

**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE LAS AMÉRICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**SOLUCIONES PARA MITIGAR LOS ARMÓNICOS CAUSADOS  
POR VARIADORES DE FRECUENCIA EN LA RED  
ELÉCTRICA INDUSTRIAL.**

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR  
EL GRADO DE BACHILLERATO EN INGENIERÍA  
ELECTROMECAÁNICA.**

**ELABORADO POR  
JUAN IGNACIO MONGE ALVARADO**

**SAN JOSÉ, ABRIL, 2021.**

## Contenido

Figuras.....	8
Ecuaciones.....	12
<i>Dedicatoria</i> .....	14
<i>Agradecimientos</i> .....	15
Resumen Ejecutivo.....	20
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN .....	21
Planteamiento del problema.....	23
Objetivos .....	23
Objetivo General: .....	23
Objetivos específicos: .....	23
Justificación: .....	24
Antecedentes: .....	25
Antecedentes Nacionales.....	25
Antecedentes internacionales .....	32
Proyecciones (Alcances).....	39
Limitaciones:.....	39
CAPÍTULO II: MARCO REFERENCIAL .....	40
Calidad de energía. ....	40
Tipos de perturbaciones eléctricas .....	41
Fundamentos generales de los armónicos .....	41
Función periódica .....	41
Serie de Fourier .....	42
Coeficientes de Fourier .....	44
Definición de Armónicos Eléctricos .....	45
Secuencia de armónicos .....	46
Valores RMS (Valor eficaz).....	47
Distorsión armónica total. (THD) .....	48

Distorsión de demanda total.....	49
Desplazamiento, Distorsión y Factor de potencia total.....	50
Factor de cresta.....	51
Potencia Activa.....	51
Potencia Reactiva.....	52
Potencia Aparente.....	53
Efecto de las corrientes armónicas en la impedancia.....	53
El efecto de la carga sobre la distorsión de la corriente armónica.....	55
Distorsión de voltaje armónico total (THDv).....	55
Distorsión total de corriente armónica (THDi) y carga reducida.....	56
Generadores de distorsión armónica.....	56
Cargas no lineales.....	56
Cargas no lineales saturables.....	57
Transformadores.....	57
Máquinas rotativas.....	59
Hornos de arco.....	59
Cargas no lineales electrónicas.....	60
Lámparas fluorescentes.....	60
Los convertidores estáticos en la red trifásica.....	60
Rectificadores (Puentes diodos).....	61
Rectificadores trifásicos en puente.....	62
Variadores de frecuencia electrónicos.....	65
Partes de los variadores de frecuencia.....	66
Características de la corriente absorbida por el variador.....	67
En el caso de una alimentación trifásica.....	67

En el caso de una alimentación monofásica .....	69
Efectos de los armónicos en la red eléctrica industrial.....	70
Impacto sobre los bancos de capacitores .....	70
Condiciones resonantes .....	71
Resonancia en paralelo .....	72
Resonancia en serie.....	73
Impacto sobre los transformadores .....	73
1.    Valor eficaz de la corriente.....	73
2.    Pérdidas por corrientes circulantes.....	74
3.    Pérdidas en el núcleo .....	74
Factor K en transformadores .....	75
Impacto sobre equipo electrónico.....	76
Problemas por paso por cero.....	76
Impacto sobre conductores y protecciones.....	76
Sobrecalentamiento de los conductores neutros .....	76
Disparos intempestivos de los interruptores automáticos.....	77
Impacto sobre motores eléctricos de inducción .....	78
Motores de inducción .....	78
Soluciones para mitigar los armónicos .....	78
Efecto de una inductancia en la corriente armónica.....	79
Transformadores de aislamiento .....	79
Cálculo de transformador de aislamiento.....	80
Ventajas.....	81
Desventajas.....	81
Reactores de línea.....	81

Cálculo para inductor de entrada (reactancia de entrada) .....	82
Ventajas .....	83
Desventajas .....	83
Reactancias Bus DC .....	83
Cálculo para inductor de salida .....	84
Ventajas .....	84
Desventajas .....	84
Filtros pasivos sintonizados.....	84
Filtros Paralelos o shunt.....	85
Cálculos para diseñar un filtro pasivo. ....	86
Frecuencia de sintonía .....	86
Factor de calidad.....	86
Relación de Reactancia inductiva y reactancia capacitiva.....	87
Potencia reactiva .....	87
Filtro pasivo de brazos múltiples sintonizado .....	88
Ventajas .....	88
Desventajas .....	89
Filtros activos.....	89
Cálculo de un filtro activo .....	90
Ventajas .....	92
Desventajas .....	92
Variadores de frecuencia multi pulsos .....	93
Convertidor de 12 pulsos. ....	93
Desplazamiento de fase en transformadores Estrella-Delta. ....	93
Cancelación de armónicos 5 y 7 con desplazamiento de fase .....	94

Ventajas .....	98
Desventajas .....	98
Convertidor IGBT Frente activo (AFE) .....	98
IGBT .....	99
Ventajas .....	100
Desventajas .....	100
Diseño del sistema de energía (optimización de diseños eléctricos).....	101
Instalación de las cargas no lineales aguas arriba en el sistema .....	101
Agrupación de las cargas no lineales.....	101
Creación de fuentes separadas. ....	102
Criterios técnicos para selección de una solución para distorsión armónica.....	102
Normativas .....	103
ARESEP .....	103
AR-NT-SUCAL: Supervisión de la calidad del suministro eléctrico en baja y media tensión.....	103
Artículo 12. Tensiones armónicas .....	103
Artículo 13. Corrientes armónicas.....	104
IEEE 519-2014 Prácticas recomendadas por IEEE y Requisitos para el control de armónicos en Sistemas de energía eléctrica. ....	106
<b>CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO.</b> .....	109
Enfoque de la investigación .....	109
Método de la investigación.....	109
Fuentes de investigación .....	110
Estudios de calidad de energía en variadores de frecuencia.....	110
Manuales técnicos. ....	110
Boletines Técnicos .....	111

Antecedentes .....	111
Normas .....	111
Libros técnicos .....	111
Variables o unidades de análisis.....	112
Instrumentos .....	113
<b>CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>115</b>
Descripción de la empresa.....	115
Definición del diseño o problema a solucionar .....	115
Desarrollo caso #1 .....	115
Desarrollo caso #2 .....	137
Soluciones propuestas caso #1 .....	153
Soluciones propuestas caso #2 .....	155
Primera Solución .....	155
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>157</b>
Conclusiones .....	157
Recomendaciones.....	160
<b>CAPÍTULO VI: PROPUESTA.....</b>	<b>161</b>
Descripción caso #1.....	161
Propuesta de implementación del diseño caso #1 .....	161
Descripción caso #2.....	163
Propuesta de implementación del diseño caso #2 .....	163
Referencias .....	166
<b>ANEXOS .....</b>	<b>170</b>

## Figuras

Figura 1: Ejemplo de la Gráfica de Corriente Distorsionada .....	30
Figura 2: Representación de una onda distorsionada con Series de Fourier .....	45
Figura 3: Imagen de una onda deformada.....	46
Figura 4: Secuencia de armónicas.....	47
Figura 5: Las corrientes distorsionadas inducen distorsión de voltaje.....	54
Figura 6: Cómo se desarrollan las caídas de voltaje armónico individuales a través de las impedancias del sistema.....	55
Figura 7 :Diferencias de onda entre carga lineal y carga no lineal .....	57
Figura 8: Curva de magnetización del núcleo de un transformador .....	58
Figura 9: Corriente de magnetización causada por el flujo en el núcleo del transformador. .....	58
Figura 10: Densidad de flujo a través de las ranuras del estator.....	59
Figura 11: Horno de arco .....	60
Figura 12: Rectificador y distorsión de corriente típica de 6 pulsos.....	61
Figura 13: Rectificador trifásico en puente.....	62
Figura 14: Formas de onda y ángulo de conducción de los diodos. ....	63
Figura 15: Serie de Fourier de un rectificador trifásico conectado en un sistema Delta- Estrella .....	64
Figura 16: Características del Sistema de Accionamiento que Afecta a los Armónicos ..	66
Figura 17: Partes de Potencia de un Variador de Frecuencia.....	67
Figura 18: Características de la Tensión y Corriente de línea de un Variador de Frecuencia trifásico. ....	68

Figura 19: Gráfica en Función de la Frecuencia de los armónicos de corriente de un Variador de Frecuencia trifásico.....	68
Figura 20: Características de la Tensión y Corriente de línea de un Variador de Frecuencia Monofásico. ....	69
Figura 21: Gráfica en Función de la Frecuencia de los armónicos de corriente un Variador de Frecuencia Monofásico .....	70
Figura 22: Resonancia Paralela y Serie.....	71
Figura 23: Ejemplo de resonancia.....	72
Figura 24: Corrientes en el Neutro.....	77
Figura 25: El efecto del inductor en la intensidad de red.....	79
Figura 26: Diagrama eléctrico de un transformador de aislamiento Delta-Estrella.....	80
Figura 27: Ubicación del reactor de línea AC.....	82
Figura 28: Ubicación de una Inductancia de DC .....	83
Figura 29: Filtro Paralelo Pasivo .....	85
Figura 30: Filtro Pasivo de Múltiples Brazos .....	88
Figura 31: Filtro Activo .....	89
Figura 32: Compensador activo de armónicos.....	90
Figura 33: Fórmula de la corriente armónica.....	91
Figura 34: Fórmula de la corriente Reactiva.....	91
Figura 35: Fórmula de la corriente de diseño del filtro.....	91
Figura 36: Diagrama Variador de Frecuencia de 12 Pulsos.....	93
Figura 37: Voltajes de Secuencia Positiva en un Transformador Estrella/Delta .....	94
Figura 38: Cancelación de las Armónicas 5 y 7 en Variadores de 12 Pulsos .....	95

Figura 39: Serie de Fourier de las corrientes de un transformador Estrella- Estrella .....	95
Figura 40: Serie de Fourier de las corrientes de un transformador Delta-Estrella.....	96
Figura 41: Corriente resultante de la suma de las dos corrientes del transformador en el lado primario.....	96
Figura 42 Representación en el Dominio de la Frecuencia para un Rectificador de 12 Pulsos.....	97
Figura 43: Ejemplo de Reducción Armónica en un Variador de Frecuencia Multi pulso.	97
Figura 44: Partes de un Variador de Frecuencia AFE.....	99
Figura 45: Armónicos de corriente en fuente activa .....	100
Figura 46: Cargas no lineales colocadas lo más aguas arriba posible.....	101
Figura 47: Agrupación de cargas no lineales .....	101
Figura 48: Alimentación independiente de cargas no lineales.....	102
Figura 49: Límites de distorsión armónica de corriente para usuarios del servicio.....	104
Figura 50: Límites recomendados de armónicos de voltaje en el PCC.....	107
Figura 51: Límites de distorsión en corriente para sistemas entre 120 V a 69 KV.....	108
Figura 52: Fotografía de la placa del motor eléctrico .....	117
Figura 53: Demostración de instalación de pinzas de medición.....	118
Figura 54: Formas de onda de Corriente y Voltaje Línea 1.....	119
Figura 55: Valor del factor de cresta de voltaje línea 1. ....	120
Figura 56: Valor de factor de cresta de corriente línea 1. ....	121
Figura 57: Gráfica de las magnitudes de las armónicas de voltaje en función de la frecuencia línea 1.....	123

Figura 58: Gráfica de las magnitudes de las armónicas de corriente en función de la frecuencia línea 1. ....	124
Figura 59: Formas de onda de Corriente y Voltaje Línea 2. ....	125
Figura 60: Valor del factor de cresta de voltaje línea 2. ....	126
Figura 61: Valor de factor de cresta de corriente línea 2. ....	127
Figura 62: Gráfica de las magnitudes de las armónicas de voltaje en función de la frecuencia línea 2. ....	128
Figura 63: Gráfica de las magnitudes de las armónicas de corriente en función de la frecuencia línea 2. ....	129
Figura 64: Formas de onda de Corriente y Voltaje Línea 3. ....	130
Figura 65: Valor del factor de cresta de voltaje línea 3. ....	131
Figura 66: Valor de factor de cresta de corriente línea 3. ....	132
Figura 67: Gráfica de las magnitudes de las armónicas de voltaje en función de la frecuencia línea 3. ....	133
Figura 68: Gráfica de las magnitudes de las armónicas de corriente en función de la frecuencia línea 3. ....	134
Figura 69: Diagrama unifilar de los 4 variadores de frecuencia 2000 HP. ....	137
Figura 70: Imagen del unifilar de medidores de calidad de energía en planta Bridgestone .....	138
Figura 71: Ubicación del reactor de línea propuesto. ....	162
Figura 72: Variador de frecuencia de Frente Activo propuesto. ....	165

## Ecuaciones

(1) .....	42
(2) .....	42
(3) .....	43
(4) .....	43
(5) .....	44
(6) .....	44
(7) .....	44
(8) .....	44
(9) .....	45
(10) .....	46
(11) .....	46
(12) .....	47
(13) .....	47
(14) .....	48
(15) .....	48
(16) .....	49
(17) .....	49
(18) .....	50
(19) .....	50
(20) .....	51
(21) .....	52
(22) .....	52

(23) .....	53
(24) .....	61
(25) .....	65
(26) .....	71
(27) .....	74
(28) .....	75
(29) .....	76
(30) .....	80
(31) .....	82
(32) .....	84
(33) .....	86
(34) .....	86
(35) .....	87
(36) .....	87
(37) .....	94
(38) .....	104
(39) .....	105
(40) .....	106
(41) .....	153

## Resumen Ejecutivo

La presente investigación se realizó con el objetivo de proponer soluciones que permitan minimizar los efectos negativos relacionados con armónicos generados por los variadores de velocidad. Por ende, se analizaron dos casos prácticos en dos diferentes empresas; para el Caso #1, se analizaron los datos de un estudio de armónicos efectuado en una farmacéutica en Panamá a un variador de frecuencia de 15HP 208 V. trifásico; asimismo, el caso #2, realizado en los variadores de frecuencia de 2000 HP. alimentados a media tensión de los molinos en Bridgestone Costa Rica.

Mediante el análisis de los datos obtenidos de los dos casos, se determinó la existencia elevada de niveles distorsión armónica generados por los variadores de frecuencia, en el caso #1 el valor de distorsión de corriente llega a un 80% en promedio; mientras que, el caso #2 el promedio es de un 18,46 % con valores máximos de 168%. Para el caso #2 se analizaron las pérdidas por efecto Joule en los conductores, las cuales incrementaron en un 5.23%, debido al aumento en la corriente armónica, producto del tipo de aplicación y carga analizada (variadores de frecuencia), no se puede atribuir una reducción en las características técnicas del transformador, protecciones y los conductores de alimentación.

Con base en los datos recolectados, se procede a estudiar las diferentes soluciones que puedan instalarse para reducir los armónicos en los dos casos estudiados. Para el caso #1, se determina que la mejor solución es un reactor de línea de 5% de impedancia instalado en línea con la entrada del variador de frecuencia. Para el caso # 2, realizada la decisión tomada, se basa en la normativa actual sobre calidad de energía llamada ART-NT-SUCAL emitida por la ARESEP, la IEEE 519 y los datos recolectados.

Tomando como guía la norma IEEE 519 y los hallazgos encontrados en este caso, se recomienda realizar una serie de recolecciones en la instalación del equipo de medición, realizar una nueva medición de calidad de energía enfocada en distorsión armónica y, con ello, generar las acciones pertinentes.

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

Con los avances tecnológicos en el área de la electrónica se ha podido incrementar la producción en la industria, por medio de sistemas automatizados con cambios de formato en las líneas de producción, en minutos gracias a la ayuda de programas ya configurados en nuestras computadoras industriales. Además, en la electrónica de potencia también hubo una mejora sustancial que ha producido una generación de equipos de alta capacidad, alto rendimiento y bajo costo. Entre estos equipos de potencia están los variadores de frecuencia los cales, por medio de un sistema de control llamado PWM (*Pulse width module*) por sus siglas en inglés, son capaces de variar la frecuencia de la onda fundamental de alimentación eléctrica y, con esto, la velocidad de los motores asíncronos que gobiernan estos procesos.

Todos estos equipos, tanto de potencia como de control, se denominan cargas no lineales debido a que, al alimentarlos con una onda sinusoidal, dichas cargas no devuelven una corriente con la forma de onda igual. Tales equipos nos han servido para mejorar nuestros procesos y para facilitar nuestra vida; no obstante, el uso de dichos equipos genera un problema en la calidad de energía eléctrica -llamado armónicos-, que consisten en una distorsión de la onda fundamental de la red eléctrica, lo cual provoca efectos no deseadas en la red eléctrica de la empresa.

El problema de una mala calidad de energía en una industria, principalmente las distorsiones provocadas por armónicos, representa un tema de sumo cuidado; por tanto, se debe asumir con la seriedad del caso siempre, ya que pueden provocar desde aumento en la facturación eléctrica, el deterioro en el aislamiento de los conductores eléctricos de alimentación, consumo elevado en el conductor neutro; hasta afectar directamente al factor de potencia, lo cual puede provocar una multa por parte de la compañía que supe la energía eléctrica. Por tal razón, se requiere un tratamiento enfocado en el problema, mediante el desarrollo de un análisis, un programa de mediciones, un diseño o rediseño del sistema, una selección de equipos normalizados, así como tomar la solución más conveniente para cada aplicación.

Entre los objetivos de esta investigación se pretende analizar, comprender y dar soluciones efectivas para mitigar estas distorsiones eléctricas; para ello, se enfocará en libros relacionados a calidad de energía y armónicos eléctricos, documentación técnica de fabricantes de variadores de frecuencia y fabricantes de equipos para mitigar armónicos, como es un estudio a nivel ingenieril,

se apegará a las normativas vigentes en Costa Rica, tal como la norma AR-NT-SUCAL emitida por como la IEEE 519 del 2014.

## **Planteamiento del problema**

¿Cuáles son las mejores soluciones existentes en el mercado local para mitigar los armónicos producidos por los variadores de frecuencia electrónicos?

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Investigar las posibles soluciones eléctricas que hay en el mercado local actual para mitigar los armónicos producidos por los variadores de frecuencia electrónicos para motores eléctricos.

### **Objetivos Específicos**

1. Analizar las causas que generan las distorsiones eléctricas en la calidad de energía eléctrica de una industria.
2. Identificar los efectos que generan los armónicos en una red eléctrica industrial.
3. Establecer las ventajas y desventajas de cada una de las soluciones mencionadas en la presente investigación.
4. Determinar los criterios relevantes para elegir un determinado amortiguador o eliminador de armónicos en un sistema de potencia.

**Justificación:**

Este proyecto de investigación se realiza con la intención de analizar y comprender de manera ampliada un tema que no es profundizado en ningún curso de la carrera de Ingeniería Electromecánica: las distorsiones armónicas en la calidad de energía eléctrica. La calidad de energía es un tema que en el transcurso de los años ha tomado fuerza, debido a varios problemas que han presentado y, actualmente, se han incrementado, debido al auge en el uso de equipos electrónicos. De tal forma, este documento se enfocará en distorsiones armónicas, tanto de voltaje como de corriente eléctrica, causados por los variadores de frecuencia, los cuales son equipos eléctricos de potencia muy utilizados en la industria, ya sea para variar la velocidad de un motor eléctrico o para ahorrar energía eléctrica, al reducir su pico de arranque; aunque el uso de estos equipos producen distorsiones en la onda fundamental senoidal de la alimentación eléctrica, lo cual provoca numerosos efectos que vamos a detallar a profundidad en la investigación.

Los objetivos planteados aquí consisten en ofrecer una guía, ampliar el conocimiento sobre estos problemas y aportar ideas al personal técnico, ingenieros y futuros ingenieros sobre cómo mitigar los problemas que se enfrentan en la industria a diario, causados por los armónicos; asimismo, una serie de recomendaciones sobre cuáles tecnologías existen hoy en el mercado para reducir estas perturbaciones específicamente generados por variadores de frecuencia trifásicos.

Al finalizar este trabajo, se espera obtener un mayor conocimiento acerca del tema de armónicos, variadores de frecuencia y sobre la calidad de energía, en general, cómo mitigar los efectos de estas distorsiones, comprender por qué se dan estos problemas y ofrecer recomendaciones y soluciones de mayor calidad ingenieril.

**Antecedentes:****Antecedentes Nacionales**

INSTITUCIÓN: Instituto Tecnológico de Costa Rica.

TÍTULO: Diagnóstico de la calidad de la energía y evaluación de las instalaciones eléctricas en la Represa Hidroeléctrica Pirrís.

AUTOR: Esteban Josué Araya Porras.

FECHA: junio de 2008.

Araya en esta tesis realiza un estudio de calidad de energía en la misma empresa que suministra la energía eléctrica en Costa Rica, interesante que, aunque sea el Instituto Costarricense de Electricidad se encuentra con varios problemas a nivel eléctrico por mejorar; un punto que destaca es que, debido a este análisis y por una medición que debían realizar en los transformadores conectados en configuración Y-Y, localizan el neutro de la estrella suelto, lo cual llama profundamente la atención, porque es uno de los problemas que reporta el personal del ICE le reporta.

Según Araya (2008):

Se tiene historial de fallo en diferentes equipos como son: un transformador trifásico de 750 KVA, 3 variadores de frecuencia, mal funcionamiento en equipo de cómputo, daños en UPS.

Se desconoce la causa de las fallas y mala operación de los equipos, y se sospecha puede ser por problemas de calidad de energía, por los que se ha optado por realizar un análisis de calidad de energía, en el punto de suministro y en diferentes puntos en el interior de la instalación de la represa (p. 10).

A partir de lo anterior, en el presente estudio, surge la idea de recomendar realizar una revisión una o dos veces al año a la subestación y de generar un análisis de calidad de energía frecuentemente, ya que en las industrias es muy normal que los procesos, equipos y cargas estén cambiando constantemente. Además, sugerir que se desarrolle una actualización del diagrama eléctrico y un levantamiento de los datos de los equipos; de esta forma, se podrá resolver cualquier problema de manera rápida.

Por último, en la primera conclusión, al comparar la normativa de la ARESEP, el límite de armónicos de tensión se encuentra fuera de lo recomendado y los valores medidos de distorsión de corriente se encuentran fuera de límite. En su tercera conclusión, se resalta que los principales generadores de armónicos son los variadores de frecuencia, arrancadores suaves y la iluminación. Por lo cual, propone como primera recomendación el uso de filtros para mitigar el problema.

INSTITUCIÓN: Instituto Tecnológico de Costa Rica.

TÍTULO: Estudio de calidad de energía eléctrica en la instalación de Laboratorios Stein, Costa Rica.

AUTOR: Luis Alejandro Brenes Hernández.

FECHA: mayo, 2018.

La conclusión que se puede obtener de este informe plantea la necesidad de implementar siempre un análisis de calidad de energía dentro de nuestras rutinas de mantenimiento. Con dicho tipo de análisis es posible detectar de varios problemas, tales como los presentados en la empresa Stein de Costa Rica, por ejemplo, las variaciones de voltaje tan amplias, las cuales originaron una queja formal a la suplidora de electricidad JASEC.

Otro hecho que resalta es el indicado por el ingeniero Luis Brenes: la cantidad de armónicos de 5<sup>to</sup> y 7<sup>mo</sup> orden que, de acuerdo con el autor, son producidos por la cantidad de variadores de frecuencia con rectificadores de 6 pulsos, los cuales se hallan en el área productiva. Asimismo, dentro de sus propuestas está la de colocar un filtro sintonizado para mitigar estos armónicos, esto, según aduce Brenes, ayudará también a realizar una acción compensadora de factor de potencia para alcanzar un valor deseado de 0.98.

Un punto importante que se evidencia en este estudio consiste en el uso de la normativa costarricense de la ARESEP Supervisión de la calidad del suministro eléctrico en baja y media tensión AR NT SUCAL 2015, la cual constituye un documento esencial en esta investigación, ya que esta normativa indica los límites de armónicos que podemos tener en nuestras instalaciones, así como de otros valores eléctricos de interés. Otro aspecto llamativo es la recomendación del

autor de llevar el control del costo de una mala calidad de energía; de esta manera, se pueden justificar las inversiones para mejorar los aspectos de calidad de energía en la instalación.

INSTITUCIÓN: Universidad de Costa Rica.

TÍTULO: Efectos de la calidad de la energía en un circuito de distribución de la CNFL ante la conexión del Proyecto Eólico Valle Central.

AUTOR: Bryan Molina Guzmán.

FECHA: diciembre 2017.

Una de las conclusiones que es posible obtener de este interesante estudio es que, aunque se realiza en alta tensión y es a nivel de sistemas de distribución eléctrica a nivel de provincia, se puede replicar en sistemas eléctricos industriales. Ello se debe al cambio constante de cargas, como sucede en los circuitos de alta tensión, las mediciones de calidad de energía cambiarán, por el cambio de impedancias en el sistema.

En el precitado trabajo, una de sus conclusiones menciona el cambio de la distorsión armónica, aunque la normativa indica que está dentro del rango establecido, no se puede solamente incorporar cargas sin tener un análisis de por medio sobre qué generará este tipo de carga; además, de los armónicos otro punto relevante y relacionado con la impedancia es el aumento de corriente de corto circuito como indica en su conclusión número 3.

Aunado a lo anterior, en las recomendaciones alude a los transformadores con factor K, los cuales tienen características eléctricas en sus diseños para soportar las corrientes armónicas, estos equipos se plantearán en el presente estudio como solución para tener un ramal destinado a cargas no lineales alimentado de un transformador con un factor K adecuado a la aplicación.

En conclusión, de este proyecto, se puede indicar que los análisis de calidad de energía no deben ser solamente un medio para realizar mantenimientos correctivos, también ayudan a predecir cómo se comportará nuestro sistema eléctrico ante eventuales expansiones de carga y cómo estar preparados para una eventual reingeniería del sistema.

INSTITUCIÓN: Instituto Tecnológico de Costa Rica.

TÍTULO: Sistema de protección inteligente contra perturbaciones eléctricas.

AUTOR: Sergio Ovando Chajón.

FECHA: 2000.

Aunque en este trabajo el objetivo general consistía en realizar una investigación total y desarrollar un sistema de control maestro para un sistema de protección inteligente contra perturbaciones eléctricas, se pueden rescatar las encuestas realizadas por el ingeniero Sergio Ovando a los clientes de Elvatron S.A.; según dicha encuesta y sus conclusiones, el 85% de los encuestados indican que presentan perturbaciones externas a sus plantas y el 62% de ellos las tienen dentro de sus instalaciones. Otro aspecto relevante es que las perturbaciones de voltaje, corriente, armónicos y el factor de potencia son las perturbaciones internas más frecuentes y ello se debe a los variadores de frecuencia, salas de computadoras, convertidores CA-CD y sistemas de aire acondicionado son los equipos que más perturbaciones generan.

En su octava conclusión señala que las compañías industriales aplican soluciones para atacar las consecuencias de las perturbaciones, sin investigar cuál es la causa de estas alteraciones. Ante lo mencionado, se puede señalar que, si en nuestras instalaciones no tenemos un plan de mediciones de calidad de energía completo o por variables, no podremos atacar efectivamente los problemas, ni nos podremos guiar al 100% por soluciones en otras plantas, casos de éxito vistos en internet o por recomendaciones. Forzosamente, debemos empezar nuestro análisis con un estudio de calidad de energía y obtener datos para tomar las mejores decisiones y no empeorar la situación proponiendo soluciones que no son efectivas.

En sus recomendaciones propone educar a los ingenieros en calidad de energía, este punto se tomará en cuenta en este estudio a modo de sugerencia, pues, como se indicó en la introducción, la calidad de energía es un tema que no se profundiza en ningún curso de la universidad, ya sea pública o privada, y, con el incremento de cargas no lineales utilizadas en la industria, constituye una información de gran relevancia para el ingeniero o para el personal encargado de la parte eléctrica, con la finalidad de entender inminentes problemas que enfrente la empresa, así sobre cómo solucionarlos de una manera efectiva.

INSTITUCIÓN: Universidad Internacional de las Américas.

TÍTULO: Estudio de calidad de energía para implementar un diseño de un sistema de energía renovable con base en energía solar para alimentar en edificio de la Universidad Internacional de las Américas.

AUTOR: Douglas E. Chacón Murillo.

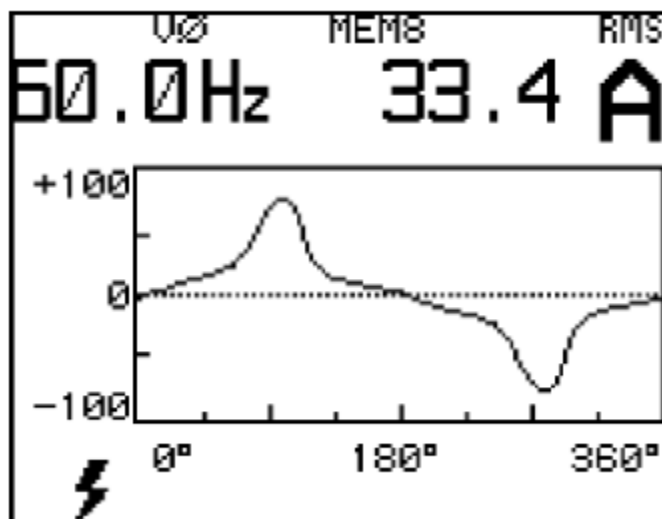
FECHA: 2010.

El objetivo del Ingeniero Douglas Chacón con su estudio es realizar un análisis de calidad de energía antes de implementar un diseño eléctrico, en este caso, un sistema de energía renovable por medio de energía solar. El proyecto lo realizó en las instalaciones de la UIA, las cuales son de índole educativo, por tanto, en su mayoría, predomina el equipo electrónico (computadoras, proyectores, iluminación led y fluorescente). Este tipo de cargas, llamadas cargas no lineales, son las responsables de distorsionar la onda de alimentación, tanto de voltaje como corriente -que, en este tipo de instalaciones, son predominantes-.

Un aspecto realmente interesante de comentar acerca de este trabajo es la idea de realizar un estudio de calidad de energía antes de implementar un proyecto, esta acción nos puede permitir saber si nuestro proyecto dará los resultados que buscamos al implementar las soluciones.

Las mediciones se realizan entre el 18 de noviembre y el 9 de diciembre, al analizar piso por piso y obteniendo datos de calidad de energía. Un parámetro sobresaliente consiste en la variación en la distorsión armónica de voltaje, la cual varía según la carga en el transformador, al pasar de 4.3% a 11.4 KVA a 1.4%, con una potencia de 5 KVA. Otro punto consiste en el incremento de la distorsión total por armónicos de corriente; entonces, se puede concluir que, cuando se realiza un análisis de calidad de energía en una instalación educativa, es seguro que se tendrá distorsión por armónicos.

Figura 1: Ejemplo de la Gráfica de Corriente Distorsionada



Fuente: (Murillo, 2010).

Al concluir el estudio, el autor propone un sistema fotovoltaico con un costo de \$ 68,836.72, lastimosamente no se conoce el ROI del proyecto ni si es viable su ejecución.

Entre sus conclusiones, Chacón argumenta que no existe ningún método específico o único para lograr el mejoramiento de la calidad de energía, debido a que cada caso es particular.

Las recomendaciones en el documento indican que, cuando se deba realizar un estudio referente a calidad de energía en una empresa, se tome la decisión de colocar el equipo por un tiempo no menor a una semana, a fin de obtener un panorama más amplio de lo que está sucediendo.

Además, en su última recomendación realiza un llamado a su valoración instalar supresores de armónicas en el diseño para mitigar sus efectos nocivos.

INSTITUCIÓN: Universidad Internacional de las Américas.

TÍTULO: Guía de diseño eléctrico para el acondicionamiento en calidad de energía de la red.

AUTOR: Oscar Emilio Barrantes Alvares.

FECHA: 2010.

El entregable de Oscar Barrantes consiste en un estudio muy detallado sobre cuáles son los problemas que afectan la calidad de energía y cómo atacarlos. Barrantes propone en su objetivo general desarrollar una guía que ayude para el diseño eléctrico, tomando en cuenta aspectos como protecciones, normas, y medidas de seguridad, tanto para el equipo como para el personal.

Este tipo de proyectos ayudan a los ingenieros, personal de mantenimiento y estudiantes a tener un conocimiento básico acerca de cuáles aspectos se debe tomar en cuenta en proyectos de diseño eléctrico. En el desarrollo de la investigación, menciona los diferentes dispositivos existentes en el mercado para solucionar los diferentes problemas relacionados a calidad de energía y hace referencia a cómo seleccionar este tipo de equipos, por ejemplo, supresores, UPS, Transformadores tipo K, moto generadores, sistemas de conexión a tierra.

En la supreseñada investigación, las soluciones planteadas como conclusiones para armónicos son de gran utilidad, el transformador con factor K, lo podemos utilizar en la alimentación de un circuito, en el cual sabemos de antemano que habrá una cantidad importante de armónicos. De tal forma, usar un neutro separado para cargas sensibles sirve para no sobrecargar de corrientes armónicas provenientes de cargas no lineales, aunque el autor indica que se utiliza un 33% más de cobre mitiga el problema y no genera problemas en otros equipos.

## **Antecedentes Internacionales**

INSTITUCIÓN: Universidad Nacional Autónoma de México.

TÍTULO: Análisis de la calidad de energía del sistema eléctrico de la zona cultural universitaria de la UNAM.

AUTOR: Raúl Vizcaíno Torres.

FECHA: 2017.

En su tesis de graduación, el ingeniero Raúl Vizcaino realiza un análisis de la calidad de energía en una de las instalaciones de la UNAM en México. Un estudio de estos resulta esencial para el buen funcionamiento de los equipos, en su análisis se enfoca en zona cultural universitaria, específicamente, en la subestación 3 que alimenta numerosas cargas.

Un estudio de calidad de energía se puede llevar a cabo de diversas formas, por ejemplo, realizando mediciones a nivel macro de todo el sistema y obteniendo resultado de todas las perturbaciones o bien enfocado en una variable, como es el caso de este proyecto, no se considera los siguientes eventos: caída de tensión (*sags*), aumentos de tensión (*swells*), sobretensiones transitorias y el sistema de puesta a tierra.

Es valioso recalcar la dedicación con que desarrolla el concepto de armónicos en el marco teórico y el tema del transformador con factor K, como recomendación, para mitigar los armónicos; ello se entiende más adelante con el desarrollo de su estudio. Cuando una de las mediciones que realiza sale fuera de margen y son los armónicos de corriente, según la normativa que él utiliza, la CFE L0000 - 45, el límite permitido es de un 8% a 12%, de acuerdo con la impedancia de cada sistema. En una de sus conclusiones, indica que un 72% de estas instalaciones está fuera de margen en tema de distorsión armónica máxima permitida en la corriente; asimismo, determina que estas distorsiones pueden generar sobrecalentamiento y falla prematura en aislamiento de conductores, transformadores, disparo indeseado de interruptores y fusibles. Aunado a ello, señala que una de las fallas puede ser solucionada con el rateo de los transformadores (utilización de transformadores de factor K).

Al analizar el estudio aludido, es posible observar que, aunque es un trabajo completo de medición y análisis de calidad de energía, los armónicos toman un lugar importante en este, debido al uso masivo de aparatos electrónicos.

Además, se puede concluir que cada caso o cada estudio es especial y tiene diferentes maneras de mitigar estas distorsiones. Entonces, el ingeniero Raúl Vizcaino propone como recomendación utilizar transformadores tipo K para solucionar este problema.

INSTITUCIÓN: Universidad Nacional Autónoma de México.

TÍTULO: Causas y efectos de armónicos en sistemas eléctricos de potencia.

AUTOR: Arturo Abundis Couoh.

FECHA: 2016

El proyecto de tesis de Arturo Abundis es completamente teórico; se enfoca en las causas y efectos de armónicos en sistemas eléctricos en subestaciones. El tema se aborda, según lo indica, con base en literatura técnica especializada en este tipo de distorsión, en especificaciones técnicas y dando un criterio técnico sobre cómo mitigar los armónicos.

Tal y como se explica, este proyecto se trata de una tesis a nivel ingenieril; por ello, debe ser totalmente apegada a las normativas actuales y vigentes de su país México, como en otras tesis que se han consultado proyecto se divide en etapas para entender mejor lo que se quiere desarrollar. Primero explica los aspectos técnicos para entender que son armónicos, porque se generan, donde se generan y como mitigarlos. Durante el proceso de estudio, también se valió de información emitida por fabricantes de equipos, organizaciones y asociaciones dedicados a la investigación en ingeniería eléctrica. Este aspecto es sumamente interesante mencionarlo, ya que las mismas empresas buscan el modo de como mitigar los armónicos causados por sus equipos y, de manera constante, investigan la forma de crear equipos lo más eficientemente posible hablando de distorsiones eléctricas.

Cumpliendo con el objetivo, el ingeniero Abundis explica de manera clara y concisa las causas, efectos y soluciones para mitigar los armónicos, así, logra que el lector tenga un primer

pero provechoso acercamiento a este tipo de problemas, que no solo son causados por variadores de frecuencia, sino también por otro tipo de cargas no lineales.

En una de sus conclusiones indica que cada caso es diferente y que aquí es donde el criterio ingenieril de la persona responsable de realizar estos estudios; asimismo, el encargado de dar soluciones desempeña un rol sumamente importante, ya que al obtener las mediciones de la aplicación analizada, se debe tomar la decisión más acertada; es decir, un correcto diseño permite maximizar los resultados de ingeniería, crear sistemas, equipos e instalaciones eficientes y seguras, pero económicamente viables, optimizando equipo y material.

INSTITUCIÓN: Universidad Nacional de Altiplano Perú.

TÍTULO: Estudio y análisis de armónicos en rectificadores estáticos de potencia eléctrica utilizando series de Fourier, para la región de puno.

AUTOR: Eddy Oliver Cáceres Chura.

FECHA: 2019.

En su proyecto de graduación, Eddy Cáceres plantea un trabajo para estudiar los armónicos generados por los rectificadores. mediante dos softwares de uso ingenieril, y propone como solución los filtros pasivos sintonizados y el filtro activo. En su análisis de resultados, presenta de manera muy detallada varios casos de rectificadores conectados a diferentes conexiones de transformadores para observar cómo se comportan los armónicos en corriente. Además, realiza un análisis con los filtros para mitigar armónicos conectados a los diferentes rectificadores, según los valores obtenidos se puede apreciar una reducción del THD con las soluciones planteadas, lo cual da una idea de cómo, en la práctica, estas soluciones deberían funcionar adecuadamente y también este tipo de análisis ayuda a calcular y saber cuáles serían los resultados por obtener al aplicar una solución como estas en la industria.

En su primera conclusión, señala que los armónicos no se pueden eliminar por completo, sino que solo se pueden mitigar para que no generen problemas mayores en la red eléctrica.

Según Cáceres, en su tercera conclusión, las distorsiones armónicas dependen de las cargas no lineales conectadas en la red eléctrica y que las armónicas tercera, sexta, novena, doceava,

generan corrientes que fluyen por el conductor neutro del sistema. Para la investigación esta conclusión es de gran relevancia, ya que los variadores de frecuencia pueden ser trifásicos o monofásicos; si utilizamos variadores de frecuencia monofásicos, evidentemente, vamos a tener grandes problemas con la tercera armónica, la cual es la que sobresale en este tipo de cargas. Además, en el desarrollo en esta investigación, el autor señala que, si tenemos varias cargas monofásicas no lineales generando este tercer armónico las corrientes de cada carga, se sumarán, lo cual puede provocar sobrecorrientes en el conductor neutro.

I

INSTITUCIÓN: Universidad Nacional del Centro de Perú.

TÍTULO: Análisis descriptivo de la amortiguación y eliminación de armónicos en sistemas eléctricos de potencia.

AUTOR: Jacob Rolando Aranda Mendoza.

FECHA: 2015.

Los objetivos planteados en este proyecto, realizado por el ingeniero Jacob Aranda, se cumplen satisfactoriamente; así, deja un documento sumamente amplio, en el cual se explica detalladamente, a través de una investigación analítica, deductiva y bibliográfica, los orígenes de los armónicos, el diseño y utilización de un filtro sintonizable para amortiguar y eliminar los armónicos.

Varios aspectos sobresalientes de este proyecto son la explicación del llamado sub armónico que constituyen señales de frecuencias menores a 60 Hz, las cuales provocan parpadeos llamados *flickers*. Estos *flickers* se hacen notar más detalladamente en las lámparas tipo fluorescentes como un parpadeo en el flujo luminoso y pueden causar cansancio a las personas. Otro aspecto – el cual se ha considerado ya en varios antecedentes-, es que el autor indica que todas las aplicaciones son diferentes y que todas tienen una solución diferente. En este caso, el equipo en estudio fue una UPS (*unit power supply*) de 24 KVA con un alto contenido armónico de corriente inyectado a la red eléctrica, cuando comienza su análisis, los usuarios le indican que la protección principal de la UPS tiene constantes disparos sin causa aparente.

Aranda, en el desarrollo de su estudio, realiza mediciones de temperatura en el cableado registrando una temperatura cercana a 70°C y el transformador de 45 KVA delta-estrella aterrizado, de la subestación No. 4, presenta temperaturas anormales sin mantener conectada la carga eléctrica total.

Como resultado y apoyado de un equipo para medición de calidad de energía, el autor realiza mediciones en un lapso de 24 horas en el transformador que alimenta esta UPS y concluye que el quinto armónico es el que afecta más al sistema, con la construcción e instalación del filtro sintonizado al quinto armónico el THDi, se redujo del 70 a 4.8 %; así, se logró reducir la distorsión armónica, evitando sobrecorrientes y la operación del transformador mejoró.

Para la investigación toma un papel importante esta obra debido a que el alcance es muy similar, aunque no se indican todas las soluciones para mitigar los armónicos. Como ya antes se comentó, cada caso es diferente; dado esto, quien dé recomendaciones para solucionar adecuadamente un problema de armónicos debe de ser una persona altamente calificada.

INSTITUCIÓN: Instituto Superior Minero Metalúrgico.

TÍTULO: Análisis de Armónicos en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

AUTOR: Osmar Escalona Pupo.

FECHA: 2008.

En este proyecto el ingenio Osmar Escalona realiza un estudio teórico-práctico sobre cómo mitigar los armónicos causados, especialmente, por unos variadores de frecuencia marca Siemens utilizados en la empresa Ernesto Che Guevara, los cuales son alimentados de una subestación llamada 5SR-6 y utilizados durante el proceso de preparación del mineral. Según indica, un mal funcionamiento de este sistema puede implicar grandes cantidades de dinero perdido por paros en la producción. Su estudio lo dividió en tres partes: la primera habla sobre toda la teoría relacionada a la distorsión armónica, las partes de los variadores de frecuencia, las consecuencias de estas distorsiones, así como de las normas internacionales y aplicables en Cuba, tal como son la IEC-6100 y la IEEE 519-1992. En la segunda parte, realiza una detallada descripción de la instalación donde se encuentra el problema, el punto donde hará las mediciones y el análisis de armónicos, la

cual es subestación llamada 5SR-6. En la última parte, se realiza una simulación de la subestación utilizando filtros de armónicos, se analizan los resultados obtenidos y una parte financiera.

Al realizar las mediciones, el ingeniero Escalona obtiene en las secciones 1 y 2 de la subestación eléctrica arriba citada, altos niveles de valores promedio THD de corrientes de 32.69% y 29.66%, respectivamente. Al obtener estos datos, el siguiente paso en su estudio fue seguir el procedimiento para la evaluación de límites armónicos, según la normativa IEEE 519 la cual vamos a utilizar en la investigación a realizar. Al percatarse que tiene armónicos de orden 5, 7, 11, 13, tomó la decisión de incorporar filtros de absorción, si se implementan, se obtiene como resultado una reducción del 25% en las pérdidas eléctricas; asimismo, un ahorro por concepto de disminución de las afectaciones a producción alrededor de 541,990.00 CUC al año (\$541,990.00).

Esta investigación será de mucha relevancia para el presente proyecto, ya que el alcance presentado por el autor es muy similar a la investigación por realizar. El objetivo general de este proyecto fue valorar la utilización de filtros para reducir los efectos negativos asociados a la generación de corrientes armónicas por los variadores de velocidad marca Siemens modelo Simover Master Drives 6SE71, la cual es una de las posibles soluciones por establecer para mitigar tales distorsiones.

INSTITUCIÓN: Universidad de San Carlos de Guatemala.

TÍTULO: Análisis técnico y económico de sobretensiones por resonancia armónica en instalaciones industriales.

AUTOR: Luis Mauricio Saquilmer Mendoza.

FECHA: 2007.

En esta investigación, el ingeniero Luis Saquilmer propone el uso de filtros pasivos para solucionar el problema de la resonancia armónica en los sistemas medidos durante su proyecto. Las resonancias causadas por los armónicos generan un gran problema en los bancos de capacitores para mejorar el factor de potencia, como indica Saquilmer en su desarrollo, tener un alto índice de armónicos en la red incurre en una multa. En todas las mediciones realizadas en las diferentes empresas que visitó durante el estudio, la cantidad de armónicos superó el límite dado por la

normativa de su país; según los datos obtenidos, este porcentaje es de 56.85, mientras que el límite dado es de 5%. Una de las conclusiones más importantes de este trabajo es que para calcular un banco de capacitores a fin de mejorar el factor de potencia, se debe realizar un estudio de calidad de energía y potencia, antes de proceder a realizar cualquier actividad correctiva. Además, en sus recomendaciones indica que el uso de filtros pasivos y para mitigar el problema dependerá, tanto del criterio técnico como del económico.

A partir de lo anterior, es importante recalcar que definitivamente los estudios para mitigar los armónicos se deben realizar y desarrollar de una manera especializada por personal altamente calificado, ello se debe a que, si no toman todas las consideraciones del caso, se podría generar otro tipo de problema.

**Proyecciones (Alcances)**

Al terminar esta investigación se busca como resultado lo siguiente:

- Dejar una investigación desarrollada en los fundamentos de los armónicos de corriente y voltaje generados por variadores de frecuencia, la cual permita al electricista, personal de mantenimiento, proyectos e ingenieros tener una base sólida sobre cómo mitigar estas distorsiones.
- Proponer soluciones viables para mitigar las distorsiones armónicas con el propósito de optimizar la calidad de energía en las industrias.
- Realizar recomendaciones de diseños eléctricos que ayuden a evitar problemas con equipos sensibles en una red eléctrica industrial.
- Realizar un estudio económico acerca de las diferentes soluciones planteadas en el documento.

**Limitaciones:**

- La nula información sobre la situación actual en temas de instalación eléctrica.
- En el caso #1, realizado en la empresa farmacéutica ubicada en Panamá, no permite realizar cálculos sobre pérdidas generadas por los armónicos.
- En el caso # 2, desarrollado en la empresa Bridgestone, no se tiene acceso para ingresar a la subestación e interactuar con el equipo para realizar mediciones eléctricas y efectuar una programación más avanzada que permita obtener más datos para analizar.
- En el caso #2 no se obtienen datos del transformador de alimentación para calcular pérdidas en este.
- La falta de experiencia del personal de Bridgestone para manipular adecuadamente el equipo de mediciones eléctricas, limita el alcance de las mediciones.

## **CAPÍTULO II: MARCO REFERENCIAL**

Los armónicos son problemas de calidad de energía ocasionados por cargas no lineales que generan distorsiones en la onda sinusoidal fundamental de alimentación eléctrica del voltaje y la corriente. Estas distorsiones pueden llegar a generar efectos no deseados y de no llegarse a controlar a tiempo pueden\* ocasionar problemas como: alteración del factor de potencia, corrientes excesivas en el neutro, sobrecarga en transformadores y conductores, disparos repentinos de protecciones eléctricas y no menos importante resonancia serie o paralela.

En este trabajo nos enfocaremos en las cargas no lineales llamadas variadores de frecuencia, los cuales son grandes generadores de armónicos, ya que en su interior su funcionamiento está basado en elementos electrónicos.

La finalidad de este capítulo consiste en detallar los términos utilizados en el análisis de resultados y darle al lector la capacidad de entender a fondo este proyecto de investigación. Primero, explicarán tres expresiones esenciales de comprender: la calidad de energía, tipos de perturbaciones eléctricas y definir el término principal de la investigación: los armónicos; después de ello, el marco referencial se adentra en esclarecer varios puntos que son importantes para que el lector pueda captar la idea general de la tesis, tal como son los variadores de frecuencia, tipos de rectificadores, la definición de cada equipo que funcionará como solución a estas perturbaciones. Por último, se procederá a mencionar las normas vigentes en Costa Rica sobre estas distorsiones armónicas.

### **Calidad de energía.**

Según Harper (2001), el concepto de la “calidad de energía” es indeterminado, pero que se puede definir como:

Una ausencia de interrupciones, sobretensiones, deformaciones producidas por armónica en la red y variaciones de voltaje RMS suministrado al usuario; esto concierne a la estabilidad del voltaje, la frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico. Actualmente, la calidad de energía es el resultado de una atención continua. En años recientes, esta atención ha sido de mayor importancia, debido al incremento del número de cargas sensibles en los sistemas de distribución, las cuales, por sí solas, resultan ser una causa de degradación en la calidad de energía eléctrica.

Podemos decir que el objetivo de la calidad de la energía es encontrar caminos efectivos para corregir los disturbios y variaciones de voltaje en el lado del usuario y proponer soluciones para corregir las fallas que se presentan en el lado del sistema de las compañías suministradas de la energía eléctrica, para lograr con ello un suministro de la energía eléctrica con calidad (p. 20).

### **Tipos de perturbaciones eléctricas**

En su documento Meléndez, Herraiz y Colomer (2005) plantean las definiciones de las perturbaciones eléctricas más importantes, según la norma UNE-EN-50160, llamada Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución, de la siguiente forma:

- Hueco de tensión.  
Reducción brusca de la tensión de la alimentación a un valor situado entre el 90% y el 1% de la tensión nominal, su duración es de 10 ms a 1 min.
- Interrupción de alimentación.  
Condición en que la tensión es inferior en los puntos de suministro es inferior al 1% de la tensión nominal. Sobrepasados los tres minutos se considera interrupción larga y por debajo de los tres minutos interrupción breve.
- Sobretensiones.  
Incremento de la tensión por encima del valor nominal. Se les clasificada de temporales cuando su duración es relativamente larga (1 min.) y transitorias cuando su duración ronda los milisegundos como máximo.
- Desequilibrio de tensión.  
En un sistema trifásico, estado en el cual el valor de las tensiones de fases no es igual.
- Tensiones armónicas.  
Tensiones sinusoidales cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la tensión de alimentación.
- Tensión Inter armónica (simplemente Inter armónica).  
Tensión sinusoidal cuya frecuencia se sitúa entre las frecuencias de los armónicos, es decir, no es múltiplo entero de la frecuencia fundamental.
- Fluctuaciones de tensión.  
Serie de variaciones cíclicas de tensión de alimentación (p. 94).

### **Fundamentos generales de los armónicos**

#### **Función periódica**

Con base en el video de QuimsicaMAT (2020), se puede concluir que las funciones periódicas son funciones que se repiten cada cierto intervalo de tiempo, ese intervalo se conoce como el período el cual es el inverso de la frecuencia de la función. La frecuencia de una onda

periódica se denomina frecuencia fundamental. (recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=o8Aqv4G28uA>).

Ecuación: Fórmula de una función periódica

$$f(x) = f(x + T) = f(x + 2T) = f(x + 3T) \quad (1)$$

Fuente: (QuimsicaMAT, 2020).

Donde:

$T = \text{Periodo de la función (s)} = 1/\text{Frecuencia (Hz)}$ .

En nuestro caso de estudio, la función que se utiliza es una onda sinusoidal con una frecuencia fundamental de 60 Hz.

### **Serie de Fourier**

Para De la Rosa (2006): “Por definición, una función periódica,  $f(t)$ , es aquella donde  $f(t) = f(t + T)$ . Esta función se puede representar mediante una serie trigonométrica de elementos que consta de un componente de CC y otros elementos cuyas frecuencias comprenden el componente fundamental y sus múltiples frecuencias enteras” (p. 24).

La expresión para la expresión trigonométrica de serie de Fourier  $f(t)$  es la siguiente:

Ecuación: Fórmula de Serie de Fourier

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cos(h\omega_0 t) + b_h \sin(h\omega_0 t)] \quad (2)$$

Fuente: De la Rosa (2006).

Donde:

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

$$\frac{a_0}{2} = \text{Magnitud del componente DC.}$$

$T$  = Período de la función periódica (s).

$h\omega_0$  = Armónico de  $h$  orden de la función periódica.

La ecuación se puede simplificar, obteniendo.

Ecuación: Fórmula Serie de Fourier de forma simplificada

$$f(t) = C_0 + \sum_{h=1}^{\infty} C_h \sin(h\omega_0 t + \phi_h) \quad (3)$$

Fuente: De la Rosa (2006).

Donde:

$$C_0 = \frac{a_0}{2}$$

$$C_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}$$

$$\phi_h = \tan^{-1}\left(\frac{a_h}{b_h}\right)$$

$h\omega_0$  = Armónico de  $h$  orden de la función periódica.

$C_0$  = Magnitud del componente DC.

$C_h$  y  $\phi_h$  = Magnitud y ángulo de fase del  $h$ -ésimo componente armónico.

La representación compleja se representa de la siguiente manera:

Ecuación: Fórmula Representación compleja de la Serie de Fourier

$$f(t) = \sum_{h=1}^{\infty} c_h e^{ih\omega_0 t} \quad (4)$$

Fuente: De la Rosa (2006).

Donde:

$$h = 0 \pm 1, \pm 2 \dots$$

$h\omega_0$  = Armónico de  $h$  orden de la función periódica.

Ecuación 5: Fórmula de magnitud de la componente armónica:

$$c_h = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) * e^{ih\omega_0 t} dt \quad (5)$$

Fuente: De la Rosa (2006).

### Coefficientes de Fourier

Para obtener los coeficientes de Fourier se utilizan las siguientes ecuaciones:

Ecuación: Fórmula de la componente  $a_0$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \quad (6)$$

Fuente: De la Rosa (2006).

Ecuación: Fórmula de la compone  $a_h$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(h\omega_0 t) dt \quad (7)$$

Fuente: De la Rosa (2006).

Ecuación: Fórmula de la componente  $b_h$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(h\omega_0 t) dt \quad (8)$$

Fuente: De la Rosa (2006).

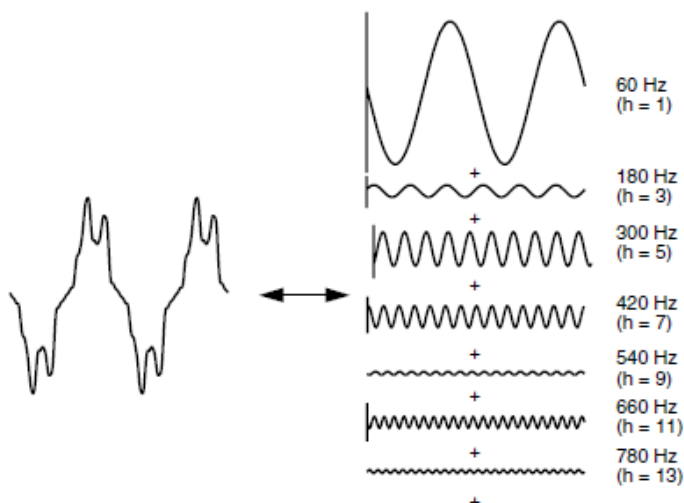
Donde:

$$h = 1, 2, \dots, \infty.$$

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

$h\omega_0$  = Armónico de h orden de la función periódica.

Figura 2: Representación de una onda distorsionada con Series de Fourier



Fuente: Electrical Power Systems Quality (2002).

### Definición de armónicos eléctricos

Un componente armónico en un sistema de energía de corriente alterna, se define como un componente sinusoidal de una forma de onda periódica que tiene una frecuencia igual a un múltiplo entero de la frecuencia fundamental del sistema.

De acuerdo con De la Rosa (2006): “Los armónicos en formas de onda de voltaje o corriente se pueden concebir como componentes perfectamente sinusoidales de frecuencias múltiples de la frecuencia fundamental” (p. 2).

Ecuación Fórmula de la frecuencia armónica

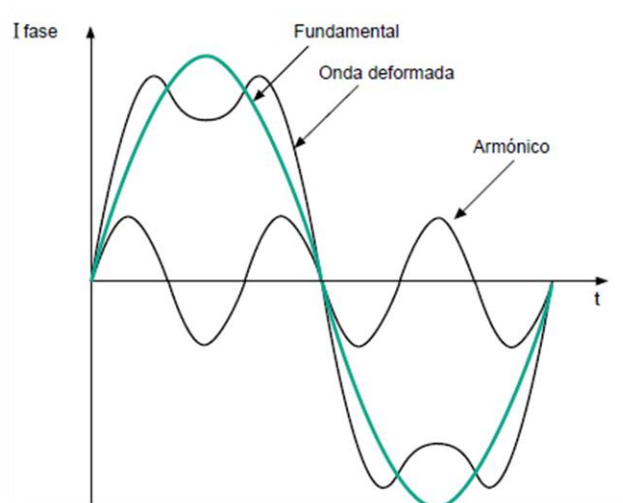
$$F_h = (h) \times (\text{frecuencia fundamental}) \quad (9)$$

Fuente: De la Rosa (2006).

Donde

h = Es un número entero.

Figura 3: Imagen de una onda deformada



Fuente: Cuaderno técnico n°152, Schneider Electric (2004).

### Secuencia de armónicos

Para Fuchs y Masoump (2015), suponiendo un sistema de potencia trifásico equilibrado de secuencia de fase positiva (ABC), las expresiones para las corrientes fundamentales son: “Los ángulos de desplazamiento negativos los que indican que los fasores fundamentales giran en el sentido de las agujas del reloj en el plano del espacio-tiempo” (p. 17).

Ecuación: Fórmula para corriente en fase A

$$i_a(t) = I_a \cos(\omega_0 t) \quad (10)$$

Fuente: Power Quality in Power Systems (2015).

Ecuación: Fórmula para corriente en fase B

$$i_b = I_b \cos(\omega_0 t - 120^\circ) \quad (11)$$

Fuente: Power Quality in Power Systems (2015).

Ecuación: Fórmula para corriente en fase C

$$i_c = I_c \cos(\omega_0 t - 240) \quad (12)$$

Fuente: Power Quality in Power Systems (2015).

Figura 4: Secuencia de armónicas

No.armónico	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Secuencia	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Fuente: Armónicos en sistemas eléctricos (s.f.).

### Valores RMS (Valor eficaz)

Dugan, Mc Granaghan, Santoso y Wayne (2004) aducen que: “En una condición no sinusoidal, una forma de onda armónicamente distorsionada está formada por sinusoides de frecuencias armónicas con diferentes amplitudes. Los valores rms de las formas de onda se calculan como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados rms de todos los componentes individuales” (p. 174).

Ecuación: Fórmula del voltaje RMS

$$V_{rms} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 \dots V_{hmax}^2} \quad (13)$$

Fuente: Control of Harmonics in electrical Power Systems (2006).

Donde:

$V_{rms}$  = Voltaje eficaz (V)

$V_h^2$  = Es la amplitud relativa de la tensión armónica de orden h. (V)

Ecuación: Fórmula de la corriente RMS

$$I_{rms} = \sqrt{I_{fund}^2 + I_{arm}^2} \quad (14)$$

Fuente: Control of Harmonics in Electrical Power Systems (2006).

Donde:

$I_{rms}$  = Corriente eficaz. (A).

$I_{fund}^2$  = Corriente a la frecuencia fundamental. (A).

$I_{arm}^2$  = El valor rms de las corrientes activas armónicas individuales de orden h. (A).

### **Distorsión armónica total. (THD)**

La distorsión armónica total (THD) es un índice importante que se usa ampliamente para describir problemas de calidad de la energía en los sistemas de transmisión y distribución. Considera la contribución de cada componente armónico individual en la señal. THD, según De la Rosa, (2006, p. 17), se define para señales de tensión y corriente, respectivamente, de la siguiente manera:

Ecuación: Fórmula de la Distorsión Armónica Total Voltaje

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} * 100 \quad (15)$$

Fuente: De la Rosa (2006).

Donde:

$V_h^2$  = Es la amplitud relativa de la tensión armónica de orden h. (V).

$V_1$  = Voltaje a la frecuencia fundamental. (V).

Ecuación: Fórmula de Distorsión Armónica Total Corriente

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} * 100 \quad (16)$$

Fuente: De la Rosa (2006).

Donde:

$I_h^2$  = El valor rms de la corriente activa armónica individual de orden h. (A).

$I_1$  = Corriente a la frecuencia fundamental. (A).

### **Distorsión de demanda total.**

Para De la Rosa (2006): “Cuando se efectúan mediciones relacionadas con armónicas en los sistemas eléctricos, es común encontrar niveles de THD altos en condiciones de baja carga que no afectan la operación de los equipos, ya que la energía distorsionante que fluye es también baja. Para evaluar adecuadamente estas condiciones se define el TDD que es el parámetro de referencia que establece los límites aceptables de distorsión en corriente en la norma IEEE 519” (p 17).

Ecuación: Fórmula de la Distorsión de demanda Total

$$\text{TDD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} * 100\% \quad (17)$$

Fuente: De la Rosa (2006).

Donde:

$I_h^2$  = El valor rms de la corriente activa armónica individual de orden h. (A).

$I_L$  = El valor rms de la máxima corriente activa demandada por la carga durante el período de medición. (A).

## Desplazamiento, Distorsión y Factor de potencia total

De acuerdo con De la Rosa (2006):

Con un entorno de distorsión armónica creciente, la definición convencional de factor de potencia como el coseno del ángulo entre el voltaje de frecuencia fundamental y la corriente ha progresado para considerar los valores rms de la señal, que constituyen la contribución de componentes de diferentes frecuencias. Por lo tanto, el factor de potencia de desplazamiento (DPF) continúa caracterizando el factor de frecuencia de potencia, mientras que el factor de potencia de distorsión (o verdadero) (TPF) emerge como el índice que rastrea las variaciones de la señal rms. El factor de potencia total (PFtotal) se convierte, así, en el producto de la distorsión y los factores de potencia reales: (p. 19).

Ecuación: Fórmula de Factor de potencial total.

$$PF \text{ total} = DPF * TPF = \cos(\theta_1 - \delta_1) * \frac{P_{\text{total}}}{S_{\text{total}}} \quad (18)$$

Fuente: De la Rosa (2006).

Donde:

PF total = Factor de potencia total.

DPF =Factor de potencia de desplazamiento.

TPF = Factor de potencia de distorsión.

$P_{\text{total}}$  = Potencia real rms (W).

$S_{\text{total}}$  = Potencia Aparente rms (KVA).

$\cos(\theta_1)$  = Coseno de Factor de Potencia de desplazamiento a la frecuencia fundamental.

$\cos(\delta_1)$  = Coseno de Factor de potencia Total a la frecuencia fundamental.

Ecuación: Fórmula de Factor de potencia Total

$$PF \text{ total} = \left( \frac{P_1}{V_1 * I_1} \right) * \sqrt{\frac{1}{1 + \left( \frac{THD_1}{100} \right)^2}} \quad (19)$$

Fuente: De la Rosa (2006).

Donde:

PF total : Factor de potencia total.

P1: Potencia real a la frecuencia fundamental (W).

V1: Voltaje a la frecuencia fundamental (V).

I1: Corriente a la frecuencia fundamental (A).

Vh: Voltaje a la frecuencia a una frecuencia h (V).

Ih: Corriente a la frecuencia a una frecuencia h (A).

THD: Distorsión armónica Total.

### **Factor de cresta**

Para De la Rosa, (2006): “Esta es la forma más sencilla de expresar la relación entre el valor máximo y el valor efectivo de una señal y los rendimientos para el caso en que la señal es una forma de onda sinusoidal pura. Esta relación está expuesta a cambios bajo distorsión armónica de la señal de voltaje creada por cargas no lineales” (p. 175).

Ecuación 16: Fórmula del factor de cresta

$$FC = \frac{\text{Valor pico}}{\text{Valor Rms}} \quad (20)$$

Fuente: De la Rosa (2006).

### **Potencia Activa**

De la Rosa, (2006) señala que: “Cada armónico proporciona una contribución a la potencia promedio que puede ser positiva o negativa. Sin embargo, la potencia armónica resultante es muy pequeña en relación con la potencia activa de frecuencia fundamental” (p. 21).

Ecuación: Fórmula de Potencia Activa

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\theta_h - \delta_h) \quad (21)$$

Fuente: De la Rosa (2006).

Donde:

P = Potencia Activa (W).

I<sub>h</sub>: Corriente a la frecuencia a una frecuencia h (A).

V<sub>h</sub>: Voltaje a la frecuencia a una frecuencia h. (V).

Cos(θ<sub>h</sub>): Coseno de Factor de Potencia de desplazamiento a una frecuencia h.

Cos(δ<sub>h</sub>): Coseno de Factor de potencia Total a una frecuencia h.

### Potencia Reactiva

Ecuación: Fórmula Potencia Reactiva

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin(\theta_h - \delta_h) \quad (22)$$

Fuente: De la Rosa (2006).

Donde:

Q = Potencia Reactiva (VAR).

I<sub>h</sub>: Corriente a la frecuencia a una frecuencia h (A).

V<sub>h</sub>: Voltaje a la frecuencia a una frecuencia h. (V).

Sin(θ<sub>h</sub>): Coseno de Factor de Potencia de desplazamiento a una frecuencia h.

Sin(δ<sub>h</sub>): Coseno de Factor de potencia Total a una frecuencia h.

## Potencia Aparente

Ecuación: Potencia Aparente

$$S^2 = P^2 + \sum_{i=1}^{\infty} V_1 I_1 \sin(\varphi_1) + D^2 \quad (23)$$

Fuente: De la Rosa (2006).

Donde:

S: Potencia Aparente (VA).

P: Potencia real a la frecuencia fundamental (W).

V1: Voltaje a la frecuencia fundamental (V).

I1: Corriente a la frecuencia fundamental (A).

Vh: Voltaje a la frecuencia a una frecuencia h (V).

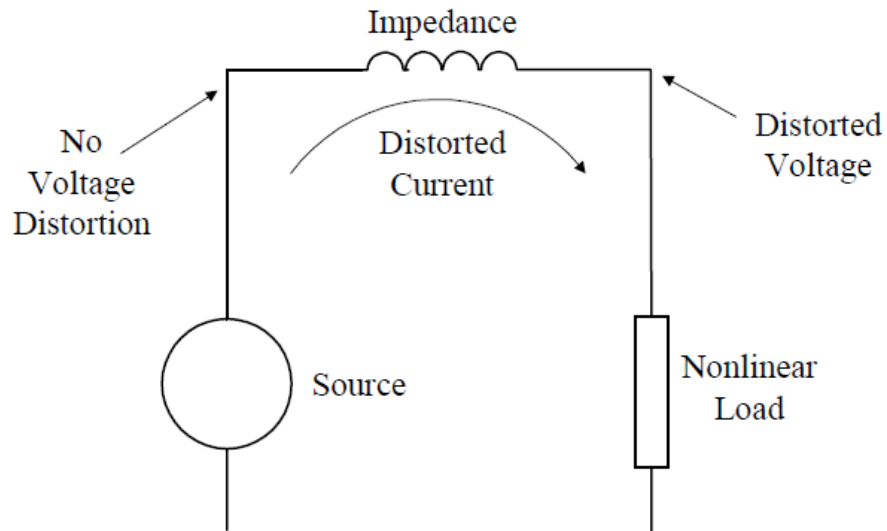
Ih: Corriente a la frecuencia a una frecuencia h (A).

## Efecto de las corrientes armónicas en la impedancia.

La figura 5 muestra de forma simplificada que cuando una carga no lineal absorbe corriente distorsionada (no sinusoidal) del suministro; esa corriente distorsionada pasa a través de toda la impedancia entre la carga y la fuente de alimentación. Las corrientes armónicas asociadas que pasan a través de la impedancia del sistema provocan caídas de voltaje para cada frecuencia armónica según la ley de Ohm ( $V_h = I_h \times Z_h$ ).

La suma vectorial de todas las caídas de tensión individuales da como resultado una distorsión total de la tensión, cuya magnitud depende de la impedancia del sistema y de los niveles de corrientes armónicas en cada frecuencia armónica.

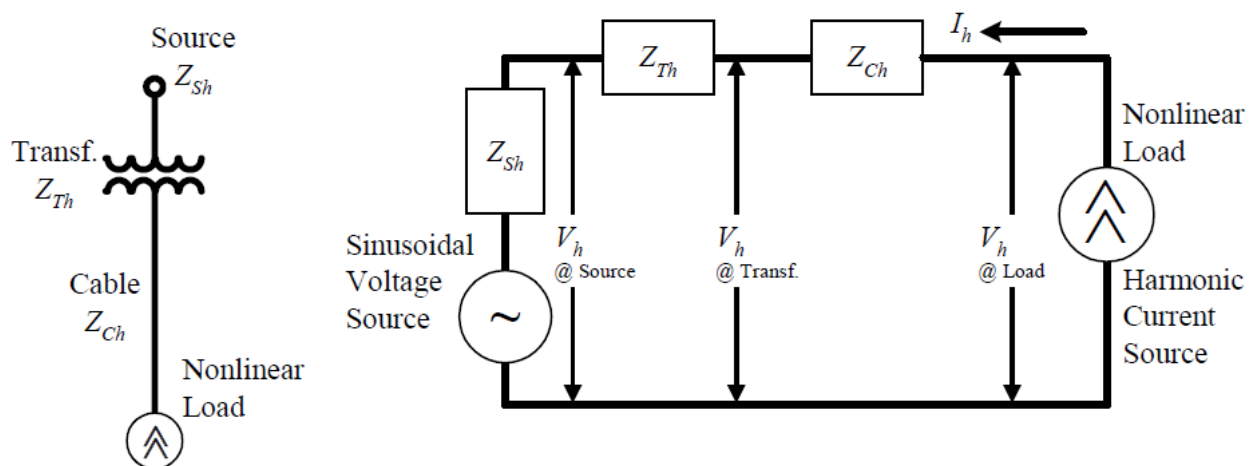
Figura 5: Las corrientes distorsionadas inducen distorsión de voltaje



Fuente: Control of Harmonics in Electrical Power Systems (2006).

La figura 6 muestra en detalle el efecto que tienen las corrientes armónicas individuales sobre las impedancias dentro del sistema de energía y las caídas de voltaje asociadas para cada una. La American Bureau of Shipping, [ABS] (2006) indica al respecto lo siguiente: “Tenga en cuenta que la "distorsión armónica total de voltaje", THDv (basada en la suma vectorial de todos los armónicos individuales), se reduce a medida que se introduce más impedancia entre la carga no lineal y la fuente” (p. 19).

Figura 6: ¿Cómo se desarrollan las caídas de voltaje armónico individuales, a través de las impedancias del sistema?



Fuente: Control of Harmonics in Electrical Power Systems (2006).

## El efecto de la carga sobre la distorsión de la corriente armónica

### Distorsión de voltaje armónico total (THDv)

La ABS (2006) afirma que. “En los sistemas de potencia que contienen cargas no lineales, la distorsión armónica total de voltaje (THDv) depende de la magnitud de cada corriente armónica en su frecuencia armónica específica que actúa sobre la impedancia de la fuente y otras impedancias del circuito individual para producir caídas de voltaje armónicas individuales, todas las cuales se suman y comparan con la tensión fundamental para obtener, en términos porcentuales, la THDv” (pp. 99-100).

Según la misma ABS (2006) se concluye que:

La distorsión de voltaje resultante tiende a disminuir cuanto más lejos se mide de la carga que produce armónicos, a menos que se presente resonancia en el sistema y esta resonancia amplifique las corrientes o voltajes armónicos entre la carga y el transformador. Por lo general, el valor de THDv más alto está cercano a la carga generadora de armónicos y se reduce progresivamente cuanto más cerca de la fuente se realice la medición, debido al efecto de cables, transformadores y otras impedancias, y hasta cierto punto, la cantidad de carga lineal (como motores de inducción), que tiende a actuar como un "sumidero armónico" (es decir, absorbe corriente armónica) en el circuito.

Cuanto mayor sea la magnitud de la corriente armónica, mayor será la distorsión de voltaje para una impedancia dada (pp. 99-100).

### **Distorsión total de corriente armónica (THDi) y carga reducida**

En el documento ABS (2006), se puede entender que:

En los variadores de frecuencia en corriente alterna con sistemas de control PWM el THDi aumentará a medida que se reduzca la carga debido a la corriente más discontinua en el bus DC, producto de la activación y desactivación de los IGBT en la parte de modulación del variador de frecuencia.

Es importante tener en cuenta que, si los variadores AC PWM están "sobredimensionados" por cualquier motivo, el THDi será mayor de lo esperado con cualquier carga, ya que el variador está no "emparejado" con la carga en lo que respecta a la clasificación de kW / HP (pp. 99-100).

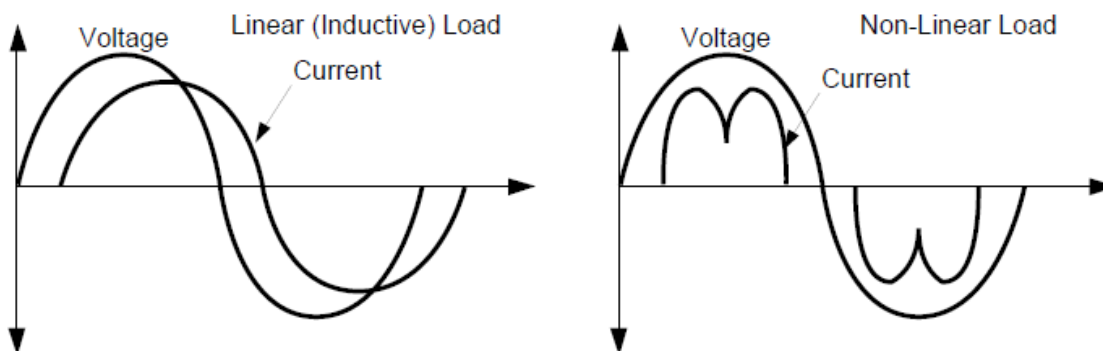
### **Generadores de distorsión armónica.**

Actualmente, existe una gran cantidad de dispositivos que generan distorsiones armónicas y constituyen un gran problema. Estos equipos son llamados cargas no lineales, hay dos tipos de cargas, las saturables y las electrónicas. Estas últimas han proliferado en la industria debido a el progreso tecnológico en semiconductores, dado esto son las que generan mayor distorsión en la red eléctrica.

### **Cargas no lineales**

Según indica Ríos (2014): “En general, los armónicos son producidos por cargas no lineales, lo cual significa que su impedancia no es constante (está en función de la tensión). Estas cargas no lineales a pesar de ser alimentadas con una tensión sinusoidal absorben una intensidad no sinusoidal, pudiendo estar la corriente desfasada un ángulo  $\phi$  respecto a la tensión. Para simplificar se considera que las cargas no lineales se comportan como fuentes de intensidad que inyectan armónicos en la red” (p. 8).

Figura 7 :Diferencias de onda entre carga lineal y carga no lineal



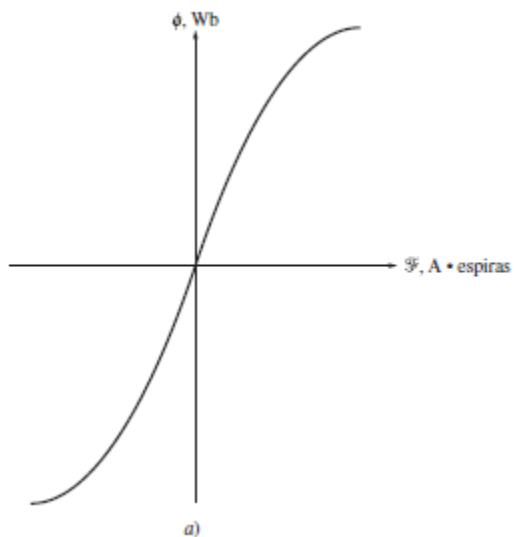
Fuente: Power System Harmonics, SQUARE D (1994).

### Cargas no lineales saturables

#### Transformadores

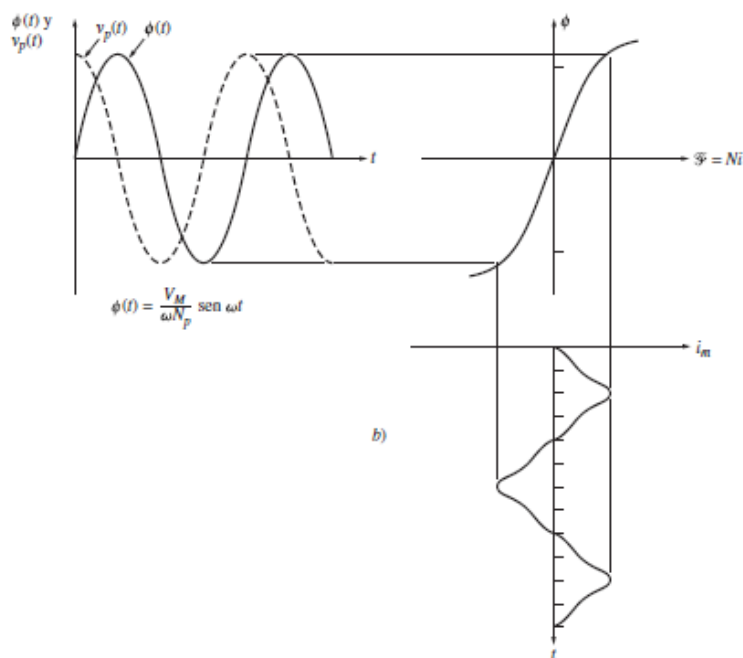
Según Chapman, (2015): “Los transformadores al encenderse generan una corriente que es necesaria para producir el flujo en el núcleo ferromagnético real, a esta corriente se le denomina corriente de magnetización la cual no es sinusoidal y genera triples armónicos, especialmente la tercera armónica. En un transformador bien diseñado estas corrientes deberían de ser mucho más pequeñas que la corriente de carga” (p. 61).

Figura 8: Curva de magnetización del núcleo de un transformador



Fuente: Máquinas Eléctricas (2015).

Figura 9: Corriente de magnetización causada por el flujo en el núcleo del transformador.



Fuente: Máquinas Eléctricas (2015).

## Máquinas rotativas

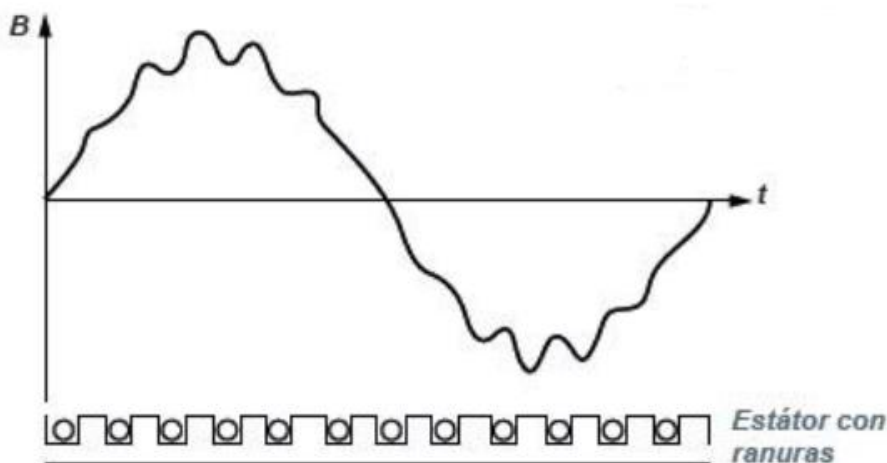
Para Harper (2001): “Las máquinas rotativas producen armónicos de ranura de rango elevado y de amplitud normalmente despreciable. Las pequeñas máquinas síncronas son, sin embargo, generadoras de tensiones armónicas de 3<sup>er</sup> orden” (p. 81).

En su página de internet, Circuitur, (2015) indica que:

La propia construcción de los devanados de los estatores en las máquinas eléctricas de corriente alterna pueden producir la aparición de componentes armónicas de tensión llamadas armónicos de ranura.

La existencia de ranuras uniformes alrededor de la parte interna del estator causa variaciones regulares de reluctancia y de flujo a lo largo de la superficie del estator, causando la deformación de la onda de tensión (recuperado de <http://circuitur.es/es/documentacion-es/articulos/3113-armonic-de-ranura-en-sistemas-de-generacion-electrica#:~:text=Los%20principales%20efectos%20de%20los,resonancia%20con%20bater%C3%ADas%20de%20condensadores>).

Figura 10: Densidad de flujo a través de las ranuras del estator



Fuente: Circuitur (2015).

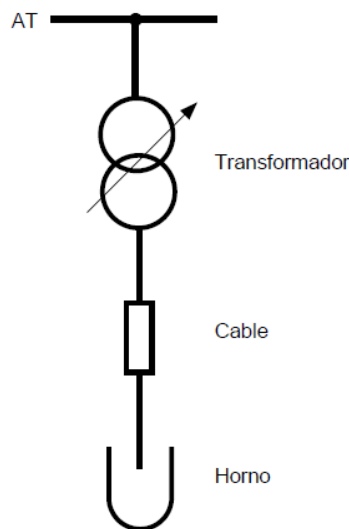
## Hornos de arco.

Según Salquimer (2007):

Los hornos de arco son equipos que se utilizan en la industria metalúrgica para fundir metales, se componen de electrodos de grafito los cuales son alimentados por medio de un transformador dedicado al horno. Las armónicas de los hornos son impredecibles por

efecto del proceso y causan los más severos problemas debido a la gran capacidad armónica. Para arrancar el proceso los tres grafitos cada uno controlado individualmente son sumergidos en el acero, el proceso se compone de subir y bajar los electrodos de manera individual, por lo que la corriente fluye por el acero retornando al transformador y haciendo que la impedancia sea variable con respecto al tiempo. Las corrientes son sumamente grandes en orden de kA y solamente las limitan los cables y el transformador del horno (pp. 14-15).

Figura 11: Horno de arco



Fuente: Cuaderno N°152, Schneider Electric (2000).

### **Cargas no lineales electrónicas**

#### **Lámparas fluorescentes.**

Harper (2001) asevera que: “Las Lámparas fluorescentes son cargas no lineales por naturaleza, por lo tanto, al aplicarles un voltaje senoidal, se produce una circulación de corrientes no senoidales a través de ellas” (p. 81).

#### **Los convertidores estáticos en la red trifásica**

Los puentes rectificadores y en general los convertidores estáticos (diodos y tiristores) son generadores de corrientes armónicas.

Así, en un puente de Graetz, la corriente continua consumida hace aparecer una corriente no senoidal, que cuando la carga es muy inductiva, tiene forma escalonada, o que tiene unos picos cuando al puente de diodos le sigue un condensador.

Generalmente, las frecuencias de interés para el análisis de armónicos incluyen hasta el 40 o más armónicos.

En condiciones ideales de funcionamiento, los armónicos generados por un convertidor de potencia de pulsos  $p$  se caracterizan por:

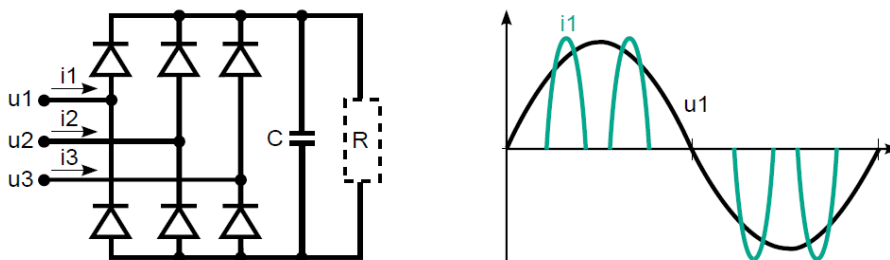
Ecuación: Fórmula de la corriente armónica

$$I_h = \frac{I_1}{h}, h = pn \pm 1 \quad (24)$$

Fuente: De la Rosa (2006).

Donde:  $h$  representa los armónicos característicos de la carga;  $n = 1, 2, \dots$ ; y “ $p$ ” es un múltiplo entero de seis.

Figura 12: Rectificador y distorsión de corriente típica de 6 pulsos



Fuente: Cuaderno Técnico N°152, Schneider Electric (2000).

### Rectificadores (puentes diodos)

Los diodos se usan en forma extensa en los rectificadores. Un rectificador es un circuito que convierte una señal de ca en una señal unidireccional.

Para Rashid (2015): “Un rectificador es un procesador de potencia que debe producir un voltaje de salida de cd con un contenido mínimo de armónicas. Al mismo tiempo, debe mantener

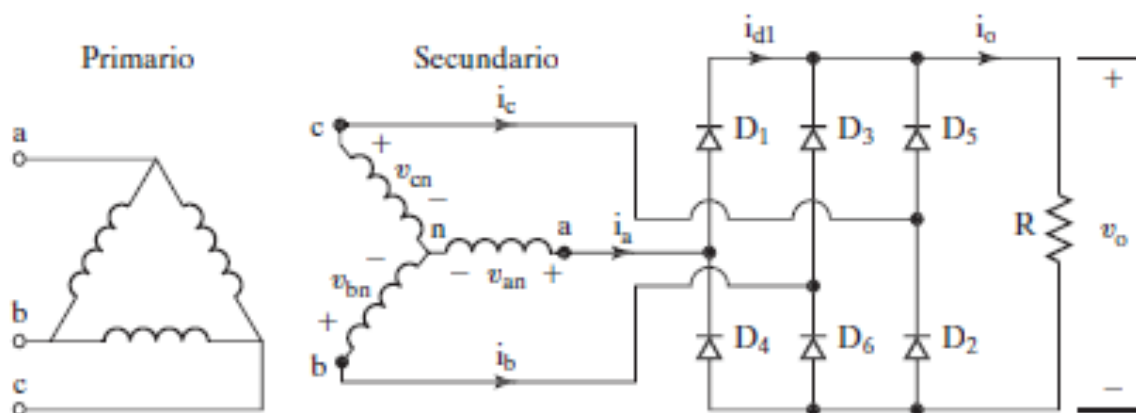
la corriente de entrada tan sinusoidal como sea posible, y en fase con el voltaje de entrada, para que el factor de potencia sea cercano a la unidad” (pp. 68-69).

### Rectificadores trifásicos en puente

Con base en Rashid (2015):

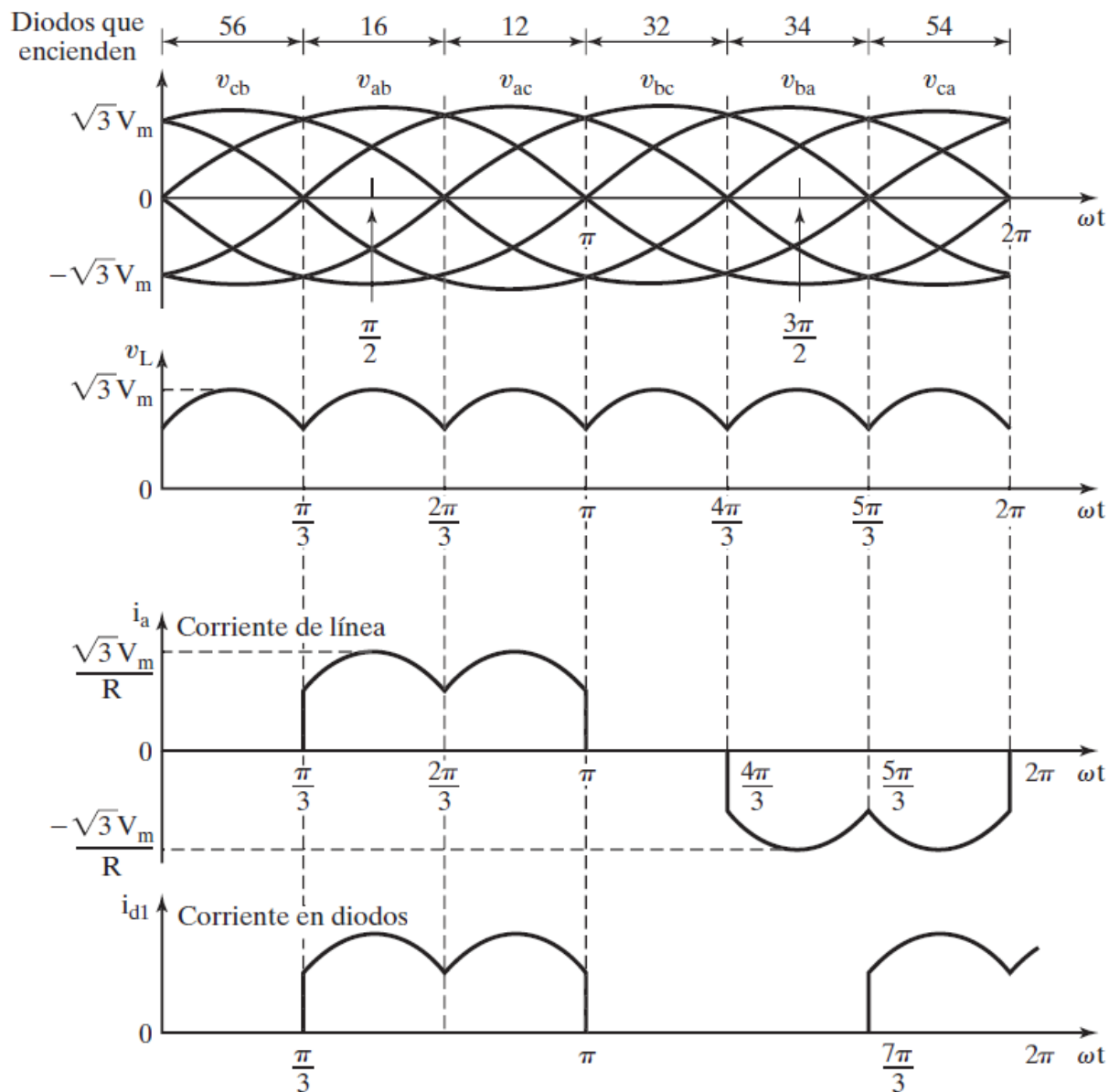
Un rectificador trifásico en puente se utiliza frecuentemente en aplicaciones de alta potencia, y se muestra en la figura 13. Es un rectificador de onda completa, y puede operar con o sin transformador, y produce rizados de seis pulsos en el voltaje de salida. Los diodos se numeran en el orden de las secuencias de conducción, y cada uno conduce durante  $120^\circ$ . La secuencia de conducción para los diodos es D1\_D2, D3\_D2, D3\_D4, D5\_D6 y D1\_D6. El par de diodos conectados entre el par de líneas de alimentación que tienen el mayor voltaje instantáneo de línea a línea es el que conduce (p. 98).

Figura 13: Rectificador trifásico en puente



Fuente: Electrónica de Potencia (2015).

Figura 14: Formas de onda y ángulo de conducción de los diodos.



Fuente: Electrónica de Potencia (2015).

Figura 15: Serie de Fourier de un rectificador trifásico conectado en un sistema Delta-Estrella

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left( \cos(\omega t) - \frac{1}{5} \cos(5\omega t) + \frac{1}{7} \cos(7\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \frac{1}{13} \cos(13\omega t) - \frac{1}{17} \cos(17\omega t) + \frac{1}{19} \cos(19\omega t) \dots \right)$$

Fuente: Power System Harmonics (2003).

Las principales fuentes armónicas son:

Tabla 1: Tipos de carga armónica y principales armónicas

Núm.	Equipo	Características de las principales armónicas	Magnitudes (1% a 60 Hz)
1	Transformadores <ul style="list-style-type: none"> <li>• Saturación</li> <li>• Energización</li> </ul>	Corrientes armónicas 3 <sup>a</sup> , 4 <sup>a</sup> , 5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup>	1 a 8%
2	Hornos de inducción y soldadoras de arco	Voltajes armónicos 5 <sup>o</sup> y 7 <sup>o</sup>	2.5 a 8%
3	Convertidores de potencia <ul style="list-style-type: none"> <li>• Conmutadores de línea</li> <li>• Auto conmutados (inversores que usan celdas de combustible o baterías)</li> </ul>	Corrientes armónicas $h = np \pm 1$ Voltajes armónicos $h = np \pm 1$	$I_h = 100/h$ 52 a 78%
4	Ciclos convertidores (grandes equipos, fábricas de papel para conversión directa de AC a DC).	Corrientes armónicas $h = np \pm 1$	5 a 9%

5	Controladores estáticos de VAR's (utilizados junto con hornos de arco o inducción)	Corrientes armónicas $h = np \pm 1$	2 a 4%
6	Reactores saturables (normalmente en paralelo con capacitores para compensación de reactivos de hornos de arco)	Corrientes armónicas 3 <sup>a</sup> , 5 <sup>a</sup> , 7	1 a 8%

Nomenclatura:  $h$  = orden de la armónica;  $p$  = número de pulsos;  $n = 1, 2, \dots$

Fuente: ABC de la calidad de la Energía Eléctrica (2001).

### Variadores de frecuencia electrónicos

Según Pulido, (2000):

Un convertidor de frecuencia electrónico es un aparato destinado a modificar la frecuencia y por lo tanto la velocidad de un motor de inducción asíncrono trifásico; es decir, que genera una corriente alterna con la frecuencia y la tensión necesarias para accionar dicho motor de corriente alterna.

El convertidor de frecuencia permite modificar el valor de frecuencia para hacer que el motor gire más o menos velocidad independientemente de la frecuencia de que disponga la red de alimentación.

Los variadores de frecuencia se rigen por la fórmula:

Ecuación: Fórmula del giro del motor

$$N = \frac{60 * f}{p} \text{ R. P. M} \quad (25)$$

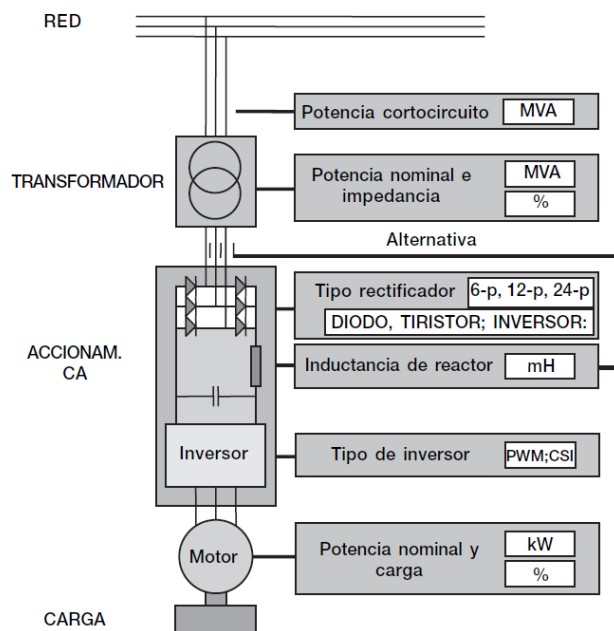
Fuente: Convertidores de frecuencia, controladores de motores y SSR (2000).

Donde:

- N = Velocidad del giro del motor
- F = Frecuencia
- P = Número de pares de polos
- RPM = Revoluciones por minuto

Actualmente esto se consigue con procedimientos electrónicos y sistemas PWM siglas en inglés, de (Pulse width module) o modulación de ancho de pulsos que se utilizan con anterioridad a la aparición de los convertidores de frecuencia electrónicos (pp. 1-2).

Figura 16: Características del Sistema de Accionamiento que Afecta a los Armónicos



Fuente: Guía de armónicos con accionamientos de CA. (s.f.).

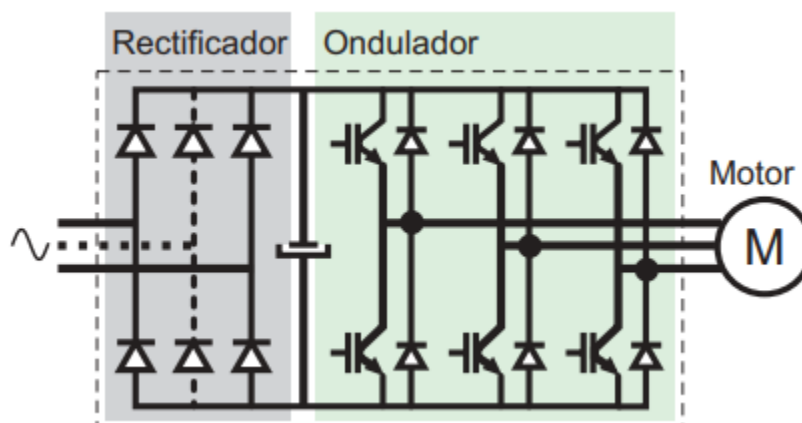
### Partes de los variadores de frecuencia

De acuerdo con Nebon (2002):

Los variadores de frecuencia se pueden dividir en tres grandes partes, para la cual solo nos interesa conocer la parte de potencia.

- Un puente rectificador monofásico o trifásico de diodos conectados a un condensador formando una fuente de tensión continua (Bus de tensión continua o Bus DC).
- Un puente ondulator generalmente con IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), alimentado por la tensión continua y que genera una onda de tensión alterna de amplitud y frecuencia variables por la técnica de «Modulación de Anchura de Impulsos» o PWM
- Una unidad de mando que suministra las órdenes de conducción a los IGBT (transistor de compuerta aislada bipolar) con arreglo a las consignas dadas por el operador (orden de marcha, sentido de marcha, consigna de velocidad) y de la medida de magnitudes eléctricas (tensión red, corriente motor) (p. 7).

Figura 17: Partes de Potencia de un Variador de Frecuencia



Fuente: Cuaderno Técnico N°204 de Schneider Electric (2002).

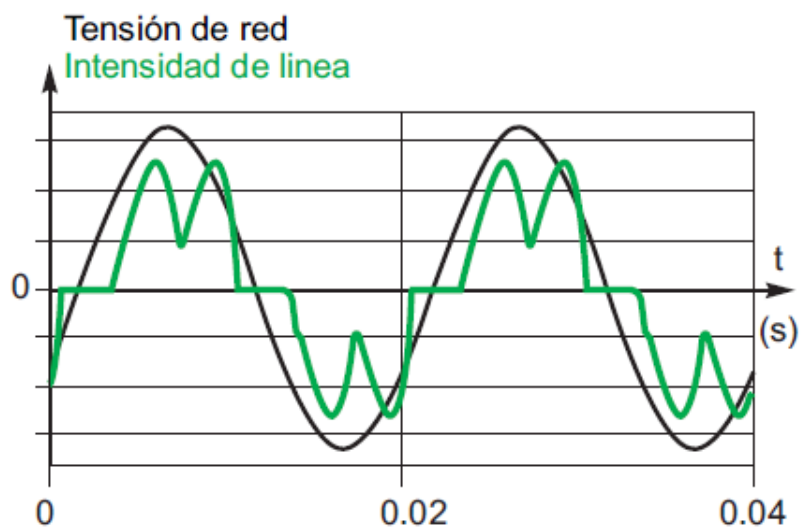
### Características de la corriente absorbida por el variador

#### En el caso de una alimentación trifásica

Nebon (2002) indica que:

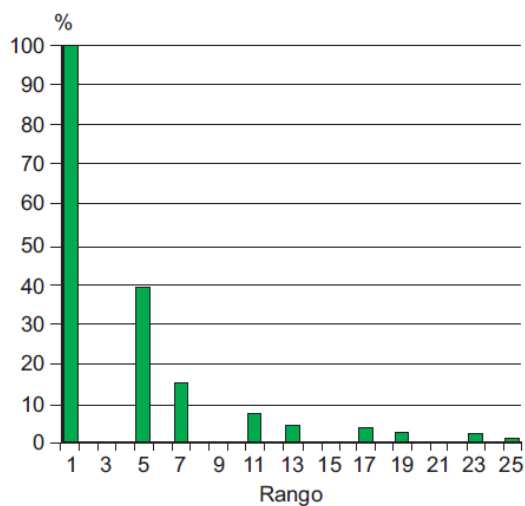
El puente rectificador combinado con el condensador de filtrado toma de la red una corriente no sinusoidal, cuyo aspecto se representa en la figura 18 y su espectro armónico en la figura 19. El valor típico del índice de distorsión armónica THD es del 40 %. Hay que señalar que este índice de distorsión se obtiene añadiendo unas inductancias de línea que provocan una caída de tensión comprendida entre el 3 y el 5 %. En ausencia de estas inductancias de línea, la distorsión de corriente es superior: puede alcanzar el 80 % en ausencia total de inductancia en el variador (p. 7).

Figura 18: Características de la Tensión y Corriente de línea de un Variador de Frecuencia trifásico.



Fuente: Cuaderno Técnico N°204 de Schneider Electric (2002).

Figura 19: Gráfica en Función de la Frecuencia de los armónicos de corriente de un Variador de Frecuencia trifásico.

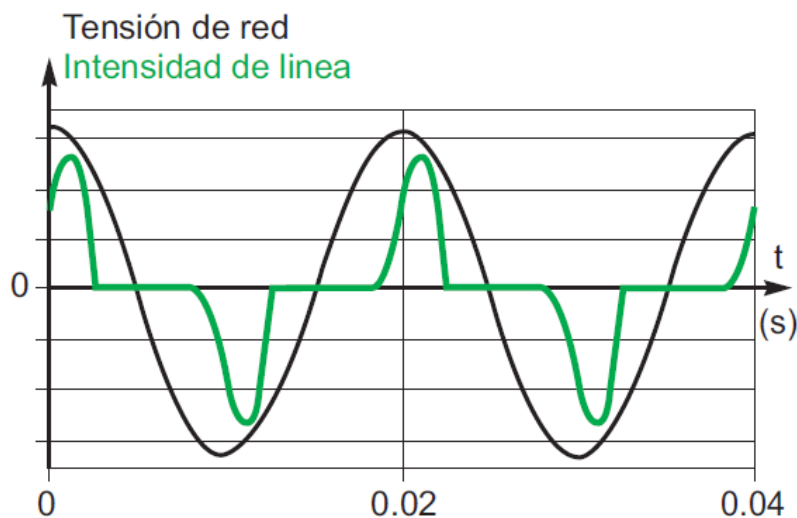


Fuente: Cuaderno Técnico N°204 de Schneider Electric (2002).

### En el caso de una alimentación monofásica

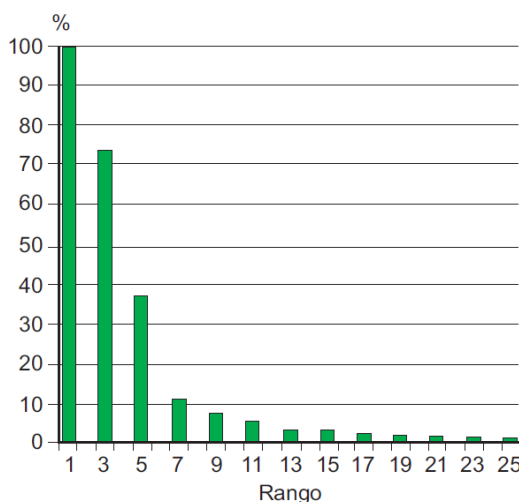
Nebon (2002) aduce que: “La corriente absorbida se representa en la figura 20 y su espectro por la figura 21. El valor típico del índice de distorsión armónica THD es del 80 %. Nótese que este índice de distorsión también se obtiene por inclusión de una inductancia de línea que provoca una caída de tensión comprendida entre el 3 y 5 %. En ausencia de esta inductancia de línea, la distorsión de corriente es superior: puede sobrepasar el 100 % en ausencia total de inductancia en el variador” (p. 7).

Figura 20: Características de la Tensión y Corriente de línea de un Variador de Frecuencia Monofásico.



Fuente: Cuaderno Técnico N°204 de Schneider Electric (2002).

Figura 21: Gráfica en Función de la Frecuencia de los armónicos de corriente un Variador de Frecuencia Monofásico



Fuente: Cuaderno Técnico N°204 de Schneider Electric (2002).

## Efectos de los armónicos en la red eléctrica industrial

### Impacto sobre los bancos de capacitores

Para Harper (2001): “En los sistemas eléctricos de potencia, se usan los bancos de capacitores para control de voltaje para mejorar o corregir el factor de potencia, pero su frecuencia constituye una de las componentes que afectan las características de la llamada respuesta a la frecuencia del sistema, ya que la conexión de los capacitores puede dar lugar a condiciones de resonancia en serie o en paralelo, que eventualmente amplifican los problemas de armónicas” (p. 88).

Según comenta Chapman (2001):

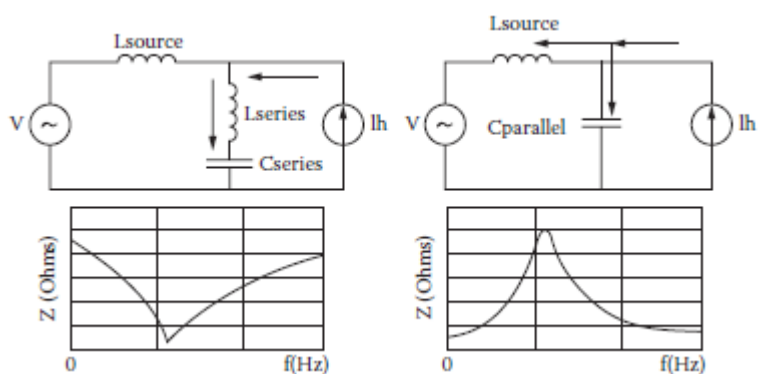
Un problema que se puede presentar con el banco de condensadores que se utiliza para mejorar el factor de potencia en una red, es que la reactancia capacitiva del condensador y la reactancia inductiva del transformador de alimentación entren en resonancia a una de las frecuencias armónicas, esto debido a que la impedancia del condensador disminuye al aumentar la frecuencia, mientras que la impedancia de la fuente es normalmente inductiva y aumenta con la frecuencia. Cuando esto se presenta se puede llegar a generar tensiones y corrientes muy grandes que provocarían daños a los equipos adyacentes (p. 9).

## Condiciones resonantes

Las condiciones de resonancia del sistema son factores importantes que afectan los niveles armónicos del mismo. La resonancia en paralelo se manifiesta como una impedancia grande al flujo de la corriente armónica, mientras que la resonancia serie se manifiesta como una impedancia pequeña.

Para Harper (2001): “Cuando las condiciones resonantes no son un problema, es porque el sistema tiene la capacidad de absorber cantidades significativas de corrientes armónicas” (p. 91).

Figura 22: Resonancia Paralela y Serie



Fuente: Libro Harmonics and Power Systems (2003).

Con base en De la Rosa (2006): “Las frecuencias de resonancia se pueden anticipar si se conoce el nivel de corriente de cortocircuito en el punto donde está instalado el banco de capacitores” (p. 72).

Ecuación: Fórmula de la frecuencia de resonancia

$$h_r = \sqrt{\frac{\text{KVA}_{\text{transformador}} * 100}{\text{KVAR}_{\text{banco de capacitores}} * \%Z_{\text{transformador}}}} \quad (26)$$

Fuente: De la Rosa (2006).

Donde:

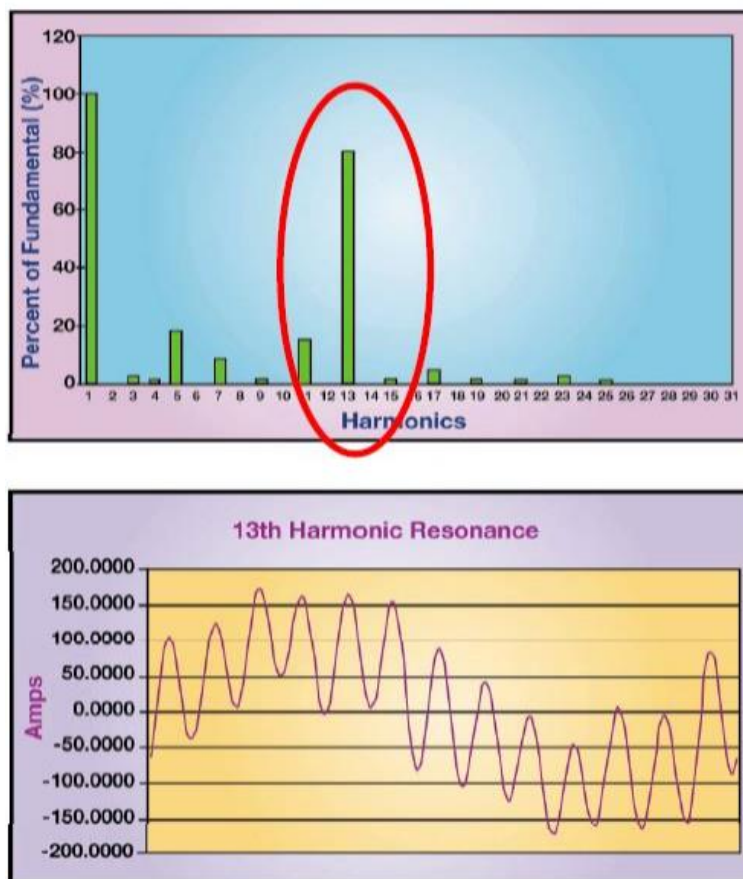
$h_r$  = Frecuencia de resonancia.

$\text{KVA}_t$  = Potencia Aparente del transformador.

$KVAR$  = Potencia reactiva del banco de condensadores.

$\%Z$  = impedancia del transformador.

Figura 23: Ejemplo de resonancia



Fuente: Eaton Electrical.

### Resonancia en paralelo

Harper (2006) señala que:

La resonancia en paralelo ocurre cuando las reactancias inductivas y capacitiva resultan ser iguales a la misma frecuencia. Si la combinación de los bancos de capacitores y la inductancia del sistema resultan en una resonancia paralelo cerca de una de las armónicas características generadas por la carga no-lineal, esa corriente armónica excitará el “circuito tanque” de ese modo dará origen a una corriente amplificada que oscilará entre

la energía almacenada en la inductancia y la energía almacenada en la capacitancia (p. 91).

### **Resonancia en serie**

Según Harper (2006):

La resonancia en serie es el resultado de la combinación serie del banco de capacitores y las inductancias del transformador o la línea. La resonancia serie presenta una trayectoria de baja impedancia a las corrientes armónicas y tienden a “atrapar” alguna corriente armónica a la cual esté sintonizado el circuito LC resultante. La resonancia serie puede resultar en niveles altos de distorsión de voltaje entre la inductancia y el capacitor en el circuito serie (p. 91).

### **Impacto sobre los transformadores**

Según Harper (2006):

Los transformadores se diseñan para entregar la potencia requerida a las cargas conectadas con un mínimo de cargas operando a la frecuencia fundamental, la distorsión armónica de la corriente en particular y también la de voltaje, contribuyen en forma significativa al calentamiento para diseñar un transformador de potencia que pueda trabajar con frecuencias mayores que la fundamental. El diseñador debe hacer distintas variantes en el diseño, como, por ejemplo, usar cables continuos transpuestos en lugar de conductores sólidos y también ampliar el número de ductos de enfriamiento (p.92).

Existen tres efectos que resultan de incrementar el calentamiento en los transformadores, cuando la corriente de la carga incluye componentes armónicas.

#### **1. Valor eficaz de la corriente.**

De acuerdo con Harper (2006): “Si el transformador está dimensionado solo para potencia en KVA de la carga, las corrientes armónicas pueden hacer que el valor eficaz de corriente sea mayor que su capacidad, lo que traerá como consecuencia un incremento en las pérdidas en los conductores.  $RI^2$ ” (p. 93).

Donde:

$RI^2$  = Pérdidas por efecto Joule (W).

## 2. Pérdidas por corrientes circulantes.

Para Harper (2006):

Estas son las corrientes reducidas en un transformador y causadas por el flujo magnético, fluyen en el devanado, en el núcleo y en otras partes conductoras sujetas al campo magnético del transformador, causando un calentamiento adicional. Esta componente de las pérdidas del transformador se incrementa con el cuadrado de la frecuencia de la corriente, produciendo las corrientes circulantes, por lo que viene a ser una componente muy importante de las pérdidas del transformador para el calentamiento por las armónicas (p. 93).

## 3. Pérdidas en el núcleo

Harper (2006) aduce que:

El incremento en las pérdidas del núcleo en la presencia de armónicas depende básicamente del efecto de las armónicas sobre el voltaje aplicado y el diseño del núcleo del transformador. Un incremento en la distorsión del voltaje puede incrementar las corrientes circulantes en las laminaciones del núcleo, el impacto neto de esto tendrá dependencia del grueso de las laminaciones del núcleo y de la calidad del acero, el incremento en estas pérdidas no es tan crítico como el de las corrientes circulantes. Si se considera que las pérdidas totales tienen dos componentes, una por efecto Joule y la otra por corrientes circulantes (PEC) (p. 93).

Ecuación: Fórmula para pérdidas en el núcleo del transformador

$$PL = P_{EC} * RI^2 \quad (27)$$

Fuente: El ABC de la calidad de la energía eléctrica (2001).

Donde:

$PL$  = Pérdidas en el Núcleo (W).

$PEC$  = Pérdidas por corrientes circulantes (W).

$RI^2$  = Pérdidas por efecto Joule (W).

Las pérdidas  $RI^2$  son directamente proporcionales al valor eficaz de la corriente, en cambio, las corrientes circulantes son proporcionales al cuadrado de la corriente y la frecuencia (Harper, 2006, p. 93).

Ecuación: Fórmula para pérdidas por corrientes circulantes en el transformador

$$P_{EC} = K_{EC} * I^2 * h^2 \quad (28)$$

Fuente: El ABC de la calidad de la energía eléctrica (2001).

Donde:

$P_{EC}$  = Pérdidas por corrientes circulantes (W).

$K_{EC}$  = Constante de proporcionalidad.

$I$  = Corriente (A)

$h$  = Frecuencia (Hz)

### **Factor K en transformadores**

Este es un parámetro relevante en la evaluación del envejecimiento prematuro de los devanados del transformador debido al calor disipado en forma de pérdidas en cobre y pérdidas en el núcleo debido a componentes espectrales de la corriente. Dado que el factor K tiene en cuenta el parámetro de frecuencia, se considera el método más preciso para estimar el contenido armónico de cargas no lineales para la especificación de transformadores de distribución.

Los transformadores de factor K están contruidos de modo que cuanto mayor sea el factor K, mayor será el contenido de armónicos que pueden manejar sin calentamiento adicional.  $K = 1$  sería un transformador convencional no apto para trabajar en entornos armónicos a potencia nominal.

El factor K es entonces un índice que determina los cambios que deben sufrir los transformadores convencionales para que puedan manejar adecuadamente las pérdidas adicionales de hierro y cobre que impondrán las corrientes armónicas, particularmente cuando operan a potencia nominal (De la Rosa, 2006, pp. 175-176).

Ecuación: Fórmula del factor K de transformador

$$K = \frac{(\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 * h^2)}{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (29)$$

Fuente: El ABC de la calidad de la energía eléctrica (2001).

Donde:

K = K-factor.

h = Armónica "n".

I<sub>h</sub> = Corriente Armónica (A).

### **Impacto sobre equipo electrónico**

#### **Problemas por paso por cero**

Chapman (2001) comenta el problema generado por los armónicos en los equipos electrónicos, los cuales en su diseño detectan el paso por cero, de la siguiente forma:

Este detector ayuda a activar semiconductores que generalmente manejan cargas inductivas las cuales a activarse a cero voltios reduce la generación de perturbaciones transitorias, reduciendo las interferencias electromagnéticas. Cuando en la fuente de alimentación están presentes armónicos o perturbaciones transitorias, el ritmo de variación de la tensión por el punto de paso por cero se hace más rápido y más difícil de identificar, provocando un funcionamiento errático. De hecho, hay varios puntos de paso por cero en cada semiciclo (p. 10).

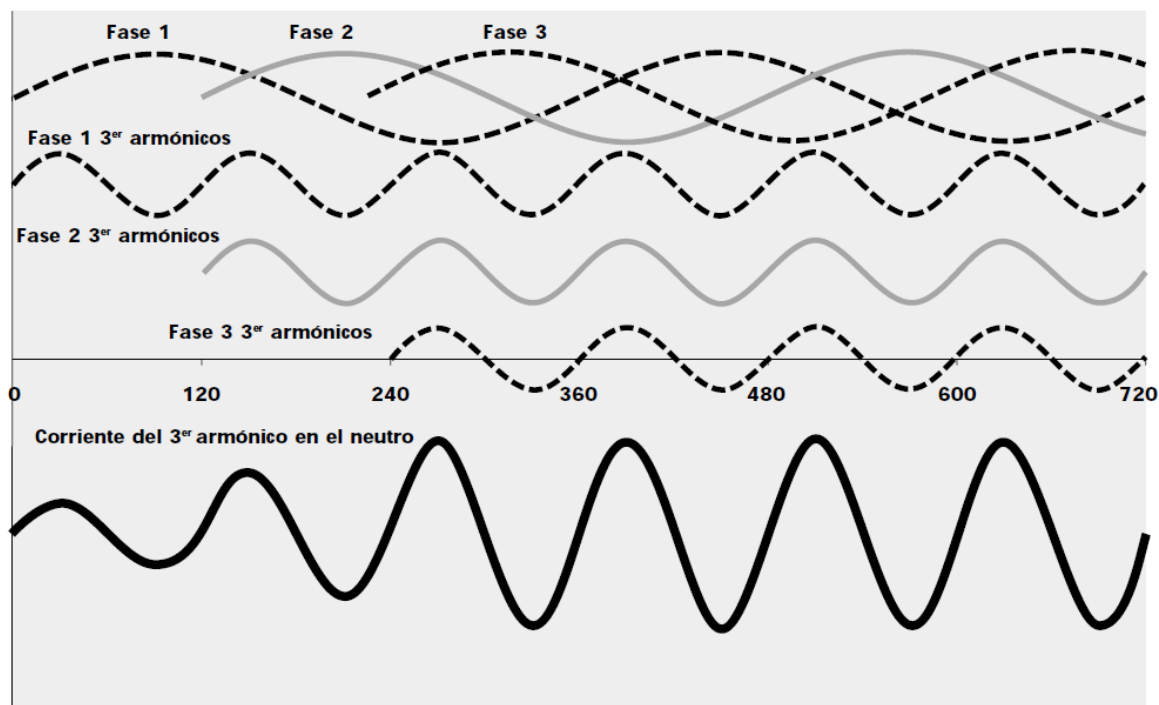
### **Impacto sobre conductores y protecciones**

#### **Sobrecalentamiento de los conductores neutros**

En un sistema trifásico, la forma de onda de tensión de cada fase, entre fase y neutro, está desfasada 120° de forma que, cuando cada una de las fases tiene la misma carga, la corriente combinada en el neutro es cero. Cuando las cargas no están equilibradas, por el neutro solo circulará la corriente neta correspondiente al desequilibrio de las cargas.

Sin embargo, aunque las corrientes fundamentales se anulan entre sí, no ocurre lo mismo con las corrientes armónicas. De hecho, aquellas que son un múltiplo impar del triple de la fundamental, los denominados armónicos "triple- N", se suman en el conductor neutro.

Figura 24: Corrientes en el Neutro



Fuente: Armónicos causas y efectos (2001).

En este diagrama las corrientes de cada fase, que se representan en la parte superior, están desfasadas  $120^\circ$ . El tercer armónico de cada fase es idéntico para las tres, al ser su frecuencia el triple de la fundamental y, por tanto, su periodo un tercio del de la onda fundamental. En la figura se muestra la corriente resultante de los tres terceros armónicos (Chapman, 2001, pp. 6-7).

### Disparos intempestivos de los interruptores automáticos

Chapman (2001) indica que:

Los interruptores automáticos de corriente diferencial residual (ID) funcionan sumando la corriente presente en los conductores de fase y neutro, y si el resultado no está dentro

del límite especificado, desconectan la energía de la carga. La desconexión anómala puede producirse en presencia de armónicos por dos razones. En primer lugar, como el ID es un dispositivo electromecánico, puede ocurrir que no sume correctamente los componentes de frecuencia más elevada y, por lo tanto, provoque una desconexión errónea. En segundo lugar, los equipos que generan armónicos también generan ruido de conmutación que debe filtrarse en el punto de conexión de energía al equipo. Los filtros normalmente utilizados para este propósito disponen de un condensador entre la línea y el neutro a tierra, por el cual se derivan pequeñas corrientes de fuga a tierra (p. 8).

## **Impacto sobre motores eléctricos de inducción**

### **Motores de inducción**

Para Chapman (2001):

La distorsión armónica de tensión provoca un aumento de las pérdidas por corrientes parásitas en los motores lo mismo que en los transformadores. Pero, además, aparecen unas pérdidas adicionales debidas a la generación de unos campos magnéticos armónicos en el estator, cada uno de los cuales intenta hacer girar el motor a una velocidad diferente tanto en un sentido como en otro, según se trate de armónicos de secuencia positiva o negativa. Las corrientes de alta frecuencia inducidas en el rotor incrementan estas pérdidas todavía más (p. 10).

### **Soluciones para mitigar los armónicos**

En el mercado local hay muchas soluciones para mitigar los armónicos generados por los variadores de frecuencia, como, por ejemplo, tipos de transformadores especiales, filtros activos, filtros pasivos, convertidores de múltiples etapas y variadores de frecuencia frente activo.

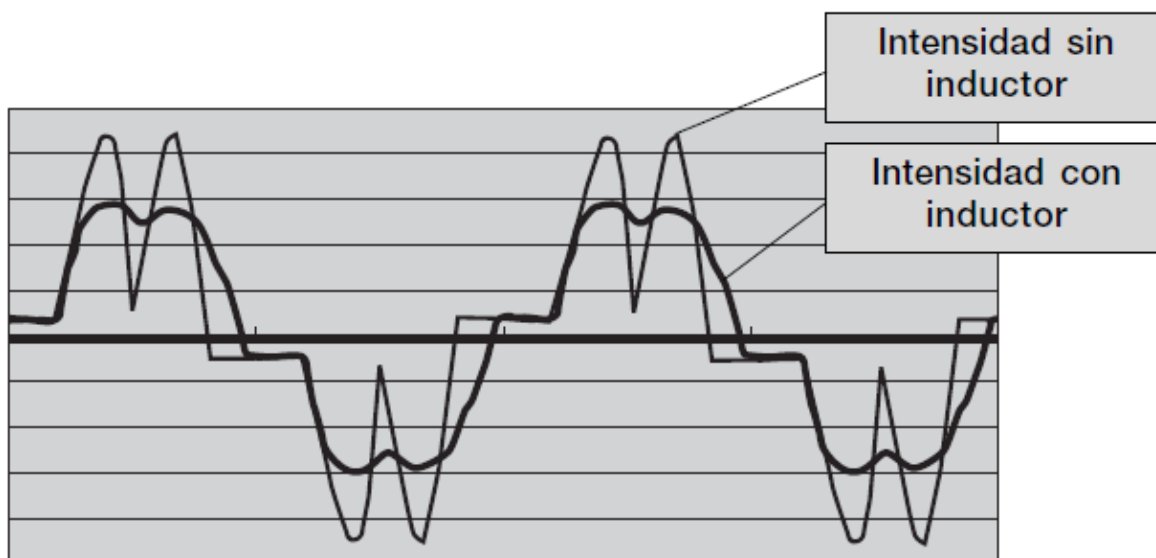
Muchos fabricantes de soluciones y los mismos constructores de variadores de frecuencia recomiendan incluir una inductancia antes o después del rectificador, esto para reducir los picos de corriente, reduciendo los picos de corriente se reduce el THD. Mencionado esto antes de entrar en temas de soluciones, se explicará el efecto de las inductancias en las armónicas.

### Efecto de una inductancia en la corriente armónica

Rashid (2015) indica que: “Una carga inductiva puede hacer que la corriente de carga sea continua. Y con una carga altamente inductiva la corriente de entrada se vuelve una onda cuadrada de C.A.” (p. 101).

Ante lo mencionado por Rashid, se puede afirmar que, al agregar una inductancia en la entrada o en el bus de corriente directa del variador de frecuencia, los picos de corriente reducen su amplitud reduciendo el THD generado por el variador de frecuencia.

Figura 25: El efecto del inductor en la intensidad de red



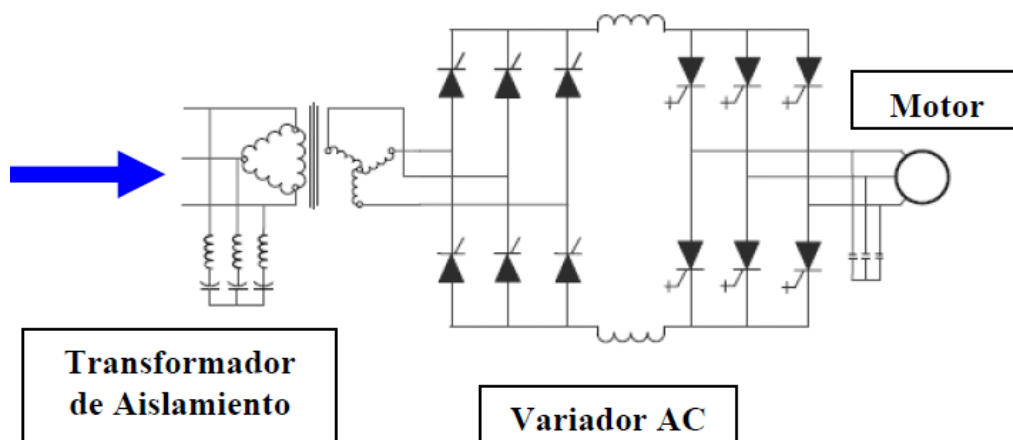
Fuente: Guía de los armónicos con accionamientos de CA (s.f).

### Transformadores de aislamiento

Blooming, Carnovale, Dionise (s.f) señalan que: “Generalmente, son un transformador de relación 1: 1 y se utilizan para proteger otras cargas de las altas frecuencias creadas por el variador y se utilizan en combinaciones para crear un sistema de distribución de 12 pulsos” (p. 2).

Con base en Motortico (2008): “Proveen aislamiento eléctrico al variador electrónico del sistema de tierra de la planta donde se encuentre instalado, decimos que es un sistema aislado. Corrientes indeseables pueden ser evitadas cuando el variador se aísla con un transformador de este tipo” (p.1).

Figura 26: Diagrama eléctrico de un transformador de aislamiento Delta-Estrella



Fuente: Boletín mensual Motortico N°2 (2008).

### Cálculo de transformador de aislamiento

Ecuación: Fórmula de la potencia del transformador

$$KVA = \frac{1.732 * V_{L-L} * VFD_{input\ amps}}{1000} \quad (30)$$

Fuente: Boletín técnico, ABB.

Donde:

KVA: Potencia aparente del transformador.

$V_{L-L}$ : Voltaje de Línea-Línea. (V).

$VFD_{input\ amps}$ : Corriente de entrada del variador de frecuencia. (A).

### **Ventajas.**

- Puede proporcionar una reducción moderada en los armónicos de voltaje y corriente agregando reactancia de fuente.
- Puede adquirir varios valores de porcentaje de impedancia según las necesidades.
- Proporciona una mayor protección de entrada para VFD y sus semiconductores contra transitorios de línea.
- Puede usarse en combinación con reactores de línea y transformadores para cancelación de armónicos Fuente: Blooming, Carnovale, Dionise (s.f. p. 4).

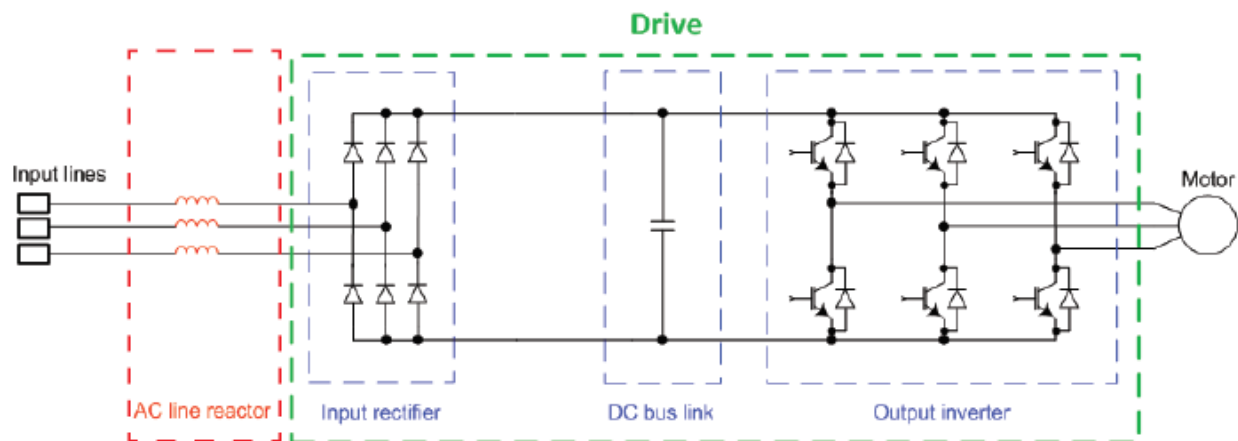
### **Desventajas**

- Los transformadores de factor K por sí mismos son un método para "vivir con" armónicos, pero no reducirán significativamente los armónicos en comparación con la solución de reactor menos costosa.
- Puede que no reduzca los niveles de armónicos por debajo de las pautas IEEE 519. Fuente: Blooming, et al, (s.f. p. 4).

### **Reactores de línea**

Más comúnmente utilizado por tamaño y costo, el reactor de línea es la mejor solución para la reducción de armónicos en comparación con un transformador de aislamiento. Los convertidores de frecuencia de CA que utilizan rectificador de puente rectificadores de diodos de frente activo son los más adecuados para reactores de línea. Los reactores de línea (comúnmente denominados inductores) están disponibles en rangos de impedancia de 3% y 5%. (Square D, 1994, p. 7).

Figura 27: Ubicación del reactor de línea AC



Fuente: The Advantages of DC Chokes versus AC Line Reactors (2018).

### Cálculo para inductor de entrada (reactancia de entrada)

Para Streicher (s.f): “En términos de valores de impedancia, normalmente encontrar que entre 3% a 5% es la norma y la mayoría se acerca a 3%” (p 2.).

Ecuación: Fórmula para el porcentaje de impedancia

$$Z\% = \frac{I_L * 2\pi f * L * \sqrt{3}}{V_{L-L}} * 100 \quad (31)$$

Fuente: MTE Manual Reactancias.

Donde:

VL-L: Voltaje de Línea-Línea (V).

IL: Corriente del reactor (A).

F: Frecuencia (Hz).

L: Inductancia en (mH).

## Ventajas

- Puede proporcionar una reducción moderada de voltaje y armónicos de corriente.
- Disponible en varios valores de porcentaje impedancia.
- Proporciona una mayor protección de entrada para VFD y sus semiconductores de transitorios de línea.

## Desventajas

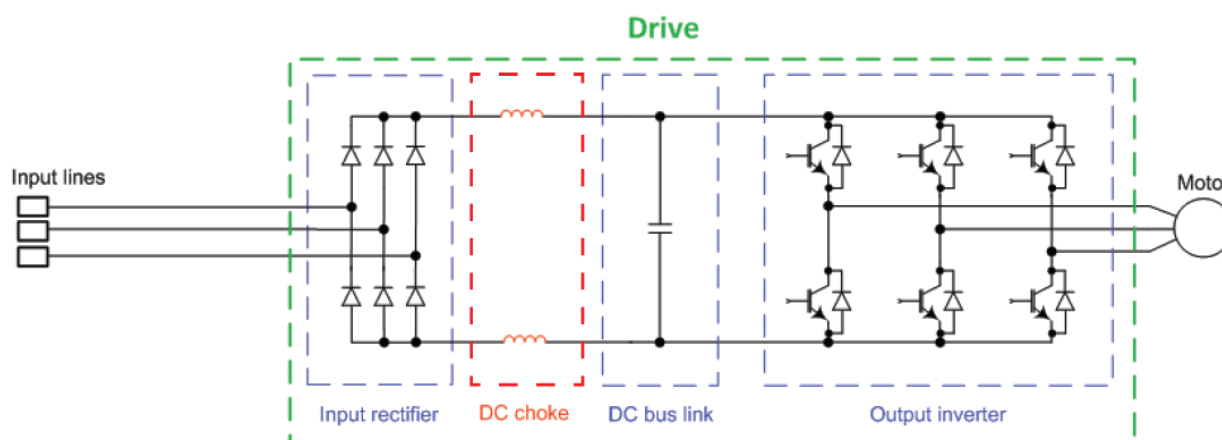
- Puede requerir un montaje separado o un gabinete VFD más grande.
- Puede que no reduzca los niveles de armónicos por debajo de las pautas IEEE 519

Fuente: Blooming et al (s.f. p. 4).

## Reactancias Bus DC

Al igual que un reactor de línea de CA, un inductor de bus de CC limita el valor pico de la corriente de línea (suministro), ello mitiga los armónicos transmitidos desde la línea, especialmente, los armónicos quinto y séptimo. Esto es importante porque los armónicos quinto y séptimo son los principales contribuyentes a la distorsión armónica de corriente total, y los choques de bus de CC atenúan mejor estos armónicos que los reactores de línea de CA.

Figura 28: Ubicación de una Inductancia de DC



Fuente: The Advantages of DC Chokes versus AC Line Reactors (2018).

### **Cálculo para inductor de salida**

La fórmula para el porcentaje de Impedancia de la inductancia de salida es:

Ecuación: Fórmula para Z% de inductancia de salida

$$Z\% = \frac{I_L * 2\pi f * L * \sqrt{3}}{\frac{V_{L-L}}{2}} * 100 \quad (32)$$

Fuente: Boletín Técnico Rockwell Automation (s.f.).

Donde:

VL-L: Voltaje de Línea-Línea (V).

IL: Corriente del reactor (A).

F: Frecuencia (Hz).

L: Inductancia en (mH).

### **Ventajas**

- Puede proporcionar una reducción moderada en los armónicos de voltaje y corriente.
- Menor caída de voltaje que un reactor de línea equivalente.

### **Desventajas**

- Menos protección que otros métodos para los semiconductores de entrada VFD.
- No puede reducir los niveles de armónicos por debajo de las pautas IEEE Std. 519.
- No disponible como opción para muchos VFD (Blooming, et al, s.f. p. 5).

### **Filtros pasivos sintonizados**

Para Harper (2001): “Un filtro lineal está compuesto de componentes lineales, tales como inductores y capacitores, estos dejan pasar la frecuencia eléctrica básica y atenúan otras frecuencias, las cuales pueden presentarse en forma de ruido” (p. 106).

Usado en aplicaciones con una alta relación no lineal al sistema para eliminar corrientes armónicas. Con base en Square (1994): “Los filtros se ajustan a un armónico específico, como el 5°, 7°, 11°, etcétera. Además, los filtros de sintonizados de armónicos proporcionan una verdadera corrección del factor de potencia de distorsión. Los filtros se pueden diseñar para varias cargas no lineales o para una carga individual” (p. 8).

De la Rosa (2006) indica que:

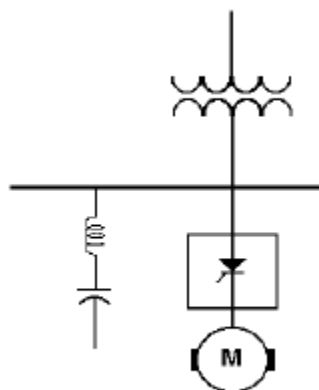
Debido a que los filtros pasivos siempre brindan compensación reactiva en un grado dictado por el tamaño de potencia y el voltaje del banco de capacitores utilizado, de hecho, pueden diseñarse con el doble propósito de proporcionar la acción de filtrado y compensar el factor de potencia al nivel deseado. Si se utiliza más de un filtro, por ejemplo, conjuntos de ramas 5 y 7 o 11 y 13, será importante recordar que todos ellos proporcionarán una cierta cantidad de compensación reactiva (p. 94).

La mejor ubicación para colocar un filtro pasivo sintonizado es cerca de la carga generadora de armónicos.

### Filtros paralelos o shunt

Los Filtros Shunt o paralelo proveen un paso alternativo de muy baja impedancia para las frecuencias armónicas, y consisten en una rama resonante serie, compuesta por elementos RLC en conexión paralela con el sistema de alimentación, entre otros. (Harper, 2001, p. 107)

Figura 29: Filtro Paralelo Pasivo



Fuente: Distorsión armónica (s.f.).

## Cálculos para diseñar un filtro pasivo.

### Frecuencia de sintonía

Para De la Rosa, 2006: “La frecuencia de sintonía o frecuencia de resonancia serie, es aquella en la que la impedancia del filtro se hace cero, provocando que las corrientes de esa frecuencia fluyan en su totalidad a través de él” (p. 94).

Ecuación: Fórmula para frecuencia de resonancia

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (33)$$

Fuente: De la Rosa (2006).

Donde:

$f_0$  = frecuencia de resonancia (Hz).

L = inductancia del filtro (H).

C = capacitancia del filtro (F).

### Factor de calidad

Los valores típicos del factor de calidad fluctúan entre 15 y 80 para los filtros que se utilizan en la industria. (De la Rosa, 2006, p. 95).

Ecuación: Fórmula del factor de calidad

$$Q_f = \frac{n * X_L}{R} = \frac{X_c}{n * R} \quad (34)$$

Fuente: De la Rosa (2006).

Donde:

$X_L$ : Reactancia inductiva ( $\Omega$ ).

$X_C$ : Reactancia Capacitiva ( $\Omega$ ).

R: Resistencia ( $\Omega$ ).

$n$  : Número de Armónica Armónico Afinado.

### Relación de Reactancia inductiva y reactancia capacitiva

Ecuación: Fórmula para obtener la relación entre la reactancia inductiva y capacitiva.

Ecuación: Fórmula de armónica de resonancia

$$h = \sqrt{\frac{X_c}{X_l}} \quad (35)$$

Fuente: De la Rosa (2006).

Donde:

h: Número de armónico.

$X_L$ : Reactancia inductiva ( $\Omega$ ).

$X_C$ : Reactancia Capacitiva ( $\Omega$ ).

### Potencia reactiva

Ecuación: Fórmula de la reactancia capacitiva

$$Q_c = \frac{V^2}{X_c} * \frac{n^2}{(n^2 - 1)^2} \quad (36)$$

Fuente: De la Rosa (2006).

Donde:

$Q_c$ : Potencia reactiva (VAR).

V: Voltaje nominal (V).

XC: Reactancia Capacitiva ( $\Omega$ ).

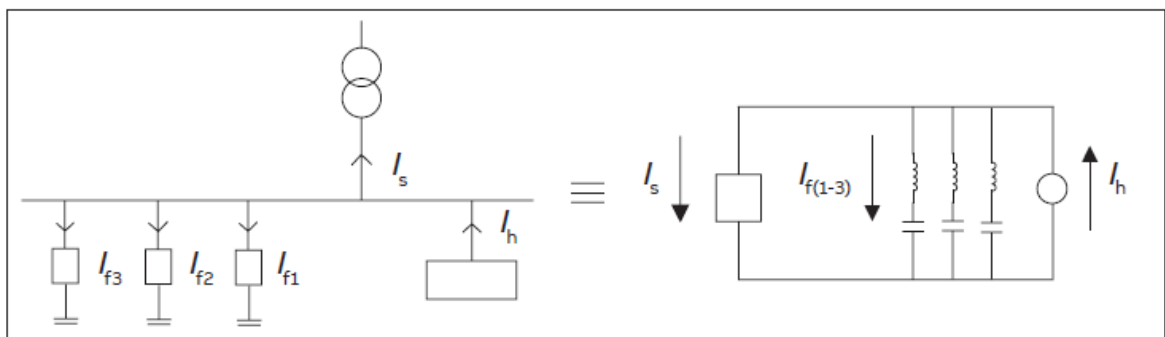
$n$  : Número de Armónica.

### Filtro pasivo de brazos múltiples sintonizado

Este filtro tiene varios brazos sintonizados a dos o más de los componentes armónicos que deberían ser los más bajos frecuencias armónicas significativas en el sistema. El filtro múltiple tiene una mejor absorción de armónicos que el sistema de un brazo.

Los filtros pasivos de brazos múltiples se utilizan a menudo para grandes instalaciones de variadores de CC. donde un transformador dedicado alimenta toda la instalación (ABB DRIVES, s.f. p 20.).

Figura 30: Filtro Pasivo de Múltiples Brazos



Fuente: Guía técnica N°6 armónicos con AC drives (s.f.).

### Ventajas

- Permitir un mayor porcentaje de cargas del sistema VFD que los reactores de línea y los estranguladores.
- Proporciona corrección del factor de potencia.

- Un solo filtro puede compensar múltiples unidades.

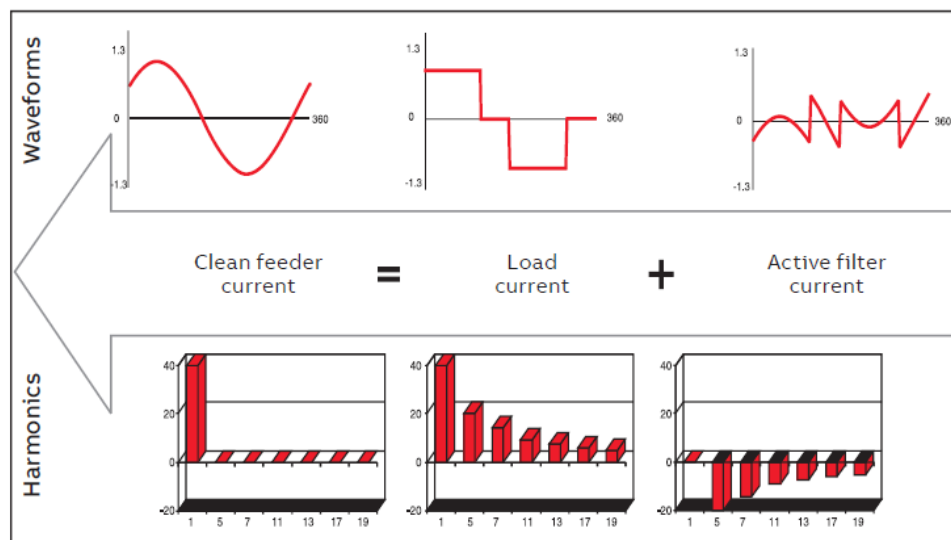
### Desventajas

- Mayor costo.
- Se requiere un dispositivo de protección y montaje separado (disyuntor / fusible).
- Es posible que no reduzca los niveles de armónicos por debajo de las pautas IEEE 519.
- Es necesario tener cuidado en la aplicación para garantizar que el filtro no se sobrecargue.
- Es necesario tener cuidado en la aplicación para garantizar que la sobrecompensación no aumente significativamente el voltaje. Fuente: Blooming, et al (s.f. pp. 6-7).

### Filtros activos

Un filtro activo compensa los armónicos generados por cargas no lineales mediante generando los mismos componentes armónicos en fase opuesta (ABB DRIVES, s.f. p 21).

Figura 31: Filtro Activo

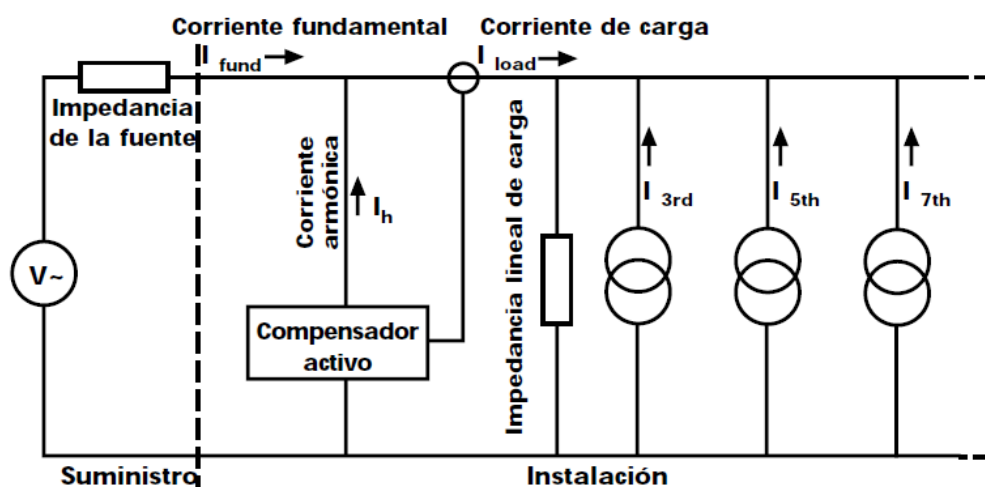


Fuente: Guía técnica N°6 armónicos con AC drives (s.f.).

Basados en Karve (2001):

El filtro activo es un dispositivo conectado en paralelo. Un transformador de intensidad mide el contenido de armónicos de la corriente de carga y controla un generador de corriente que produce una réplica exacta de los mismos de signo opuesto, que es enviada a la fuente de alimentación en el ciclo siguiente. Como la corriente armónica es compensada por el filtro activo, sólo la corriente fundamental procede de la fuente de alimentación (p. 2).

Figura 32: Compensador activo de armónicos



Fuente: Compensadores activos de armónicos (2001).

### Cálculo de un filtro activo

De acuerdo con Porras (2014), en su tesis: Diagnóstico de la calidad de la energía y evaluación de las instalaciones eléctricas en la Represa Hidroeléctrica Pirrís: “Para el dimensionamiento del filtro activo es necesario conocer las magnitudes de corriente que deberá aportar. Este tipo de filtros aportan tanto la corriente para la corrección de armónicos (hasta armónico 50) como la corriente reactiva necesaria para corregir el factor de potencia” (p.151). Primero calculamos la corriente armónica necesaria para el filtro, para realizar este cálculo utilizaremos los resultados de las mediciones mediante la normativa de ARESEP, mostrados en la sección 5.2 de este documento, con un THDI máximo de 8,3%,  $I_L=159,7$  A:

Figura 33: Fórmula de la corriente armónica

$$I_H = \frac{I_L}{\sqrt{\frac{1}{THDI^2} + 1}} = 13,2 A$$

Donde:

$I_H$ : Corriente armónica (A).

$I_L$ : Corriente fundamental (A).

THDI: Distorsión armónica total de corriente.

Ahora se estima la corriente necesaria para compensar los 35 KVAR que absorbe la carga, asumiendo un factor de potencia objetivo de 0,93.

Figura 34: Fórmula de la corriente Reactiva

$$I_R = \frac{Q_c}{\sqrt{3} * V_{L-L}} = 42,1 A$$

Donde:

$I_R$ : Corriente reactiva (A).

$Q_c$ : Potencia reactiva capacitiva (VAR).

$V_{L-L}$ : Voltaje de línea a línea (V).

Finalmente, se calcula la capacidad del filtro requerido:

Figura 35: Fórmula de la corriente de diseño del filtro.

$$I_{Filtro} = \sqrt{I_H^2 + I_R^2} = 44,1 A$$

Donde:

$I_F$ : Corriente Filtro (A).

$I_R$ : Corriente reactiva (A).

$I_H$ : Corriente armónica (A).

De esta forma podemos elegir el tamaño de filtro activo disponible en el mercado con valor superior más cercano al obtenido, el cual es de 50 A, de marca Schneider, aunque otras marcas, como Eaton tienen un valor mínimo de 60 A.

### **Ventajas**

- Garantiza el cumplimiento de IEEE 519 si se dimensiona correctamente.
- La unidad de derivación no se puede sobrecargar incluso si se agregan cargas armónicas futuras.
- Cancelación de armónicos del 2° al 50° armónico.
- La unidad conectada en derivación proporciona una instalación sencilla sin necesidad de realizar modificaciones importantes en el sistema.
- Proporciona corrientes reactivas (VAR) que mejoran el factor de potencia del sistema.
- Puede diseñarse en un centro de control de motores para compensar varios VFD.

### **Desventajas**

- Según Carnovale, Dionise y Blooming, una de las desventajas de los filtros activos son los efectos creados por la etapa de generación de corriente, estos filtros usan IGBT y, por la frecuencia de conmutación de estos semiconductores, generan armónicas que rondan los 2 kHz.
- Normalmente más caro que otros métodos debido a las secciones de potencia y control de alto rendimiento. Fuente: Blooming, et al (s.f. p. 8).

## Variadores de frecuencia multi pulsos

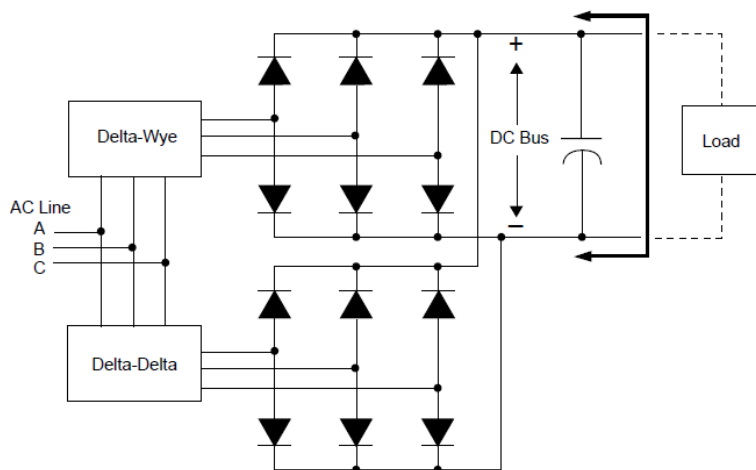
### Convertidor de 12 pulsos.

En esta configuración, el extremo frontal del circuito rectificador de puente utiliza doce diodos en lugar de seis. Las ventajas son la eliminación de los armónicos  $5^{\circ}$  y  $7^{\circ}$  a un orden superior donde el  $11^{\circ}$  y  $13^{\circ}$  se convierten en los armónicos predominantes. Esto minimizará la magnitud de los armónicos, pero no los eliminará.

De acuerdo con Square (1994):

Las desventajas son el costo y la construcción, que también requiere un transformador Delta-Delta y Delta-Wye, un transformador “Zigzag” o un autotransformador para lograr el cambio de fase de  $30^{\circ}$  necesario para una operación adecuada. Esta configuración también afecta la clasificación de eficiencia general del sistema de variadores debido a la caída de voltaje asociada con el requisito de configuración del transformador (p. 6).

Figura 36: Diagrama Variador de Frecuencia de 12 Pulsos



Fuente: Power System Harmonics Causes and Effects of Variable Frequency Drives (1994).

### Desplazamiento de fase en transformadores Estrella-Delta.

Los voltajes y corrientes de secuencias positiva y negativa sufren un desfase al pasar por un transformador estrella-Delta, que depende de la identificación de las terminales.

Ecuación: Desplazamiento de fase

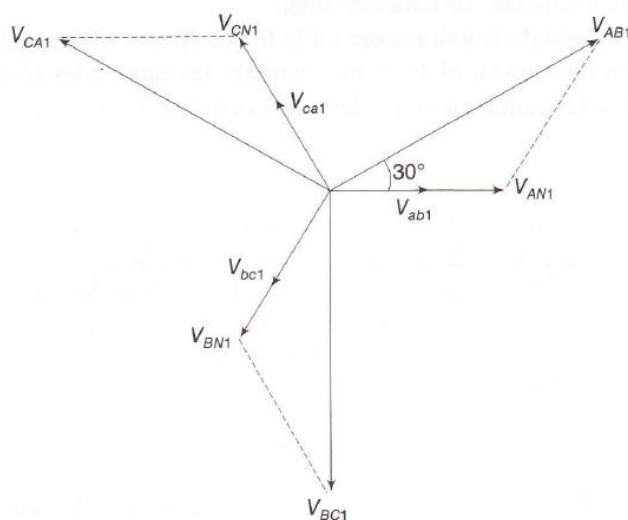
$$V_{AB1} = x V_{ab1} \quad < 30^\circ, x = \text{razón de transformación de fase} \quad (37)$$

Fuente: Sistemas eléctricos de potencia (2008).

Los voltajes de línea en secuencia positiva en el lado de la estrella están 30° adelantados a los voltajes correspondientes en el lado de la delta se aplicaría el mismo resultado a los voltajes de línea a neutro en los dos lados.

Para Kothari, Nagrath (2008): “El desfaseamiento con secuencia negativa, en comparación con el caso de secuencia positiva, se invierte, es decir, las cantidades en el lado de la estrella se adelantan 30° a las cantidades en el lado de la delta” (p. 392).

Figura 37: Voltajes de Secuencia Positiva en un Transformador Estrella/Delta

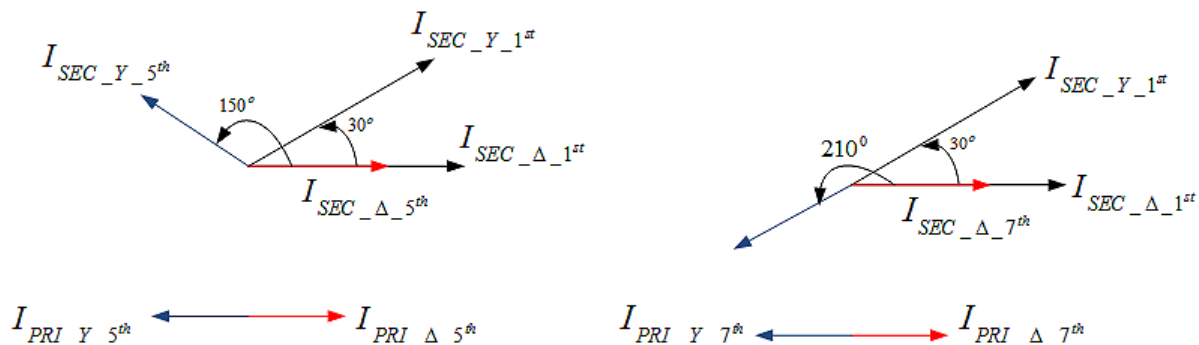


Fuente: Sistemas eléctricos de potencia (2008).

### Cancelación de armónicos 5 y 7 con desplazamiento de fase

De acuerdo con Rockwell Automation (2014): “Los armónicos de corriente de línea predominantes en un rectificador trifásico de 6 pulsos son los armónicos quinto y séptimo de la fundamental. En un sistema de 12 pulsos, los armónicos 5° y 7° se cancelan como se muestra en el diagrama fasorial de la Figura 38. Luego, los armónicos dominantes son el 11° y 13°, que son significativamente más bajos en amplitud que el 5° y 7°” (p.13).

Figura 38: Cancelación de las Armónicas 5 y 7 en Variadores de 12 Pulsos



Fuente: Application Guidelines for 12-Pulse Operation of Power Flex 750-Series AC

Drives (2014).

Para Arrillaga y Watson (2003):

Si los devanados trifásicos primario o secundario del transformador convertidor están conectados en triángulo, las formas de onda de la corriente del lado de primario consisten en las diferencias instantáneas entre dos corrientes secundarias rectangulares separadas por  $120^\circ$ . La serie de Fourier de la forma de onda, la cual se muestra en la Figura 39, se puede obtener fácilmente, a partir de la ecuación superponiendo los resultados de los pulsos de dos componentes de anchos  $\pi$  y  $\pi/3$ , respectivamente (p.38).

Además, para mantener los mismos voltajes primario y secundario que para la conexión estrella-estrella, se introduce un factor de  $\sqrt{3}$  en la relación del transformador.

Figura 39: Serie de Fourier de las corrientes de un transformador Estrella- Estrella

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left( \cos(\omega t) - \frac{1}{5} \cos(5\omega t) + \frac{1}{7} \cos(7\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) \right. \\ \left. + \frac{1}{13} \cos(13\omega t) - \frac{1}{17} \cos(17\omega t) + \frac{1}{19} \cos(19\omega t) \dots \right)$$

Fuente: Power System Harmonics (2003).

Figura 40: Serie de Fourier de las corrientes de un transformador Delta-Estrella

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left( \cos(\omega t) + \frac{1}{5} \cos(5\omega t) - \frac{1}{7} \cos(7\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) \right. \\ \left. + \frac{1}{13} \cos(13\omega t) + \frac{1}{17} \cos(17\omega t) - \frac{1}{19} \cos(19\omega t) \dots \right)$$

Fuente: Power System Harmonics (2003).

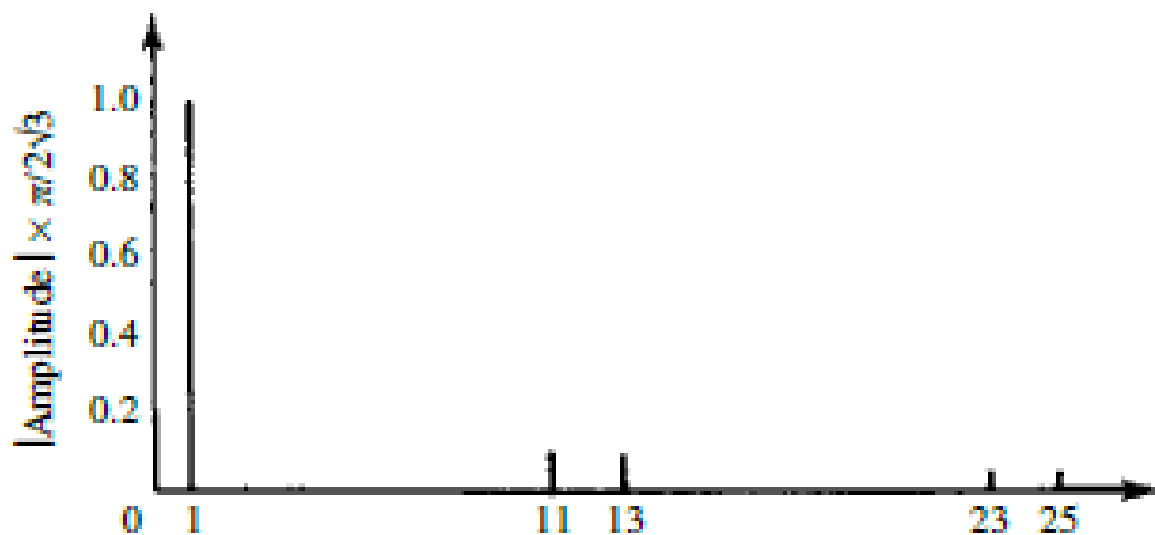
La corriente resultante está dada por la suma de las dos series de Fourier de los transformadores estrella-estrella figura (40) y delta-estrella figura (41), es decir:

Figura 41: Corriente resultante de la suma de las dos corrientes del transformador en el lado primario.

$$(i_a)_{12} = 2 \left( \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \right) I_d \left( \cos(\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \frac{1}{13} \cos(13\omega t) \right. \\ \left. - \frac{1}{23} \cos(23\omega t) + \frac{1}{25} \cos(25\omega t) \dots \right)$$

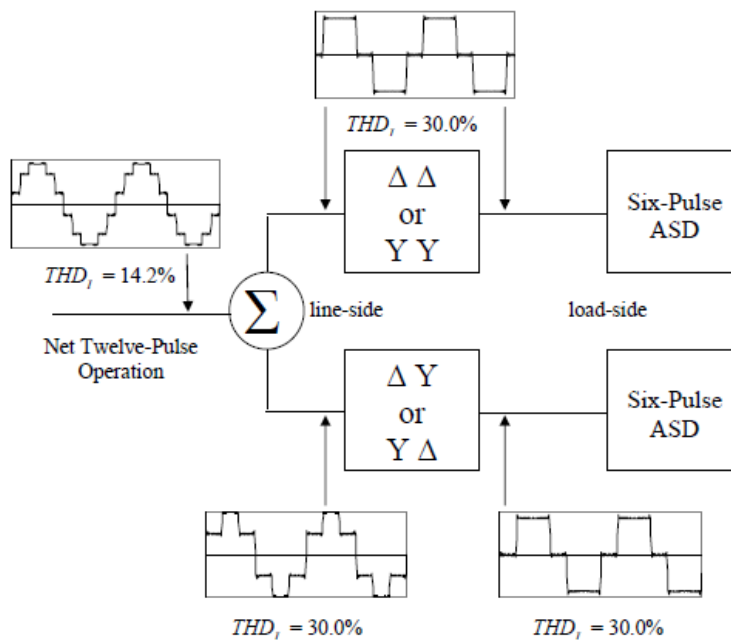
Fuente: Power System Harmonics (2003).

Figura 42 Representación en el Dominio de la Frecuencia para un Rectificador de 12 Pulsos.



Fuente: Power System Harmonics (2003).

Figura 43: Ejemplo de Reducción Armónica en un Variador de Frecuencia Multi pulso.



Fuente: Mack Grady (2012).

### **Ventajas**

- El costo puede ser bajo o alto según la implementación.
- Proporciona una reducción sustancial (50-80%) en los armónicos de voltaje y corriente.
- Proporciona una mayor protección de entrada para AFD y sus semiconductores contra transitorios de línea.

### **Desventajas**

- El costo puede ser bajo o alto según la implementación.
- La adaptación de impedancia de las fuentes con desfase es fundamental para el rendimiento.
- La cancelación máxima se produce solo si la carga de la unidad está equilibrada.
- Los transformadores requerirán un montaje separado.
- Es posible que no reduzca los niveles de armónicos por debajo de las pautas IEEE 519.

Fuente: Blooming, et al (s.f. p. 5).

### **Convertidor IGBT Frente activo (AFE)**

La introducción de un puente rectificador, hecho de componentes auto conmutados, brinda varios beneficios y oportunidades en comparación con los conmutados de fase. Como un rectificador controlado por fase, una unidad de suministro activo permite tanto la rectificación como regeneración, pero permite controlar el nivel de tensión CC y factor de potencia de desplazamiento por separado independientemente de la dirección del flujo de potencia (ABB DRIVES p. 18.).

Un AFE no muestra componentes de corriente de entrada de armónicos bajos como puentes de diodos pasivos. La distorsión armónica total de las corrientes de entrada THDi está significativamente por debajo del 5% y, generalmente, se halla en el mismo rango que la distorsión de la tensión de alimentación. Debido a las acciones de conmutación del sistema de convertidor activo para dar forma a la corriente de entrada, el AFE genera voltajes de ruido a la frecuencia de conmutación, que está en el rango de varios kHz (ABB DRIVES p. 18.).

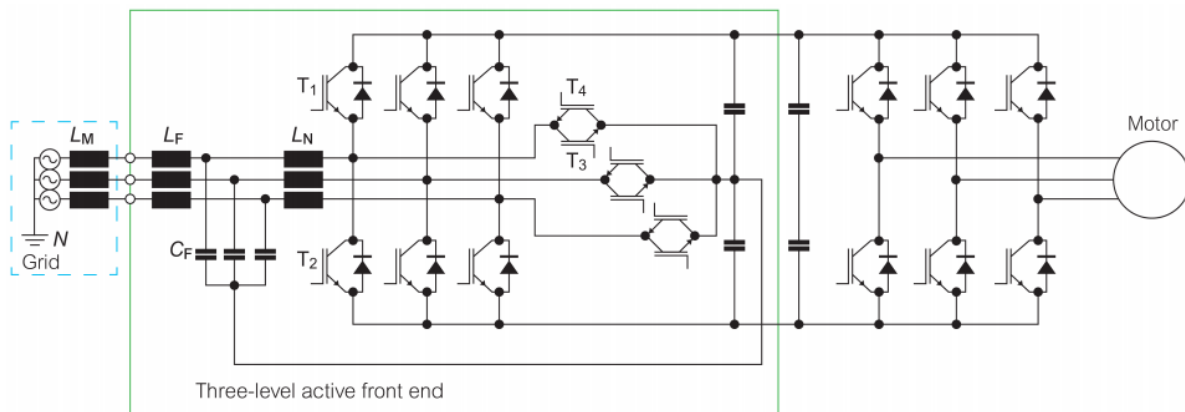
## IGBT

Es un transistor de potencia, controlado por una tensión aplicada a un electrodo llamado puerta «gate» aislada del circuito de potencia, de ahí su nombre «Insulated Gate Bipolar Transistor».

Con base en Hartmann (2016):

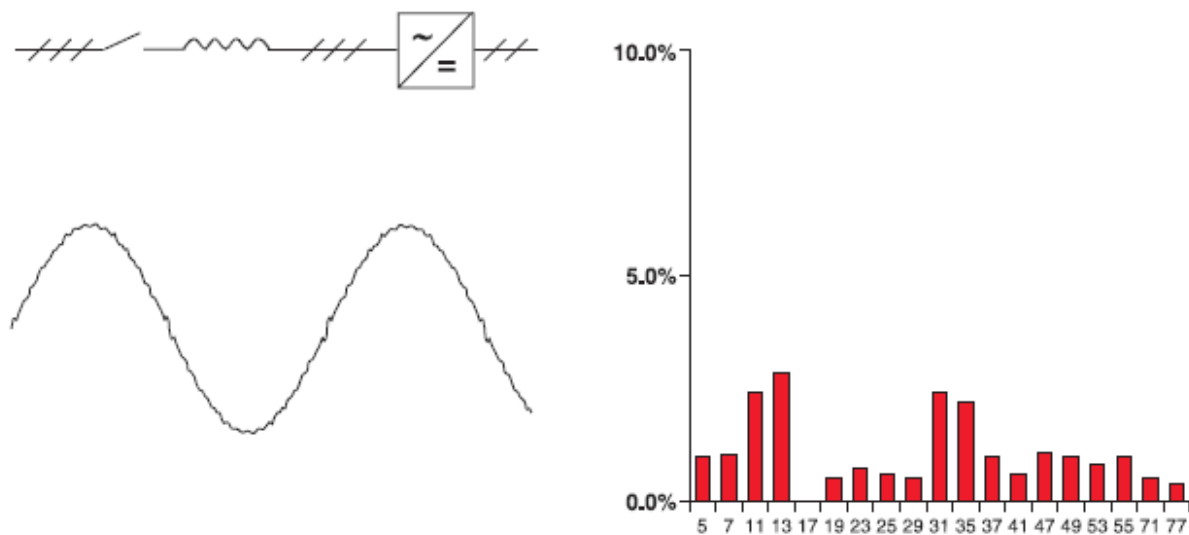
Este componente necesita una energía mínima para hacer circular corrientes importantes. Actualmente es el componente que se utiliza como interruptor «todo o nada» en la mayor parte de convertidores de frecuencia hasta potencias elevadas (del orden de MW). Sus características tensión-corriente son similares a las de los transistores bipolares, pero sus prestaciones en energía de mando y la frecuencia de conmutación son muy superiores a todos los otros semiconductores. Las características de los IGBT avanzan muy rápida y actualmente hay modelos disponibles para alta tensión ( $> 3 \text{ kV}$ ) y grandes corrientes (varios centenares de amperios) (p. 2).

Figura 44: Partes de un Variador de Frecuencia AFE



Fuente: Highly efficient Active Front End enables trouble-free operation of low harmonic drives Michael Hartmann (2016, p.2).

Figura 45: Armónicos de corriente en fuente activa



Fuente: ABB DRIVES (p. 18).

### Ventajas

- Con dispositivos AFE es posible el funcionamiento en cuatro cuadrantes, lo que significa que la potencia de frenado del motor puede devolverse al sistema de la red

### Desventajas

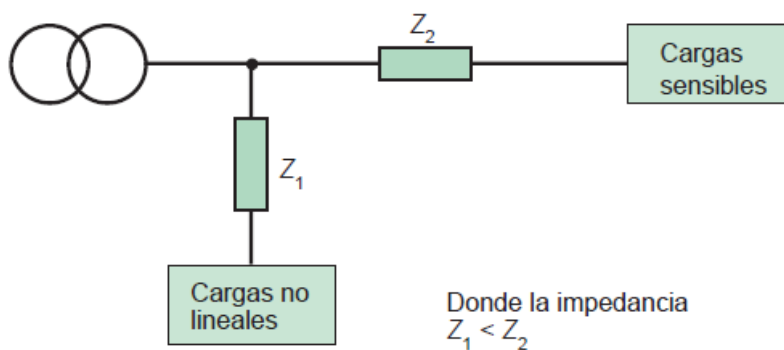
- La complejidad técnica de los dispositivos es muy alta, lo que conlleva costes de inversión muy elevados
- En principio, los dispositivos AFE se componen de dos convertidores de frecuencia, uno de ellos suministrando potencia al motor y otro al sistema de la red. Dada la creciente complejidad del circuito, la eficiencia del convertidor de frecuencia es menor en el funcionamiento del motor
- Otra desventaja, es la frecuencia de conmutación utilizada por los dispositivos para la corrección de la corriente de entrada. Se sitúa en el rango de 3 a 6 kHz. Los dispositivos buenos (y relativamente complejos), filtran esta frecuencia de conmutación antes de devolverla el sistema de red

## Diseño del sistema de energía (optimización de diseños eléctricos)

### Instalación de las cargas no lineales aguas arriba en el sistema

Las perturbaciones armónicas generales aumentan a medida que disminuye la potencia de cortocircuito (Guía de diseño de instalaciones eléctricas p. 17).

Figura 46: Cargas no lineales colocadas lo más aguas arriba posible

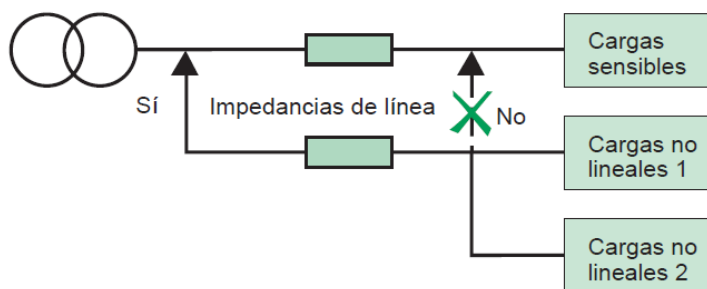


Fuente: Guía de diseño de instalaciones eléctricas (2010).

### Agrupación de las cargas no lineales

Al preparar el diagrama de una sola línea, los dispositivos no lineales deben separarse del resto (Schneider Electric, 2010, p. 17).

Figura 47: Agrupación de cargas no lineales



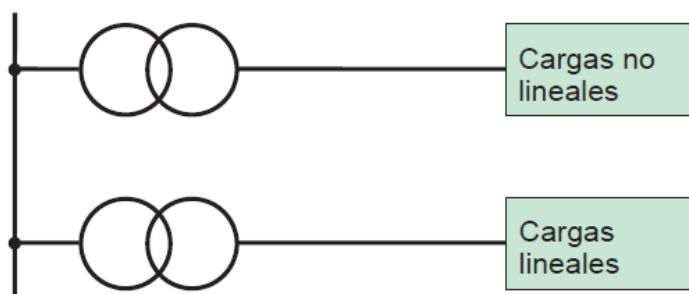
Fuente: Guía de diseño de instalaciones eléctricas (2010).

### Creación de fuentes separadas.

En el intento de limitar los armónicos, se puede obtener una mejora adicional alimentando las cargas no lineales desde una fuente independiente del resto de cargas de la instalación.

Según Schneider Electric (2010): “La desventaja es un aumento del coste de la instalación” (p. 18).

Figura 48: Alimentación independiente de cargas no lineales.



Fuente: Guía de diseño de instalaciones eléctricas (2010).

### Criterios técnicos para selección de una solución para distorsión armónica

Las soluciones adecuadas dependen de numerosos factores.

Según Presentación Eaton Electrical (s.f.): “La mejor solución se determina a partir de un sistema completo análisis considerando todos los métodos de filtrado disponibles” (p. 53).

Ampliando sobre el comentario en la Presentación de Eaton Electrical, se pueden agregar y explicar los criterios técnicos para seleccionar los equipos, el número de variadores de frecuencia es un buen aspecto para tomar en cuenta, si solamente es un variador de frecuencia se puede colocar un reactor de línea o cambiar a un variador de frente activo, si la cantidad de variadores de frecuencia es amplia lo mejor es tomar en cuenta un filtro activo o un filtro pasivo para todos los equipos.

Si la construcción es nueva o existente, es un aspecto de gran relevancia para seleccionar un equipo para mitigar los armónicos, se debe tomar en cuenta las dimensiones y el espacio disponible para instalar el dispositivo.

Con base en el tipo de instalación, se decide cuáles son las opciones viables para mitigar los armónicos, si es una instalación donde el variador de frecuencia trabaja solo sin posibilidad de afectar otras cargas es considerable utilizar un reactor de línea, un reactor de d.c. o un filtro pasivo.

Para la misma Presentación Eaton Electrical (s.f.): “Se debe tomar en consideración si la instalación eléctrica tendrá nuevas modificaciones o ampliaciones para ello lo mejor es optar por un filtro activo con un diseño considerando este crecimiento futuro de la carga” (p. 54).

El valor de equipo es uno de los puntos más importantes, las inversiones por equipos para mitigar los armónicos son de un costo considerable y se debe justificar adecuadamente con un estudio de armónicos y tomar en cuenta la ubicación de estos equipos.

1. Número de VFD (Variador de frecuencia).
2. Construcción nueva o existente.
3. Tipo de instalación.
4. Crecimiento futuro.
5. Valor del equipo.

## **Normativas**

### **ARESEP**

La Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP) es una institución pública, creada por medio de la Ley 7593 en 1996, con el fin de armonizar las necesidades de los usuarios o consumidores con los intereses de los prestadores y velar porque estos servicios se brinden de forma óptima (calidad, continuidad, oportunidad, confiabilidad y precio).

### **AR-NT-SUCAL: Supervisión de la calidad del suministro eléctrico en baja y media tensión.**

#### **Artículo 12. Tensiones armónicas**

En condiciones normales de explotación, para cada período de siete días consecutivos, el 95 % de los valores eficaces de cada tensión armónica promediados en 10 minutos, no debe sobrepasar el 3% del valor de tensión nominal. Además, la tasa de distorsión armónica total de la tensión (TDA) suministrada (comprendidos todos los armónicos hasta el orden 20) no debe sobrepasar el 5%.

Ecuación: Fórmula para la Distorsión armónica de tensión

$$TDA = \sqrt{\sum_{h=2}^{20} (v_h)^2} \quad (38)$$

Fuente: Documento técnico AR-NT-SUCAL (2016).

Dónde:

$V_h$  es la amplitud relativa de la tensión armónica de orden  $h$ , en relación con la fundamental  $V_f$ , hasta la armónica individual número 20. Los valores aquí señalados corresponden a los límites de tensiones armónicas de la tensión de servicio, siempre y cuando, el abonado o usuario cumpla con las condiciones de corrientes armónicas contempladas en el artículo 13.

### Artículo 13. Corrientes armónicas

Las empresas eléctricas velarán porque los abonados o usuarios de tipo industrial y general, con servicios trifásicos ajusten sus instalaciones y equipamiento con el fin de que la distorsión armónica de la corriente en el punto de entrega se encuentre dentro de los límites establecidos en la figura 44:

Figura 49: Límites de distorsión armónica de corriente para usuarios del servicio

<b>LÍMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE CORRIENTE PARA USUARIOS CONECTADOS EN REDES GENERALES DE DISTRIBUCIÓN.</b>				
<b>(Tensión de 120 a 69000 Volt)</b>				
<b><math>I_{sc}/I_L</math></b>	<b><math>h &lt; 11</math></b>	<b><math>11 \leq h &lt; 17</math></b>	<b><math>17 \leq h &lt; 20</math></b>	<b>TDD</b>
<20	4.0	2.0	1.5	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	20.0

Fuente: Documento técnico AR-NT-SUCAL (2016).

Donde:

h: Orden de la armónica.

Isc: Máxima corriente de cortocircuito en el punto de entrega (punto de acople común).

IL: El valor rms de la máxima corriente activa demandada por la carga durante el período de medición.

TDA: Tasa de distorsión armónica total de la tensión.

TDD: Tasa de distorsión total de corriente, como un porcentaje de la máxima corriente activa demandada por la carga.

La tasa de distorsión total de la corriente (TDD) se calculará utilizando la siguiente fórmula:

Ecuación: Fórmula de la Distorsión de corriente total

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{20} (ih)^2}}{I_1} \quad (39)$$

Fuente: Documento técnico AR-NT-SUCAL (2016).

Donde:

Ih: El valor rms de la corriente activa armónica individual de orden h.

iL: El valor rms de la máxima corriente activa demandada por la carga durante el período de medición.

Notas:

1. IL debe calcularse como el promedio de la máxima corriente demandada durante los doce últimos meses precedentes. Para un sistema trifásico, iL se calcula como:

Ecuación: Fórmula para la corriente demandada

$$I_L = \frac{KW_{demanda}}{\cos\phi * kV * \sqrt{3}} \quad (40)$$

Fuente: Documento técnico AR-NT-SUCAL (2016).

Donde:

$I_L$ : Corriente activa demandada (A).

$\cos\phi$ : Factor de potencia.

kV: Voltaje de línea a línea.

2. Los valores de distorsión para las armónicas de orden par deben limitarse al 25 % de los valores para las armónicas de orden impar.

3. No se admite componente DC.

### **IEEE 519-2014 Prácticas recomendadas por IEEE y Requisitos para el control de armónicos en Sistemas de energía eléctrica.**

#### **Alcance**

Esta práctica recomendada establece metas para el diseño de sistemas eléctricos que incluyen cargas lineales y no lineales. Se describen las formas de onda de voltaje y corriente que pueden existir en todo el sistema y se establecen los objetivos de distorsión de la forma de onda para el diseñador del sistema. La interfaz entre fuentes y cargas se describe como el punto de acoplamiento común y la observancia de los objetivos de diseño minimizará la interferencia entre equipos eléctricos.

#### **Propósito**

Esta práctica recomendada se utilizará como guía en el diseño de sistemas de potencia con cargas no lineales.

Los límites establecidos son para el funcionamiento en régimen permanente y se recomiendan para las condiciones del “peor caso”. Se pueden encontrar condiciones transitorias

que excedan estos límites. En cualquier caso, los valores límite indicados en este documento son recomendaciones y no deben considerarse vinculantes en todos los casos. Debido a la naturaleza de las recomendaciones, existe cierto conservadurismo que puede no ser necesario en todos los casos.

Esta práctica recomendada, debe aplicarse en los puntos de interfaz entre los propietarios u operadores del sistema y los usuarios del sistema eléctrico. Los límites de esta práctica recomendada están pensados para su aplicación en un punto de acoplamiento común (PCC) entre el propietario u operador del sistema y un usuario, donde el PCC, generalmente, se toma como el punto en el sistema de energía más cercano al usuario, donde el propietario del sistema o el operador podría ofrecer servicio a otro usuario.

De acuerdo con IEEE 519 (2014):

Con frecuencia, para el servicio a usuarios industriales (es decir, plantas de fabricación), a través de un transformador de servicio dedicado, el PCC se encuentra en el lado de alta tensión del transformador. Para los usuarios comerciales (parques de oficinas, centros comerciales y demás.) suministrados a través de un transformador de servicio común, el PCC se encuentra comúnmente en el lado de BT del transformador de servicio.

Se proporcionan límites de distorsión de voltaje armónico para reducir los posibles efectos negativos sobre el usuario y el equipo del sistema (p. 8).

Figura 50: Límites recomendados de armónicos de voltaje en el PCC

<b>Bus voltage <math>V</math> at PCC</b>	<b>Individual harmonic (%)</b>	<b>Total harmonic distortion THD (%)</b>
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5 <sup>a</sup>

Fuente: IEEE 519 (2014).

Figura 51: Límites de distorsión en corriente para sistemas entre 120 V a 69 KV

<b>Maximum harmonic current distortion in percent of <math>I_L</math></b>						
<b>Individual harmonic order (odd harmonics)<sup>a,b</sup></b>						
$I_{SC}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
<20 <sup>c</sup>	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Fuente: IEEE 519 (2014).

### **CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO.**

En este capítulo se presenta la metodología utilizada en la investigación, la cual incluye aspectos como el enfoque de la investigación, fuentes de información, variables de la investigación, técnicas e instrumentos de recolección de datos.

#### **Enfoque de la investigación**

Este proyecto se desarrolla desde el enfoque cuantitativo. El enfoque cuantitativo es secuencial y probatorio. Cada etapa precede a la siguiente y no se pueden eludir pasos. El orden es riguroso, aunque desde luego, se puede redefinir alguna fase.

Parte de una idea que va acotándose y, una vez delimitada, se derivan objetivos y preguntas de investigación, se revisa la literatura y se construye un marco o una perspectiva teórica. Con base en Hernández, Fernández y Baptista (2014): “De las preguntas se establecen hipótesis y determinan variables; se traza un plan para probarlas (diseño); se miden las variables en un determinado contexto; se analizan las mediciones obtenidas utilizando métodos estadísticos, y se extrae una serie de conclusiones respecto de la o las hipótesis” (pp. 4-5).

Realizar dos análisis para evaluar las opciones que ofrece el mercado, sobre un sistema o equipo para mitigación de armónicos, que sea adecuado para solucionar el problema de la distorsión armónica en las empresas.

#### **Método de la investigación**

El tipo de estudio a realizar será descriptivo, ya que este estudio permitirá analizar cómo son y como se manifiestan las armónicas.

Para poder generar una solución al problema planteado y conocer cuál es la solución más recomendable para proponer, se revisarán dos análisis de estudios de calidad de energía enfocados en armónicos realizado a uno o varios variadores de frecuencia.

Cuando se estudie los datos del análisis de calidad de energía y se logre determinar el porcentaje de distorsión armónica generado por el variador de frecuencia, se dará inicio al estudio y selección con base en los criterios de la solución más apropiada para el caso en estudio.

Analizando la situación de cada caso, se determinarán los pros y contras de cada equipo lo que nos dará una visión amplia para seleccionar la mejor opción para solucionar el problema

Se realizará una comparativa económica de las diferentes soluciones existentes en el mercado local, para lograr una propuesta formal y definitiva del proyecto.

### **Fuentes de investigación**

El presente trabajo de investigación cuenta con diversas fuentes para recolectar la información técnica. Con el fin de realizar un análisis correcto y acertado, dentro de las señaladas fuentes están las siguientes:

#### **Estudios de calidad de energía en variadores de frecuencia**

Se analizarán dos casos de estudios de calidad de energía brindados por dos empresas industriales diferentes realizados en variadores de frecuencia; cada uno de ellos serán indicados en el apartado de referencias bibliográficas de este proyecto.

Estos análisis se recolectaron en un tiempo de seis horas, en el caso #1 del estudio realizado en una empresa farmacéutica ubicada en Panamá; y en el caso #2. por un tiempo de 3:44 horas, efectuado en la empresa Bridgestone de Costa Rica.

#### **Manuales técnicos.**

Los manuales técnicos recopilados forman parte de la información técnica requerida para entender este proyecto; de tal modo, se incluyen manuales técnicos de variadores de frecuencia y soluciones para mitigación de armónicos.

## **Boletines Técnicos**

Los Boletines técnicos suplen una amplia cantidad de la información recopilada, los boletines técnicos constituyen información redactada por instituciones, ya sean nacionales como internacionales, por ejemplo, la Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Fabricantes de equipo electrónico de potencia y equipo para soluciones de calidad de energía como son; Schneider, Allen Bradley, ABB. Asimismo, nacionales, tal como el Boletín Técnico de Motor tico.

## **Antecedentes**

Los antecedentes mencionados en el capítulo 1, serán tomados en cuenta como fuente de información, entre las universidades que se tomaron en cuenta están la Universidad de Costa Rica, Tecnología de Costa Rica, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto Superior Minero Metalúrgico y la Universidad de San Carlos.

## **Normas**

Representan las normas técnicas por utilizar, estas medidas son de uso obligatorio para el desarrollo adecuado del cualquier proyecto. Estas son, principalmente, ARESEP SUCAL, la cual es la norma vigente en temas de calidad de energía e indica los valores mínimos de variables de calidad de energía los cuales se deben de cumplir en una red industrial. En temas de armónicos variable en estudio, este proyecto se basa en la IEEE 519, la cual es una recomendación técnica para el buen diseño eléctrico en temas de armónicos.

## **Libros técnicos**

Los libros técnicos son de gran ayuda para afirmar toda la información recopilada en los boletines técnicos y en los manuales técnicos abordados; dentro los libros que se tomaron en cuenta para obtener información están: libros exclusivos del tema de armónicos, libros de calidad de energía eléctrica y libros de máquinas eléctricas.

## **Variables o unidades de análisis**

Según Barrantes (2006): “Se entiende por variable todo rasgo, cualidad o característica cuya magnitud puede variar en individuos, grupos u objetos. Es todo aquello que se va a medir, controlar, y estudiar en una investigación” (p. 137).

1. Analizar las causas que generan las distorsiones eléctricas en la calidad de energía eléctrica de una industria.

Variable: Causas de las distorsiones eléctricas.

Indicador: Se estudiarán los equipos eléctricos monofásicos y trifásicos, los cuales causan estas distorsiones en la onda de alimentación.

Definición conceptual: Equipos eléctricos responsables causantes de estas distorsiones eléctricas.

Definición operacional: Por medio de estudios anteriores se determinará los equipos que son propensos a distorsionar la onda sinusoidal.

Definición instrumental: Se utilizará manuales técnicos, boletines técnicos, libros técnicos.

2. Identificar los efectos que generan los armónicos en una red eléctrica industrial.

Variable: Efectos de los armónicos en la red eléctrica.

Indicador: Se estudiarán los posibles efectos dañinos que produce tener armónicos en la red eléctrica a los conductores de alimentación y equipos eléctricos.

Definición conceptual: Efectos nocivos para la red eléctrica producidos por equipos generadores de distorsión armónica.

Definición operacional: Por medio de estudios anteriores se determinará los efectos que generan estas cargas a la red eléctrica.

Definición instrumental: Manuales técnicos, boletines técnicos, libros técnicos.

3. Establecer las ventajas y desventajas de cada una de las soluciones mencionadas en la presente investigación.

Variable: Ventajas y desventajas de cada solución.

Indicador: Por medio de un análisis técnico y monetario se determinan las ventajas y desventajas de cada solución.

Definición conceptual: Características técnicas de los equipos industriales a valorar

Definición operacional: Por medio de manuales técnicos de fabricantes y boletines técnicos y determinará las ventajas y desventajas entre las soluciones

Definición instrumental: Manuales técnicos, boletines técnicos.

4. Determinar los criterios relevantes para elegir un determinado amortiguador o eliminador de armónicos en un sistema de potencia.

Variable: Modelos y fabricantes.

Indicador: Cumpliendo con los objetivos requeridos en las normas indicadas.

Definición operacional: Por medio de los datos recolectados en las mediciones, analizar los puntos relevantes para seleccionar una solución adecuada.

Definición instrumental: Mediciones de calidad de energía a variadores de frecuencia (THD tanto de corriente como de voltaje, factor de cresta, factor K y voltajes de alimentación).

## **Instrumentos**

Los instrumentos para recolectar información son las distintas formas o maneras para obtener la información necesaria para realizar el estudio técnico y desarrollo de las propuestas a plantear

Entre los instrumentos que tenemos para recolectar datos son:

Analizadores de calidad de energía portátiles: se utilizará un medidor para detección de fallos en variadores de frecuencia, el MDA 550 de Fluke, con el cual se puede obtener, aparte de otras variables, la cantidad de distorsión armónica en el punto a medir.

Analizadores de calidad de energía fijos: se utilizarán los medidores de calidad de energía fijos que actualmente hay instalados en la planta para obtener los datos relacionados a armónicos, el modelo a utilizar es el medidor de calidad de energía marca Schneider CM4250.

Información técnica obtenida de internet, para realizar nuestro estudio y confirmar nuestros hallazgos en los estudios de calidad de energía realizados.

Visita a campo con el personal autorizado de la planta para valorar diversos factores que interactúan en proceso.

## **CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Para el análisis de resultados, se abarcarán dos casos de calidad de energía para demostrar en la práctica lo que se establece en la teoría, lo cual se realiza en dos plantas industriales diferentes; por tanto, se estudiarán de manera separada obteniendo diferentes soluciones, a partir de este momento vamos a llamar a cada caso como caso #1 y caso #2. Un estudio se realizó en una empresa de origen farmacéutica (caso #1), y el otro estudio se llevó a cabo en la empresa Bridgestone (caso #2).

### **Descripción de la empresa**

#### **Caso #1**

La empresa, en la cual se desarrolla la investigación ubicada en Panamá, es una entidad del mercado farmacéutico británica establecida desde los años 2000, por medio de una fusión entre dos empresas ya establecidas, muy reconocida en el ámbito médico y de complementos nutricionales.

### **Definición del diseño o problema a solucionar**

Con el estudio de investigación en ejecución se pretende mitigar el evidente problema de distorsión armónica que generan los variadores de frecuencia, en el mercado actual hay varias soluciones para este problema, pero se debe analizar aspectos importantes en cada estudio con el fin de seleccionar el equipo que sea efectivo y acomode de la mejor manera al sistema.

Se someterá a análisis tres posibles soluciones en el caso # 1 y 2 soluciones en el caso #2 para asegurar la mejor solución, para ello se están tomando en cuenta los criterios técnicos para seleccionar adecuadamente una solución de mitigación de armónicos, ventajas y desventajas técnicas de los equipos y los datos obtenidos de cada estudio como desbalance de voltaje y el THDi y THDv medidos.

### **Desarrollo caso #1**

En este análisis de armónicos realizado en Panamá, se llevó a cabo en setiembre del 2020 por un problema que se presentó en un equipo electrónico de medición de caudal por tecnología ultrasónica; de acuerdo con la investigación desarrollada, se indica en el marco teórico que uno de

los efectos nocivos de los armónicos son los problemas en equipos electrónicos, debido al paso por cero del voltaje.

Uno de los procesos más importantes de esta planta de producción está en el cuarto de purificación de agua para proceso. Así pues, para purificar el agua se pasa por diversos procesos y, cuando está lista para su uso, se envía a los diferentes cuartos de producción donde se utiliza para realizar los fármacos, el agua que no se utilice se debe recircular por medio de una bomba para evitar que se generen bacterias. Para evitar esto, se inyecta ozono al agua, la inyección de ozono depende del caudal que está pasando en ese momento por la tubería de retorno al sistema y el caudal se mide con un medidor de flujo ultrasónico no invasivo, el cual está instalado en la tubería y, por medio de una señal 4 a 20 mA (señal analógica), envía la señal al medidor de ozono para que se encargue de inyectar la cantidad adecuada al agua.

Al presentarse este problema durante su instalación y puesta en marcha, específicamente, se sospecha del variador de frecuencia que controla el motor de la bomba de recirculación marca Fristam; por ende, se procede a realizar el análisis de distorsión armónica con un equipo marca Fluke modelo MDA 550 especialmente diseñado para realizar mediciones de este tipo.

El modelo de la motobomba es el siguiente:

- Bomba Fristam modelo: FPX742-195. S/N: FPX74298228. Capacity: 51 gpm @ 110 psi.
- Motor eléctrico Marca Baldo de 15 hp 3500 rpm 230/460 V, 35/17.5 amps, 60 Hz, trifásico.

Figura 52: Fotografía de la placa del motor eléctrico

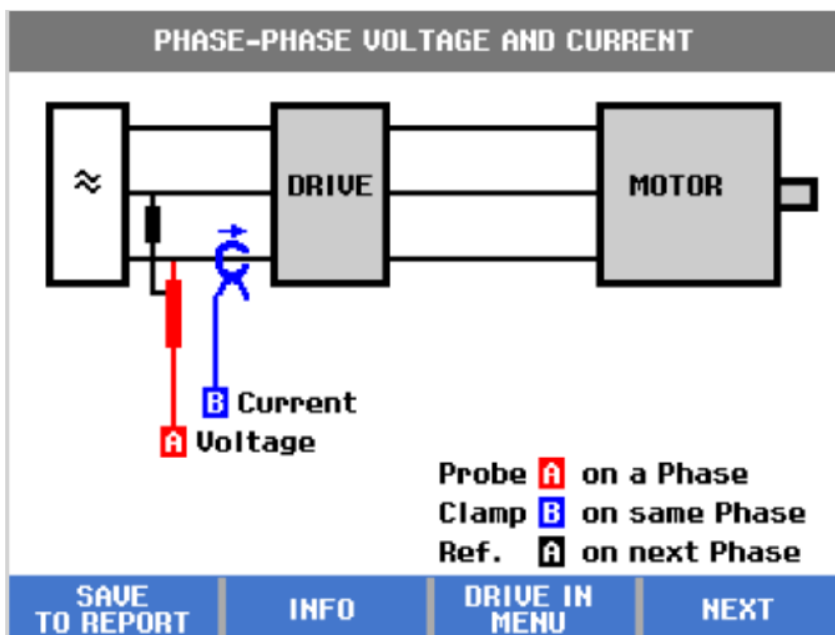


Fuente: Elvatron (2020).

El motor eléctrico, el cual está controlado por medio de un variador de frecuencia, se halla conectado a la red eléctrica de la empresa a 208 voltios trifásico 60 Hz.

Las mediciones se realizan en el *breaker* principal del variador de frecuencia modelo Power Flex 525 del fabricante Allen Bradley y se realizaron mediciones en las tres líneas L1 - L2 - L3, tanto en voltaje como en corriente, para efectuar un análisis detallado de que podría estar sucediendo y dar una solución al problema.

Figura 53: Demostración de instalación de pinzas de medición.



Fuente: Elvatron (2020).

Se deben tomar en consideración que las mediciones de voltaje son voltajes línea-línea y se grafican en color rojo y las de corriente en color azul.

Otro punto importante consiste en indicar que los valores de voltaje y corriente dados son RMS y en el estudio de armónicos graficado con barras se indica la corriente y voltaje fundamental indicado con “H1”.

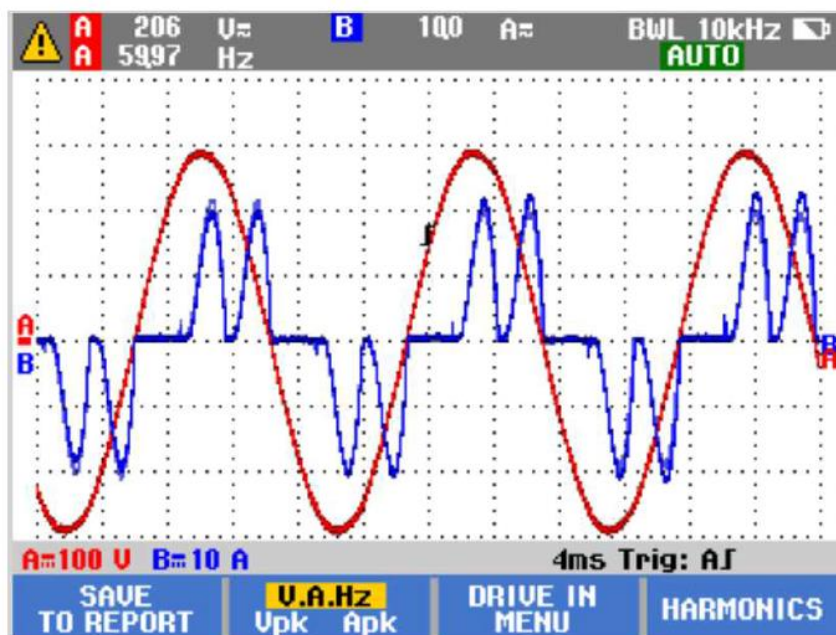
Por último, se debe mencionar que el valor de voltaje de la línea tres está erróneo por un fallo en el equipo de medición, ello se comprueba con la medición de corriente, la cual tiene valores en la línea tres muy similares a las otras dos líneas; además del factor de cresta ayuda a confirmar que hubo un error en la medición. Por lo cual, para efectos de análisis, se obtiene el valor de voltaje rms con la ecuación del factor de cresta (20).

### Mediciones en L1.

La primera medición realizada permite examinar la entrada de voltaje y la corriente al variador. Se puede observar que el voltaje indica 206 V. línea-línea rms de entrada al variador de frecuencia y una corriente de 10 amperios de línea.

Con esta primera medición, se observa en la figura 54 la gráfica de la onda de corriente y voltaje con respecto al tiempo donde se aprecia que existe una carga no lineal generando una distorsión armónica de la corriente de entrada (gráfica en color azul), y que se trata de una carga trifásica con un rectificador de seis pulsos. Lo anterior se debe a su forma de onda muy similar a la indicada en el marco teórico en la Figura 18: Características de la Tensión y Corriente de línea de un Variador de Frecuencia trifásico., muy reconocida en los variadores de frecuencia electrónicos como el que se está estudiando en este caso.

Figura 54: Formas de onda de Corriente y Voltaje Línea 1.



Fuente: Elvatron (2020).

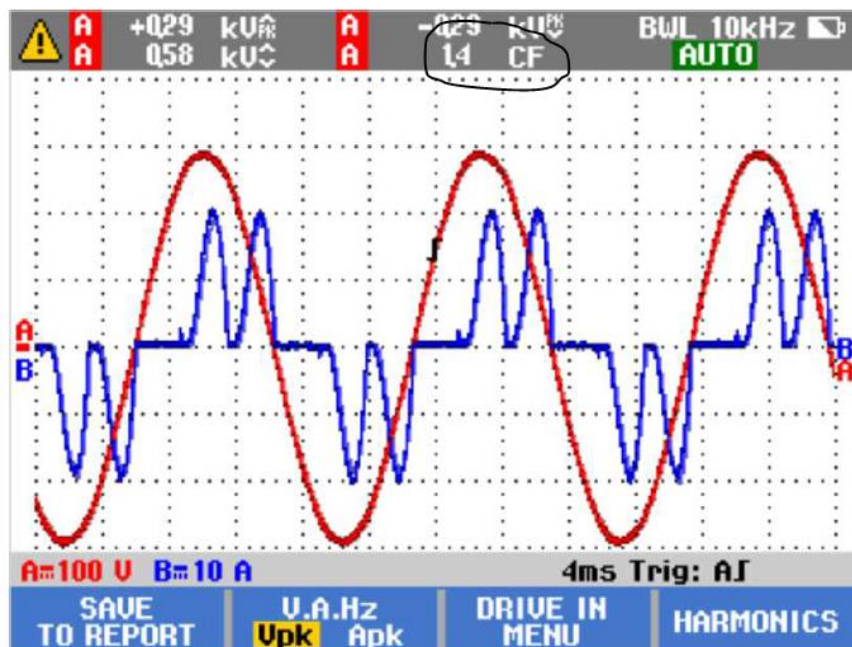
Al despejar la ecuación (20) del marco teórico, se puede confirmar el dato de valor de cresta dado por el medidor en la figura 55.

Ecuación del factor de cresta en voltaje

$$FC = \frac{\text{Valor}_{\text{pico}}}{\text{Valor}_{\text{rms}}} = 1.4 * 206 V_{\text{rms}} \approx 290 V = 0.29 \text{ kV}$$

Un valor normal para una forma de onda sinusoidal es  $\sqrt{2} = 1.4$ ; por tanto, un valor más alto puede alertar de un problema de distorsión. Al analizar este dato, se puede concluir que no existe distorsión armónica en voltaje en la Línea 1.

Figura 55: Valor del factor de cresta de voltaje línea 1.



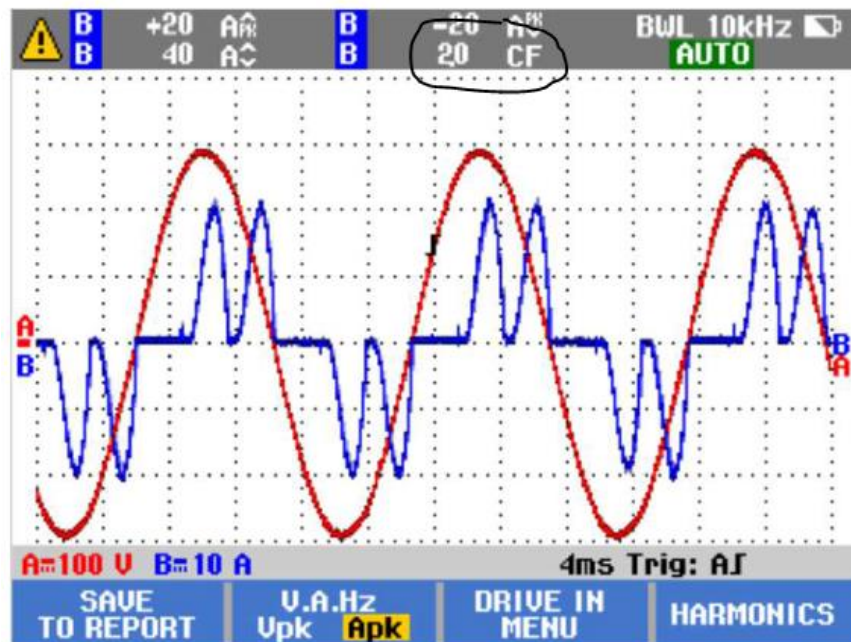
Fuente: Elvatron (2020).

La medición del factor de cresta se realizó para la corriente, en la figura 56 se logra ver un factor de cresta de 2.0, el cual está por encima del 1.4 de una onda sinusoidal a 60 Hz. Con ello, se vuelve a confirmar que el variador de frecuencia está generando armónicos de corriente los cuales se inyectan en la red eléctrica de la empresa.

Ecuación (20) del factor de cresta en corriente

$$FC = \frac{\text{Valor}_{\text{pico}}}{\text{Valor}_{\text{rms}}} = 2 * 10 I_{\text{rms}} = 20 \text{ A}$$

Figura 56: Valor de factor de cresta de corriente línea 1.



Fuente: Elvatron (2020).

La última medición en L1, se realiza con base en la frecuencia; por tanto, se analiza el gráfico tipo barras, el cual permite observar detalladamente cuál es el índice de distorsión armónica presente, además de que deja ver cuales armónicos están afectando de una manera importante. Como se observó en los gráficos anteriores, se presenta la carga no lineal trifásica, se puede deducir que en este caso la carga no lineal tiene un cuadro de diodos de seis pulsos, utilizando la ecuación (24).

$$H = pn \pm 1.$$

Tabla 2: Armónicos de un rectificador de 6 Pulsos.

Fórmula	Armónico
$6 * 1 \pm 1$	5
$6 * 1 \pm 1$	7
$6 * 2 \pm 1$	11
$6 * 2 \pm 1$	13

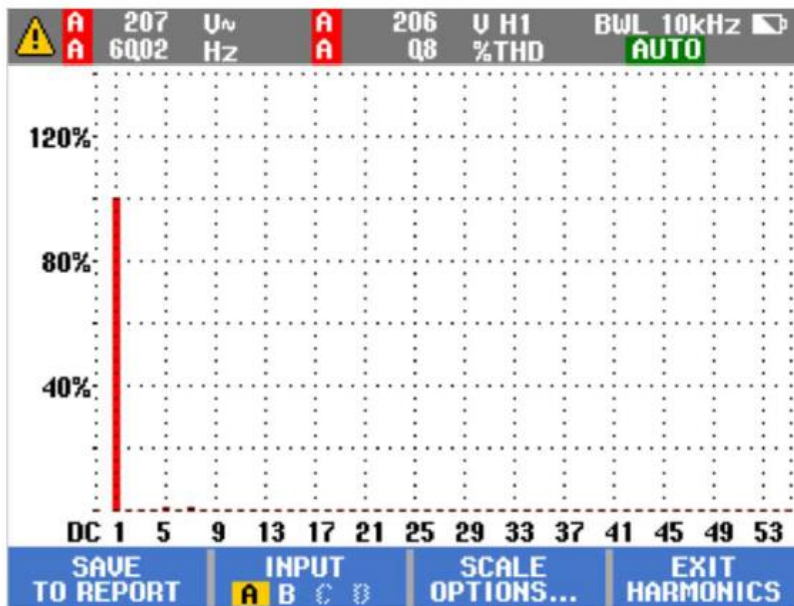
Fuente: Propia.

Con la ecuación anterior se puede asegurar la cantidad de pulsos del rectificador, por la afectación mayoritaria en las armónicas 5, 7, 11 y 13 y con un THDi en la L1 de un 83.3%, el cual da una idea del gran problema que genera este variador de frecuencia.

Siguiendo con el análisis en corriente, también es importante recalcar que en el gráfico se nota una carga monofásica conectada a la L1, ya que se evidencia una afectación de, aproximadamente, un 10% en la tercera armónica prueba indiscutible que hay una carga monofásica no lineal generando armónicos. Es muy usual encontrarse cargas trifásicas y monofásicas en las máquinas industriales debido a su uso en electrónica de control; por ejemplo, fuentes de alimentación 24 voltios corriente directa, controladores lógicos programables, pantallas interfaz hombre máquina, y el mismo medidor de flujo ultrasónico instalado y responsable de este estudio. Es importante indicar que las corrientes armónicas se desplazan no solo al transformador de alimentación sino también a los equipos vecinos afectando la electrónica de estos. (Ver Figura 58: Gráfica de las magnitudes de las armónicas de corriente en función de la frecuencia línea 1.

Por otro lado, en la medición de distorsión armónica total (THD) de voltaje se obtiene un 0.8% de distorsión armónica, por lo que se concluye que en la línea 1 no se presentan problemas en temas de distorsión en voltaje.

Figura 57: Gráfica de las magnitudes de las armónicas de voltaje en función de la frecuencia línea 1.



Fuente: Elvatron (2020).

Con este primer análisis en la línea 1 y con las ecuaciones (16) y (14) podemos obtener lo siguiente:

Despejando la ecuación (16) de THD obtenemos la corriente residual:

$$\text{THDi} = \frac{\sqrt{\sum_{h>2}^{h_{\max}} M^2_h}}{M_1} * 100 \rightarrow 83.3\% = \frac{\sqrt{(x)^2}}{7.1 \text{ A}} \rightarrow \text{Corriente residual} = 5.914 \text{ A.}$$

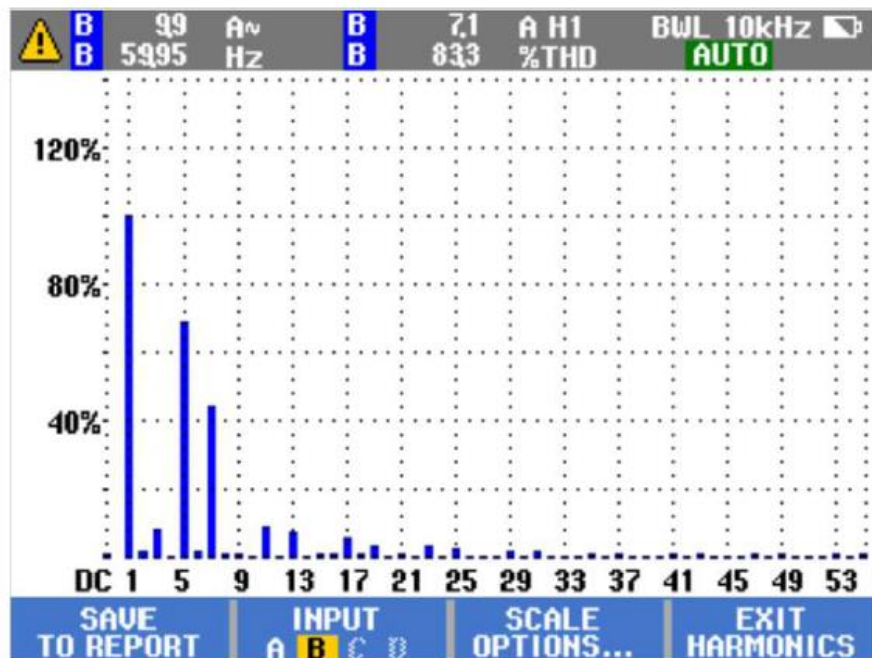
Corriente RMS: Sumando los cuadrados de la corriente residual y la corriente de la armónica fundamental obtenemos la corriente RMS ecuación (14)(13).

$$\sqrt{(I_{\text{residual}})^2 + (I_{\text{fundamental}})^2} = \sqrt{(5.914)^2 + (7.1)^2} \approx 9.9 \text{ A}$$

Porcentaje de corriente armónica fluyendo por el circuito.

$$\% \text{ I armónica} = \frac{I_{\text{rms}} - I_{\text{fundamental}}}{I_{\text{fundamental}}} * 100 = \frac{(9.9 - 7.1)}{7.1} * 100 \text{ (A)} = 39.43\%$$

Figura 58: Gráfica de las magnitudes de las armónicas de corriente en función de la frecuencia línea 1.



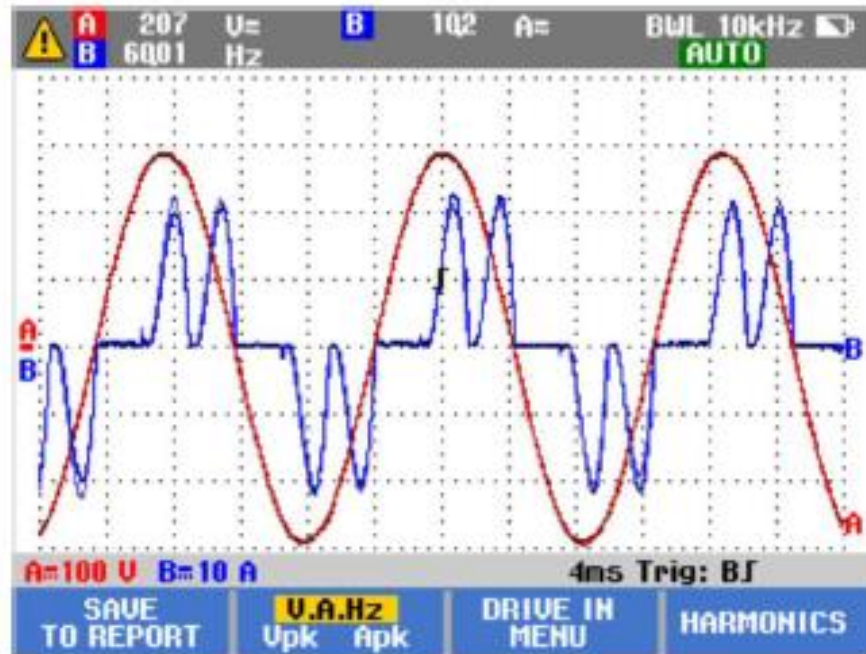
Fuente: Elvatron (2020).

## Mediciones en L2

Se efectuaron las mismas mediciones en la línea 2, con la misma secuencia. Primero se realiza una medición de voltaje y corriente de entrada al variador de frecuencia, el resultado arrojado indica la existencia de un voltaje de línea de 207 V línea-línea rms y la corriente rms nos indica un valor de 10.2 amperios.

Nuevamente se observa un evento similar a lo que sucedido en la línea 1, una distorsión armónica importante en la corriente, generado por el variador de frecuencia.

Figura 59: Formas de onda de Corriente y Voltaje Línea 2.



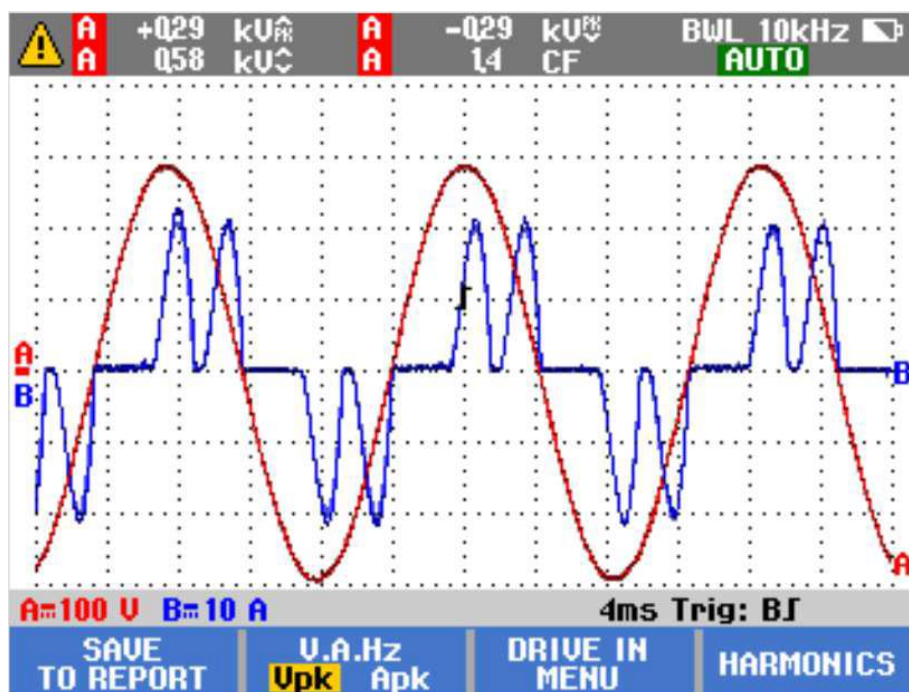
Fuente: Elvatron (2020).

Igual que en la L1, el factor de cresta en voltaje se mantiene dentro de lo normal 1.4 para una forma de onda sinusoidal, esto indica que en la línea dos no debería haber un problema de distorsión armónica importante o de qué preocuparnos.

Ecuación (20) del factor de cresta en voltaje

$$FC = \frac{\text{Valor}_{\text{pico}}}{\text{Valor}_{\text{rms}}} = 1.4 * 207 \text{ V}_{\text{rms}} \approx 290 \text{ V} = 0.29 \text{ kV}$$

Figura 60: Valor del factor de cresta de voltaje línea 2.



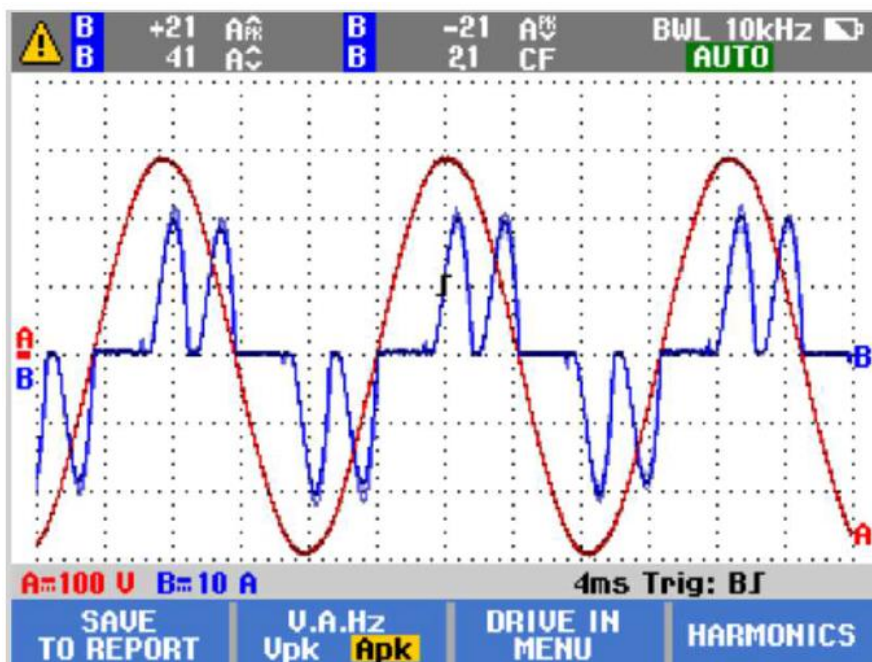
Fuente: Elvatron (2020).

En la medición para analizar el factor de cresta en corriente, el análisis arroja un valor de 2.1, ello indica nuevamente y refuerza la teoría de que este variador de frecuencia constituye una fuente de generación armónica importante.

Ecuación (20) del factor de cresta en corriente:

$$FC = \frac{\text{Valor}_{\text{pico}}}{\text{Valor}_{\text{rms}}} = 2 * 10.2 I_{\text{rms}} \approx 21 \text{ A}$$

Figura 61: Valor de factor de cresta de corriente línea 2.

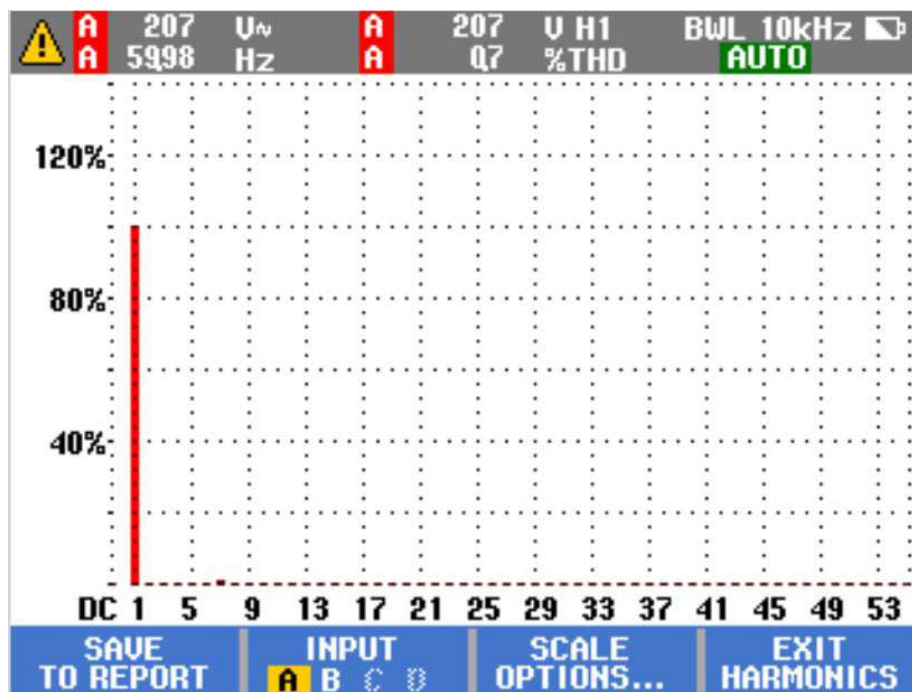


Fuente: Elvatron (2020).

En conclusión, el análisis en la línea dos tenemos los gráficos basados en frecuencia, los cuales nos permiten realizar una revisión más profunda del problema que estamos viendo en los otros gráficos.

Por el lado de armónicos de voltaje como sucede con la línea 1, la línea 2 indica un THD muy bajo 0.7% de distorsión, el dato obtenido no debe de generar ningún efecto nocivo.

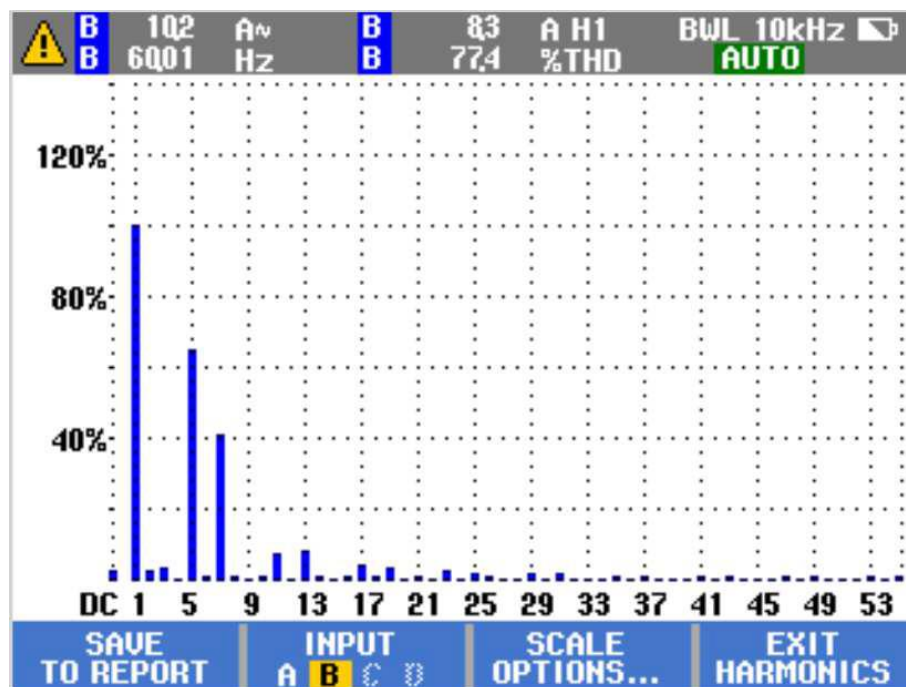
Figura 62: Gráfica de las magnitudes de las armónicas de voltaje en función de la frecuencia línea 2.



Fuente: Elvatron (2020).

Para los armónicos de corriente, se evidencia la carga no lineal trifásica conectada a la red con afectación en la 5,7, 11, 13 armónica, al ser la quinta armónica la más pronunciada para una medición de THD de 77.4%. Para esta línea se puede concluir que se hallan cargas monofásicas conectadas a la línea, pero el gran problema de este circuito sigue siendo el variador de frecuencia para la calidad de energía de la red. (Ver Figura 63: Gráfica de las magnitudes de las armónicas de corriente en función de la frecuencia línea 2).

Figura 63: Gráfica de las magnitudes de las armónicas de corriente en función de la frecuencia línea 2.



Fuente: Elvatron (2020).

Con el análisis en la línea 2 y con las ecuaciones (16) y (14), se obtiene lo siguiente:

Despejando la ecuación (16) de THD obtenemos la corriente residual:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h>2}^{h_{\max}} M^2 h}}{M_1} * 100 \rightarrow 77.4\% = \frac{\sqrt{(x)^2}}{8.3 \text{ A}} \rightarrow \text{Corriente residual} = 6.424 \text{ A}$$

Corriente RMS: Sumando los cuadrados de la corriente residual y la corriente de la armónica fundamental obtenemos la corriente RMS

$$\sqrt{(I_{\text{residual}})^2 + (I_{\text{fundamental}})^2} = \sqrt{(6.424)^2 + (8.3)^2} \approx 10.2 \text{ A}$$

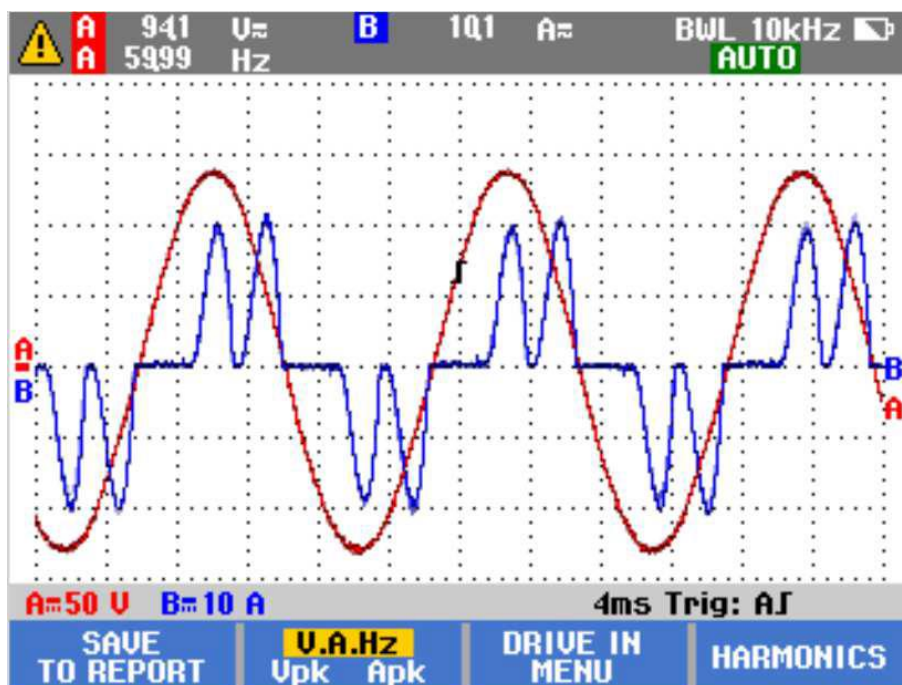
Porcentaje de corriente armónica fluyendo por el circuito

$$\% \text{ I armónica} = \frac{I_{\text{rms}} - I_{\text{fundamental}}}{I_{\text{fundamental}}} * 100 = \frac{(10.2 - 8.3)}{8.3} * 100 \text{ (A)} = 22.9\%$$

### Mediciones en Línea 3

En la línea tres se encuentra un elemento muy importante para el análisis, el equipo fallo al tomar las mediciones de voltaje de línea y THDv. Más adelante con la ecuación de factor de cresta, se confirma que hubo un error en esa medición y, con esta ecuación, se obtiene el valor verdadero de voltaje para L3 y la corriente rms es de 10.1 A similar a las otras dos líneas.

Figura 64: Formas de onda de Corriente y Voltaje Línea 3.



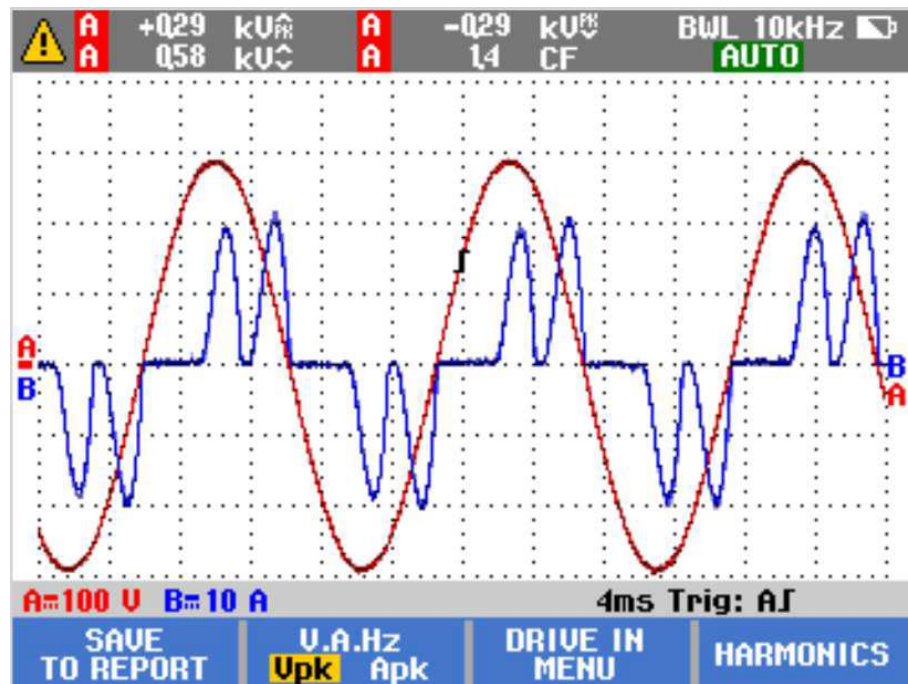
Fuente: Elvatron (2020).

Con la ecuación del factor de cresta (20), se corrobora el error en el momento de la medición en L3, si despejamos la ecuación y utilizamos el valor pico medido, es posible obtener el valor rms de esta línea.

$$FC = \frac{\text{Valor}_{\text{pico}}}{\text{Valor}_{\text{rms}}} = \frac{290\text{v}}{1.4} = 207.143 V_{\text{rms}}$$

Esto se puede comprobar con la figura (65), la cual indica los valores medidos.

Figura 65: Valor del factor de cresta de voltaje línea 3.

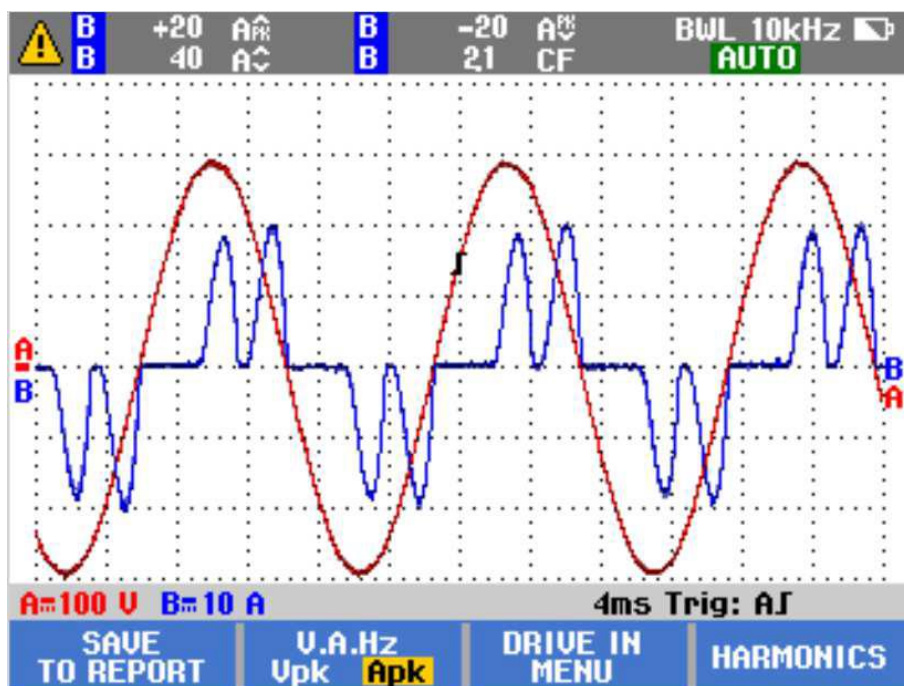


Fuente: Elvatron (2020).

Al realizar el mismo análisis que en las fases anteriores, se detalla el factor de cresta con un valor de 2.1 y una corriente pico de 20 A, la cual se comprueba utilizando la ecuación (20).

$$FC = \frac{\text{Valor}_{\text{pico}}}{\text{Valor}_{\text{rms}}} = 2.1 * 10.1 I_{\text{rms}} \approx 21 \text{ A}$$

Figura 66: Valor de factor de cresta de corriente línea 3

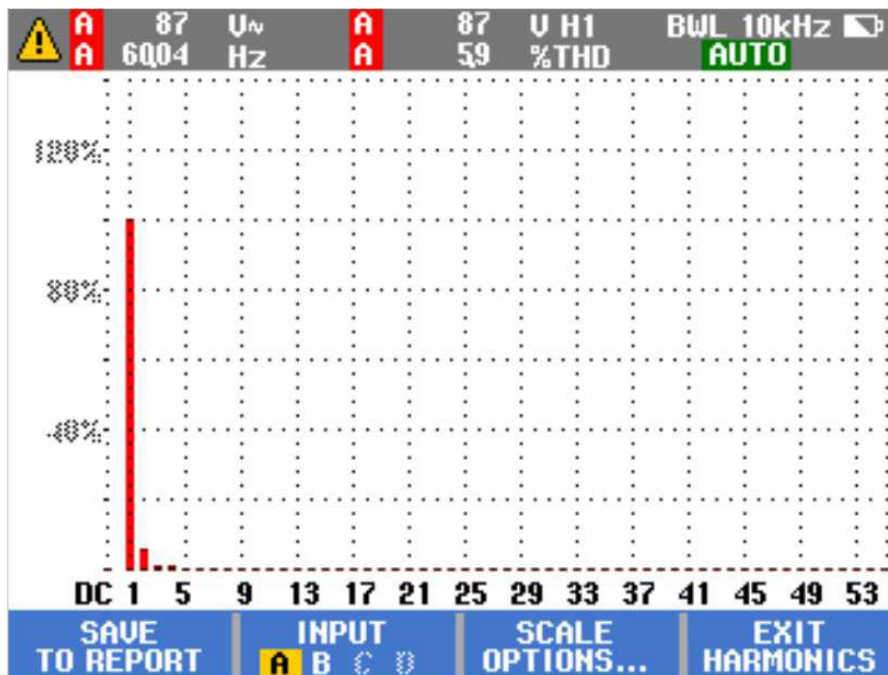


Fuente: Elvatron (2020).

Como en las últimas dos mediciones, se finaliza el análisis en los gráficos de frecuencia para analizar las armónicas que predominan y ver el THD presente en la línea 3.

Para empezar con el análisis en frecuencia, se aprecia el gráfico de THD de voltaje, el cual como se ya explicó y se comprueba matemáticamente, no debería indicar ningún valor de distorsión armónica de voltaje.

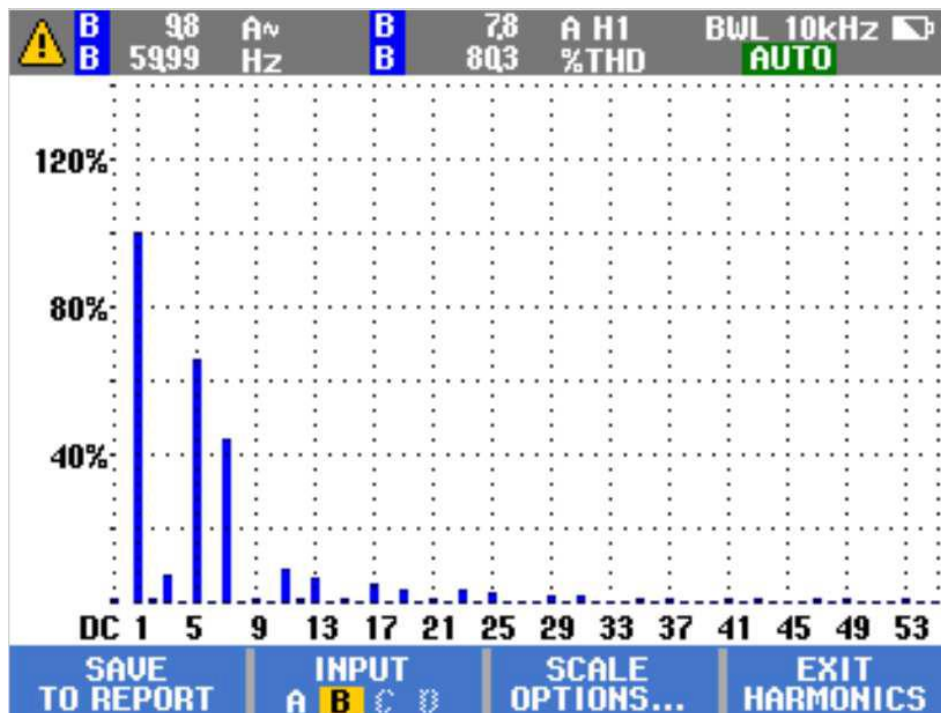
Figura 67: Gráfica de las magnitudes de las armónicas de voltaje en función de la frecuencia línea 3



Fuente: Elvatron (2020).

En el caso de corriente, reaparece el patrón de las primeras dos mediciones, donde la quinta armónica predomina debido a naturaleza de carga no lineal trifásica y resalta las cargas monofásicas conectadas a estas líneas por el incremento en la tercera armónica, aunque no son cargas que generen un impacto importante en la red eléctrica, tal como la carga trifásica.

Figura 68: Gráfica de las magnitudes de las armónicas de corriente en función de la frecuencia línea 3.



Fuente: Elvatron (2020).

Utilizando las ecuaciones correspondientes a corriente rms (14) y distorsión armónica de corriente (16), se obtienen los siguientes datos.

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h>2}^{h_{\max}} M^2_h}}{M_1} * 100 \rightarrow 80.3\% = \frac{\sqrt{(x)^2}}{7.8 \text{ A}} \rightarrow \text{Corriente residual} = 6.263 \text{ A}$$

Corriente RMS: Sumando los cuadrados de la corriente residual y la corriente de la armónica fundamental, obtenemos la corriente RMS.

$$\sqrt{(I_{\text{residual}})^2 + (I_{\text{fundamental}})^2} = \sqrt{(6,263)^2 + (7.8)^2} \approx 10 \text{ A}$$

Porcentaje de corriente armónica fluyendo por el circuito

$$\% \text{ I armónica} = \frac{I_{\text{rms}} - I_{\text{fundamental}}}{I_{\text{fundamental}}} * 100 = \frac{(9.8 - 7.8)}{7.8} * 100 \text{ (A)} = 25.64\%$$

Al tomar como referencia el amperaje del variador de frecuencia en la ficha técnica Anexo 3: Corriente de entrada variador Power Flex 525, el cual indica que este modelo tiene un amperaje máximo de 44 amperios, se puede intuir que el variador de frecuencia no está trabajando a su plena carga; estimando un valor de carga se puede indicar un valor cercano al 25% de la carga nominal, como se indica en el marco teórico, la carga influye en la distorsión armónica.

Realizando un análisis de armónicos a nivel global del sistema, al considerar las tres líneas, se logra una conclusión sólida, fundamentada en la teoría; asimismo, observando las gráficas arrojadas por el equipo basadas en el tiempo que la máquina tiene una carga no lineal trifásica, la cual, a su vez, tiene un rectificador de seis pulsos; en este caso, un variador de frecuencia, debido a la forma de la onda característica que se adquiere del análisis.

El factor de cresta juega un importante papel en el análisis de armónicos, con este factor se logra fácilmente ver si se presenta un problema de distorsión armónica. En este caso, en las tres fases localizan valores por encima de lo normal en el factor de cresta en corriente, estos valores son superiores a dos, los cuales para forma de onda sinusoidal están fuera de rango.

Continuando con el análisis y aprovechando las cualidades del equipo utilizado, se analizaron las gráficas en función de la frecuencia, las cuales permiten determinar cuáles armónicas predominan y la distorsión armónica total de corriente y voltaje en cada fase, se llega a la conclusión de que en la máquina se halla una carga no lineal trifásica, la cual genera una cantidad importante de distorsión, esto se justifica viendo que las armónicas predominantes son la quinta, onceava, treceava. También, se logra observar un decrecimiento en las magnitudes de las componentes armónicas con el aumento del número de armónico, tal y como se documentó en la Fuente: Cuaderno Técnico N°204 de Schneider Electric (2002).

Figura 19: Gráfica en Función de la Frecuencia de los armónicos de corriente de un Variador de Frecuencia trifásico. del marco teórico. Por último, sin dejar de lado las cargas no lineales monofásicas vistas en la gráfica que, aunque menos importantes con respecto a las trifásicas también generan una cantidad de armónicos que inundan la red eléctrica de la planta y crean problemas a otros equipos.

Tabla 3: Cuadro resumen de datos obtenidos en las mediciones.

Cuadro resumen de las tres fases			
Variable	L1	L2	L3
Voltaje	207	207	207.14
Corriente RMS	10 A.	10.2 A.	10.1 A.
Corriente fundamental	7.1 A.	8.3 A	7.8 A.
Corriente residual	5.914 A.	6.242 A.	6.262 A.
Factor de cresta	2	2.1	2.1
THD %	83.3%	77.4%	80.3%
Desbalance de voltaje	0.05%		

Fuente: Propia.

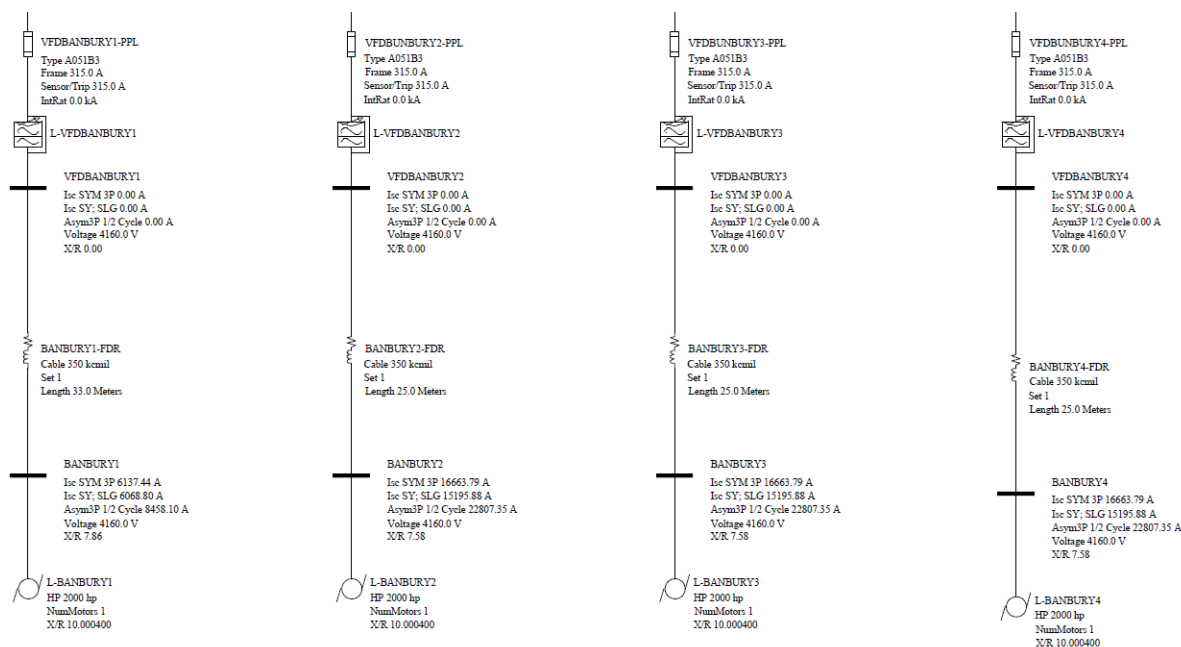
## Desarrollo caso #2

### Evaluación del sistema actual

El caso #2, se desarrolló en la empresa Bridgestone en Costa Rica. En la actualidad, esta compañía cuenta en uno de sus procesos con tres molinos para triturar la materia prima que, en este caso, es caucho. A la vez, estos molinos cuentan con un motor de 2000 HP, controlados por un variador de frecuencia modelo Power Flex 7000 por motor, los cuales se alimentan por medio de un transformador conexión Delta-Estrella de 7500 KVA con un voltaje en el primario de 34500 V y un secundario de 4160 V, sumergido en aceite y un porcentaje de impedancia de  $Z=6.72\%$ , según el diagrama unifilar el calibre de conductores para alimentar estas tres cargas es de 350 MCM, cada línea tiene tres conductores.

Como parte de un plan de una mejora en el diseño eléctrico de la planta, se implementó colocar en varios puntos de la fábrica medidores de calidad de energía en línea para registrar en tiempo real cualquier eventualidad asociada a energía. Para este año se planea que entre operar el cuarto molino.

Figura 69: Diagrama unifilar de los 4 variadores de frecuencia 2000 HP.

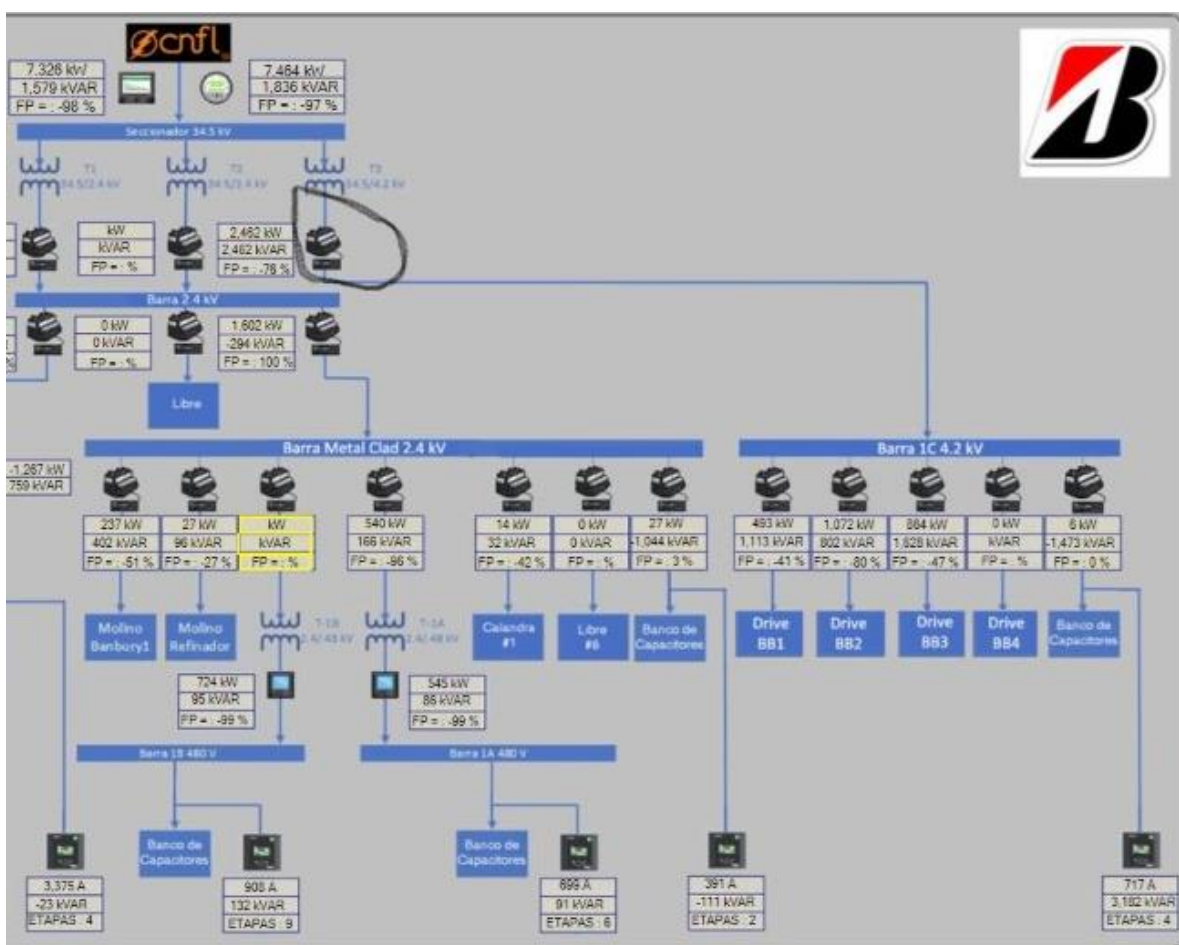


Fuente: Personal de Bridgestone.

Las mediciones se realizaron en el medidor llamado Barra\_1C\_4160. Principal, ubicado en el secundario del transformador alimentador del ramal. En este medidor se alcanza a revisar datos relacionados a los armónicos generados por los tres variadores de frecuencia, es importante indicar que en este aparato se registran los valores del banco de condensadores para la corrección de factor de potencia.

En la figura 70 se aprecia, encerrado en un círculo, el medidor de calidad de energía marca Schneider CM 4250 donde se realizó el estudio de armónicos.

Figura 70: Imagen del unifilar de medidores de calidad de energía en planta Bridgestone



Fuente:(Personal de Bridgestone.)

Iniciando el análisis, se puede citar lo que sugiere la IEEE-519, con respecto a la recomendación de la adecuada ubicación del medidor para realizar el análisis de distorsión armónica.

Esta práctica recomendada debe aplicarse en los puntos de interfaz entre los propietarios u operadores del sistema y los usuarios del sistema eléctrico. Los límites de esta están pensados para su aplicación en un punto de acoplamiento común (PCC) entre el propietario u operador del sistema y un usuario, donde el PCC, generalmente, se toma como el punto en el sistema de energía más cercano al usuario, aquí el propietario del sistema o el operador podrían ofrecer servicio a otro usuario. Con frecuencia, para el servicio a usuarios industriales (es decir, plantas de fabricación), a través de un transformador de servicio dedicado, el PCC se encuentra en el lado de alta tensión del transformador. Para los usuarios comerciales (parques de oficinas, centros comerciales, entre otros), suministrados por medio de un transformador de servicio común, el PCC se encuentra comúnmente en el lado de BT del transformador de servicio.

Después de leer la recomendación de la IEEE, es importante indicar que el equipo de medición está en el lado de bajo voltaje, por cual una de las recomendaciones será pasar el medidor al primario del transformador, con el objetivo de realizar mediciones con base en la recomendación de esta norma y tomar acciones de mitigación con datos correctos.

Sumado a la recomendación de la IEEE 519, se puede agregar lo mencionado por la ARESEP en su normativa ART-NT-SUCAL en su Artículo 12. Tensiones armónicas, la cual indica el límite de distorsión armónica de voltaje debe de ser de un 5% y en su Artículo 13. Corrientes armónicas aporta una tabla con los límites de TDD de corriente para usuarios conectados en redes generales de distribución. (Ver figura Figura 49: Límites de distorsión armónica de corriente para usuarios del servicio).

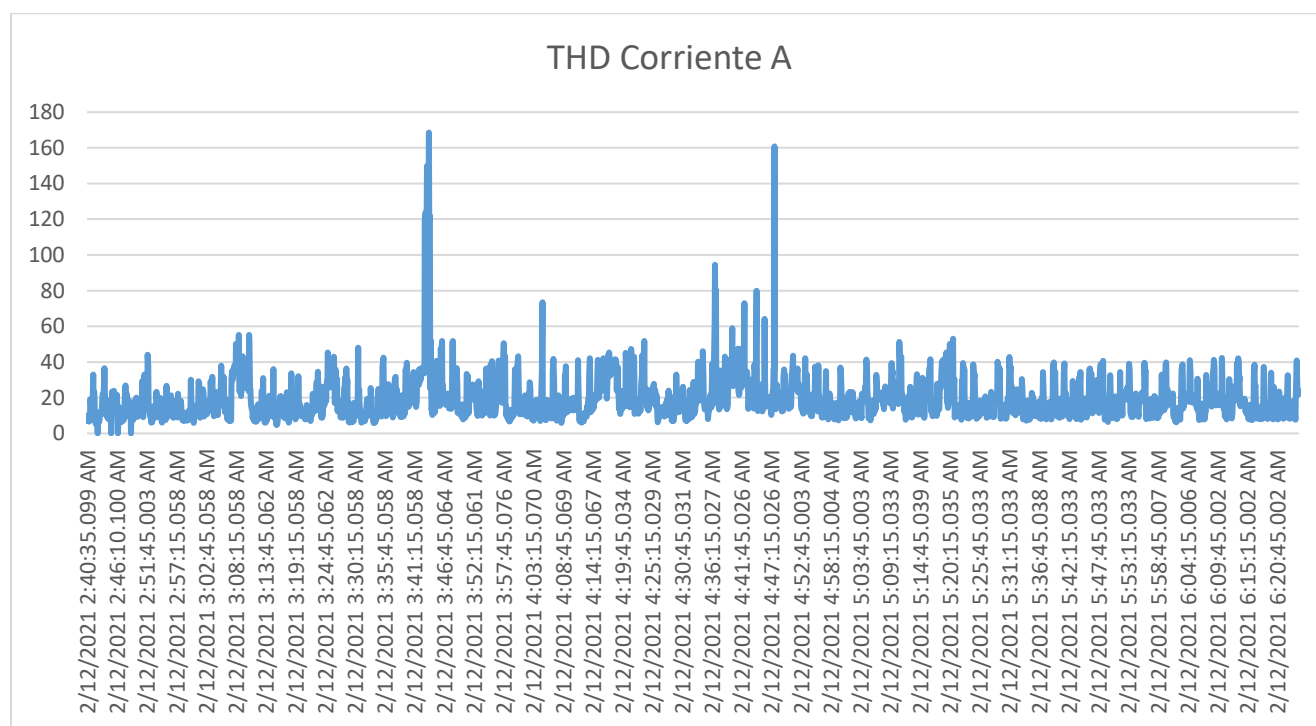
Para este caso, se realizaron mediciones en las tres líneas L1-L2-L3, por un lapso de tres horas y 44 minutos, durante el cual se realizaron mediciones cada cinco segundos para obtener un total de 39,390 datos de diversas variables, los cuales se analizarán y ayudarán a confirmar lo detallado en el marco teórico en el capítulo 1. Un punto relevante de mencionar es que cada variador de frecuencia ya cuenta con un reactor de línea, que ayuda a mitigar la distorsión armónica total en el transformador.

## Mediciones realizadas en las líneas A-B-C

Al efectuar un análisis de manera macro al sistema, se obtienen valores promedio de THD de corriente muy similares, realizando un promedio entre las tres líneas da un valor de 18.46%. Durante la medición, se presentan dos eventos que superan el 100% de THDi. Estos fenómenos se pueden apreciar en los gráficos 1, 2 y 3, los cuales también ayudan a apreciar todas las mediciones efectuadas durante la recolección de datos. Estos se pueden interpretar como el efecto en la variación de la carga en el molino, que según el personal de Bridgestone estas variaciones de carga son normales en el proceso, ya que los variadores de frecuencia varían entre 20 Hz a 40 Hz en lapsos muy cortos.

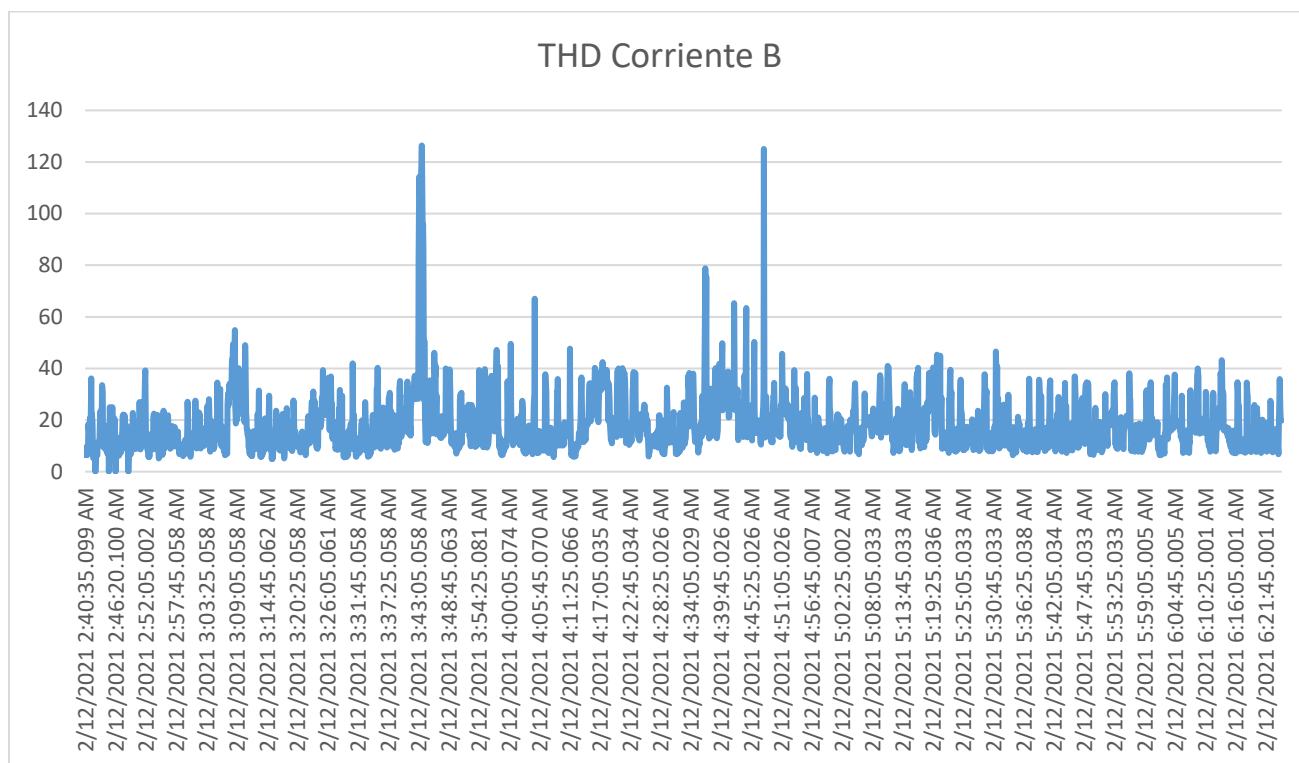
En la Gráfico 4: Valores Máximos de THD de Corriente Línea A-B-C, se detalla los valores máximos del evento con mayor duración, el cual es de un minuto. Estos datos se pueden interpretar como transitorios y no permanentes que puedan llegar a generar efectos nocivos en los equipos.

Gráfico 1: Valores de THD de corriente en Línea A



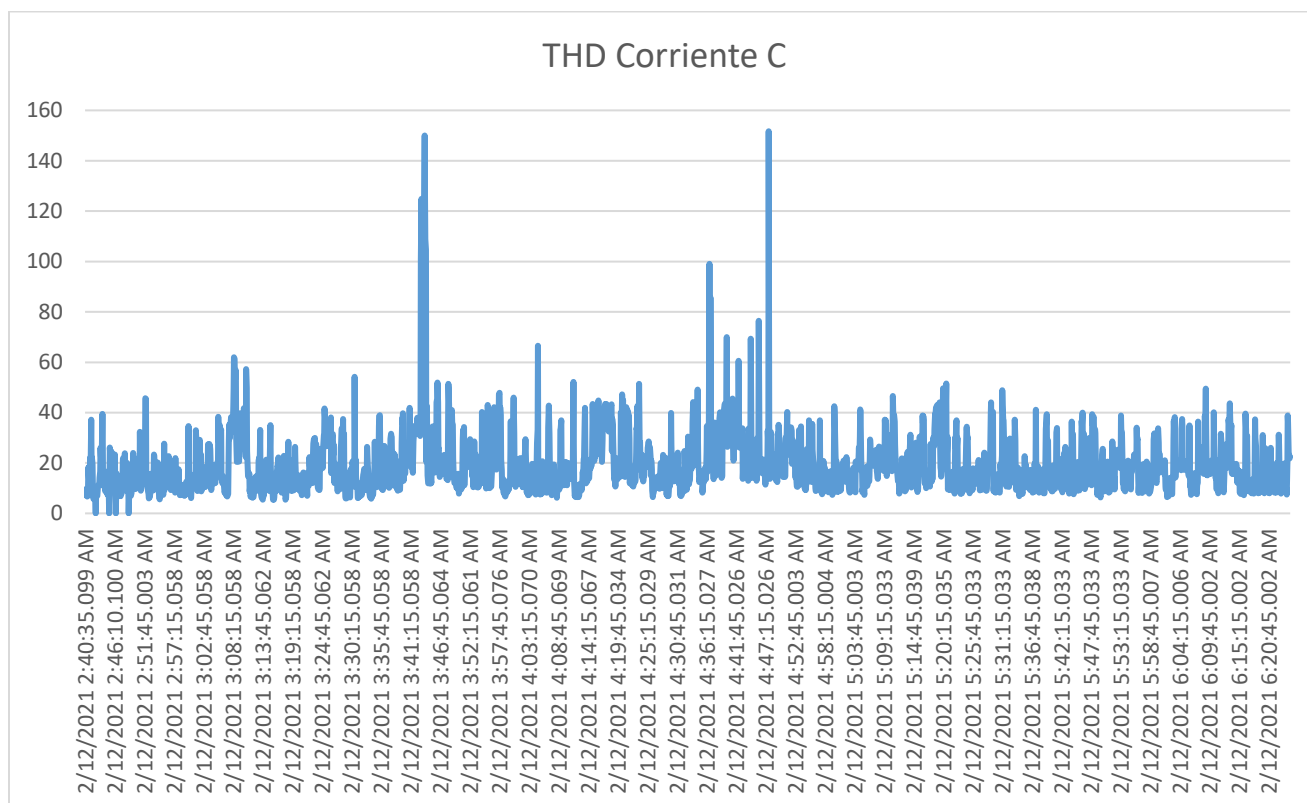
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 2: Valores de THD de corriente en Línea B



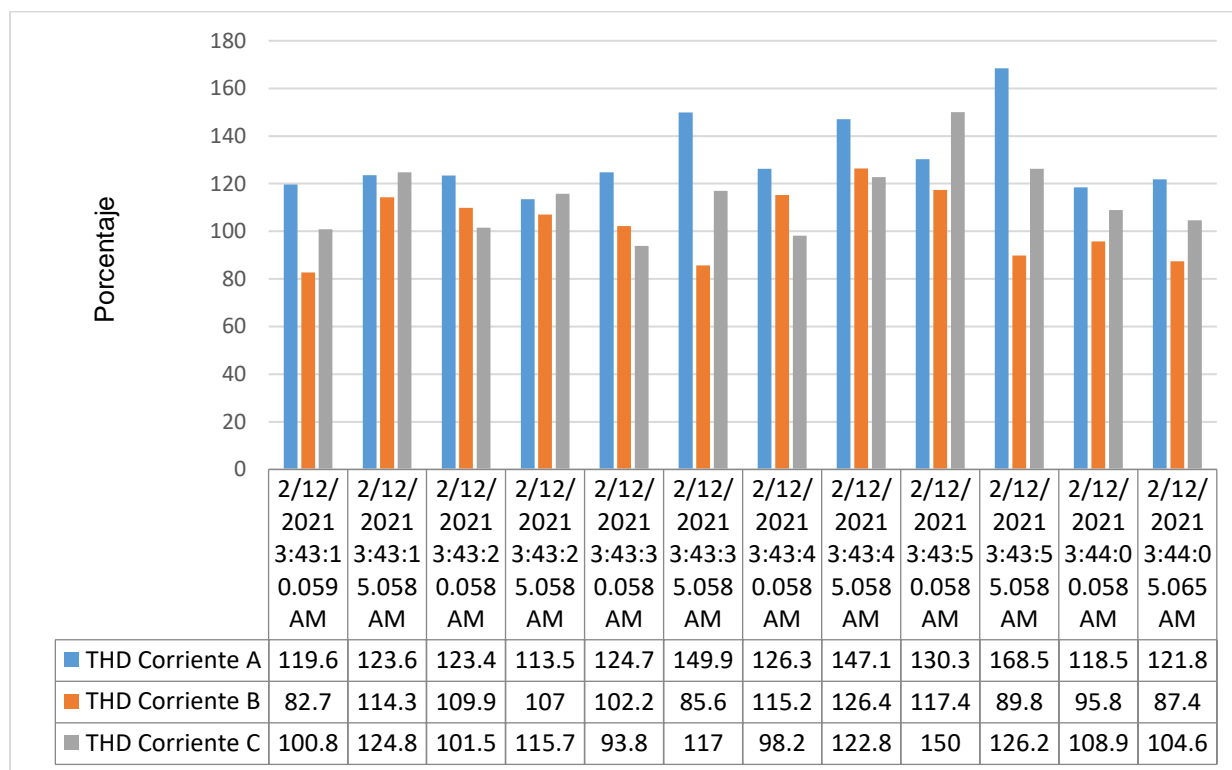
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3: Valores de THD de corriente en Línea C



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4: Valores Máximos de THD de Corriente Línea A-B-C

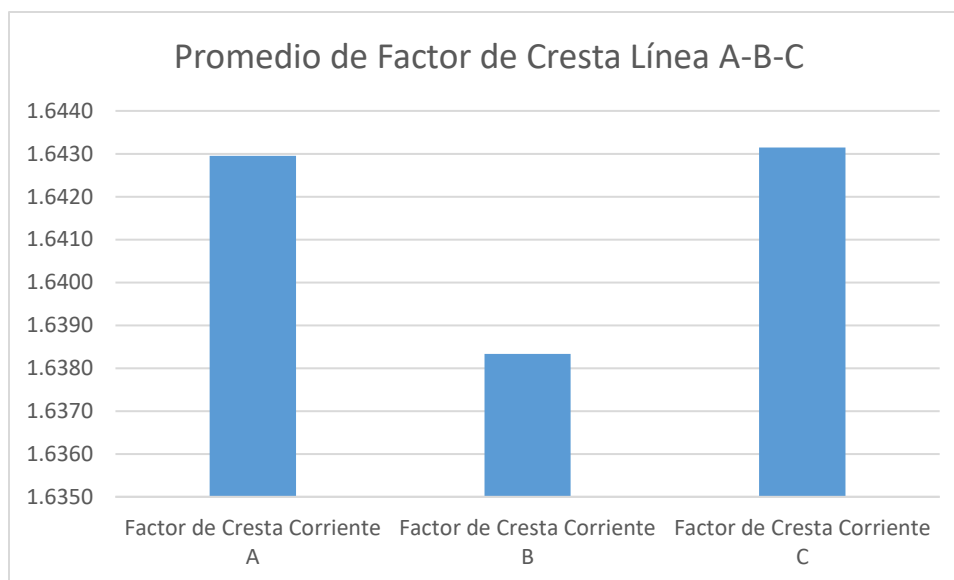


Fuente: Elaboración propia.

En comparación con el caso #1, se presenta un incremento notable en la distorsión armónica de voltaje, el cual en promedio los valores son, en la línea A es de 4.15%; en línea B de un 4.08% y línea C es de un 3.95%. Por tanto, se entiende que la fuente es rígida con una impedancia baja y un corto circuito alto, lo cual ayuda a que los valores de THD<sub>v</sub> sean bajos, como en este caso.

El factor de cresta revela nuevamente que existe una distorsión de la onda fundamental, provocada por los variadores de frecuencia en estudio, los valores en promedio son superiores a 1.4, que es el valor de una onda sinusoidal. El valor máximo promedio obtenido es de 2.49, lo cual muestra que el pico de corriente máxima será 2.49 veces la corriente RMS.

Gráfico 5: Promedios de factor de cresta Línea A-B-C



Fuente: Elaboración propia.

Los datos recolectados de corriente fundamental dan una visión de cómo se comportan estos variadores de frecuencia durante el proceso. Así, el valor de corriente varía con base en la carga de los molinos, en un punto dado todos los variadores de frecuencia se apagaron ya que el valor de corriente reporta 0 amperios.

Los valores de voltaje se mantienen estables durante las mediciones con algunas fluctuaciones, debido a las variaciones en la carga; el voltaje promedio entre las tres líneas da un resultado de 4189 V. Al realizar un cálculo para obtener el porcentaje del desbalance del voltaje con los valores promedio de cada línea, se obtiene un valor de 1.88%, 0.31% para valores máximos y 0.16% con valores mínimos.

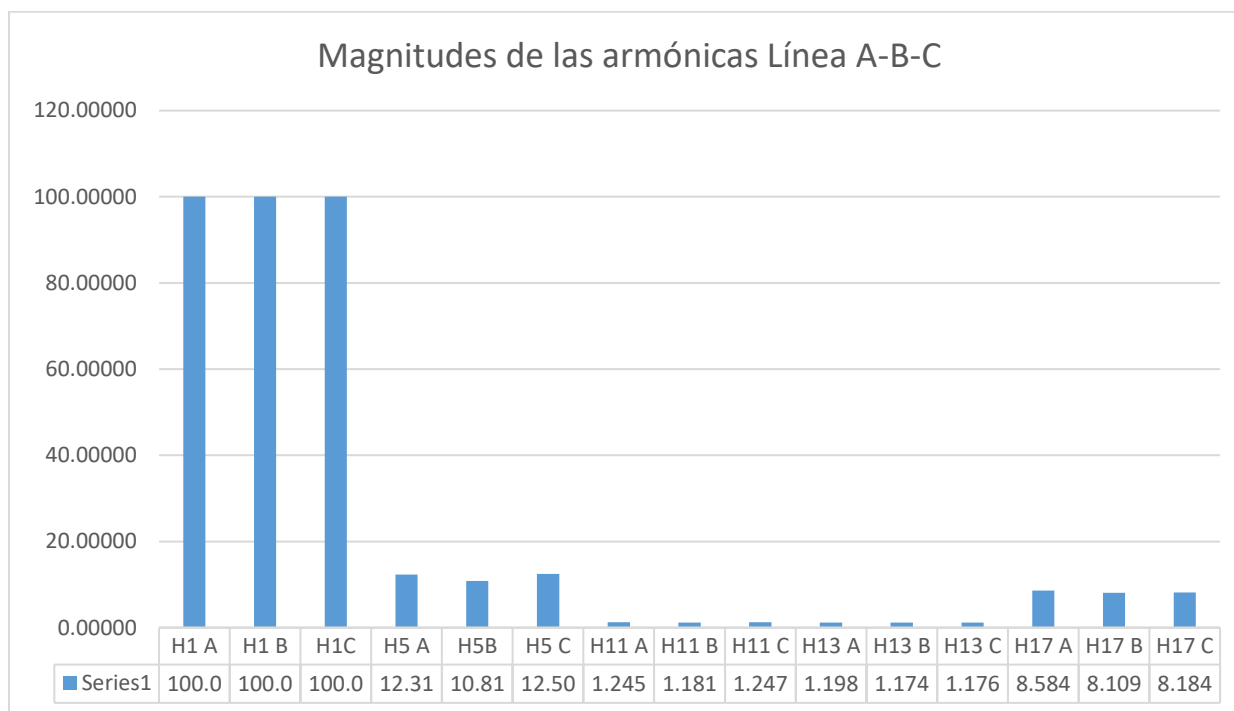
Este dato ayuda a tomar decisiones como, por ejemplo, si es factible valorar un variador de frecuencia de múltiples pulsos, donde uno de los factores más importantes que le afectan a un variador de este tipo es el desbalance de voltaje, ya que, si los transformadores no suministran el mismo voltaje a los rectificadores, las corrientes no serán de la misma magnitud y no se podrán cancelar adecuadamente las corrientes armónicas, tal como se documentó en el marco teórico. (Ver Fuente: Sistemas eléctricos de potencia (2008).

Cancelación de armónicos 5 y 7 con desplazamiento de fase del capítulo 1).

Observando las magnitudes de las armónicas involucradas en este análisis, se puede confirmar que los variadores de frecuencia son trifásicos y de seis pulsos, como se observó en el caso #1, se presenta un incremento en la quinta armónica, la cual sería que tiene mayor participación, según la Figura 12: Rectificador y distorsión de corriente típica de 6 pulsos, las magnitudes disminuyen mientras que el número de armónica incrementa.

Una observación relevante es el incremento de la armónica número 17, esto se puede deber a una distorsión en la señal, ya que no es normal un incremento en esa armónica en este tipo de cargas. Por tanto, cabe la sospecha de una carga no lineal conectada al ramal de variadores que no está señalada en el plano unifilar o podría ser una carga monofásica del mismo variador de frecuencia como un transformador para control del equipo.

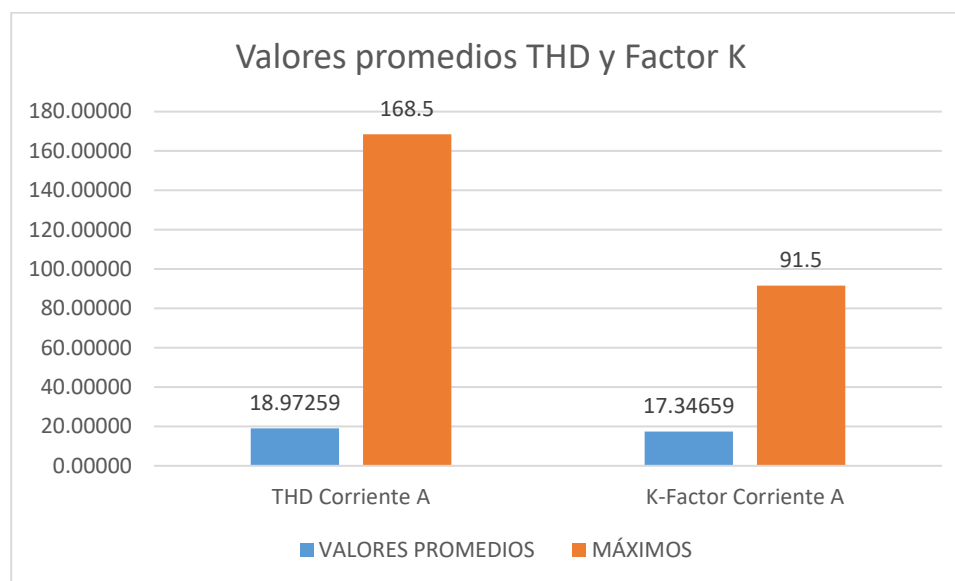
Gráfico 6: Magnitudes armónicas de corriente



Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente gráfica se tomó como muestra los valores promedios y máximos del THD y el factor K de la línea A, se puede observar lo que se plantea en la ecuación (29), de esta ecuación se logra deducir que entre más corriente residual haya en el circuito analizado mayor será el factor K requerido por el transformador. Los valores promedios se representan en color azul, mientras que los valores máximos, en color naranja.

Gráfico 7: Valores promedios de THD y Factor K



Fuente: Elaboración propia.

### **Pérdidas por efecto Joule en conductores de alimentación**

Generando un valor promedio entre las tres líneas, el incremento de pérdidas por efecto Joule causado por los armónicos es de un 5.23%. Para monetizar las pérdidas provocadas por la corriente fundamental y la corriente residual, se tomaron los datos obtenidos en promedio de cada una de las tres líneas mostradas en la tabla Tabla 4: Valores promedio de Pérdidas por Efecto Joule, el costo por kWh en punta con un valor aproximado de ₡112 y se considera como tiempo efectivo para el cálculo de los kWh las 3: 44 min que duraron las mediciones.

Como se comentó en la situación actual, el calibre del conductor es 350 MCM y que, según la ficha técnica, de un cable similar al instalado da un valor de  $0.00248 \Omega$ . (El valor de la resistencia del cable de alimentación se estima con la ficha técnica adjunta en el Anexo 9: Ficha técnica del cable de alimentación).

Tabla 4: Valores promedio de Pérdidas por Efecto Joule

<b>Valores</b>	<b>Efecto Joule Fundamental Línea A (W)</b>	<b>Efecto Joule Fundamental Línea B (W)</b>	<b>Efecto Joule Fundamental Línea C (W)</b>
Promedio	103.05	106.05	104.97

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del incremento de pérdidas por corrientes armónicas

$$103.05 \text{ W} * 1.0523 = 108.44 \text{ W.}$$

$$106.05 \text{ W} * 1.0523 = 111.59 \text{ W.}$$

$$104.97 \text{ W} * 1.0523 = 110.46 \text{ W.}$$

Al sumar los tres valores de potencia, se obtiene un resultado de 330.5 W ó 0.330 kW, multiplicando por el intervalo del tiempo de 3:44 min los kWh son 1,135.00.

Estimando el peor escenario con el precio de la electricidad en ₡ 112 por kWh consumido, según datos proporcionados por el personal de Bridgestone en el Anexo 10: Costo de energía eléctrica en punta, las pérdidas por efecto Joule totales generarían un costo de ₡ 127.12 colones, realizando un aproximado del peor escenario a un tiempo de un mes de 31 días, bajo estas condiciones 24 horas el costo sería de ₡ 27,462.40.

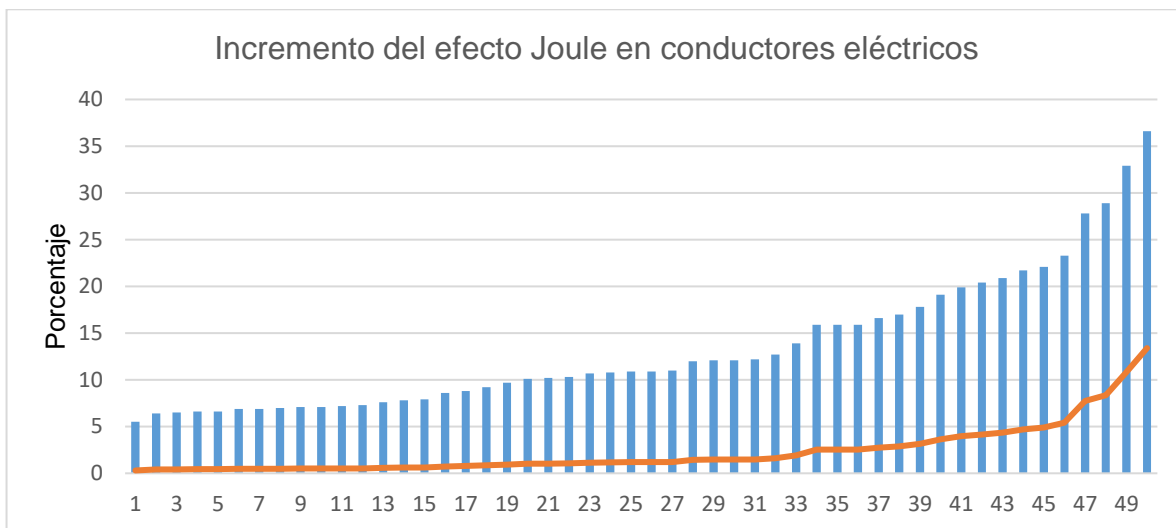
$$0.330 \text{ kW} * 24 \text{ horas} * 31 \text{ días} = 245.52 \text{ kWh.}$$

$$245.2 \text{ kWh} * ₡ 112 = ₡ 27,462.40.$$

Como los variadores de frecuencia no trabajan a carga nominal o al 100% de su potencia, no se puede indicar que haya una reducción de las características técnicas de los equipos de alimentación, pero sí de un incremento en las pérdidas por efecto Joule en el cableado que se deben sumar a las pérdidas normales por el calentamiento normal de la resistencia, debido a la corriente

fundamental. De este modo, en el gráfico 8 se puede observar dicho efecto, tomando una muestra de 50 valores de la línea A, cuanto más incremente el THDi, mayores serán las pérdidas por efecto Joule.

Gráfico 8: Incremento del efecto Joule en conductores eléctricos



### Transformador

Según el análisis de los valores de potencia aparente medidos, el transformador que alimenta los tres variadores de frecuencia de 7500 KVA trabaja a un máximo de 3479 KVA, esto es alrededor de 46,38% de su capacidad nominal. Mientras que en el intervalo de mayor distorsión armónica la carga en el transformador se reduce a un promedio de 227 KVA un 3.02% de su potencia, dados estos valores se puede indicar que los armónicos generados por los variadores no comprometerían al transformador, debido a que en ningún momento el transformador trabaja a su carga nominal o cerca de la potencia de la placa.

Como muestra de lo anteriormente mencionado se colocan en la tabla 5 los valores de THD, la corriente de la línea A y los valores de Potencia Aparente KVA en el intervalo de mayor distorsión armónica en la medición.

Tabla 5: Valores de potencia aparente

DÍA/ HORA	Corriente A (A)	THD Corriente A (%)	Potencia Aparente (KVA)
2/12/2021 3:43:10.059 AM	26	119.6	222
2/12/2021 3:43:15.058 AM	27	123.6	233
2/12/2021 3:43:20.058 AM	26	123.4	220
2/12/2021 3:43:25.058 AM	27	113.5	215
2/12/2021 3:43:30.058 AM	27	124.7	216
2/12/2021 3:43:35.058 AM	26	149.9	232
2/12/2021 3:43:40.058 AM	26	126.3	218
2/12/2021 3:43:45.058 AM	27	147.1	226
2/12/2021 3:43:50.058 AM	28	130.3	238
2/12/2021 3:43:55.058 AM	28	168.5	246
2/12/2021 3:44:00.058 AM	26	118.5	228
2/12/2021 3:44:05.065 AM	27	121.8	234

Fuente: Propia.

### Frecuencia de resonancia

Con el dato de la potencia aparente del transformador y el dato suministrado por el personal de Bridgestone se puede calcular la frecuencia de resonancia del sistema con la ecuación (26).

$$h_r = \sqrt{\frac{7500 \cdot 100}{1600 \text{ Kvar} \cdot 6.72}} = 8.35$$

La frecuencia de resonancia está lejos de la séptima y onceava armónica, debido a esto no se puede considerar que en el sistema haya un caso de resonancia entre la inductancia del transformador y la capacitancia de los condensadores.

Los datos recolectados del porcentaje de TDD tienen un valor promedio de 9.49 % con un máximo 49.7%, como se indicó anteriormente el medidor de este ramal está mal ubicado, debido a esto no se puede asegurar que los valores están dentro de los límites solicitados por la normativa. Además, según el manual del equipo utilizado para realizar las mediciones,

**Anexo II: Manual Equipo CM4250**, el valor de la corriente de demanda promedio se debe colocar manualmente en el equipo y, según comentarios del personal de Bridgestone, no se sabe con seguridad si está bien ingresado. En consecuencia, no se pueden estimar los datos registrados como confiables para tomar acciones de corrección.

Tabla 6: Medición de TDD%

TDD %
-------

Mínimo	0
Promedio	9.49
Máximo	49.7

Fuente: Elaboración propia.

Para concluir el análisis, un aspecto interesante por resaltar es que el diseño eléctrico de este ramal cumple con dos de las mejores prácticas planteados en el marco teórico, dentro del cual se indica que una manera de optimizar el diseño eléctrico con cargas no lineales, consiste en separar las cargas lineales de otras cargas y realizar una alimentación por separado de estas. Los puntos antes mencionados se explican capítulo 1, Diseño del sistema de energía (optimización de diseños eléctricos).

Tabla 7: Datos obtenidos en la línea A

Datos obtenidos en Línea A			
Variable	Valor Máximo	Valor Promedio	Valor Mínimo
Voltaje A-B (V)	4290	4176	4060
Corriente fundamental (A)	484	183.52	0
THD corriente %	168.5	18.97	4.8

THD voltaje %	7.2	4.15	1.3
Factor de cresta	2.47	1.64	1.43

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8 Datos obtenidos en la línea B

Datos obtenidos en Línea B			
Variable	Valor Máximo	Valor Promedio	Valor Mínimo
Voltaje B-C (V)	4310	4198	4070
Corriente fundamental (A)	488	186.64	0
THD corriente %	126.4	17.60	4.9
THD voltaje %	7.7	4.08	1.3
Factor de cresta	2.55	1.63	1.44

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9: Datos obtenidos en la línea C

Datos obtenidos en Línea C			
Variable	Valor Máximo	Valor Promedio	Valor Mínimo
Voltaje C-A (V)	4310	4193	4070
Corriente fundamental (A)	487	185.22	0
THD corriente %	151.7	18.82	5.5

THD voltaje %	7.2	3.95	1.3
Factor de cresta	2.47	1.64	1.43

Fuente: Elaboración propia.

## Soluciones propuestas caso #1

Tomando en cuenta los datos obtenidos en el análisis de resultados y los criterios de selección para una solución de armónicas, como se comentó en el marco teórico en el apartado Criterios técnicos para selección de una solución para distorsión armónica, las soluciones propuestas son las siguientes:

Según el variador de frecuencia utilizado, en este caso es de 15 HP, la corriente de entrada sería 44 amperios de línea según la ficha técnica. (Anexo 3: Corriente de entrada variador Power Flex 525).

### 1. Cálculo del reactor de línea

Según la ecuación (31)

$$Z\% = \frac{45 * 2\pi * 60 * 0.3 * 10^3 * \sqrt{3}}{208} * 100 = 4.23\% \sim 5\%$$

Se selecciona un reactor de línea abierto marca MTE, modelo RL-04501, corriente 45 amperios, inductancia 0.3 mH voltaje 208 voltios 60 Hz trifásico, 5% de impedancia, %THDi de 34.96, dimensiones Largo 8.9" x ancho 7.1" x profundidad 4.6" Anexo 4: Reactor de línea marca MTE

Con este reactor de línea se obtiene una reducción de THDi de:

$$\%THD \text{ actual (80)} - \%THD \text{ instalando un reactor (34.96)} = 45.04\% \quad (41)$$

Fuente: Propia.

### 2. Cálculo de filtro pasivo

Se selecciona con base en la ficha técnica, debido a que este filtro tiene un reactor de línea incorporado; por tanto, se selecciona con base en la corriente a carga nominal del variador de frecuencia. (Anexo 5: Filtro pasivo trifásico marca MTE).

Según los datos de la ficha técnica de MTE para filtros pasivos, se opta por el modelo MAPP0044A Matrix AP Adaptive Passive Harmonic Filter, voltaje 240V 3~ 60 Hz, para variador

de frecuencia de 6 pulsos, corriente, %THDi 8, dimensiones largo 11.6" x ancho 10.5" x profundidad 7.2" Anexo 5: Filtro pasivo trifásico marca MTE.

Con el filtro pasivo se obtiene una reducción de THDi, según la ecuación (41)

$$\%THD \text{ actual (80)} - \%THD \text{ Implementando un filtro pasivo (8)} = 72\%$$

### 3. Cálculo para filtro activo

De acuerdo con la ecuación de la Figura 33: Fórmula de la corriente armónica, se logra obtener la corriente del filtro necesario para contrarrestar la corriente armónica, alcanzando el promedio de las corrientes residuales.

$$I_F = \sqrt{6.20^2 + 0^2} = 6.2 \text{ A.}$$

Con base en el cálculo, se selecciona un filtro Activo marca ABB Modelo PQFS-M-03-IP30 voltaje 208 voltios corriente 30 amperios 60 Hz dimensiones largo 23" x ancho 12.2" x profundidad 27.56". (No se encuentra un de menor capacidad en el mercado). (Anexo 6: Filtro activo marca ABB).

Con este filtro activo se puede obtener una reducción de THDi según la ecuación (41)

$$\%THD \text{ actual} - \%THD \text{ Implementando un filtro pasivo} = 77\%$$

Tabla 10: Cuadro comparativo de las soluciones planteadas

Solución	THD (%)	Costo (¢)	Dimensiones (pulgadas)
Reactancia de línea	34.96%	¢ 446,088.45	Largo 8.9" x Ancho 7.1" x Alto 4.6"
Filtro pasivo	5%	¢ 1,809,494.18	Largo 11.6" x Ancho 10.5" x Alto 7.2"
Filtro activo	3%	¢5,842.500.00 (estimado)	Largo 23" x Ancho 12.2" x Alto 27.56"

Fuente: Propia.

## Soluciones propuestas caso #2

Tomando en cuenta los datos obtenidos en el análisis de resultados y los criterios de selección para una solución de armónicas, como se comentó en el marco teórico, en el apartado Criterios técnicos para selección de una solución para distorsión armónica, las soluciones propuestas son las siguientes:

### Primera Solución

1. El variador se selecciona con base en el voltaje de alimentación y en la potencia del motor a controlar en este caso 4160 voltios y 2000 HP.

Opción 1: Variador de frente Activo marca Allen Bradley Power Flex 7000-A285DEBD-RPDTD-1EDSTP-1STR-3LL-14PVKLC-14TS1-750T-760<sup>a</sup> voltaje de alimentación 4160 VAC trifásico 2000 HP %THD <5 60 Hz.

Con el variador de frecuencia de frente activo obtenemos la reducción utilizando la ecuación (41).

$$\%THD \text{ actual promedio} - \%THD \text{ Implementando la solución 1} = 13.46\%$$

2. El variador se selecciona con base en el voltaje de alimentación y en la potencia del motor a controlar en este caso 4160 voltios y 2000 HP.

Opción 2: Variador de frecuencia de múltiples pulsos marca Allen Bradley Power Flex 6000T-BA265ME6AJ-EHEU-1ESTP-3LB-13TCOMME-14TS1-14TS2-14TS4-89D6-5056 Voltaje de alimentación 4160 V trifásico 2000 HP %THD <5 60 Hz.

Con el variador de frecuencia de múltiples pulsos obtenemos la reducción utilizando la ecuación (41).

$$\%THD \text{ actual promedio} - \%THD \text{ Implementando la solución 1} = 13.46\%$$

Tabla 11: Cuadro comparativo de las soluciones planteadas

Solución	THD (%)	Costo (¢)	Dimensiones (pulgadas)
Variador de Frecuencia AFE.	5%	¢ 165,558,600.00	Largo 91.12" x ancho 27.56" x alto 90"
Variador de Frecuencia Multi pulso.	5%	¢ 303,462,782.00	Largo 75.2" x ancho 49.2" x alto 113.7"

Fuente: Propia.

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

Después de hecho el estudio de los datos recolectados, en el caso #1 de la empresa farmacéutica ubicada en Panamá y el caso #2 realizado en Bridgestone Costa Rica, se concluyen los siguientes puntos.

- El fenómeno de distorsión de armónica representa un problema causado por cargas tanto monofásicas como trifásicas no lineales. En las mediciones realizadas en ambos casos se confirma que los variadores de frecuencia causan distorsiones armónicas en la red eléctrica. Con los datos obtenidos en el caso #1, se observa que no es un problema de la energía eléctrica propio del país o de la marca de equipos, sino de diseño electrónico en los rectificadores.
- Después del análisis realizado en el caso #2, se confirma que los efectos nocivos se ven reducidos por el tipo de carga analizada, ya que los variadores de frecuencia al no trabajar al 100% de su carga disminuyen su corriente nominal, esto ayuda a reducir el impacto en pérdidas por efecto Joule. Según cálculos estimados, el incremento de las pérdidas por calentamiento en los conductores, en promedio es de un 5.23%, sumando las pérdidas de la corriente fundamental y la corriente residual da un valor de 245.52 KWh, con un costo de ₡ 27,462.40 mensual. Este ramal solamente tiene variadores de frecuencia, por tanto, los armónicos de voltaje no generan ningún efecto dañino a otros equipos del proceso. En el caso #1, no se puede atribuir el mal funcionamiento del medidor de flujo ultrasónico a los armónicos generados por el variador de frecuencia.
- Según el estudio de ventajas y desventajas, queda al descubierto que ninguna solución funciona al 100% en todas las aplicaciones y, que para implementar alguna de las soluciones planteadas es obligatorio efectuar un estudio de calidad de energía enfocado en distorsión armónica al sistema eléctrico impactado por este fenómeno y seguir los criterios de selección. Ante lo citado, se puede determinar que, sin un estudio realizado a nivel ingenieril, la solución seleccionada puede no generar el impacto deseado.

- Las soluciones existentes en el mercado para mitigar los armónicos utilizan diferentes métodos, empezando por el más básico, el uso de inductancias en línea con el variador de frecuencia, filtros pasivos sintonizados a una frecuencia específica hasta llegar a métodos más avanzados, como son los variadores de frecuencia de múltiples pulsos y los sistemas de frente activo.
- El desarrollo de los dos casos estudiados ayuda a confirmar la teoría planteada de las distorsiones armónicas en variadores de frecuencia. Los rectificadores de seis pulsos utilizados durante muchos años en estos equipos para reducir costos en la factura eléctrica son uno de los grandes responsables de causar distorsiones en la onda fundamental de la red eléctrica, los cuales pueden llegar a tener niveles vistos de hasta 168% de distorsión armónica de corriente. Esto permite tener un panorama del problema que actualmente generan estos equipos; asimismo, evidencia nuestra responsabilidad como ingenieros de idear soluciones para mitigar este fenómeno.
- De acuerdo con la teoría y las mediciones analizadas, se puede afirmar que el factor de cresta es un valor el cual permite darse cuenta de que existe un problema de distorsión armónica en la red eléctrica. Un valor superior a 1.4 en una onda fundamental sinusoidal de alimentación es un indicador de que existe una distorsión.
- Con la investigación realizada, se logra conocer que el país cuenta con una norma sobre la calidad de energía, la cual fue emitida en el 2015 por la ARESEP llamada ART-NT-SUCAL la cual habla en sus artículos doce y trece sobre los límites permitidos de distorsión armónica y actualmente no existe una multa vigente por no respetar esta norma.
- Esta tesis ayudará a los ingenieros y al personal encargado del mantenimiento eléctrico de una empresa a comprender cómo los variadores de frecuencia electrónicos generan armónicos y darse una idea de cómo cada solución puede o no servir en una aplicación;

o bien, facilitar una charla técnica con una persona especialista en el tema de calidad de energía eléctrica.

- En síntesis, el asunto relacionado con la calidad de energía dejó de ser un problema aislado para convertirse en un problema que todos los días va en crecimiento por el uso de diferentes dispositivos a nivel industrial. Dado esto, los ingenieros del departamento eléctrico de las empresas deberían de estar al tanto del tema para reconocer los diferentes efectos que generan este tipo de perturbaciones y, de esta manera, realizar las correcciones adecuadas con fundamento ingenieril 100% acertado.

## Recomendaciones

Al finalizar este estudio, se recomienda lo siguiente.

- Como parte de una buena práctica de Ingeniería Eléctrica, mantener actualizados los diagramas eléctricos de la empresa, con todos los datos posibles técnicos que debe de tener un plano eléctrico, calibres de cable, impedancias de transformadores, voltajes, tipos de cargas, potencias entre otros, así tomar decisiones rápidas y acertadas con fundamento ingenieril.
- A la Autoridad Reguladora de Servicios Públicos (ARESEP) iniciar con el monitoreo y cumplimiento de la normativa ART-NT-SUCAL, principalmente lo estipulado en los artículos 12 y 13 sobre los límites permitidos de distorsión armónica generados por los usuarios y con esto coadyuvar a mantener una buena calidad de energía en la red eléctrica nacional.
- La instalación de reactores de línea en todos los variadores de frecuencia, como primer paso para mitigar los armónicos y proteger estos equipos de problemas eléctricos generados en otros ramales de la instalación o descargas atmosféricas.
- A los ingenieros encargados de la parte eléctrica de las empresas, en general, colocar equipos en línea de calidad de energía eléctrica o como parte de sus rutinas de mantenimiento anuales realizar un estudio de armónicos, para asegurarse de mantener los niveles de armónicos en un rango dentro de los límites establecidos.
- Promover este tipo de temas de investigación entre los compañeros de Ingeniería Electromecánica para profundizar en este y otros temas relacionados en calidad de energía eléctrica; además, se invita a los docentes y al director de carrera a dar charlas con un experto en calidad de energía en la universidad para enriquecer el conocimiento en criterios de diseño eléctrico.

## **CAPÍTULO VI: PROPUESTA**

### **Descripción caso #1**

El proyecto pretende reducir los armónicos inyectados a la red eléctrica generados por el variador de frecuencia de 15 hp, utilizado para manejar la bomba de recirculación de agua ultrapura, por medio de un equipo para amortiguar estas perturbaciones.

Ante lo señalado, es necesario incorporar un equipo con capacidad de mitigar estos armónicos, las dimensiones de este equipo no pueden ser muy extensas debido a que la instalación es una instalación ya en uso.

Para este proyecto se plantearon tres posibles soluciones, en la primera solución un reactor de línea de 5% de impedancia trifásico modelo RL-04501; segunda opción, filtro pasivo trifásico modelo MAPP0044A; y, por último, un filtro activo modelo PQFS-M-03-IP30. Con los tres casos se estima mitigar los armónicos generados por el variador.

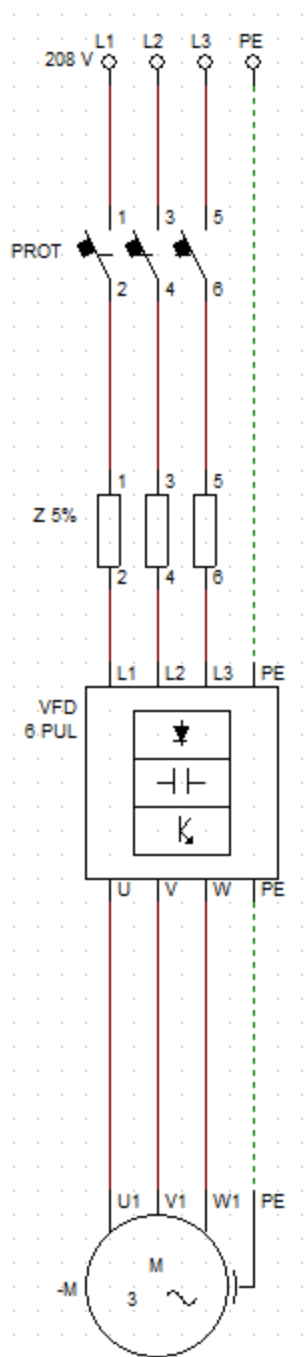
### **Propuesta de implementación del diseño caso #1**

El caso # 1, realizado en Panamá, el sistema cuenta con un variador de frecuencia de 6 pulsos de 15 hp, el cual inyecta armónicos a la red eléctrica; con base en las mediciones realizadas, se obtienen los datos de THDi que, en ese instante, tienen un promedio entre las tres líneas de alimentación de un 80%, según los cálculos realizados la corriente residual rms, en promedio sería de 6.19 amperios. Esta corriente residual incrementa las pérdidas por efecto Joule en los conductores.

Es debido a estas mediciones, a los criterios técnicos para seleccionar una solución y los datos que se tienen sobre el diseño eléctrico, se plantean tres propuestas económicas, y se elige para esta aplicación un reactor de línea con una impedancia de 5% marca MTE modelo RL-04501 de 45 amperios, este reactor se coloca en la entrada del variador de frecuencia.

Con este reactor podemos bajar el THDi en un 45.04%, a fin de obtener un THDi de 34,96% impactando directamente la corriente residual (reduciéndola a 3.14 A), que es el objetivo principal de aplicar soluciones a estos problemas. Además de mitigar los armónicos, ayuda a proteger el variador de perturbaciones proveniente de la red eléctrica. Si fuese necesario esta solución se puede complementar con otras soluciones para generar una mayor reducción de armónicos.

Figura 71: Ubicación del reactor de línea propuesto.



Fuente: Propia.

## **Descripción caso #2**

Como en la propuesta del caso #1, el objetivo de este proyecto pretende disminuir la distorsión armónica a los límites establecidos por la normativa ART-NT-SUCAL de la ARESEP y la IEEE 519, esta distorsión armónica es generada por los tres variadores de frecuencia instalados para manejar los motores de 2000 HP de los molinos.

A partir de lo preindicado, es necesario incorporar un equipo con capacidad de mitigar estos armónicos a niveles permitidos por la norma, las dimensiones de este equipo son un punto importante para considerar debido a que la instalación es existente.

Para este proyecto se plantearon dos posibles soluciones: la primera opción, es un variador de frecuencia de frente activo de 2000 HP marca Allen Bradley modelo 7000-A285DEBD-RPDTD-1EDSTP-1STR-3LL-14PVKLC-14TS1-750T-760<sup>a</sup>: Entre tanto, la segunda opción, un variador de frecuencia múltiples pulsos de 2000 HP marca Allen Bradley modelo 6000T-BA265ME6AJ-EHEU-1ESTP-3LB-13TCOMME-14TS1-14TS2-14TS4-89D6-5056. Con los dos casos, se estima mitigar los armónicos generados por los variadores a un valor dentro de lo estipulado en la norma nacional vigente (SUCAL).

## **Propuesta de implementación del diseño caso #2**

En este caso, el sistema cuenta con tres variadores de frecuencia de media tensión de 2000 HP que manejan los molinos, alimentados a una tensión de 4160 voltios; este ramal se alimenta con un transformador dedicado situado en la subestación de la empresa de una potencia de 7500 KVA, donde se realizaron las mediciones con un equipo fijo de medición de variables de calidad de energía, según las mediciones, se obtienen valores de TDD de 9.49% en promedio entre las tres líneas.

Uno de los hallazgos más importantes fue encontrar el medidor de calidad de energía donde se realizan las mediciones instalado en el secundario del transformador; por ende, mal instalado para asegurar mediciones confiables de TDD (según la IEEE 519 para una planta industrial el PCC está en el primario del transformador del usuario).

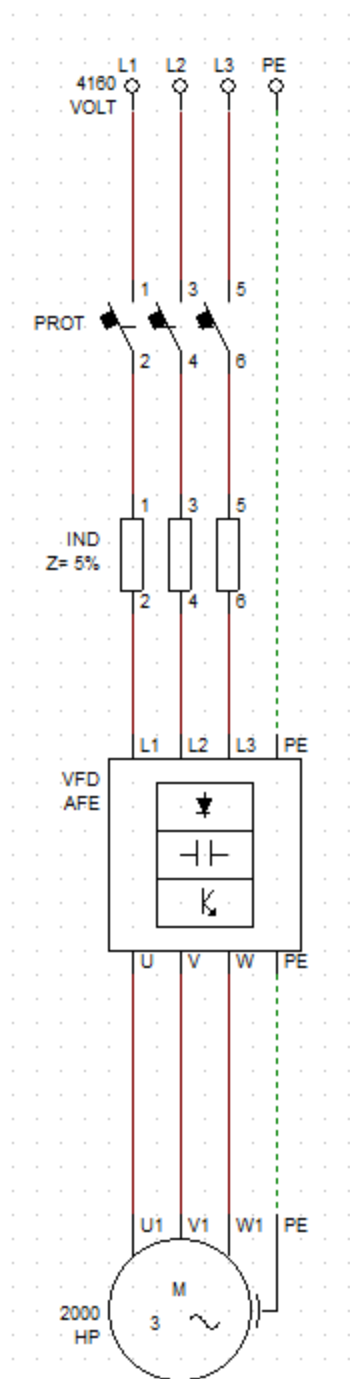
Una vez señalado lo anterior, se propone para este caso reinstalar el medidor de calidad de energía llamado Barra\_1C\_4160.Principal en el primario del transformador, calcular la corriente demandada promedio de los 12 meses anteriores y agregarlos en el registro 3233 del equipo antes

mencionado; con estas correcciones, realizar un estudio completo en temas de análisis de distorsión armónica y así tomar acciones con fundamentos técnicos y certeza de los datos medidos. Como manera opcional y validar los datos obtenidos por el equipo fijo, se puede realizar una medición con una empresa especializada en calidad de energía que según el

Anexo 13: Cotización de estudio de **calidad de energía** el costo es de ₡ 552,630.65 por 7 días 24 horas de recolección de datos de calidad de energía. Esta medición se realizaría para corroborar los datos recolectados por el medidor propiedad de Bridgestone.

Además de lo indicado, propone para futuras adquisiciones de variadores de frecuencia para este ramal ya sea para mejora o para futuros proyectos e independientemente de los resultados del análisis realizado posterior a las recomendaciones de mejoras, comprar variadores de frecuencia de frente activo para reducir los armónicos generados, tales variadores de frecuencia cuentan con la ventaja de tener un factor de potencia cercano a la unidad. Con el cambio de los tres variadores de frecuencia actuales, se puede eliminar el banco de condensadores, el cual funciona solamente para mejorar el factor de potencia cuando los variadores de frecuencia entran en funcionamiento y es un punto de falla adicional en este ramal.

Figura 72: Variador de frecuencia de Frente Activo propuesto.



Fuente: Propia.

## Referencias

- Abundis Couoh, Arturo. (2016). *Causas y efectos de armónicos en sistemas eléctricos de potencia*. Tesis de Bachiller. México, CD. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Álvarez Pulido, Manuel. (2000). *Convertidores de Frecuencia controladores de motores y SSR*. Andalucía. Marcombo Boixareu Editores.
- Aranda Mendoza, Jacob. (2015). *Análisis descriptivo de la amortiguación y eliminación de armónicos en sistemas eléctricos de potencia*. Tesis Bachiller. Lima. Universidad Nacional Del Centro de Perú.
- Araya Porras, Esteban Josué. (2008). *Diagnóstico de la calidad de la energía y evaluación de las instalaciones eléctricas en la Represa Hidroeléctrica Pirrís*. Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago. Repositorio Institucional- Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- ARESEP. (2015). *Normativa aprobada mediante resolución RJD-070-2015 de las 15:05 horas del 23 de abril de 2015*, publicada en el Alcance digital N°31 a La Gaceta N° 85 del 5 de mayo, 2015. [https://aresep.go.cr/images/documentos/ENERGIA/4.Normativa/Norma\\_tecnica\\_su\\_pervision\\_de\\_la\\_calidad\\_del\\_suministro\\_electrico\\_en\\_baja\\_y\\_media\\_tension\\_AR-NT-SUCAL-2015\\_actualizada\\_a\\_febrero\\_2016.pdf](https://aresep.go.cr/images/documentos/ENERGIA/4.Normativa/Norma_tecnica_su_pervision_de_la_calidad_del_suministro_electrico_en_baja_y_media_tension_AR-NT-SUCAL-2015_actualizada_a_febrero_2016.pdf).
- Barrantes Alvares, Oscar. (2010). *Guía de diseño eléctrico para el acondicionamiento en calidad de energía de la red*. Tesis de Licenciatura. San José. Universidad Internacional de las Américas. San José. Repositorio Institucional- Universidad Internacional de las Américas.
- Brenes Hernández, Luis. (2018). *Estudio de calidad de energía eléctrica en la instalación de Laboratorios Stein, Costa Rica*. Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago. Repositorio Institucional- Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Cáceres Chura, Eddy. (2019). *Estudio y análisis de armónicos en rectificadores estáticos de potencia eléctrica utilizando series de Fourier, para la región de puno*. Tesis Bachiller. Lima. Universidad Nacional de Altiplano Perú.

- Carnovale, Daniel J. P.E. Thomas J. Dionise, P.E Thomas M. Blooming, P.E. (s.f). ***Price and performance considerations for harmonic solutions Eaton***. Washington. | Cutler-Hammer.
- Chacón Murillo, Douglas. (2010). ***Estudio de calidad de energía para implementar un diseño de un sistema de energía renovable con base en energía solar para alimentar en edificio de la Universidad Internacional de las Américas***. Tesis de Licenciatura, Universidad Internacional de las Américas. San José. Repositorio Institucional- Universidad Internacional de las Américas.
- Chapman, David. (2001). ***Guía de calidad de la energía eléctrica. Armónicos causas y efectos***. Madrid. Copper Development Association UK.
- Chapman, J. (2015). ***Máquinas Eléctricas Stephen***. (Quinta edición). New York. Mc Graw Hill.
- Collins, Danielle. (2020). ***What is a motor choke and why is it used?*** Rescatado de: <https://www.motioncontroltips.com/what-is-a-dc-bus-choke-and-why-is-it-used/>
- Collombet, Christian; Lupin, Jean Marc; Schonek, Jacques. (2000). ***Cuaderno Técnico N°152 Schneider Electric***. Barcelona. Centro de Formación Schneider.
- Danfoss. (s.f). ***Manual de diseño Aplicaciones de HVAC y refrigeración diseño de instalaciones e ingeniería de proyectos con convertidores de frecuencia***. Santiago de Chile. Danfoss Ind. Ltd.
- Eaton. (2020). ***Presentación Harmonic Distortion from Variable Frequency Drives Eaton Electrical***. Rescatado de: <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/industrialcontrols-drives-automation-sensors/variable-frequency-drives/vfd-harmonics-solutions-br04007002e.pdf>
- Escalona Puppo, Osmar. (2008). ***Análisis de Armónicos en la empresa comandante Ernesto Che Guevara*** Tesis Máster. Holguín, Cuba. Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- Fell, Jeff. (2011). ***How to size a isolation transformer for a VFD***. ABB University. Rescatado de: <https://new.abb.com/drive>.

- Ferracci, P. (2004). *Cuaderno Técnico N°199 La calidad de la energía eléctrica, Schneider Electric*. Barcelona. Centro de Formación Schneider.
- Global Tec. (2008). *Transformadores de aislamiento para variadores de velocidad electrónicos, Número 2 Boletín mensual*. Cartago. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Harper, Gilberto. (2001). *El ABC de la calidad de la energía eléctrica*. México. Limusa, Noriega Editores, México.
- IEC Schneider Electric. (2010). *Guía de diseño de instalaciones eléctricas, según Normas Internacionales*. Madrid. IEC Schneider Electric.
- IEEE 519. (2014). *“Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems”*. Nueva Jersey, EU. IEEE.
- Kothari, D.P y Nagrath, I.J. (2008). *Sistemas Eléctricos de Potencia*. (Tercera Edición). New York. McGraw Hill.
- Mack, Grady. (2012). *Understanding Power System Harmonics Prof*. Texas. Dept. of Electrical & Computer Engineering University of Texas.
- Meléndez Frigola, Joaquín; Herraiz, Sergio; Jaramillo, Joan; Colomer, Llinds. (2005). *Calidad de onda en el servicio eléctrico N°360*. Girona, España. Universidad de Girona.
- Meléndez, J.; Herraiz, S.; Colomer Llinàs, J. (2005). *"Calidad de onda en el servicio eléctrico: causas y efectos de las perturbaciones que afectan la calidad de la electricidad."* *Automática e instrumentación 1*. Madrid, Ecnipublicaciones España, S.L
- Molina Guzmán, Bryan. (2017). *Efectos de la calidad de la energía en un circuito de distribución de la CNFL ante la conexión del Proyecto Eólico Valle Central. Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica. San José*. Repositorio Institucional- Universidad de Costa Rica.
- Nikunj, Shah. (2013). *Whitepaper Harmonics in Power System cause, effects, and control Siemens*. E.U. Rv-Wp-Drive Harmonics in Power Systems.

- Ovando Chajón, Sergio. (2000). *Sistema de protección inteligente contra perturbaciones eléctricas*. Tesis de Licenciatura. Cartago. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Repositorio Institucional- Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Ruggero Ríos, Bruno. (2014). *Incidencias de Cargas No Lineales en Transformadores de Distribución. Vol. 1 N°1*. Asunción, Paraguay. Universidad de Cono Sur de las Américas.
- Saquilmer Mendoza, Luis, (2007). *Análisis técnico y económico de sobretensiones por resonancia armónica en instalaciones industriales*. Tesis Bachiller. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Square, D. (1994). *Power System Harmonics Bulletin No 8803PD9402*. EU. Rescatado de: [https://download.schneider-electric.com/files?p\\_enDocType=Data+Bulletin&p\\_File\\_Name=8803PD9402.pdf&p\\_Doc\\_Ref=8803PD9402Power System Harmonics](https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Data+Bulletin&p_File_Name=8803PD9402.pdf&p_Doc_Ref=8803PD9402Power System Harmonics)
- Square, D. (1994). *Product Data Bulletin Power System Harmonics Causes and Effects of Variable Frequency Drives*. EU. Rescatado de: [https://download.schneider-electric.com/files?p\\_enDocType=Data+Bulletin&p\\_File\\_Name=8803PD9402.pdf&p\\_Doc\\_Ref=8803PD9402Power System Harmonics](https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Data+Bulletin&p_File_Name=8803PD9402.pdf&p_Doc_Ref=8803PD9402Power System Harmonics)
- Streicher, J. (2020). *How to calculate percent impedance on a line reactor or DC*. Wisconsin. Rockwell Automation Mequon.
- Vizcaino Torres, Raúl. (2017). *Análisis de la calidad de energía del sistema eléctrico de la zona cultural universitaria de la UNAM*. Tesis de Bachiller. México. Universidad Nacional Autónoma de México.

ANEXOS

## Anexo 1: Medidor portátil MDA550 Fluke

## TECHNICAL DATA

## Fluke MDA-510 and MDA-550 Motor Drive Analyzer

**KEY MEASUREMENTS**

Inverter output voltage, DC bus voltage and ripple voltage, harmonics, unbalance

**THREE POWERFUL TEST TOOLS IN ONE**

Motor-drive analyzer, waveform analyzer and recording data logger all in one

**HIGHEST SAFETY RATING IN THE INDUSTRY**

600 V CAT IV/1000 V CAT III rated for use at the service entrance and downstream

### Simplify complex motor-drive troubleshooting with guided test setups and automated drive measurements that provide reliable, repeatable test results.

The new Fluke MDA 510 and MDA 550 Motor-Drive Analyzers save time and eliminate the hassle of setting up complex measurements, while simplifying the troubleshooting process. Simply select a test and the step-by-step guided measurements show you where to make voltage and current connections, while the preset measurement profiles ensure you will capture all the data you need for each critical motor-drive section—from the input to the output, the DC bus, and the motor itself. From basic to advanced measurements, the MDA-500 Series has you covered, and with a built-in report generator you can quickly and easily generate as-found, and as-left reports with confidence.

The MDA-510 and MDA-550 are the ideal portable motor-drive analysis test tools, and can help safely locate and troubleshoot typical problems on inverter type motor-drive systems.

- **Measure key motor-drive parameters** including voltage, current, DC Bus voltage level and AC ripple, voltage and current unbalance and harmonics (MDA-550), voltage modulation, and motor shaft voltage discharges (MDA-550).
- **Perform extended harmonics measurements** to identify the effects of low and high order harmonics on your electrical power system.
- **Conduct guided measurements** for motor-drive input, DC bus, drive output, motor input and shaft measurements (MDA-550) with graphical step-by-step voltage and current connection diagrams.
- **Use simplified measurement setup** with preset measurement profiles to automatically trigger data collection based on the chosen test procedure.
- **Create reports quickly and easily** that are perfect for documenting troubleshooting and collaborative work with others.
- **Measure additional electrical parameters** with full 500 MHz oscilloscope, meter and recording capability for complete range of electrical and electronic measurement on industrial systems.

Anexo 2: Medidor fijo CM4250

# PowerLogic<sup>®</sup> Circuit Monitor

## Series 4000 Reference Manual

(Includes Models 4000, 4250, 4000T)

Retain for future use.



Anexo 3: Corriente de entrada variador Power Flex 525

Fuses and Circuit Breakers for PowerFlex 520-Series Drives (continued)

200...240V 3-Phase Input Protection Devices - Frames A...E

Catalog No. (1)	Output Ratings				Input Ratings		Frame Size	Contactor Catalog No.	IEC Applications (Non-UL)				UL Applications		Min. Enclosure Vol. (in.³)			
	NO	HP	KW	HD	HP	KW			Amps	kVA	Max Amps (2)	Fuses (Rating)		Circuit Breakers		Fuses (Max. Rating) Class / Catalog No.	Circuit Breakers	
Min.							Max.	140U/140G				140M	140U/140G	140M	140U/140G		140M (3)(4)(5)	
25A-B1P6N104	-	0.25	0.2	0.25	0.2	1.6	0.9	1.9	A	100-039	3	6	140U-D603-830	140M	CLASS RK5, CC, J, or T / DLS-R-15	140U-D603-830	140M-C2E-825	-
25A-B2P5N104	25B-B2P5N104	0.5	0.4	0.5	0.4	2.5	1.2	2.7	A	100-039	6	6	140U-D603-840	140M-C2E-840	CLASS RK5, CC, J, or T / DLS-R-6	140U-D603-840	140M-C2E-840	-
25A-B3P2N104	25B-B3P2N104	1.0	0.75	1.0	0.75	5.0	2.7	5.8	A	100-039	10	16	140U-D603-880	140M-C2E-863	CLASS RK5, CC, J, or T / DLS-R-15	140U-D603-880	140M-C2E-863	-
25A-B4P1N104	25B-B4P1N104	2.0	1.5	2.0	1.5	8.0	4.3	9.5	A	100-C12	16	20	140U-D603-C10	140M-C2E-C10	CLASS RK5, CC, J, or T / DLS-R-20	140U-D603-C10	140M-C2E-C10	-
25A-B01N104	25B-B01N104	3.0	2.2	3.0	2.2	11.0	6.3	13.8	A	100-C23	20	32	140U-D603-C15	140M-C2E-C16	CLASS RK5, CC, J, or T / DLS-R-30	140U-D603-C15	140M-C2E-C16	-
25A-B07N104	25B-B07N104	5.0	4.0	5.0	4.0	17.5	9.6	21.1	B	100-C23	32	45	140U-D603-C25	140M-C8E-C25	CLASS CC, J, or T / 45	140U-D603-C25	140M-C8E-C25	-
25A-B024N104	25B-B024N104	7.5	5.5	7.5	5.5	24.0	12.2	26.6	C	100-C37	35	63	140G-6603-C35	140M-C8E-C32	CLASS CC, J, or T / 60	140M-C8E-C32	140M-C8E-C32	-
25A-B032N104	25B-B032N104	10.0	7.5	10.0	7.5	32.2	15.9	34.8	D	100-C43	45	70	140G-6603-C60	140M-C8E-C45	CLASS RK5, CC, J, or T / DLS-R-70	140M-C8E-C45	140M-C8E-C45	-
25A-B048N104	25B-B048N104	15.0	11.0	15.0	11.0	48.3	20.1	44.0	E	100-C60	63	90	140G-6603-C70	140M-C8E-C45	CLASS CC, J, or T / 90	140M-C8E-C45	140M-C8E-C45	140G (6)
25A-B062N104	25B-B062N104	20.0	15.0	20.0	15.0	62.1	25.6	56.0	E	100-C72	70	125	140G-6603-C90	140M-C8E-C45	CLASS CC, J, or T / 125	140M-C8E-C45	140M-C8E-C45	-

## Anexo 4: Reactor de línea marca MTE

Get best-in-class performance with our RL Line/Load Reactors.



Our RL Line/Load Reactors are a robust, best-in-class filtering solution for virtually any 4 or 6-pulse rectifier or power conversion unit. There is no need to derate these reactors. They are harmonic compensated and protected to assure optimum performance in the presence of harmonics, and can help you meet IEEE-519 requirements. There are units available for a full line of currents (1A to 1,500A) and a full line of impedance options (1.5%, 3% and 5%).

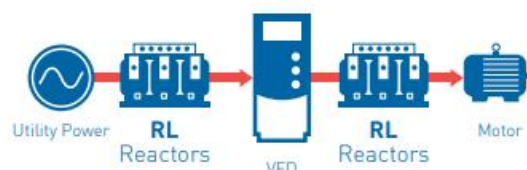
**Robust design and construction** for unequaled filtering of power line disturbances.

**Highest continuous service factor** virtually eliminates breakdowns in the field.

**Reduces audible noise.**

**Multiple cabinet designs** help meet NEMA 1/2 and 3R.

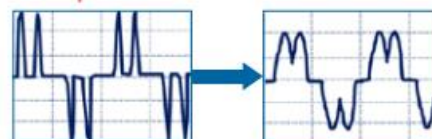
RL  
Reactors



Performance Specifications	
Impedance Levels	1.5%, 3% and 5%
Continuous Service Factor	Reactors rated 1 to 750 Amps - 150% of rating Reactors rated above 750 Amps - 125% of rating
Overload Rating	200% of rated for 30 minutes 300% of rated for 1 minute
Input Voltage Range	208V - 690V
Current Range	1A - 1,500A
Temperature Rise	135°C
Ambient Temperature	-40 to 50°C
Altitude Maximum Without Derating	1,000 meters
Fundamental Frequency	50/60 Hz
Inductance Curve	100% at 100% Current 100% at 150% Current 50% at 350% Current

Final product specifications subject to change at anytime.

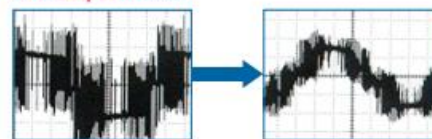
MTE Input Reactor



Waveform without reactor

Waveform with reactor

MTE Output Reactor



Waveform without reactor

Waveform with reactor

## Anexo 5: Filtro pasivo trifásico marca MTE

Improve power quality and reduce downtime with our patented Adaptive Passive Technology.



The best-in-class Matrix® AP Harmonic Filters can be specified for use on the input of your VFD or other 6-pulse rectifier power supply to enable your system to meet the IEEE-519 requirements for harmonic distortion, regardless of power load.

**Features our patented Adaptive Passive Technology** for superior harmonic mitigation and better THID performance over a wider load range.

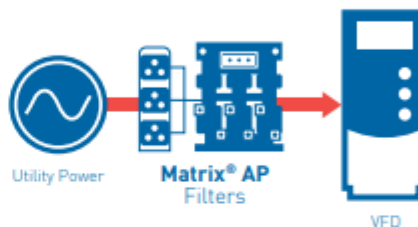
**MTE performance guarantee** provides peace of mind that the Matrix AP will meet or exceed performance expectations - every time.

**Extends service life of electrical equipment**, especially transformers and motors, due to the virtual elimination of CEMF and the skin effect.

**Alleviates system downtime** by preventing blown fuses and tripped circuit breakers.

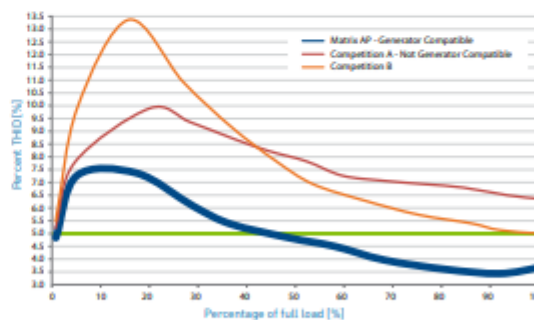
**Industry leading THREE year warranty** because the best products deserve the best warranty.

### Matrix® AP



Performance Specifications	
Service Load Condition	Load: 6-pulse rectifier only
Input Voltage	208 - 240V +/- 10%; 60 Hz; 3-phase 380 - 415V +/- 10%; 50 Hz; 3-phase 480V +/- 10%; 60 Hz; 3-phase 600V +/- 10%; 60 Hz; 3-phase 690V +/- 10%; 50 Hz; 3-phase
Current Range	208 - 240V: 6A - 403A (3 HP - 150 HP) 380 - 415V: 6A - 1200A (1.1 KW - 600 KW) 480V: 6A - 2300A (3 HP - 1850 HP) 600V: 6A - 786A (5 HP - 800 HP) 690V: 52A - 636A (37 KW - 450 KW)
Maximum THID	8% @ 30% load; 5% @ full load
Maximum Ambient Temperature	-40C to +50C open panel filter -40C to +40C - 45C enclosed filter -40C to +90C storage
Insertion Loss @ Full Load	<4%
Efficiency	97% - 99%
Altitude Without Derating	3,300 feet above sea level
Relative Humidity	0% to 95% non-condensing
Current Rating	150% for 1 minute duration

MTE vs. Competition THID [%]



Matrix AP Harmonic Filters can help ensure that your system meets the IEEE-519 requirements for harmonic current.

## Matrix AP 208-240 Volts, 60Hz Selection Tables

### Open Panel

**Table 4-1: Matrix AP 208V-240V Open Panel**

Motor HP	Filter Amps Rating	Part Number	App. Wt. (lbs.)	Open Magnetics (in.) (H x W x D)	Capacitor (in.) (H x W) Capacitor Panel (in.) (H x W x D)
1.5	6	<a href="#">MAPP0006A</a>	19	8.5 x 8.0 x 5.4	7.5 x 3.0
2	8	<a href="#">MAPP0008A</a>	19	8.5 x 8.0 x 5.4	7.5 x 3.0
3	11	<a href="#">MAPP0011A</a>	22	8.6 x 8.0 x 5.4	7.5 x 4.6
5	14	<a href="#">MAPP0014A</a>	21	8.6 x 8.0 x 5.4	7.5 x 3.9
5	21	<a href="#">MAPP0021A</a>	30	9.8 X 8.0 X 4.8	9.1 x 4.6
7.5	27	<a href="#">MAPP0027A</a>	36	9.7 x 9.0 x 5.3	9.1 x 4.6
10	34	<a href="#">MAPP0034A</a>	51	11.7 x 10.5 x 6.7	10.6 x 4.6
15	44	<a href="#">MAPP0044A</a>	52	11.6 x 10.5 x 7.2	9.0 x 4.6
20	52	<a href="#">MAPP0052A</a>	56	11.7 x 10.5 x 7.2	9.0 x 3.5
25	66	<a href="#">MAPP0066A</a>	64	11.6 x 10.5 x 7.7	9.0 x 3.9
30	83	<a href="#">MAPP0083A</a>	77	11.6 x 10.5 x 9.1	9.0 x 3.9
40	103	<a href="#">MAPP0103A</a>	111	14.0 x 12.0 x 9.6	10.6 x 4.6 10.6 x 4.6
50	128	<a href="#">MAPP0128A</a>	134	14.0 x 12.0 x 10.8	10.6 x 4.6 10.6 x 4.6
60	165	<a href="#">MAPP0165A</a>	157	13.9 x 13.4 x 12.0	10.6 x 4.6 9.0 x 4.6
75	208	<a href="#">MAPP0208A</a>	174	14.0 x 13.4 x 12.0	9.0 x 4.6 9.0 x 4.6
100	240	<a href="#">MAPP0240A</a>	225	19.9 x 15.3 x 11.9	6.7 x 7.6 x 16.4
125	320	<a href="#">MAPP0320A</a>	263	19.9 x 15.3 x 12.8	6.7 x 7.6 x 16.4
150	403	<a href="#">MAPP0403A</a>	280	20.0 x 15.3 x 12.8	8.3 x 7.6 x 16.4

## Anexo 6: Filtro activo marca ABB

Model	PQFI	PQFM	PQFS
<b>Electrical characteristics</b>			
Connection method	3-wire		3-wire/4-wire
Network voltage <sup>(1)</sup> <b>Note: select V2 for 600V</b>	V1: 208-480V V2: 480-600V for cULus version and upto 690V for IEC version		208-240V 380-415V
Network frequency	50 Hz/60 Hz - +/- 5%		
Line current rating per base unit (A <sub>max</sub> )	V1: 300A, 450A V2: 180A, 320A <sup>(2)</sup>	V1: 70A, 100A, 130A, 150A V2: 100A	30A, 45A, 60A, 70A, 80A, 90A, 100A, 120A
Neutral current rating per base unit (A <sub>max</sub> )	-		3 times the line current rating <sup>(3)</sup>
Modularity <sup>(4)</sup>	Maximum 8 units can be combined		Maximum 4 units combined
Redundancy <sup>(5)</sup>	Master/master or master/slave arrangement		
Equipment losses	3% of the equipment power typically		
Internal power circuit protection	Main breaker	Fuse block + Class J fuse standard incoming protection	-
<b>Filter characteristics</b>			
Harmonic range	2 <sup>nd</sup> to 50 <sup>th</sup> order		
Harmonics selectable simultaneously	20 orders		3-wire: 20 orders 4-wire: 15 orders
Filtering degree	Programmable per harmonic in absolute Ampere value		
Harmonic attenuation factor (I <sub>h</sub> (source)/I <sub>h</sub> (load))	Better than 97% at rated load		
Reaction time	< 0.5 ms instantaneous response		
Response time	2 networks cycles typically (10-90% filtering)		
<b>Reactive power characteristics</b>			
Target cos φ	Programmable from 0.6 (inductive) to 0.6 (capacitive) <sup>(6)</sup>		
<b>Load balancing characteristics</b>			
Modes	L-L: ON/OFF		L-L: ON/OFF L-N: ON/OFF
<b>Programming/Communication</b>			
Digital I/O	2 digital inputs/6 digital outputs and one NO Fan contact (potential free)		
Alarm contact	1 NO/NC alarm contact (potential free)		
Programming/Monitoring	Using PQF-Manager GUI One standard Modbus TCP Ethernet or optional Modbus RTU interface PQF-Link software (optional extra)		

## Anexo 7: Cotización de filtro activo de 50 amperios 480 V



**KENFER JIMÉNEZ Y ASOCIADOS S.A.**

Cedula Jurídica 3-101-284699-20



SIEMENS



### OFERTA COMERCIAL

- Validez de la oferta: 30 días calendario a partir de esta fecha.
- Valor de oferta: \$ 14,513.27 + I.V. (\$ 16,400.00 I.V.I.)
- Forma de pago: 50% con la orden de compra, 30% previo al despacho y saldo Crédito a 30 días posterior a la facturación, se factura una vez listo para despacho
- Tiempo de entrega: 6-8 semanas hábiles a partir de su orden de compra en firme y el anticipo solicitado.
- Lugar de entrega: Sus instalaciones La Uruca.
- Orden de compra: **POR FAVOR DE SALIR FAVORECIDOS CON SU ORDEN DE COMPRA DIRIGIRLA A KENFER JIMENEZ Y ASOCIADOS S.A.**




C.G.M. mejorando día con día para beneficio de nuestros estimables clientes.

Atentamente,

Carlos A. Chavarria C.  
**GERENTE GENERAL**

## Anexo 8: Variador de Frecuencia de frente de Frente Activo y Múltiples pulsos

### PowerFlex Medium Voltage AC Drives

POWERFLEX AC DRIVES	PowerFlex® 6000		PowerFlex® 7000	
	 Air-Cooled	 Air-Cooled	 Liquid-Cooled	
Description				
Power Rating Range @ 2.3/2.4 kV	(UL/CSA) 137...702 kW (183...941 Hp)	150...1500 kW (200...2000 Hp)	–	
Power Rating Range @ 3 kV	(IEC) 160...1650 kW (214...2211 Hp)	–	–	
Power Rating Range @ 3.3 kV	(IEC) 176...1815 kW (235...2432 Hp)	187...3600 kW (250...4750 Hp)	–	
Power Rating Range @ 4/4.16 kV	(IEC) 220...2350 kW (294...3150 Hp) (UL/CSA) 225...1220 kW (300...1635 Hp)	261...4400 kW (350...5750 Hp)	2240...3900 kW (3000...5000 Hp)	
Power Rating Range @ 6 kV	(IEC) 200...3350 kW (268...4490 Hp) (UL/CSA) 300...1753 kW (402...2350 Hp)	–	–	
Power Rating Range @ 6.3 kV	(UL/CSA) 286...1852 kW (384...2482 Hp)	–	–	
Power Rating Range @ 6.6 kV	(IEC) 220...3685 kW (294...4939 Hp) (UL/CSA) 300...1940 kW (400...2600 Hp)	400...6000 kW (500...8000 Hp)	3000...5595 kW (4000...7500 Hp)	
Power Rating Range @ 10 kV	(IEC) 200...5600 kW (268...7506 Hp)	–	–	
Motor Type	Induction motor	Induction or synchronous motor		
Input Voltage Rating	(IEC) 3 kV, 3.3 kV, 4.16 kV, 6 kV, 6.6 kV, 10 kV (UL/CSA): 2.4 kV, 4.16 kV, 6.6 kV, 6.9 kV	2.4 kV, 3.3 kV, 4.16 kV, 6.6 kV	4.16 kV, 6.6 kV	
Input Voltage Tolerance	±10% of nominal	±10% of nominal		
Input Voltage Sag	-20% of nominal, duration 60 seconds	-30% of nominal, continuous with derating		
Input Frequency	50/60 Hz, ±5%	50/60 Hz, ±5%		
Input Power Factor	>.95	>.95 (AFE Rectifier)		
Input Impedance Device	<b>Multiphase isolation transformer</b>	Line reactor (Direct-to-Drive AFE), isolation transformer (AFE), or multiphase isolation transformer (18 Pulse)		
VFD Efficiency	> 96%*	> 97.5% (Direct-to-Drive AFE), > 98% (18 Pulse)		
VFD Noise Level	< 80 dB (A)	< 85 dB (A)		
Output Voltage	0...2300/2400 V, 0...3000 V, 0...3300 V, 0...4000/4160 V, 0...6000 V, 0...6300 V, 0...6600 V, 0...10,000 V	0...2300 V, 0...3300 V, 0...4000 V, 0...6600 V	0...4000 V, 0...6600 V	
Overload Capacity	120% overload for 1 min every 10 min	110% overload for 1 min every 10 min (normal duty/variable torque load) 150% overload for 1 min every 10 min (heavy duty/constant torque load)		
Rectifier Configurations	18-Pulse, 24-Pulse, 36-Pulse, 54-Pulse	Direct-to-Drive™ (transformerless AFE rectifier) AFE with separate isolation transformer AFE with integrated transformer 18-Pulse with separate isolation transformer	Direct-to-Drive™ (transformerless AFE rectifier) AFE with separate isolation transformer 18-Pulse with separate isolation transformer	
Rectifier Switch	Diodes	SGCTs (AFE Rectifier), SCRs (18 Pulse)		
Inverter Configuration	Pulse Width Modulated (PWM) power modules	Pulse Width Modulated (PWM) power modules		
Inverter Switch	IGBTs	SGCTs		
Output Current THD (1st...49th)	< 5%	< 5%		
Output Waveforms to Motor	Near sinusoidal current and voltage	Near sinusoidal current and voltage		

## Anexo 9: Ficha técnica del cable de alimentación

### Cable de Media Tensión, Cu, 15 kV, XLP o XLP-RA 100% y 133% NA, Pantalla de Alambre, Cubierta PEAD o PVC, Uso Seco o Húmedo

#### Información técnica.

#### Cubierta PVC Ambiente húmedo:



Calibre aproximado	Tensión	Área nominal de la sección transversal	Diámetro del conductor Nominal	Número de alambres	Resistencia conductor Nominal a 20°C	Espesor Nominal del aislamiento 100 % NA	Diámetro sobre el aislamiento aproximado	Pantalla (No. Alambres / AWG)	Diámetro total aproximado	Peso Total aproximado	
		mm <sup>2</sup>	mm	No.	Ohm/km	mm	mm		mm	kg/km	
2	AWG	15 KV	33.6	6.8	7	0.521	4.45	17	12H/22AWG	27	873
1/0	AWG	15 KV	53.5	8.6	18 <sup>1</sup>	0.328	4.45	19	12H/22AWG	29	1108
2/0	AWG	15 KV	67.4	9.6	18 <sup>1</sup>	0.261	4.45	20	12H/22AWG	30	1268
3/0	AWG	15 KV	85	10.8	18 <sup>1</sup>	0.206	4.45	21	12H/22AWG	31	1469
4/0	AWG	15 KV	107	12.1	18 <sup>1</sup>	0.164	4.45	23	12H/22AWG	32	1714
250	kcmil	15 KV	127	13.2	35 <sup>2</sup>	0.139	4.45	24	16H/22AWG	34	1961
300	kcmil	15 KV	152	14.5	35 <sup>2</sup>	0.116	4.45	25	16H/22AWG	35	2249
350	kcmil	15 KV	177	15.7	35 <sup>2</sup>	0.099	4.45	26	16H/22AWG	36	2522
400	kcmil	15 KV	203	16.7	35 <sup>2</sup>	0.0865	4.45	27	16H/22AWG	37	2788
500	kcmil	15 KV	253	18.7	35 <sup>2</sup>	0.0695	4.45	29	16H/22AWG	39	3322
600	kcmil	15 KV	304	20.6	58 <sup>3</sup>	0.0577	4.45	33	20H/22AWG	44	4070
750	kcmil	15 KV	380	23.0	58 <sup>3</sup>	0.0462	4.45	35	20H/22AWG	47	4873
1000	kcmil	15 KV	507	26.9	58 <sup>3</sup>	0.0347	4.45	39	20H/22AWG	51	6245

**Nota:** Construcción opcional (1) 19 alambres, (2) 37 alambres y (3) 61 alambres, en caso de requerir en esta construcción especificar en la solicitud de cotización. Los valores aquí indicados son aproximados y de acuerdo a tolerancias de normas de fabricación, por lo cual pueden sufrir variaciones.

Calibre aproximado	Tensión	Área nominal de la sección transversal	Diámetro del conductor Nominal	Número de alambres	Resistencia conductor Nominal a 20°C	Espesor Nominal del aislamiento 133 % NA	Diámetro sobre el aislamiento aproximado	Pantalla (No. Alambres / AWG)	Diámetro total aproximado	Peso Total aproximado	
		mm <sup>2</sup>	mm	No.	Ohm/km	mm	mm		mm	kg/km	
2	AWG	15 KV	33.6	6.8	7	0.521	5.6	20	12H/22AWG	29	969
1/0	AWG	15 KV	53.5	8.6	18 <sup>1</sup>	0.328	5.6	21	12H/22AWG	31	1211
2/0	AWG	15 KV	67.4	9.6	18 <sup>1</sup>	0.261	5.6	22	12H/22AWG	32	1374
3/0	AWG	15 KV	85	10.8	18 <sup>1</sup>	0.206	5.6	24	12H/22AWG	33	1580
4/0	AWG	15 KV	107	12.1	18 <sup>1</sup>	0.164	5.6	25	12H/22AWG	35	1841
250	kcmil	15 KV	127	13.2	35 <sup>2</sup>	0.139	5.6	26	16H/22AWG	36	2094
300	kcmil	15 KV	152	14.5	35 <sup>2</sup>	0.116	5.6	28	16H/22AWG	37	2374
350	kcmil	15 KV	177	15.7	35 <sup>2</sup>	0.099	5.6	29	16H/22AWG	39	2651
400	kcmil	15 KV	203	16.7	35 <sup>2</sup>	0.0865	5.6	30	16H/22AWG	40	2921
500	kcmil	15 KV	253	18.7	35 <sup>2</sup>	0.0695	5.6	32	16H/22AWG	43	3626
600	kcmil	15 KV	304	20.6	58 <sup>3</sup>	0.0577	5.6	35	20H/22AWG	46	4229
750	kcmil	15 KV	380	23.0	58 <sup>3</sup>	0.0462	5.6	37	20H/22AWG	49	5095
1000	kcmil	15 KV	507	26.9	58 <sup>3</sup>	0.0347	5.6	41	20H/22AWG	53	6429

**Nota:** Construcción opcional (1) 19 alambres, (2) 37 alambres y (3) 61 alambres, en caso de requerir en esta construcción especificar en la solicitud de cotización. Los valores aquí indicados son aproximados y de acuerdo a tolerancias de normas de fabricación, por lo cual pueden sufrir variaciones.

### Anexo 10: Costo de energía eléctrica en punta

Factura energía eléctrica - ION 9200					
Fecha inicio: 01/03/2021 06:00			Fecha final: 01/03/2021 06:00		
Consumo de energía -kWh-				Máxima demanda	
Período	Consumida	Costo	Total	Período	Demanda máxima
Punta	109762	€ 112.74	€ 12374570.00	Punta	7227.7725
Valle	207292	€ 38.73	€ 8028420.00	Valle	7536.213
Nocturno	254246	€ 24.86	€ 6320555.00	Nocturno	7139.43
Sub Total	571300		€ 26723545.00	Sub Total	
<b>Factor de potencia (%)</b>					

## Anexo 11: Manual Equipo CM4250

63230-300-212B1  
12/2005PowerLogic® Circuit Monitor Series 4000 Reference Manual  
Appendix C—Abbreviated Register Listing

Table C-3: Abbreviated Register List (continued)

Reg	Name	Size	Type	Access	NV	Scale	Units	Range	Notes
1270	Distortion Power Factor, Phase C	1	Integer	RO	N	xx	0.10%	0 – 1,000 (-32,768 If N/A)	4-wire system only
1271	Distortion Power Factor, Total	1	Integer	RO	N	xx	0.10%	0 – 1,000	
<b>Harmonic Current and Voltage</b>									
1274	Harmonic Current, Phase A	1	Integer	RO	N	A	Amperes/Scale	0 – 32,767	
1275	Harmonic Current, Phase B	1	Integer	RO	N	A	Amperes/Scale	0 – 32,767	
1276	Harmonic Current, Phase C	1	Integer	RO	N	A	Amperes/Scale	0 – 32,767	
1277	Harmonic Current, Neutral	1	Integer	RO	N	B	Amperes/Scale	0 – 32,767 (-32,768 If N/A)	4-wire system only
1278	Harmonic Voltage, A-N/A-B	1	Integer	RO	N	D	Volts/Scale	0 – 32,767	Voltage A-N (4-wire system) Voltage A-B (3-wire system)
1279	Harmonic Voltage, B-N/B-C	1	Integer	RO	N	D	Volts/Scale	0 – 32,767	Voltage B-N (4-wire system) Voltage B-C (3-wire system)
1280	Harmonic Voltage, C-N/C-A	1	Integer	RO	N	D	Volts/Scale	0 – 32,767	Voltage C-N (4-wire system) Voltage C-A (3-wire system)
1281	Total Demand Distortion	1	Integer	RO	N	xx	0.1%	0 – 1,000	Calculated based on Peak Current Demand Over Last Year entered by user in register 3233
1282	Harmonic Power Flow	1	Bitmap	RO	N	xx	xxxxxxxx	0x0000 – 0x0F0F	Describes harmonic power flow per phase and total 0 = into load, 1 = out of load Bit 00 = kW Phase A Bit 01 = kW Phase B Bit 02 = kW Phase C Bit 03 = kW Total Bit 04 = reserved Bit 05 = reserved Bit 06 = reserved Bit 07 = reserved Bit 08 = kVA Phase A Bit 09 = kVA Phase B Bit 10 = kVA Phase C Bit 11 = kVA Total Bit 12 = reserved Bit 13 = reserved Bit 14 = reserved Bit 15 = reserved
<b>Sequence Components</b>									
1284	Current, Positive Sequence, Magnitude	1	Integer	RO	N	A	Amperes/Scale	0 – 32,767	
1285	Current, Positive Sequence, Angle	1	Integer	RO	N	xx	0.1	0 – 3,599	
1286	Current, Negative Sequence, Magnitude	1	Integer	RO	N	A	Amperes/Scale	0 – 32,767	
1287	Current, Negative Sequence, Angle	1	Integer	RO	N	xx	0.1	0 – 3,599	
1288	Current, Zero Sequence, Magnitude	1	Integer	RO	N	A	Amperes/Scale	0 – 32,767	
RO = Read only. R/CW = Read configure writeable if in a setup session. NV = Nonvolatile. ① See "How Power Factor Is Stored In the Register" on page 178. ② See "How Date and Time Are Stored In Registers" on page 178.									

## Anexo 12: Cotización de equipos para mitigación de armónicos



ELVATRON S.A  
Cédula Jurídica N° 3-101-020826-35  
Tel.: 2242-9900 - Fax.: 2520-0697  
425 mts Norte de la Entrada Principal de la CNFL  
Costa Rica, San José, Central, La Uruca,  
www.elvatron.com

Cotización No.  
P35-AB05J8 Versión: 1

Página: 1 de 1
Fecha de emisión: 10/03/2021
Fecha de vencimiento: 18/03/2021

Asunto: EQUIPOS

Cliente: CONTADO	Condición de venta: Contado	
Dirección: SAN JOSE, COSTA RICA	Vendedor: Ignacio Monge	Cel: ND
Contacto: Juan Ignacio Monge Alvarado	Teléfono: 22429900 Ext: 155	Fax: DN
C/T: juan-ignacio-26@hotmail.com/No Indica	Correo: ignacio.monge@elvatron.com	

LIN.	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANT.	T.ENTREGA	PRECIO UNI.	TOTAL LÍNEA
1	ELX-2-P-INSTM-APP	REACTOR DE LÍNEA MARCA MTE MODELO RL-04501 DE 45 AMPERIOS TRIFASICO IMPEDANCIA DE 5% VOLTAJE 208 VOLTIOS PARA VARIADOR DE FRECUENCIA	1	05-06 SEMANAS	¢ 446,088.45	¢ 446,088.45
2	ELX-2-P-INSTM-APP	FILTRO PASIVO PARA VARIADOR DE FRECUENCIA DE 6 PULSOS MODELO MAPP0044A MARCA MTE VOLTAJE DE ALIMENTACION 208 VOLTIOS	1	10-11 SEMANAS	¢ 1,809,494.18	¢ 1,809,494.18
3	ELX-2-P-INSTM-APP	TRANSFORMADOR DE AISLAMIENTO MARCA SOLA HD MODELO DT651H20S DE 20 KVA PARA VARIADOR DE FRECUENCIA 15 HP	1	19-20 SEMANAS	¢ 1,918,027.04	¢ 1,918,027.04
4	ELX-2-P-INSTM-APP	VARIADOR DE FRECUENCIA DE FREENTE ACTIVO MARCA ALLEN BRADLEY MODELO 7000-A285DEBD-RPDTD-1EDSTP-1STR-3LL-14PVKLC-14TS1-750T-760* VOLTAJE DE ALIMENTACION 4160 V POTENCIA 2000 HP FACTOR DE POTENCIA 1	1	ND	¢ 165,558,600.00	¢ 165,558,600.00
5	ELX-2-P-INSTM-APP	VARIADOR DE FRECUENCIA MARCA ALLEN BRADLEY DE MULTIPLES PULSOS 6000T-BA265ME6AJ-EHEU-1ESTP-3LB-13TCOMME-14TS1-14TS2-14TS4-89D6-5056 VOLTAJE DE ALIMENTACION 4160 V POTENCIA 2000 HP FACTOR DE POTENCIA 1	1	ND	¢ 303,462,782.00	¢ 303,462,782.00

Notas:

SUB - TOTAL	¢ 473,194,391.67
N/A	¢ 61,515,348.32
TOTAL	¢ 534,710,340.59

## Anexo 13: Cotización de estudio de calidad de energía



# Cotización

**Preparada para:** Juan Ignacio Monge Alvarado

**Cotización:** OP20-14855

Juan-ignacio-26@hotmail.com  
San José, Costa Rica

**Fecha:** 10/marzo/2021

**Asunto:** Mediciones de Calidad de Energía

### 1. DESCRIPCIÓN

> **Lugar:**

Dentro del GAM

> **Variables a monitorear:**

- Tensión y Corriente.
- THD en tensión y corriente.
- Espectro armónico
- Desbalance.
- Potencia.
- Transitorios, Sags y Swells.
- Frecuencia.

> **Incluye:**

- Una visita por cada conexión y desconexión de equipos que se deba realizar.
- Generación de reporte digital.

> **Equipo Utilizado:**

Analizador de Calidad de Energía FLUKE 435.

> **Reporte Digital:**

- Incluye resultados del monitoreo, gráficos, observaciones y recomendaciones.
- Se entregará digital, vía e-mail. Si el cliente lo desea impreso se le aplicará un recargo de \$2 por hoja, más envío.

> **Responsabilidad del cliente:**

- Todo equipo perteneciente a Sistemas IQ que sea instalado en propiedad del cliente, queda bajo la responsabilidad de este último (se debe firmar una carta de responsabilidad).
- Personal técnico con conocimientos de la planta debe estar disponible en todo momento de las visitas para manipulación de tableros y equipos propios del cliente, y para aclarar dudas concernientes a dichas instalaciones.
- Por ningún motivo el cliente manipulará sin autorización o retendrá los equipos pertenecientes a Sistemas IQ.





## Cotización

### 2. OFERTA ECONÓMICA

LÍNEA	DESCRIPCIÓN	CANT.	UNITARIO	TOTAL
1.	Medición de un (1) punto, durante una (1) semana.	1	\$ 800.00	\$ 800.00
<b>SUB-TOTAL</b>				<b>\$ 800.00</b>
<b>13% IVA</b>				<b>\$ 104.00</b>
<b>TOTAL</b>				<b>\$ 904.00</b>
<b>(NOVECIENTOS CUATRO DÓLARES CON 00/100)</b>				

### 3. TÉRMINOS DE NUESTRA OFERTA

- 3.1 PRECIOS** Todos los precios en este documento son en dólares americanos. Precios en horario de Lunes a Viernes, de 8am a 5pm, Cualquier labor que se deba realizar fuera de los horarios indicados a solicitud del cliente, aplicará con cargos extra.
- 3.2 FORMA DE PAGO** 100% contra finalización del servicio.
- 3.3 TIEMPO DE ENTREGA** A convenir después de recibir orden de compra.
- 3.4 VIGENCIA DE OFERTA** 30 días a partir de la fecha de este documento.

Agradeciendo la atención prestada y en espera de cualquier consulta, se despide de usted muy atentamente,

---

**Ing. Jason Rodríguez R.**  
Calidad de Energía y Protección contra  
Descargas Atmosféricas  
Sistemas IQ, S.A.