



**MITIGACIÓN DEL NIVEL DE ARMÓNICOS EN UN SISTEMA ELÉCTRICO INDUSTRIAL  
MEDIANTE UN FILTRO DE ARMÓNICO PASIVO**

**DAVID FERNANDO MONTOYA CÉSPEDES**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
ESPECIALIZACIÓN EN TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA  
MEDELLÍN  
2016**

**MITIGACIÓN DEL NIVEL DE ARMÓNICOS EN UN SISTEMA ELÉCTRICO INDUSTRIAL  
MEDIANTE UN FILTRO DE ARMÓNICO PASIVO**

**DAVID FERNANDO MONTOYA CÉSPEDES**

**Trabajo de grado para optar al título de Especialista en  
TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**Director:**

**ANDRÉS MAURICIO GARCÍA PATIÑO**

**Especialista en Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
ESPECIALIZACIÓN EN TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA  
MEDELLÍN**

**2016**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

Firma  
Nombre  
Presidente del jurado

---

Firma  
Nombre  
Presidente del jurado

---

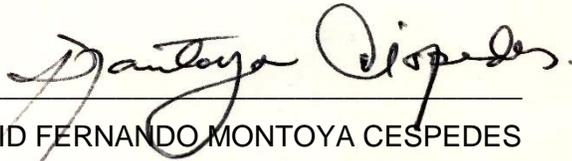
Firma  
Nombre  
Presidente del jurado

Medellín, junio de 2016.

## DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Medellín, 31 de Mayo de 2016.

Yo, DAVID FERNANDO MONTOYA CÉSPEDES, declaro que esta tesis (o trabajo de grado) no ha sido presentada para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o cualquier otra universidad (Art 85. Régimen Discente de Formación Avanzada).



DAVID FERNANDO MONTOYA CÉSPEDES  
CC 98.668.876 DE ENVIGADO

## **AGRADECIMIENTOS**

Dios ha sido siempre mi guía y a él encomiendo cada propósito en mi vida, en esta ocasión le agradezco por acompañarme en esta especialización, por darme la oportunidad de crecer a nivel personal y profesional, por haber conocido grandes profesionales y seres humanos dentro de esta etapa, agradezco a mi compañero de clase y director de tesis Andrés García Patiño quien me brindo todo su conocimiento, experiencia y apoyo.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>GLOSARIO.....</b>	<b>13</b>
<b>SIGLAS .....</b>	<b>15</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>17</b>
<b>CONSIDERACIONES GENERALES .....</b>	<b>19</b>
1.1. <b>DIAGRAMA CONCEPTUAL .....</b>	<b>19</b>
1.2. <b>ESQUEMA GENERAL .....</b>	<b>20</b>
<b>2.  CAPITULO 1.....</b>	<b>21</b>
2.1. <b>ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>21</b>
2.2. <b>PERTURBACIONES ELECTROMAGNÉTICAS .....</b>	<b>23</b>
2.3. <b>TRANSITORIOS .....</b>	<b>26</b>
Transitorios tipo impulso .....	27
Transitorio tipo oscilatorio .....	28
Hundimiento (sags) .....	29
Elevaciones (swells).....	31
Interrupciones.....	33
Interrupciones de larga duración.....	33
Interrupciones de corta duración.....	34
Variaciones de tensión de larga duración (subtensiones y sobretensiones).....	35
Muecas de tensión (notches) .....	37
Flicker.....	38
Desbalance de tensión.....	39
Variaciones de frecuencia .....	40
2.4. <b>ARMÓNICOS .....</b>	<b>41</b>
Armónicos de corriente .....	41
Armónicos de tensión.....	42
<b>3.  CAPITULO 2.....</b>	<b>44</b>
3.1. <b>IMPACTO DE LOS ARMÓNICOS EN INSTALACIONES INDUSTRIALES .....</b>	<b>44</b>

<b>3.2. EFECTO SOBRE LOS CABLES.....</b>	<b>46</b>
<b>3.3. EFECTO SOBRE LOS TRANSFORMADORES .....</b>	<b>48</b>
Pérdidas sin carga o de hierro .....	48
Pérdidas I <sup>2</sup> R.....	49
Pérdidas por corrientes de Eddy.....	49
Pérdidas adicionales .....	49
<b>3.4. EFECTO EN LOS CAPACITORES .....</b>	<b>49</b>
<b>3.5. EFECTO SOBRE LOS MOTORES .....</b>	<b>50</b>
<b>3.6. EFECTOS SOBRE OTROS EQUIPOS .....</b>	<b>52</b>
<b>4. CAPITULO 3.....</b>	<b>53</b>
<b>4.1. IMPLEMENTACIÓN SOLUCIÓN PROPUESTA .....</b>	<b>53</b>
<b>4.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO.....</b>	<b>54</b>
Fuente de potencia .....	54
Transformador elevador.....	54
Impedancia de red .....	56
Subestación.....	57
Medidores voltaje a tierra.....	59
Blindobarras para distribución en baja tensión (460 V) .....	60
Rectificador pasivo de seis pulsos .....	61
Bus de corriente continua y carga del rectificador (motor) .....	61
Acometida otras cargas del sistema .....	62
Transformador de aislamiento .....	64
Descripción de las cargas restantes .....	65
Filtro de armónicos.....	66
<b>5. CAPITULO 4.....</b>	<b>67</b>
<b>5.1. DISEÑO DEL FILTRO.....</b>	<b>67</b>
<b>5.2. SELECCIÓN DE FILTRO .....</b>	<b>67</b>
<b>5.3. SELECCIÓN DE LA FRECUENCIA DE SINTONÍA DEL FILTRO .....</b>	<b>68</b>
<b>5.4. VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL FILTRO.....</b>	<b>70</b>
<b>6. RESULTADOS.....</b>	<b>73</b>

<b>7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>76</b>
<b>8. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>77</b>
<b>9. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>78</b>
<b>10. ANEXOS.....</b>	<b>80</b>

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<i>Tabla 1. Clasificación perturbaciones de calidad de potencia según su duración .....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 2. Datos de placa transformador 1MVA.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 3. Conductores FLEXOTEK – CABLE THWN/THHN 600 V. ....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 4. Datos de placa transformador Torytrans .....</i>	<i>65</i>

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1. Diagrama conceptual</i> .....	19
<i>Figura 2. Esquema general impacto de armónico en la industria</i> .....	20
<i>Figura 3. Descomposición de una onda distorsionada</i> .....	22
<i>Figura 4. Clasificación perturbaciones Electromagnéticas según IEC 61000-2-5</i> .....	25
<i>Figura 5. Representación de transitorio de impulso y oscilatorio</i> .....	27
<i>Figura 6. Transitorio tipo impulso de polaridad positiva y negativa</i> .....	28
<i>Figura 7. Descripción del Hundimiento (Sags)</i> .....	30
<i>Figura 8. Descripción de la elevación de tensión (Swells)</i> .....	32
<i>Figura 9. Muesca en onda de tensión</i> .....	37
<i>Figura 10. Registro de variación de frecuencia</i> .....	41
<i>Figura 11. Rectificador de 6 pulsos</i> .....	45
<i>Figura 12. Corriente de un rectificador de 6 pulsos</i> .....	46
<i>Figura 13. Densidades de corriente en un mismo conductor a corriente de alta frecuencia</i> .....	47
<i>Figura 14. Valor de la relación <math>X_s</math> en función de la frecuencia</i> .....	48
<i>Figura 15. Factor de reducción para motores en redes con contenido de armónicos</i> .....	51
<i>Figura 16. Sistema eléctrico industrial</i> .....	53
<i>Figura 17. Pérdidas en vacío transformador 3.75 MVA</i> .....	55
<i>Figura 18. Perdidas en vacío transformador 1 MVA</i> .....	59
<i>Figura 19. Espectro armónico de voltaje inicial subestación a 460 V con banco de compensación de 250 kVAR (sin filtro)</i> .....	59
<i>Figura 20. Espectro armónico de voltaje en el barraje principal de la subestación a 460 V con filtro</i> .....	70
<i>Figura 21. Espectro armónico de corriente en el barraje principal de la subestación a 460 V con filtro</i> .....	70
<i>Figura 22. Espectro armónico de corriente por el banco de capacitores con filtro</i> .....	71
<i>Figura 23. Forma de onda de corriente rms en el banco de condensadores con filtro</i> .....	72
<i>Figura 24. Forma de onda de voltaje rms fase- tierra en el banco de condensadores con filtro</i> .....	72
<i>Figura 25. Espectro armónico de tensión sin banco de compensación</i> .....	74
<i>Figura 26. Espectro armónico de tensión con banco de compensación</i> .....	74
<i>Figura 27. Espectro armónico de voltaje en barra 460V con filtro</i> .....	75
<i>Figura 28. Espectro armónico de corriente en barra 460V con filtro</i> .....	75
<i>Figura 29. Modelo utilizado en ATP para la modelación de la fuente</i> .....	80
<i>Figura 30. Modelo utilizado en ATP para la modelación del transformador elevador</i> .....	80

<i>Figura 31. Modelo utilizado en ATP para la modelación de la impedancia de red.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 32. Modelo utilizado en ATP para la modelación del transformador reductor.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 33. Modelo utilizado en ATP para la modelación de los medidores de voltaje .....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 34. Modelo utilizado en ATP para la modelación de las blindobarras.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 35. Modelo utilizado en ATP para la modelación del rectificador de 6 pulsos .....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 36. Modelo utilizado en ATP para la modelación de la carga del rectificador.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 37. Modelo utilizado en ATP para la modelación de acometidas.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 38. Modelo utilizado en ATP para la modelación del transformador de aislamiento .....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 39. Modelo utilizado en ATP para la modelación de las cargas restantes.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 40. Modelo utilizado en ATP para la modelación del filtro armónico.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 41. Espectro armónico de voltaje en el barraje principal de la subestación a 460 V sin banco de compensación .....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 42. Espectro armónico de voltaje en el barraje principal de la subestación a 460 V con banco de compensación de 250 kVAR.....</i>	<i>85</i>

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
<i>Anexo A. Modelo utilizado en ATP para la modelación de la fuente .....</i>	<i>80</i>
<i>Anexo B. Modelo utilizado en ATP para la modelación del transformador elevador.....</i>	<i>80</i>
<i>Anexo C. Modelo utilizado en ATP para la modelación de la impedancia de red .....</i>	<i>80</i>
<i>Anexo D. Modelo utilizado en ATP para la modelación del transformador reductor .....</i>	<i>80</i>
<i>Anexo E. Modelo utilizado en ATP para la modelación de los medidores de voltaje.....</i>	<i>81</i>
<i>Anexo F. Modelo utilizado en ATP para la modelación de las blindobarras .....</i>	<i>81</i>
<i>Anexo G. Modelo utilizado en ATP para la modelación del rectificador de 6 pulsos .....</i>	<i>82</i>
<i>Anexo H. Modelo utilizado en ATP para la modelación de la carga del rectificador .....</i>	<i>82</i>
<i>Anexo I. Modelo utilizado en ATP para la modelación de acometidas.....</i>	<i>83</i>
<i>Anexo J. Modelo utilizado en ATP para la modelación del transformador de aislamiento.....</i>	<i>83</i>
<i>Anexo K. Modelo utilizado en ATP para la modelación de las cargas restantes .....</i>	<i>83</i>
<i>Anexo L. Modelo utilizado en ATP para la modelación del filtro armónico.....</i>	<i>84</i>
<i>Anexo M. Espectro armónico de voltaje en el barraje principal de la subestación a 460 V sin banco de compensación .....</i>	<i>84</i>
<i>Anexo N. Espectro armónico de voltaje en el barraje principal de la subestación a 460 V con banco de compensación de 250 kVAR.....</i>	<i>84</i>

## GLOSARIO

**ARMÓNICO:** Una componente de orden mayor que uno de la serie de Fourier de una cantidad periódica. Por ejemplo, en un sistema de 60 Hz, el orden armónico 3, también conocida como la "tercera armónica," es 180 Hz.

**CALIDAD DE LA POTENCIA:** Conjunto de características físicas de las señales de tensión y corriente, de un sistema de potencia en un momento determinado, que permiten satisfacer las necesidades requeridas por el usuario de la electricidad. Estas características son evaluadas con respecto a un conjunto de parámetros técnicos de referencia.

**CARGAS CRÍTICAS:** Aparatos o equipos cuya operación no satisfactoria pone en peligro la salud o la seguridad del personal, y/o resultados en la pérdida de la función, pérdida financiera o daño a la propiedad consideradas críticas por parte del usuario.

**CARGA NO LINEAL:** Una carga eléctrica cuya característica de tensión/corriente es no lineal, es decir que la señal de corriente no sigue la misma forma de onda de la señal de tensión, de la cual se está alimentando la carga.

**COMPENSACIÓN CAPACITIVA:** Arreglo de capacitores instalado en la red eléctrica los cuales generan cargas capacitivas que contrarrestan las pérdidas reactivas de la instalación.

**COMPONENTE FUNDAMENTAL** Magnitud base de la frecuencia del sistema que se está analizando.

**DISTORSIÓN ARMÓNICA** Relación entre la raíz media cuadrática del contenido armónico y la raíz media cuadrática de la cantidad fundamental, con frecuencia expresada como un porcentaje de la fundamental.

**DISTORSIÓN DE LA FORMA DE ONDA** Distorsión de la onda seno cuya frecuencia es un múltiplo de la frecuencia fundamental. Convierte la onda normal en una forma de onda compleja.

**DISTORSIÓN TOTAL DE CORRIENTE DE DEMANDA (TDD)** La suma de la raíz cuadrada total de las distorsiones de corriente armónica en porcentaje de la máxima corriente de carga demandada (15 o 30 minutos de demanda).

**FILTRO DE ARMÓNICO** Conjunto de condensadores e inductancias sintonizados en la frecuencia armónica que se pretende eliminar.

**TENSIÓN ARMÓNICA** Distorsión de la onda sinusoidal nominal de tensión respecto a la fundamental.

**FRONTERA COMERCIAL** Es el punto de responsabilidad del operador de red (OR), o el comercializador y es básicamente la vigilancia del medidor.

**FRONTERA OPERATIVA** Es el punto de conexión de la acometida del usuario (residencial, comercial o industrial) y es hasta este punto la responsabilidad del Operador de Red.

## SIGLAS

**ATP:** (Alternative Transients Program). Programa de análisis de fenómenos transitorios.

**CP:** Calidad de la Potencia.

**FPA:** Filtro Pasivo de Armónicos.

**IEC:** (International Electrotechnical Commission). Comisión Electrotécnica Internacional.

**IEEE:** (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.

**SEI:** Sistema Eléctrico Industrial.

**SEM:** Sistemas Electromagnéticos.

**SP:** Sistemas de Potencia.

**TDD:** Distorsión Total de Corriente de Demanda.

**TDDi:** Distorsión Armónica Total de Corriente de Demanda.

**THD:** Distorsión Armónica Total.

**THDV:** Distorsión Armónica Total de Voltaje.

## RESUMEN

El presente documento plantea la mitigación del contenido de armónicos de un sistema eléctrico industrial donde típicamente se encuentran dispositivos que originan perturbaciones al interior de la industria y al exterior a través de los sistemas de distribución. Dicha mitigación se realiza calculando un filtro de armónicos pasivo y verificando la finalidad del mismo mediante un modelamiento en el software ATP (Alternative Transients Program), con el fin de analizar el comportamiento del sistema. Al inicio se muestra un repaso de todos los fenómenos que afectan la calidad de la potencia sus causas y efectos, luego se plantean los impactos que estos fenómenos producen directamente en los equipos y dispositivos que conforman el sistema, se realiza una descripción de cada uno de los dispositivos utilizados en la simulación y por último los resultados alcanzados con el desarrollo de la herramienta computacional.

**Palabras clave:** Calidad de la Potencia, ATP, sistemas de distribución, perturbaciones, filtro de armónico pasivo.

## INTRODUCCIÓN

Este trabajo fue motivado por el interés de conocer las perturbaciones que se generan en los sistemas eléctricos de potencia a causa de las cargas no lineales que se encuentran en ella y tratar de minimizar el impacto que estas producen a todos los dispositivos e infraestructura asociado a esta. El primer capítulo de este trabajo busca describir brevemente las perturbaciones más comunes que afectan la calidad de la potencia eléctrica en un sistema eléctrico industrial, considerando estos dentro de la clasificación de los fenómenos conducidos de baja frecuencia.

El eje central de este trabajo es recrear mediante un programa de simulación un sistema típico industrial y poder observar las perturbaciones ocasionadas en las formas de onda por los dispositivos que basan su trabajo en la electrónica de potencia.

El capítulo II busca identificar las consecuencias que trae consigo una mala calidad del suministro eléctrico al interior de un sistema industrial. La comprensión de la naturaleza de los fenómenos asociados a la calidad de la potencia fue uno de los objetivos de este capítulo.

El capítulo III pretende demostrar el mejoramiento de la calidad de potencia eléctrica en una planta industrial mediante la implementación de un filtro de armónicos sintonizado correctamente. Debido a que el aspecto clave en la simulación son los modelos, en este capítulo se hace una descripción a cada uno de los elementos involucrados en el modelo, para poder entender cuál es su función dentro de la red y cuáles son los parámetros establecidos para su funcionamiento.

El capítulo IV presenta en forma breve los resultados obtenidos en cada una de las simulaciones para los diferentes escenarios propuestos. En las simulaciones se observa las formas de ondas antes y después de la entrada en funcionamiento del filtro de armónicos y los espectros de armónicos en la red para cada escenario. La comparación de los resultados se presenta en el capítulo V, los valores tomados como referencia fueron extraídos del ATP.

Finalmente se dejan conclusiones y recomendaciones en el capítulo VI. Los modelos, resultados se dan en el Anexo A.

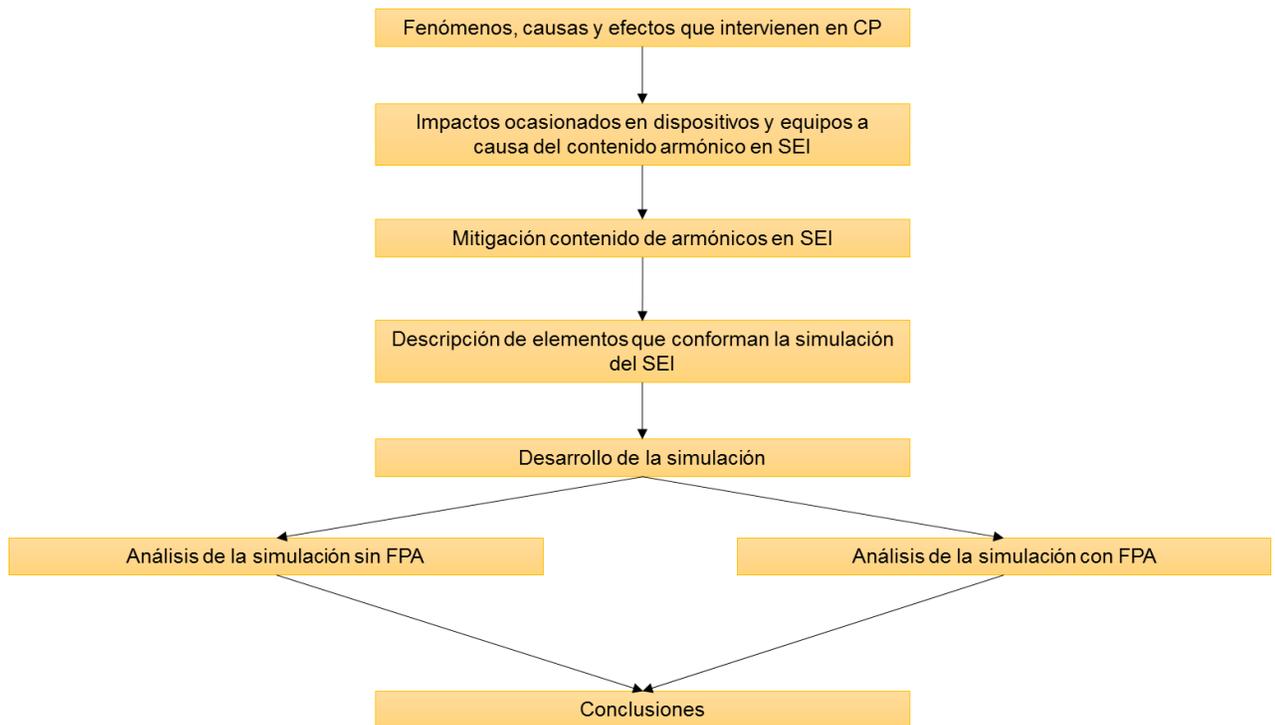
Lo realizado en este trabajo es breve, el tema es muy extenso y se espera que todo lo realizado y la información recopilada sean de utilidad a los interesados en el tema.

## CONSIDERACIONES GENERALES

### 1.1. DIAGRAMA CONCEPTUAL

Para el desarrollo de este trabajo de grado se analizaron las soluciones más recomendadas a nivel industrial para la mitigación del nivel de armónicos, con el objetivo de proteger los equipos más sensibles a perturbaciones eléctricas que son claves en la operación de una planta industrial.

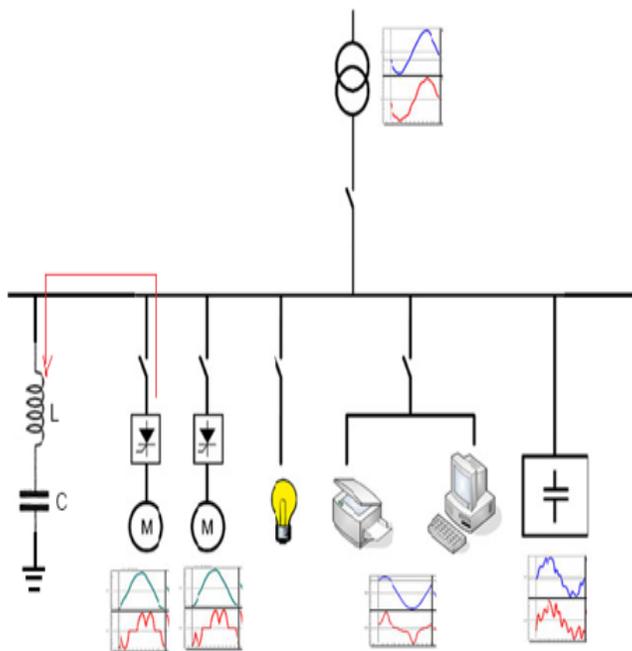
En la Figura 1 se presenta un diagrama conceptual para el desarrollo de este trabajo de grado.



**Figura 1. Diagrama conceptual**

## 1.2. ESQUEMA GENERAL

La metodología desarrollada en este trabajo de grado se fundamenta en identificar la mejora en la calidad de la potencia eléctrica en un sistema eléctrico industrial mediante la instalación de un filtro pasivo de control de armónicos. En la Figura 2 se presenta el esquema general para analizar el impacto que trae consigo el filtro de armónicos en un sistema típico industrial.



➤ *Disminución del fenómeno de resonancia.*

➤ *Menores pérdidas energéticas, por efecto joule en todos los conductores, transformadores, dispositivos, cables, etc.*

➤ *Disminución de pérdidas por calentamiento en máquinas asíncronas.*

➤ *Aumento de la vida útil de los equipos*

➤ *Reducción de los disparos intempestivos y parada de la instalación.*

➤ *Con la reducción del contenido de armónico de la instalación no se hace necesario el sobredimensionamiento de equipos.*

➤ *Los efectos en la distorsión en la tensión de alimentación posibilita un funcionamiento adecuado de sistemas de control y comunicaciones.*

Figura 2. Esquema general impacto de armónico en la industria

## 2. CAPITULO 1

### 2.1. ESTADO DEL ARTE

El Estado colombiano, a partir de la Constitución de 1991, ha difundido las políticas de prestación de servicios públicos domiciliarios y ha implantado nuevos marcos legales y regulatorios. Para la prestación del servicio de Energía Eléctrica en Colombia se encuentra la Ley 143 de 1994, conocida como la Ley Eléctrica, la cual establece criterios fundamentales que garantizan la calidad del suministro eléctrico y donde involucra tanto al proveedor como al usuario final, ya que ambos juegan un papel importante dentro de la cadena de abastecimiento del servicio de energía que es prestado.

Los dispositivos electrónicos cada vez ocupan más espacios dentro de nuestro entorno y son altamente sensibles a las perturbaciones electromagnéticas; tales dispositivos basados en electrónica de potencia presentan un comportamiento no lineal, entre ellos están los variadores de velocidad, rectificadores, convertidores y, en general, dispositivos basados en microprocesadores que finalmente causan perturbaciones en las ondas de tensión y de corriente, lo que ha incrementado la atención de los consumidores y suministradores en lo que respecta a la calidad de la señal de tensión y corriente. Este nuevo esquema regulatorio implica que la calidad de la energía eléctrica vaya más allá de la continuidad en el suministro de energía e involucre parámetros como amplitud, frecuencia, y formas de ondas de tensión y corriente.

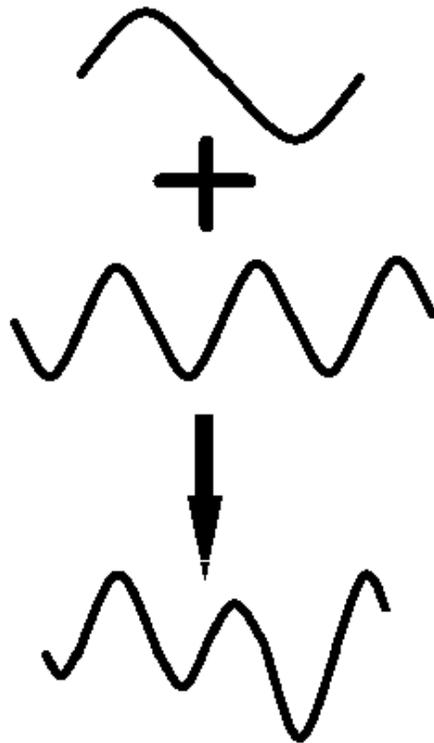
Los sistemas de potencia eléctrica en Colombia están diseñados para operar a 60Hz, con una tensión y corriente sinusoidal; por diferentes razones se puede presentar un flujo eléctrico a frecuencias diferentes de 60Hz sobre algunas zonas del sistema eléctrico de potencia o al interior de la instalación de un usuario.

Cuando la forma de onda existente está compuesta por un número de ondas sinusoidales de diferentes frecuencias estamos frente a una onda distorsionada que no es más que la onda de frecuencia fundamental (60Hz) más una onda de frecuencia distinta. Esta

distorsión en la forma de onda se le conoce con el término de componente armónico o armónico, que se refiere a cualquiera de las ondas sinusoidales distintas a la forma de onda fundamental y que es múltiplo de ella. En la figura 3 se observa la descomposición de una onda distorsionada en una onda sinusoidal a la frecuencia fundamental (60Hz) más una onda de frecuencia distinta. La amplitud de los armónicos se expresa normalmente en porciento de la fundamental.

De acuerdo con Enríquez (2002), los armónicos se caracterizan por dos aspectos fundamentalmente, que son:

- Su amplitud: hace referencia al valor de la tensión o intensidad del armónico.
- Su orden: hace referencia al valor de su frecuencia referido a la frecuencia fundamental (60Hz). De esta forma un armónico de orden 3 tiene una frecuencia 3 veces superior a la fundamental, es decir  $3 \times 60\text{Hz} = 180\text{Hz}$ .



**Figura 3. Descomposición de una onda distorsionada**

En sí, los armónicos hacen parte de las perturbaciones que involucra el estudio de la Calidad de la Potencia Eléctrica, que se dedica a estudiar cualquier problema de potencia manifestado en la desviación de la tensión, de la corriente, de la frecuencia, de sus valores ideales que ocasionen la falla, interrupción de los sistemas eléctricos o mala operación del equipo de un usuario. Un alto nivel de Calidad de Potencia Eléctrica generalmente puede ser entendido como un bajo nivel de Perturbaciones.

## **2.2. PERTURBACIONES ELECTROMAGNÉTICAS**

En las últimas décadas los crecientes desarrollos de la tecnología han impulsado el uso de dispositivos basado en la electrónica, susceptibles a perturbaciones tales como: distorsión armónica, fluctuaciones rápidas de tensión (Flicker), transitorios, Sags, Swell, Notch, entre otros. Los usuarios del sector industrial que dependen de procesos productivos, en ocasiones las 24 horas del día durante todo el año, exigen una calidad del servicio de energía eléctrica tal que no afecte sus procesos productivos.

Por otro lado, los operadores de red (OR) son los responsables de mantener un nivel estable de la tensión hasta la frontera comercial, es decir, hasta el equipo de facturación o medidor; sin embargo, el mantenimiento y operación de las instalaciones después del medidor de energía llamadas fronteras operativas son responsabilidad del usuario; no obstante la frontera comercial y operativa necesariamente son las mismas, ya que depende de las particularidades del sistema eléctrico del usuario y el acuerdo comercial que se haya pactado entre el usuario y el comercializador, adicionalmente, la mayoría de los sistemas de distribución presentan una topología en malla, por lo tanto, una perturbación puede verse reflejada o afectar a redes vecinas. De allí surge el término de Calidad de Potencia Eléctrica, que se dedica, de acuerdo con Sánchez, Caicedo y Castro (2008), a estudiar cualquier problema de potencia manifestado en la desviación de la tensión, de la corriente, de la frecuencia, de sus valores ideales que ocasionen falla, interrupción de los sistemas eléctricos o mala operación del equipo de un usuario.

Finalmente, los problemas de Calidad de la Potencia Eléctrica afectan al usuario final y es éste quien debe de enfrentar tanto las perturbaciones de suministro de energía eléctrica

entregada por el OR en el punto de conexión, como los problemas inducidos por los equipos propios instalados dentro de la instalación. Debido a esto, en la calidad de la energía debe involucrarse tanto a la fuente como a la carga o lo que es lo mismo a la señales de tensión y corriente.

Este capítulo presenta una breve descripción de la naturaleza de los problemas de calidad de la potencia de fenómenos conducidos de baja frecuencia, posibles soluciones y los mecanismos disponibles para contrarrestar estos problemas, así como los diferentes fenómenos electromagnéticos descritos y clasificados por la norma IEC 61000-2-5. La Figura 4 muestra la clasificación de los fenómenos electromagnéticos según la IEC.

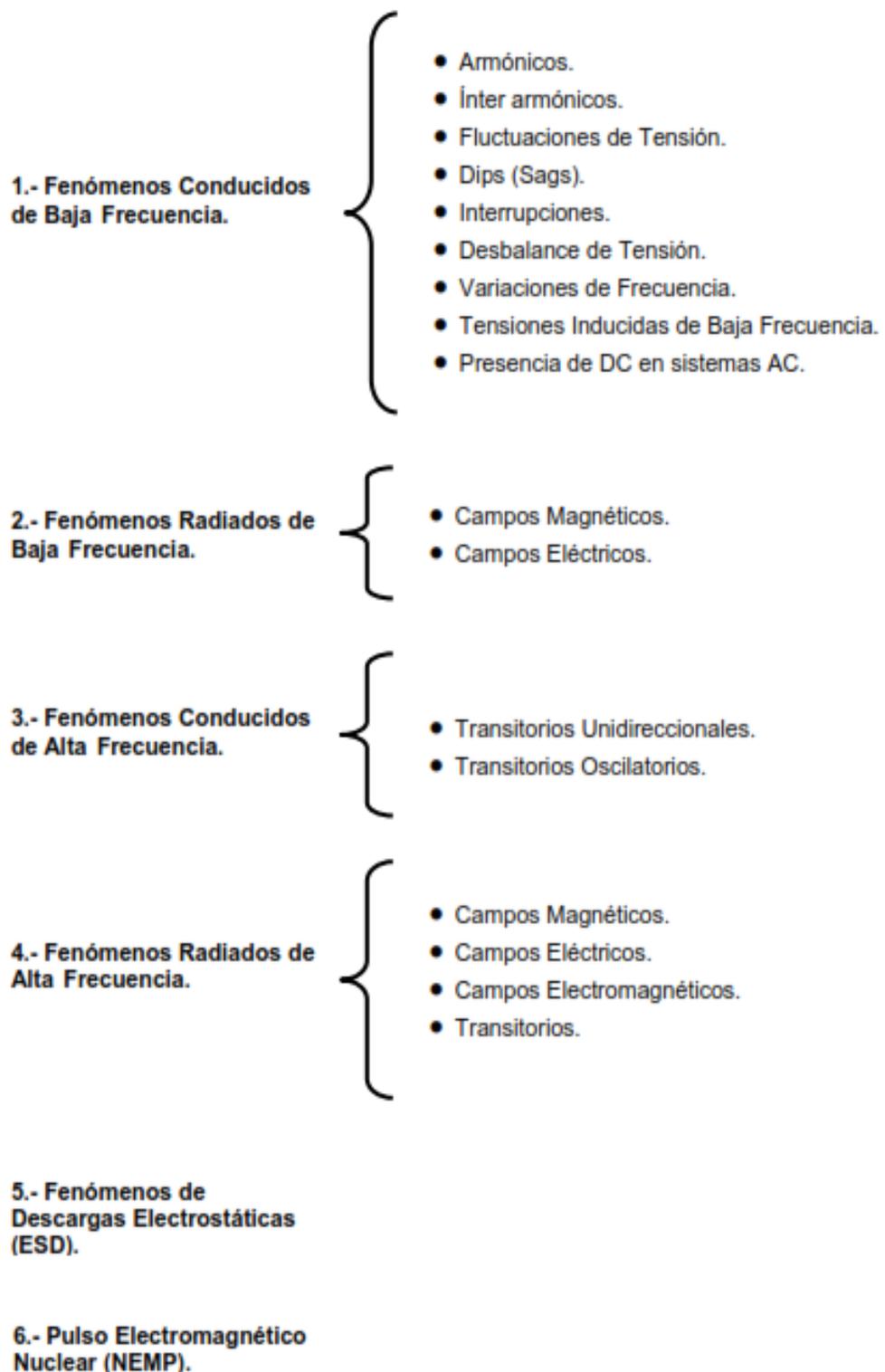


Figura 4. Clasificación perturbaciones Electromagnéticas según IEC 61000-2-5

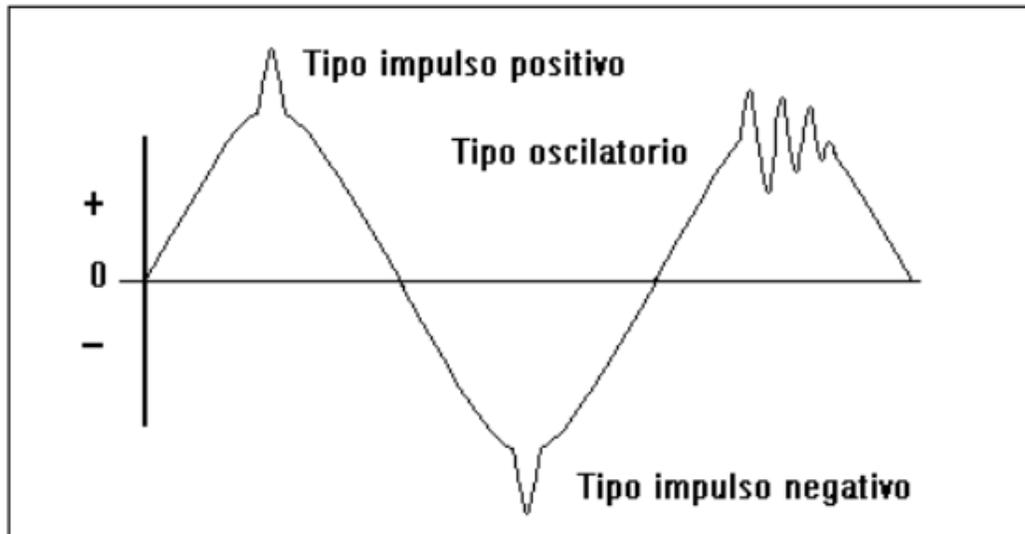
Estos fenómenos también se clasifican según su duración en el tiempo; a continuación se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1. Clasificación perturbaciones de calidad de potencia según su duración**

<b>Perturbaciones</b>	<b>Tipo</b>
<b>Larga duración o permanentes</b>	Variaciones de tensión de estado estable
	Desbalance de tensión
	Flicker
	Interrupciones de larga duración (duración $\geq 1$ min)
	Armónicos de tensión
	Armónicos de corriente
	Muecas de tensión
	Variaciones de tensión de larga duración (subtensiones y sobretensiones)
<b>Lentas</b>	Interrupciones de corta duración (duración $< 1$ min)
	Hundimientos (Sags)
	Elevaciones (Swells)
	Variaciones de frecuencia
<b>Rápidas</b>	Sobretensiones transitorias

### 2.3. TRANSITORIOS

Según Saucedo y Taxis (2008), los transitorios son perturbaciones de muy corta duración, que se evidencian por una breve discontinuidad en la forma de onda, durando normalmente menos de medio ciclo. Son de polaridad positiva o negativa y pueden dividirse en dos categorías, de impulso u oscilatorias.



**Figura 5. Representación de transitorio de impulso y oscilatorio**

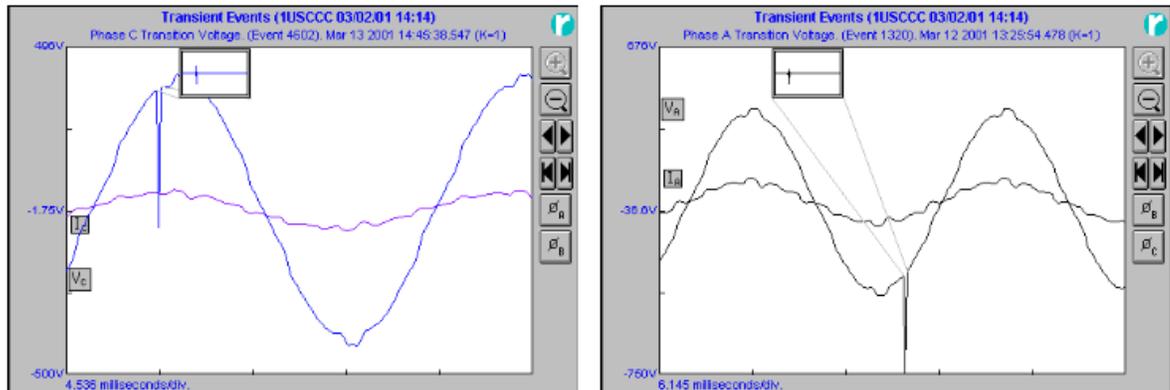
Si la onda sinusoidal fundamental es retirada, la onda resultante es la componente pura del transitorio, se considera a un transitorio tipo impulso cuando el 77% del voltaje pico-pico de la componente pura, es de una sola polaridad.

Existen varios tipos de transitorios: tipo impulso, tipo oscilatorio, hundimiento (sags), elevaciones (swells), interrupciones, interrupciones de larga duración, interrupciones de corta duración, variaciones de tensión de larga duración (subtensiones y sobretensiones), muescas de tensión (notches), flicker, desbalance de tensión, variaciones de frecuencia, armónicos, armónicos de corriente y armónicos de tensión.

**Transitorios tipo impulso**

El efecto que presenta es de un cambio rápido, a una frecuencia diferente a la del sistema en estado estacionario en cualquier condición de corriente o tensión. Se considera como una onda de única polaridad, dirección y magnitud. La tasa de aumento o la forma como alcanza su valor pico también es una variable importante que afecta la sensibilidad de los equipos electrónicos. Debido a las altas frecuencias involucradas, la forma de este tipo de transitorios puede ser cambiada rápidamente por componentes del circuito, y puede tener características significativamente diferentes cuando se examina el sistema de potencia a cualquier nivel. Los transitorios tipo impulso pueden excitar la frecuencia natural de los

circuitos del sistema de potencia y producir oscilaciones transitorias. Los transitorios de alta frecuencia se observan solo cerca del lugar donde ocurre el evento, poseen duraciones bajo los 50 nano segundos (ns). La Figura 6 muestra un ejemplo.



**Figura 6. Transitorio tipo impulso de polaridad positiva y negativa**

### Transitorio tipo oscilatorio

Este transitorio tiene un pico de magnitud que puede acercarse a 2.0 p.u, pero es tipo típicamente de 1.3 a 1.5 p.u y la duración es aproximadamente de 8ms, dependiendo de la amortiguación del sistema. La frecuencia varían en un rango de 0.5 y 5MHz.

#### i. Causas

- Maniobras y equipos del sistema, en particular, la energización de banco de condensadores resultante en oscilaciones amortiguadas que superponen en la onda fundamental, cuya frecuencia de oscilación abarca entre los 100Hz y 9kHz, con una duración pico menor de medio ciclo.
- Conmutación de cargas inductivas que producen transitorios rápidos cuyo tiempo de crecimiento varia típicamente entre 0.5 $\mu$ s a 5 $\mu$ s.
- Descargas atmosféricas, las cuales, externamente, pueden generar impulsos unidireccionales con un tiempo de crecimiento en el orden de 1 $\mu$ s y un valor cresta alcanzando los 10kV y 20kV.

- Descargas atmosféricas, las cuales internamente, pueden generar ondas oscilatorias amortiguadas con una frecuencia de 5kHz a 500kHz, un tiempo de crecimiento menor que 1 $\mu$ s y valor cresta típicamente limitado a 6kV.
- Alta frecuencia de disparos de tiristores.
- Fallas en cableados e interruptores.
- Cierre de relés y contactos.
- Desconexión y arranque de cargas con alto consumo de energía.

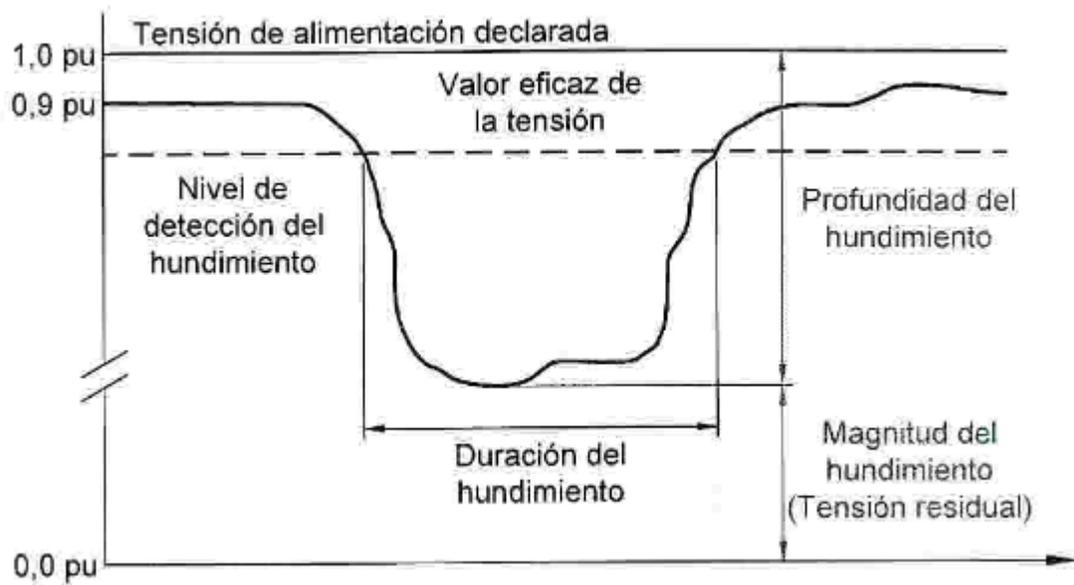
## ii. Efectos

- Degradación o falla inmediata del aislamiento en todas las clases de equipos.
- Ruptura del aislamiento en el equipo tales como maquinaria rotatoria, transformadores, condensadores, cables, transformadores de tensión y de corriente y demás dispositivos de la subestación.
- Fallas en los componentes de las fuentes de potencia de los equipos electrónicos.
- Disparos molestos de los variadores de velocidad ajustables.
- Daños en discos duros, pérdida de memoria y errores de paridad en equipos de cómputo.

## Hundimiento (sags)

Los hundimientos o caídas de tensión (*Sags*) son reducciones súbitas del valor eficaz de la tensión por debajo del 90% y por arriba del 10% de la tensión declarada, seguido por un retorno a un valor más alto que el 90% de la tensión declarada, en un tiempo que oscila desde los 8.33ms (medio ciclo) hasta 1min.

Los hundimientos de tensión son caracterizados por su duración y por la magnitud de la caída de tensión, como se puede observar en la Figura 7.



**Figura 7. Descripción del Hundimiento (Sags)**

**i. Causas**

Los hundimientos de tensión son generalmente causados por elevadas corrientes, generadas por cortocircuitos, conexión u operación de cargas que exijan una elevada demanda de potencia. Cuando ocurre una falla en el sistema eléctrico, los interruptores y reconectores son los equipos destinados a reconectar el sistema después de extinguida la falla, pero cuando estos equipos intenta un recierre después de un falla y ésta no ha sido despejada, están presentes y se inyectan estos huecos de tensión.

Entre las causas más típicas de los hundimientos se encuentran:

- Energización y cambio de taps de grandes transformadores.
- Energización de cargas grandes.
- Fallas en la fuente de alimentación del sistema de potencia o del sistema eléctrico propio o de vecinos.
- Cortocircuito en los sistemas de alimentación originados por fenómenos naturales como: descargas atmosféricas, fuertes vientos, arboles, etc.
- Alta demanda de energía en el sistema de potencia, superando la capacidad del sistema.

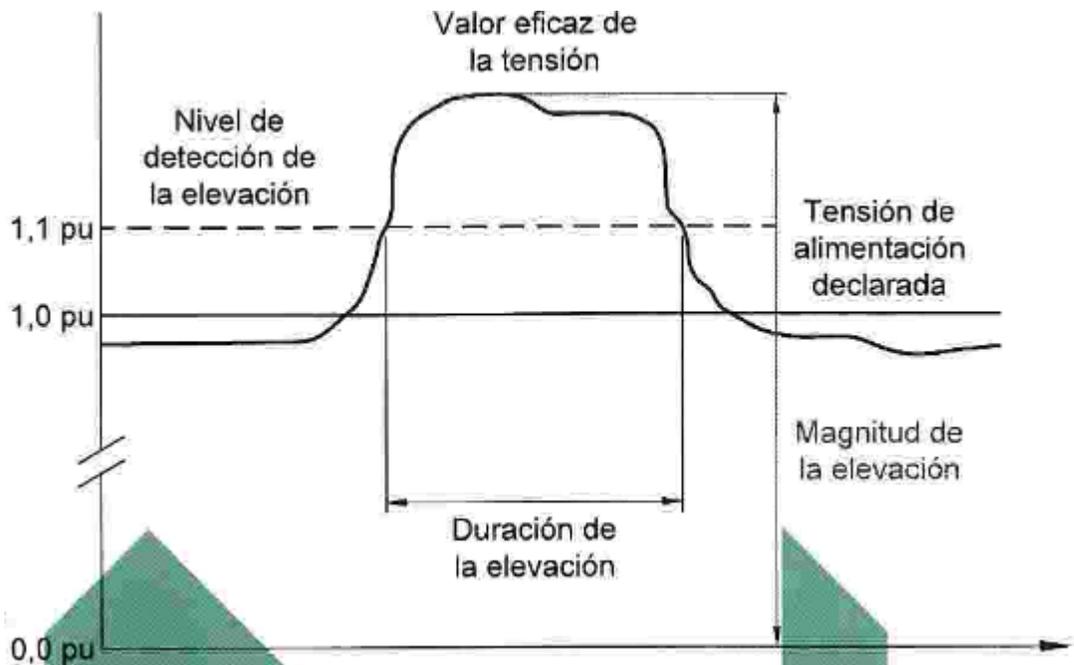
## **ii. Efectos**

- Detenimiento de procesos.
- Reducción de los niveles de luminosidad en dispositivos de iluminación.
- Interrupción en sistemas de comunicación.
- Disparo de protecciones.
- Funcionamiento defectuoso de equipos.
- Salida de operación de controladores de motores.
- Incremento en las pérdidas por calentamiento en motores de inducción debido al aumento en la corriente.
- Cambios de velocidad en las máquinas de inducción.
- Salida de operación de dispositivos electrónicos como computadores y controladores electrónicos.
- Al presentarse hundimiento con una magnitud inferior al 70%, los sistemas con transferencia automática entrar en operación.
- Los sistemas de iluminación de descarga pueden apagarse cuando los hundimientos alcanzan valores inferiores al 80% de la tensión nominal.

### **Elevaciones (swells)**

Las elevaciones de tensión son aumentos súbitos del valor eficaz de la tensión por encima del 110% de la tensión nominal. Las sobretensiones temporales pueden durar entre 8.33ms y 1min.

Las elevaciones de tensión son caracterizadas por la medida de su duración por encima de un umbral definido y por la magnitud de la elevación (ver Figura 8).



**Figura 8. Descripción de la elevación de tensión (Swells)**

La duración de la elevación de tensión es el tiempo medido, desde el momento en que el valor eficaz de la tensión se eleva por encima del umbral hasta cuando retorna por debajo de este. Para clasificar la elevación de tensión se toma la máxima desviación del valor eficaz de la tensión respecto a la tensión declarada. Y la duración de la elevación es dada por la máxima duración de la peor fase afectada en cada caso.

#### **i. Causas**

Los Swells están asociados a condiciones de fallas monofásicas en el sistema, energización de banco de condensadores o de transformadores, incrementando la magnitud del voltaje en las fases sin falla. Estos se presentan especialmente en sistemas sin puesta a tierra o sistemas en delta o con neutro flotante, donde el cambio súbito en la referencia de la tierra resulta en un incremento de la tensión en las fases que podrían alcanzar valores de 1.73 p.u durante la condición de falla.

Las elevaciones de tensión pueden ser causadas también por cortocircuitos, disminución súbita de la carga, o fenómenos de resonancia y ferroresonancia.

Algunas causas características son:

- Funcionamiento de grandes sistemas de UPS
- Operación de cargas controladas por tiristores
- Funcionamiento de Dimmers
- Arcos de soldadura

## ii. Efectos

- Falla de los componentes de un equipo, dependiendo de la frecuencia de ocurrencia del evento.
- Disminución de la vida útil en dispositivos electrónicos, incluyendo variadores de velocidad, computadores, conductores, barrajes, transformadores de tensión y corriente así como maquinaria rotativa.
- Operaciones no deseadas en relés de protección.
- Incremento de luz visible de alguno dispositivos de iluminación.
- Degradación de algunos dispositivos electrónicos de protección (varistores, diodos, etc.).
- Protuberancia en la envolvente de los condensadores en banco de control de reactivos.
- Incremento en la potencia de salida en bancos de condensadores.

## Interrupciones

Este tipo de eventos se puede dividir según su duración en el tiempo, las de corta duración que son menores a un minuto (<1min) y las de larga duración mayores a un minuto (>1min).

### Interrupciones de larga duración

Se describe como la condición en la que el valor eficaz de la tensión de alimentación es inferior al 10% de la tensión declarada con una duración mayor a 1min. Esta interrupción de alimentación se puede clasificar como programada (cuando los clientes son informados de antemano para permitir la ejecución de los trabajos programados en la red de

distribución) o accidental (cuando está provocada por efectos permanentes o temporales, la mayoría de las veces asociados a eventos o daños externos).

### **i. Causas**

Las causas de estas interrupciones son generalmente accidentales y suelen ser de origen interno o externo. El mayor número de casos son de eventos externos y donde las empresas de energía no tienen incidencia.

Algunas causas características:

- Fallas en la fuente del sistema de potencia.
- Problemas en las transferencias automáticas o manuales.
- Apertura o cierre de los interruptores de protección.
- Fallas en cableado o redes.
- Disparos de protecciones del sistema eléctrico.

### **ii. Efectos**

El efecto de una interrupción sostenida es la salida de operación del equipo, excepto en las cargas protegidas por los sistema que cuentan con sistemas de respaldo como UPS u otras fuentes de almacenamiento de energía.

- Mala operación y desenergización de los contactores de los motores de inducción.
- Interrupción de procesos y equipos.
- Salida de operación y reinicio de sistemas.
- Caída de sistemas de comunicación.
- Apagado de sistemas de iluminación.

### **Interrupciones de corta duración**

Se describen cuando el valor eficaz de la tensión es inferior al 10% de la tensión declarada en todas las fases (en el caso trifásico) con una duración menor a 1min.

## **i. Causas**

La mayoría de las interrupciones se presentan en las redes de media tensión donde por la acción de los dispositivos de protección es muy común recerrar automáticamente el interruptor para restaurar el suministro de potencia ante la presencia de fallas transitorias.

El tiempo muerto para el recierre es ajustado en general entre 300ms y 500ms y en la mayoría de los casos menor a 1s. En el caso de un recierre exitoso el cual aclara la falla, los usuarios son afectados por una profunda caída de tensión seguida por una interrupción que dura el tiempo muerto ajustado para el recierre.

Las otras líneas o circuitos conectados a la misma barra de la línea en la cual ocurre la falla experimentarían una caída de tensión que durara el tiempo de operación del interruptor y cuya profundidad dependerá de la distancia de la localización de la falla hasta la barra de la subestación. Sin embargo, cualquier recierre automático afectaría todos los usuarios de media y baja tensión conectados a la línea afectada.

## **ii. Efectos**

- Interrupción de procesos y equipos.
- Salida y reinicio de sistemas.
- Desprogramación de controladores lógicos y equipo electrónico
- Apagado de sistemas de iluminación.
- Caída de sistemas de comunicación.

### **Variaciones de tensión de larga duración (subtensiones y sobretensiones)**

Estos eventos se caracterizan por tener duraciones mayores a 1min, pueden ser sobretensiones o subtensiones dependiendo si el valor eficaz de la tensión está por encima o por debajo del  $\pm 10\%$  de la tensión de alimentación declarada.

## **i. Causas**

Las sobretensiones y subtensiones de estado estable no son generalmente consecuencias de fallas en el sistema de potencia. En un sistema eléctrico, la magnitud de la tensión de estado estable depende de las características de diseño, cambios de carga y operaciones de maniobra en el sistema. Comúnmente la tensión de estado estable se corrige en varios puntos del sistema, por ejemplo, utilizando cambiadores de Taps automáticos en la subestación de transformación y sobre algunos alimentadores de distribución.

Las sobretensiones pueden ser el resultado de maniobras en la carga, por ejemplo, la desconexión de una carga grande, o por variaciones en la compensación reactiva al energizar banco de condensadores. La mala regulación de la tensión en el sistema de suministro, así como un ajuste inadecuado de los taps de los transformadores puede generar una condición de sobrevoltaje.

Las subtensiones son el resultado de eventos inversos a los que ocasionan las sobretensiones. La energización de una carga grande o la desconexión de banco de condensadores pueden producir un evento de subtensión, hasta que el equipo de regulación de tensión pueda llevar de nuevo el voltaje dentro de los márgenes permitidos. Los circuitos sobrecargados también pueden experimentar condiciones de subtensiones.

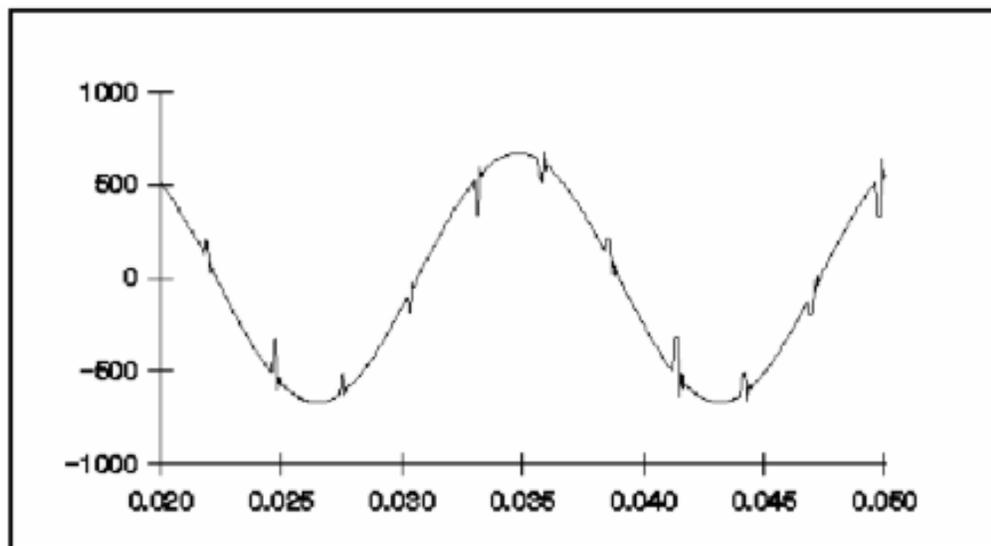
## **ii. Efectos**

- Sobretensiones: generan fallas en los equipos, degradación progresiva en cables, transformadores, barras, transformadores de potencial y de corriente, maquinas rotativas, disparos no deseados en dispositivos de protección, la potencia reactiva de un banco de condensadores aumentara, ya que varía con el cuadrado de la tensión, la luminiscencia aumentara en los dispositivos de iluminación.
- Subtensiones: Detenimiento de procesos, funcionamiento inadecuado de equipos, mal funcionamiento de dispositivos de control de motores, incremento de las perdidas por calentamiento en motores de inducción debido al aumento en el consumo de corriente, cambios de velocidad en la operación de motores de

inducción, salida de equipos de cómputo y controladores electrónicos, disminución de potencia reactiva en banco de condensadores.

### **Muestras de tensión (notches)**

Las muescas de tensión son perturbaciones de la tensión, de corta duración y periódicas que causan una distorsión de la onda de tensión en forma de pequeños huecos, reduciendo su valor instantáneo durante intervalos que generalmente no sobrepasan los 0.5 ciclos. En la figura 9 se puede observar la forma de onda en una fase de un rectificador.



**Figura 9. Muesca en onda de tensión**

#### **i. Causas**

Las muescas son producidas por principalmente por la conmutación de dispositivos electrónicos de potencia. Durante el proceso de operación la corriente es conmutada de una fase a la siguiente, creando un cortocircuito entre dos fases que acerca el valor instantáneo de la tensión a cero tanto como se lo permitan la impedancia del sistema.

## **ii. Efectos**

- Altera las formas de onda y puede afectar otras cargas, principalmente a los controladores de dichas cargas.
- Genera armónicos de alta frecuencia que pueden circular por el sistema y producir resonancias.
- Si la profundidad de la muesca es muy pronunciada tal que realice el cruce por cero, esto puede causar la operación errática de cargas basadas en electrónica.
- Las variaciones rápidas de tensión afectan los componentes inductivos de los dispositivos electrónicos.

## **Flicker**

El flicker es la percepción de la variación de la luminosidad de una lámpara, ocasionada por fluctuaciones de tensión en la red de alimentación eléctrica en baja tensión. Las fluctuaciones de tensión consisten en una secuencia de rápidos cambios de tensión muy poco espaciados en el tiempo de modo que es percibida por el ojo humano. La señal de la fluctuación rápida de tensión por lo general posee magnitudes tan bajas como 0.5% del valor nominal y frecuencias entre 6 y 8Hz.

## **i. Causas**

Los flicker provienen de variaciones repetitivas de tensión causadas por ciertas cargas industriales como equipos de soldadura, hornos de arco, motores grandes con cargas variables.

## **ii. Efectos**

- Sensación de inestabilidad visual.
- Irritabilidad y cansancio visual
- Variaciones de niveles de iluminación en bombillas incandescentes y bombillas de descarga.

- Reducción de vida útil de bombillas de descarga.
- Efecto electroboscópico.

### **Desbalance de tensión**

Este indicador representa la magnitud y asimetrías del ángulo de fase de las tensiones trifásicas en operación de estado estable. El desbalance de tensión es definido usando la teoría de componentes simétricas, como la relación entre la componente de secuencia negativa de la tensión y la componente de secuencia positiva.

#### **i. Causas**

El desbalance de tensión se producen debido a dos causas: asimetría de la impedancia de línea y desbalances de carga. La fuente más importante de desbalance de tensión son las cargas monofásicas no balanceadas en sistemas trifásicos. El desbalance de tensión también puede presentarse debido a la falla de banco de condensadores, tales como la apertura de un fusible en una de las fases de un banco trifásico.

#### **ii. Efectos**

- Reducción en la capacidad de carga de motores.
- Reducción de vida útil del aislamiento en motores debido al exceso de calor durante su funcionamiento.
- En dispositivos donde la tecnología de los rectificadores sea PWM se aumenta la distorsión armónica, incrementando los reactivos de carga generando rizados de corriente en la etapa de corriente continua.

## **Variaciones de frecuencia**

Las variaciones en un sistema de potencia existen cuando se produce una alteración entre la carga y la generación. La frecuencia del sistema está directamente relacionada con la velocidad de giro de los generadores, es decir, con el número de revoluciones de por minuto de los mismos.

Las variaciones de frecuencia son definidas como la desviación de la frecuencia fundamental del sistema de potencia, es decir, de su valor nominal especificado que para Colombia es 60Hz.

### **i. Causas**

Las variaciones de frecuencia que salen de los límites aceptados para el régimen casi estacionario del sistema eléctrico de potencia, pueden ser causadas por fallas en el sistema eléctrico de transmisión cuando sale un gran bloque de potencia, o cuando un grupo generador sale de servicio.

Existen pequeñas variaciones en la frecuencia como consecuencia del balance dinámico entre la generación y la carga. La magnitud de las desviaciones de la frecuencia y su duración dependen de las características de carga y de la respuesta del control de la generación a los cambios de carga. En la figura 10 se puede observar esta perturbación.

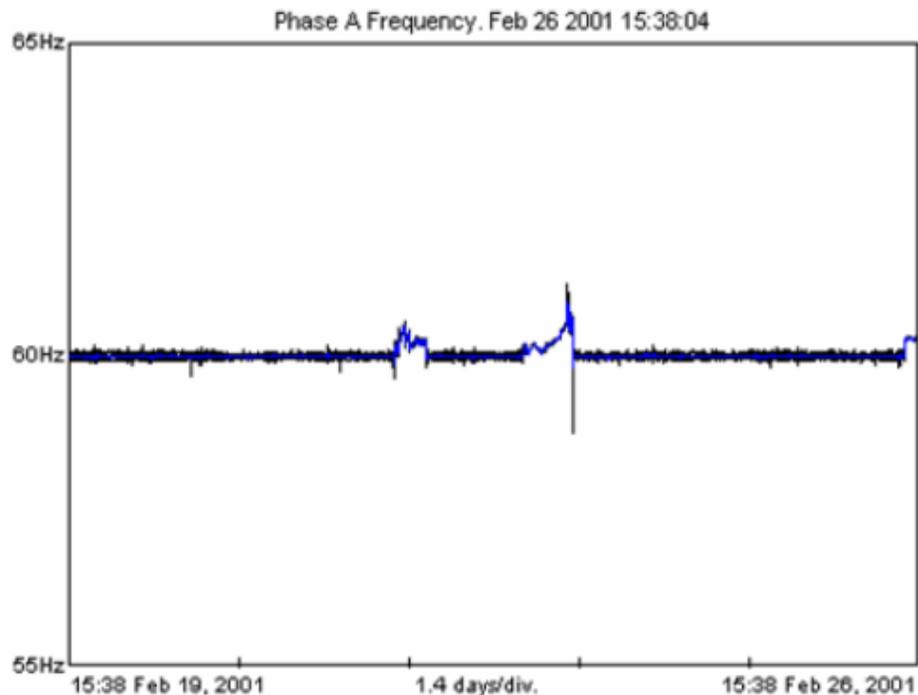


Figura 10. Registro de variación de frecuencia

## ii. Efectos

- Errores de sincronización de frecuencia, en usuarios que tienen cargas de grandes rectificadores.
- Comportamientos erróneos en equipos electrónicos.
- Interrupción del servicio y variaciones de tensión por deslastre de carga.

## 2.4. ARMÓNICOS

### Armónicos de corriente

Las cargas no lineales conectadas al sistema de suministro eléctrico producen corrientes armónicas que se propagan al sistema de potencia y causan distorsiones armónicas de tensión que afectan a otros usuarios.

### **i. Causas**

- Conmutación a alta frecuencia en las fuentes de alimentación.
- Utilización de cargas controladas por tiristores.
- Grandes sistemas de UPS.
- Alta impedancia de las fuentes de alimentación.
- Alta impedancia en el cableado eléctrico.
- Utilización de cargas que conmuten bastante sobre la red (equipos de soldadura, equipos de cómputo, Ups).

### **ii. Efectos**

- Sobrecalentamiento y daños en transformadores con baja carga, motores, generadores y balastos electrónicos.
- Corrientes excesivas en neutros.
- Operación de protecciones sin causa aparente.
- Ruido audible excesivo en centros de distribución.
- Fallas en equipos electrónicos.
- Pérdida de datos en equipos de memoria.
- Fallas en UPS en operaciones con transferencia.
- Aumento de pérdidas de energía en los equipos eléctricos.
- Riesgo de incendio y explosiones por existencia de resonancia eléctrica en el sistema eléctrico.

### **Armónicos de tensión**

Los armónicos de tensión son ondas senoidales cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental (60Hz). La presente definición cubre armónicos de larga duración o estado estable, excluyendo fenómenos transitorios aislados.

## **i. Causas**

Los armónicos son causados por dispositivos cuya característica tensión/corriente es no lineal, es el caso de convertidores electrónicos de potencia para variadores de velocidad de motores, rectificadores, hornos de arco, etc.

## **ii. Efectos**

- Aumento de pérdidas y calentamiento en equipos eléctricos.
- Registro incorrecto en equipo de control y monitoreo.
- Sobrecalentamiento de equipo rotatorio, transformadores y conductores eléctricos.
- Aumento en niveles de ruido audible de equipos eléctricos.
- Fallas en aislamientos de equipos eléctricos.
- Fallas u operación prematura de dispositivos de protección.
- Sobre o sub facturación de energía por alteración del valor rms de la tensión y/o corriente que pasa por el medidor de energía.
- Condiciones de resonancia armónica en el sistema de potencia eléctrico del usuario, deteriorando la operación y confiabilidad del sistema y los equipos.

## 3. CAPITULO 2

### 3.1. IMPACTO DE LOS ARMÓNICOS EN INSTALACIONES INDUSTRIALES

Los sistemas eléctricos industriales se caracterizan por ser grandes consumidores de potencia reactiva debido a la gran cantidad de motores de inducción que son instalados en la industria. Por lo anterior, la legislación da facultades a los operadores de red para que penalice económicamente a todos aquellos industriales que no mejoren los factores de potencia de sus instalaciones, por tanto se hace necesario y más económico instalar banco de condensadores, llevando el factor de potencia a pocos menos de la unidad y disminuyendo la facturación por demanda.

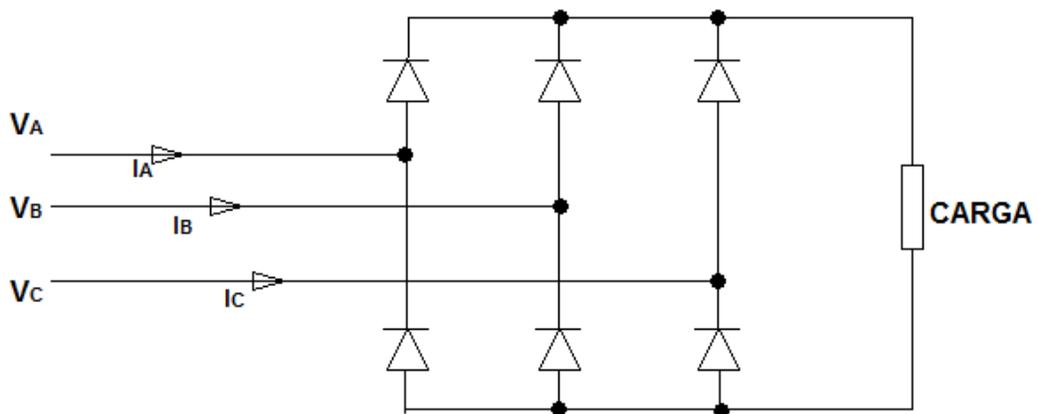
En la actualidad, los clientes industriales se han visto obligados a volcar la tecnología de su instalación en aras del incremento de la productividad, por lo tanto, la proliferación del uso de la electrónica de potencia en sus procesos, los cuales producen armónicos de tensión y especialmente de corriente.

De acuerdo con Arcila (s.f.), los armónicos son el resultado de cargas no lineales, las cuales ante una señal de tipo sinusoidal presenta una respuesta de tipo no sinusoidal. Las principales fuentes de armónico a nivel industrial son:

- Hornos de arco y otros elementos de descarga de arco, tales como lámparas fluorescentes. Los hornos de arco se consideran más como generadores de armónicos de voltaje que de corriente, apareciendo típicamente todos los armónicos (2º, 3º, 4º, 5º,...) pero predominando los impares con valores típicos con respecto a la fundamental de:
  - ❖ 20% del 3er armónico.
  - ❖ 10% del 5º.
  - ❖ 6% del 7º.
  - ❖ 3% del 9º.
- Núcleos magnéticos en transformadores y maquinas rotativas que requieren corriente de tercer armónicos para excitar el hierro.

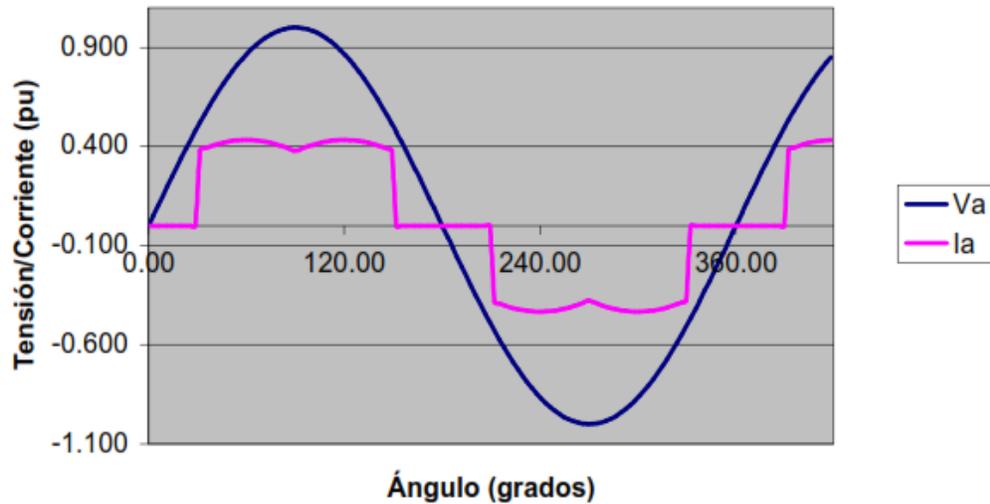
- La corriente de magnetización de los transformadores produce segundo y cuarto armónico.
- Controladores de velocidad ajustables usados en ventiladores, bombas y controladores de procesos.
- Swiches en estado sólido que modulan corrientes de control, intensidad de luz, calor, etc.
- Fuentes controladas para equipos electrónicos.
- Rectificadores basados en diodos y tiristores para equipos de soldadura, cargadores de baterías, etc.
- Convertidores de AC a DC (inversores).

La Figura 11 muestra el circuito correspondiente a un rectificador de 6 pulsos, el cual la carga generadora de armónicos más abundante en la industria.



**Figura 11. Rectificador de 6 pulsos**

En la Figura 12 se muestra la corriente que absorbe el rectificador de 6 pulsos para el caso en el cual su carga es resistiva y la tensión de la red es sinusoidal.



**Figura 12. Corriente de un rectificador de 6 pulsos**

Todo lo anterior para decir que el desconocimiento de los efectos de la combinación de carga no lineal y compensación de reactiva en los clientes industriales ocasiona efectos nocivos en lo que se refiere a la calidad de la energía de sus instalaciones, así como en la red eléctrica de la cual se abastecen. Estos bancos de condensadores crean condiciones de resonancia que puede magnificar la corriente armónica de las cargas no lineales y llegar a producir efectos en múltiples elementos que forman parte de la instalación y que a continuación presentamos.

### 3.2. EFECTO SOBRE LOS CABLES

Para Aguirre (2015), la distribución de la corriente a través de un conductor sólo es uniforme cuando se trata de corriente directa. En corriente alterna, a medida que la frecuencia aumenta, la no uniformidad de la distribución de corriente se ve incrementada.

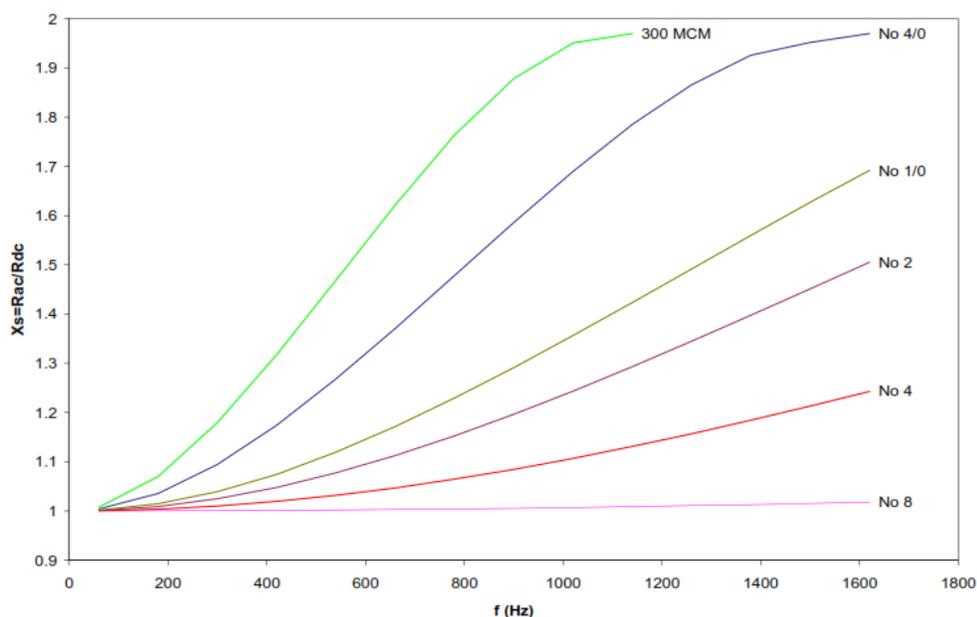
En conductores circulares la densidad de corriente aumenta del centro a la superficie debido a que las capas externas son menos influenciadas por el flujo magnético que las internas, esto significa que con corriente alterna es inducido más voltaje longitudinalmente en el interior del conductor que en la superficie, por lo tanto la densidad de corriente va en aumento del interior, a las capas externas del conductor, a este fenómeno se le conoce como *efecto skin*.

El efecto de los armónicos hace que este fenómeno se vea aumentado en los conductores y que produzca en ellos una menor capacidad efectiva de transportar corriente por su sección transversal, lo cual se refleja como un aumento en la resistencia efectiva del conductor, por ende también aumentan las pérdidas por calentamiento. A frecuencia de 60Hz, este efecto se puede despreciar, no por que no exista, sino porque este factor es considerado en el momento de la fabricación de los conductores. Sin embargo con corrientes distorsionadas, las perdidas por efecto joule son mayores por las frecuencias de las componentes armónicas de la corriente, en la Figura 13 se puede observar un ejemplo.



**Figura 13. Densidades de corriente en un mismo conductor a corriente de alta frecuencia**

La Figura 14 muestra la variación de la relación  $r_{ac}/r_{dc}$  con la frecuencia para algunos calibres de conductores utilizados en la industria. Se puede ver como a mayor sección (menor  $r_{dc}$ ) el efecto se hace más acentuado.



**Figura 14. Valor de la relación  $X_s$  en función de la frecuencia**

### **3.3. EFECTO SOBRE LOS TRANSFORMADORES**

Según Arcila (s.f.), los transformadores de potencia están diseñados para operar con corriente alterna y a una frecuencia determinada (50 ó 60 Hz), lo cual representa que el transformador trabajando con la carga nominal y a una temperatura ambiente no mayor a la especificada, debe tener la capacidad de disipar el calor producido por sus pérdidas sin llegar a sobre calentarse.

Los transformadores naturalmente presentan pérdidas sin carga o de hierro y pérdidas con carga, que incluyen las pérdidas  $I^2R$ , pérdidas por corrientes de Eddy y pérdidas adicionales en la cuba, herrajes y otras partes de su estructura. De manera puntual, el efecto de los armónicos en estas pérdidas se explica a continuación:

#### **Pérdidas sin carga o de hierro**

Producidos por la rama de magnetización en el núcleo del transformador. La forma de onda del voltaje en el devanado primario es considerada sinusoidal sin importar la corriente de carga, por lo que no se considera que aumentan para corrientes de carga no sinusoidales.

Sin embargo, la corriente de magnetización consiste de armónicos, estos son muy pequeños comparados con las corrientes de la carga, por lo tanto sus efectos en las pérdidas totales son mínimos.

### **Pérdidas I<sup>2</sup>R**

Si la corriente de carga contiene armónicos, entonces estas pérdidas se aumentarían en el devanado secundario del transformador por el efecto piel.

### **Pérdidas por corrientes de Eddy**

Estas pérdidas llamadas también corriente circulantes a frecuencia fundamental son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia, razón por la cual se puede tener un aumento excesivo de estas en los devanados que conducen corrientes de carga no sinusoidales.

### **Pérdidas adicionales**

Las corrientes distorsionadas producen flujos de dispersión armónicos además del flujo de dispersión fundamental. Cuando estos flujos armónicos atraviesan los conductores de cobre, inducen voltajes armónicos y, por ende, corrientes parasitarias armónicas. En consecuencia estas pérdidas aumentan las temperaturas en las partes estructurales del transformador y en los devanados es particularmente importante ya que estas pérdidas no están distribuidas uniformemente en la superficie sino que están centradas en ciertas regiones, con frecuencia en la parte superior e inferior de los devanados. Por lo tanto, algunas regiones pueden calentarse mucho más que otras trayendo consigo una reducción de la vida útil del transformador.

## **3.4. EFECTO EN LOS CAPACITORES**

Cuando un capacitor transporta una corriente distorsionada, el voltaje a través de sus terminales no tiene la misma forma de onda que la corriente. La razón es que la reactancia

capacitiva no es la misma a las frecuencias fundamental y armónica. Los armónicos también afectan las pérdidas en el dieléctrico que separan las placas metálicas. Por otro lado el esfuerzo dieléctrico es importante tenerlo en cuenta ya que los voltajes en los capacitores son aditivos al pico de voltaje de la fundamental.

### **3.5. EFECTO SOBRE LOS MOTORES**

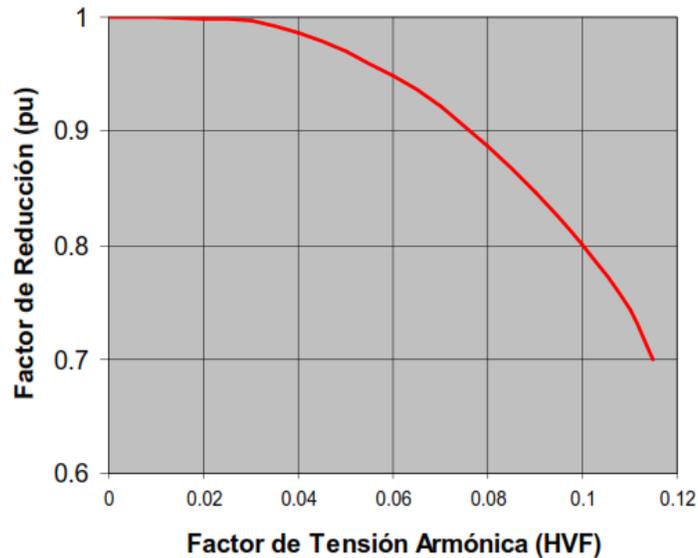
El mayor efecto que tienen los armónicos de voltaje en la maquinas rotativas sincrónicas y en los motores de inducción es el incremento de calor debido a las pérdidas en el hierro y en el cobre a altas frecuencias, por lo tanto, los armónicos afectarán tanto la eficiencia de la máquina como el torque desarrollado.

Los armónicos de corriente en motores pueden aumentar la emisión de ruidos audibles comparado con la excitación sinusoidal. También pueden producir distribuciones de flujo resultante en el gap de aire las cuales pueden causar o aumentar el fenómeno llamado “cogging” (la negativa al arranque suave) o el llamado “crawling” (alto deslizamiento) en los motores de inducción.

Los armónicos de corriente en pareja tales como el quinto y el séptimo tienen el potencial de producir oscilaciones mecánicas en la combinación turbina-generator o en sistemas motor carga. Estas resultan cuando el torque oscila y es causado por una interacción entre las corrientes armónicas y el campo magnético de frecuencia fundamental. Por ejemplo, el quinto y el séptimo armónico pueden combinarse para producir una torsión en el rotor del generador a la frecuencia del sexto armónico. Si existe una resonancia mecánica de frecuencia cercana a la eléctrica, altas fuerzas mecánicas pueden ser desarrolladas en algunas partes del motor

Debido a que las corrientes armónicas se combinan y afectan el flujo giratorio de la máquina es necesaria más corriente para producir el mismo trabajo, por lo tanto la eficiencia disminuye.

Cuando se trabaja con motores alimentados con tensiones no sinusoidales, debe tenerse en cuenta que no pueden operar a su capacidad nominal. La Figura 15 muestra el factor de reducción de la capacidad del motor de acuerdo con el factor de tensión armónica.



**Figura 15. Factor de reducción para motores en redes con contenido de armónicos**

$$HVF = \sqrt{\sum_{n=5}^{n=\infty} \frac{(V_n)^2}{n}}$$

Dónde:

**n:** Orden de la armónica sin considerar las divisibles por 3.

**Vn:** Tensión a la frecuencia de la armónica n [p.u]

Finalmente, no es recomendable operar el motor ante un HVF elevado o considerable ya que el incremento de las pérdidas contribuye al incremento de la temperatura y es aconsejable evitar superar los límites de temperatura establecidos por la clase térmica de los materiales, por el bienestar de los aislantes y en definitiva para prolongar la vida útil del motor.

### **3.6. EFECTOS SOBRE OTROS EQUIPOS**

Los equipos electrónicos sensibles son susceptibles a operación incorrecta a causa de los armónicos. En algunos casos estos equipos dependen de la determinación precisa del cruce por cero del voltaje u otros aspectos de la forma de onda del mismo, por los que condiciones de distorsión puedan afectar su operación deseada.

En lo que tiene que ver con medición e instrumentación, estos son afectados por las componentes armónicas, principalmente si tienen condiciones de resonancia que causen altos voltajes armónicos en los circuitos.

## 4. CAPITULO 3

### 4.1. IMPLEMENTACIÓN SOLUCIÓN PROPUESTA

La solución para mitigar el nivel de armónicos se enfocó a instalaciones eléctricas de tipo industrial debido a que en la práctica es donde mayor frecuencia se tienen problemas relacionados con calidad de la potencia eléctrica, bien sea por fallas en la red de media tensión que alimenta la industria o por el tipo de cargas al interior de la planta.

En la Figura 16 se presenta el sistema eléctrico al cual se realizará el análisis de calidad de la potencia y cuyos elementos se describirán más adelante.

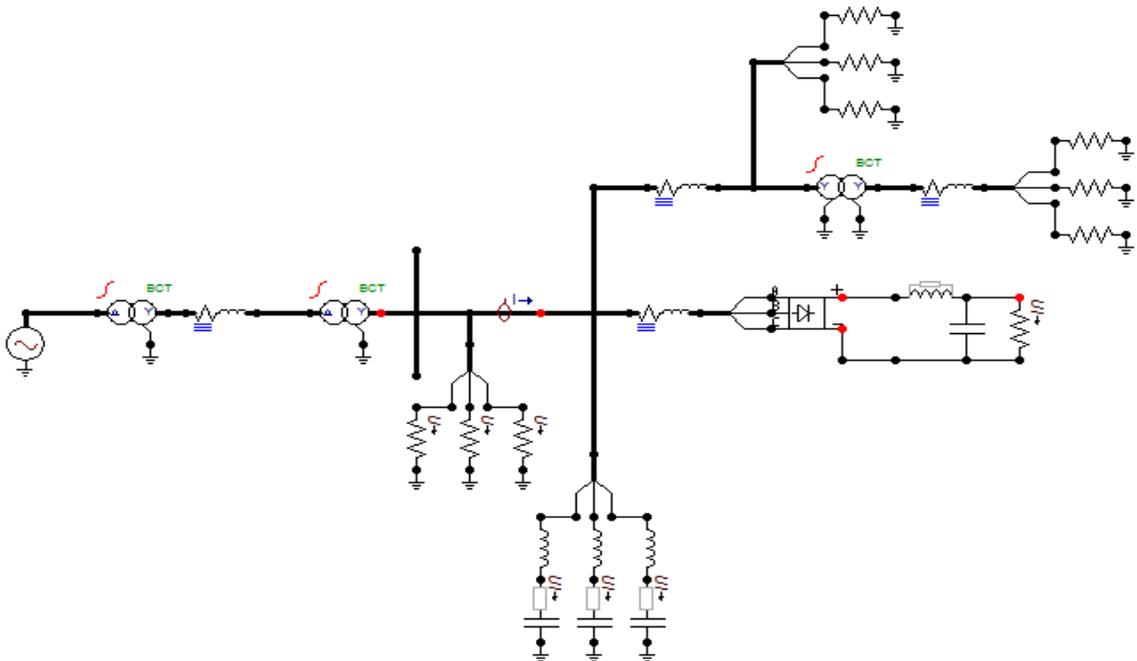


Figura 16. Sistema eléctrico industrial

## 4.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO

### Fuente de potencia

Este componente es simplemente una fuente ideal sin impedancia interna destinada a simular la Central de generación (fuente) que alimenta al transformador elevador para poder realizar la distribución de energía a nivel de 13,2 kV, la cual alimentará la subestación de la planta industrial.

Para modelar la fuente de potencia mediante el software ATP, se emplea una fuente de corriente alterna (C.A) de tensión trifásica con conexión a tierra (**AC source (1&3)**) con las siguientes características:

- Amplitud= 3396,62 V.
- Frecuencia: 60 Hz.
- Voltage source.
- 3-phase, degrees.
- Peak-L-G, grounded.

### Transformador elevador

El transformador elevador es un elemento de suma importancia dentro de un sistema de potencia cuyo objetivo es transformar la tensión generada por la central a un nivel superior con el fin de que la energía sea transportada o distribuida. Para nuestro caso, se tiene una línea de distribución en media tensión a 13,2 kV.

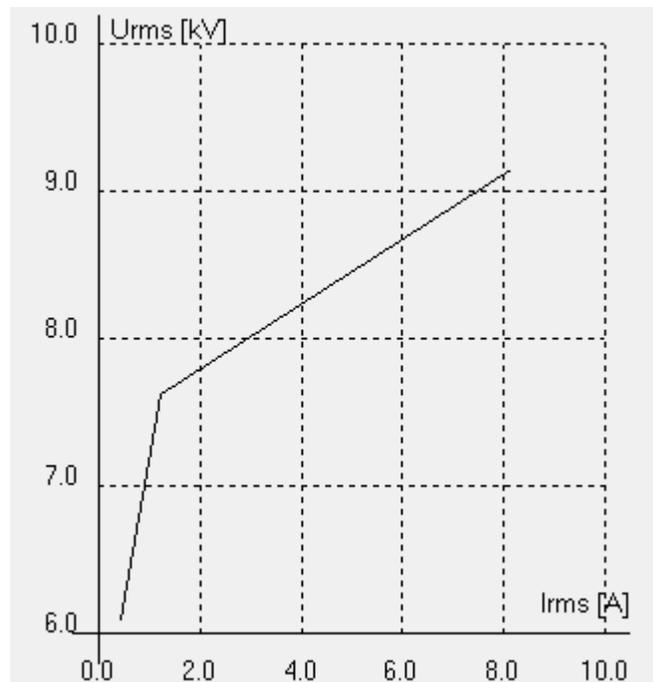
Para modelar el transformador elevador mediante el software ATP, se empleó el modelo BCTRAN del ATP con el fin de dar una alta calidad al sistema eléctrico a simular. Las especificaciones del modelo BCTRAN del transformador son las siguientes:

- Potencia: 3,75 MVA.
- Voltaje de alta: 4,16 kV.
- Voltaje de baja: 13,2 kV.
- Número de fases: 3.

- Número de devanados: 2.
- Conexión: DY.
- Frecuencia: 60 Hz.
- Tipo: Sumergido en aceite.
- Pérdidas en vacío: 4,39 kW.
- Pérdidas en carga (ref 85°C): 25,62 kW.

Las pérdidas en vacío y en carga respectivamente, fueron consultadas en el catálogo del fabricante SUNTEC S.A.S para transformadores sumergidos en aceite con tensión nominal de 15 kV.

Adicionalmente, se construyó la curva de secuencia positiva de pérdidas en circuito abierto con el fin de visualizar el desempeño del transformador de acuerdo a datos del fabricante, pero dicho desempeño no tiene gran incidencia en los resultados de la simulación ya que el análisis estará enfocado a nivel de baja tensión (460 V).



**Figura 17. Pérdidas en vacío transformador 3.75 MVA**

## Impedancia de red

Se estima una potencia de cortocircuito disponible en la red de media tensión de 200 MVA, cuyo dato es bastante coherente con los valores de potencia de cortocircuito que se pueden tener en una red de media tensión a 13,2 kV. Se debe convenir que éste no es un dato crítico, ya que por lo general la impedancia de un transformador de distribución resulta mucho más importante que la impedancia de la red. De hecho, en estos casos es muy habitual suponer que la red tiene una potencia de cortocircuito infinita.

Sin embargo, se procede a determinar las componentes de la impedancia equivalente:

$$Z_s = \frac{V^2}{S} = \frac{(13,2kV)^2}{200 MVA} = 0,87\Omega$$

Adoptando los valores habituales de  $\cos 81,37^\circ = 0,15$  y  $\sin 78,52^\circ = 0,98$ , se tienen:

$$R_s = Z_s \times \cos \phi \therefore 0,87 \times 0,15$$

$$R_s = 0,13\Omega$$

$$X_s = Z_s \times \sin \phi \therefore 0,87 \times 0,98$$

$$X_s = 0,8526\Omega$$

$$L_s = \frac{X_s}{2\pi f} = \frac{0,8526}{2\pi * 60} = 2,26mH = 2260\mu H$$

Para modelar la impedancia de red mediante el software ATP, se emplea la Rama RLC trifásica (**RLC3**, 3-phase).

## Subestación

El transformador reductor simula la subestación principal ubicada al interior de la planta industrial (13,2/0,46 kV), donde se realiza la distribución a nivel de baja tensión (460 V) para las cargas. La ubicación y distancia de ésta respecto a las cargas finales es clave para el cálculo de las impedancias asociadas a las acometidas de distribución al interior de la planta.

Se empleó el modelo BCTRAN (Two windings) del ATP con el fin de simular el transformador reductor asociado a la subestación de la planta industrial. Las especificaciones del modelo BCTRAN del transformador son las siguientes:

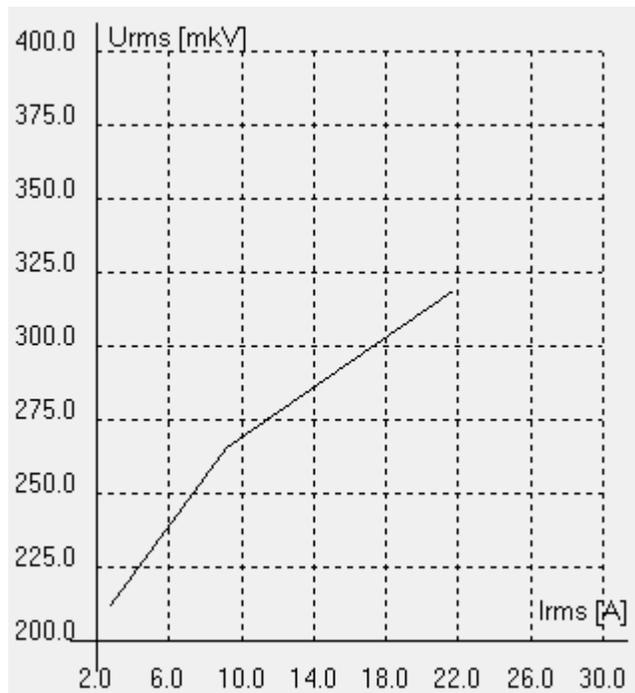
- Potencia: 1 MVA.
- Voltaje de alta: 13,2 kV.
- Voltaje de baja: 0,46 kV.
- Número de fases: 3.
- Número de devanados: 2.
- Conexión: DY.
- Frecuencia: 60 Hz.
- Tipo: Sumergido en aceite.
- Pérdidas en vacío: 1,51 kW.
- Pérdidas en carga (ref 85°C): 7,77 kW.

Las pérdidas en vacío y en carga respectivamente, fueron consultadas en el catálogo del fabricante SUNTEC S.A.S para transformadores sumergidos en aceite con tensión nominal de 15 kV.

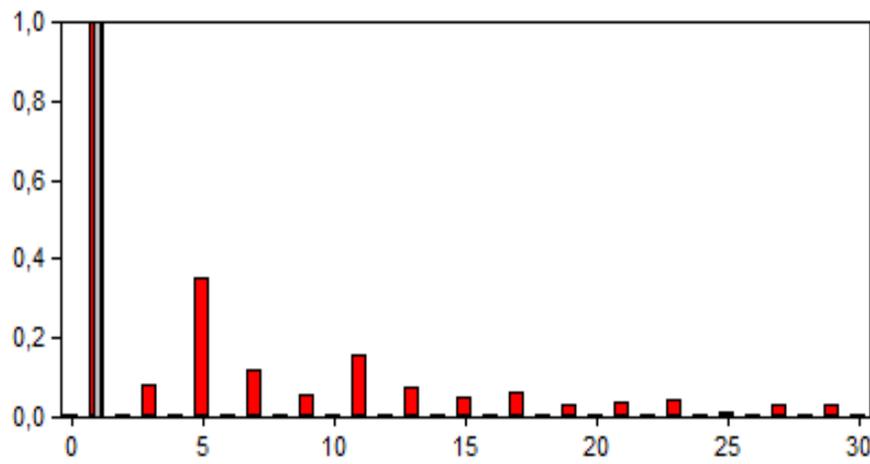
**Tabla 2. Datos de placa transformador 1MVA**

<b>TENSIÓN NOMINAL 15/1,2 kV – TENSION DE ENSAYO (60Hz-1 min) 34/10kV –                      NIVEL DE ASILAMIENTO (BIL) 95/30Kv – BAJAS PÉRDIDAS – Frecuencia: 60Hz –                      Grupo vectorial: Dyn_</b>									
Potencia	(kVA)	800	1.000	1.250	1.600	2.000	2.500	3.000	3.750
Pérdidas en vacío (100% Vn)	(KW)	1,29	1,51	1,78	2,14	2,56	3,08	3,6	4,39
Pérdidas en carga (ref. 85°C)	(KW)	6,23	7,77	9,45	11,69	14,28	17,5	20,79	25,62
Impedancia Máxima	(%)	5,0	5,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Corriente de Excitación	(%)	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Regulación fp: 1,0 – 100% carga	(%)	0,90	0,90	0,93	0,91	0,89	0,88	0,87	0,86
Regulación fp: 0,8 – 100% carga	(%)	3,65	3,65	4,27	4,25	4,24	4,23	4,23	4,22
Eficiencia fp: 1,0 – 100% carga	(%)	99,07	99,08	99,11	99,14	99,17	99,18	99,19	99,21
Eficiencia fp: 1,0 – 75% carga	(%)	99,21	99,22	99,25	99,28	99,30	99,32	99,32	99,34
Eficiencia fp: 0,8 – 100% carga	(%)	98,84	98,85	99,89	98,93	98,96	98,98	98,99	99,01
Eficiencia fp: 0,8 – 75% carga	(%)	99,01	99,03	99,06	99,10	99,13	99,15	99,16	99,17

Adicionalmente, se construyó la curva de secuencia positiva de pérdidas en circuito abierto con el fin de visualizar el desempeño del transformador de acuerdo a datos del fabricante, con el objetivo de acercar al máximo a la realidad el modelo construido a nivel de baja tensión (460 V).



**Figura 18. Perdidas en vacío transformador 1 MVA**



**Figura 19. Espectro armónico de voltaje inicial subestación a 460 V con banco de compensación de 250 kVAR (sin filtro)**

### Medidores voltaje a tierra

Tener claro la referencia de medida de las ondas de tensión es fundamental para el análisis y comprensión del sistema eléctrico en presencia de armónicos, por ende, es imprescindible

utilizar medidores de tensión referenciados a tierra para conocer con claridad los valores de distorsión armónica.

Con el objetivo de medir la forma de onda y los valores de distorsión armónica en el barraje principal de la subestación a nivel de 460 V, se emplea este tipo de medidores, los cuales básicamente se componen de resistencias con valores altos (100000  $\Omega$ ) para que por ellas no circule corriente sino que únicamente sirvan para medir el voltaje respecto a tierra.

### **Blindobarras para distribución en baja tensión (460 V)**

Para la alimentación del motor de 500 kW se considerará un tendido de blindobarras marca NOVOBARRA modelo BB250, de 40 m de longitud hasta el punto de alimentación del rectificador de 6 pulsos.

Para modelar las blindobarras mediante el ATP, se emplea la Rama RLC trifásica (RLC3, 3-phase).

Los datos más relevantes proporcionados por el fabricante son los siguientes:

- Intensidad nominal  $I_n$  a 35 ° C ambiente: 250 A
- Sección por fase: 97 mm<sup>2</sup>
- Resistencia por fase a  $I_n$  y 20 °C ambiente: 0,2248 m $\Omega$  / m
- Reactancia por fase a 60 Hz: 0,1825 m $\Omega$  / m
- Impedancia por fase a  $I_n$ , 20 ° C ambiente y 60 Hz: 0,3256 m $\Omega$  / m

A partir de estos valores, se pueden obtener la resistencia y la reactancia representativas del tramo de 40 m de blindobarra:

$$R_{bb} = r_{bb} \times 40m \therefore 0,2248m\Omega/m \times 40m$$

$$R_{bb} = 9m\Omega$$

$$X_{bb} = X_{bb} \times 40m = 0,1825m\Omega/m \times 40 = 7,3m\Omega$$

$$X_{bb} = 7,3m\Omega$$

$$L_{bb} = X_{bb}/(2 \times \pi \times f) \therefore 7,3m\Omega/(2 \times \pi \times 60Hz)$$

$$L_{bb} = 0,0194mH$$

De manera similar que para el caso de los cables, estos valores resultan bastante conservadores, debido a que se considera la resistividad de las blindobarras a su corriente nominal, pero en esta aplicación se las hace trabajar a poco más de la mitad de ese valor.

### **Rectificador pasivo de seis pulsos**

El arreglo de diodos sigue el principio de todo rectificador de 6 pulsos, el cual es caracterizado por ser la carga más relevante y conocida en un sistema industrial, debido al uso de variadores de velocidad (VFD).

Es importante anotar que el rectificador de 6 pulsos en comparación con el de 12 pulsos, como cargas armónicas, el rectificador de 6 pulsos es el que más afecta la calidad de la energía en un sistema eléctrico.

Puente de diodos genéricos, interruptor simple tipo 11 (**Diode. Simple TYPE 11 switch**), cada diodo con un circuito amortiguador de transitorios (*snubber*) representado con una rama RLC monofásica (**RLC**) donde  $R=1000 \Omega$  y  $C=0,1 \mu f$ .

El esquema se compiló en un solo bloque (vista externa) para no saturar el modelo y hacer más fácil su entendimiento (vista interna).

### **Bus de corriente continua y carga del rectificador (motor)**

Para analizar el efecto de los armónicos que trae a nivel de baja tensión (460 V) una carga de gran potencia en una planta industrial, se simuló dicha carga como una resistencia, donde el variador de velocidad compuesto por un rectificador de 6 pulsos inyecta los armónicos al barraje de la subestación.

Resistor, Capacitor e inductor (**Branch Linear**), el inductor simula el pequeño tramo que existe entre el puente rectificador y el bus de corriente continua (capacitor), el capacitor representa el bus de corriente continua del variador de velocidad (VFD), el voltaje entre terminales del mismo por estar en paralelo será el voltaje a la salida, es decir, en la carga. Los valores de R, L y C son respectivamente: R=0,615  $\Omega$  y C=1000  $\mu$ f L=0,1  $\Omega$ .

El valor de R=0,59  $\Omega$  simula el motor de 500 kW cuyo cálculo se realizó de la siguiente manera:

Datos de entrada:

Potencia: 500 kW

Fp=0,8

Voltaje: 460 V

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} * VLL * \cos\phi} = 784,44 A$$

$$R = \frac{V}{I} = 0,59 \Omega$$

### **Acometida otras cargas del sistema**

Gran parte de las acometidas al interior de una planta industrial son conductores de cobre para alimentar cargas pequeñas pero importantes dentro de los procesos. Para distancias largas los parámetros anteriormente calculados pueden presentar cambios drásticos, por lo que hay que tener claro la longitud de los circuitos del sistema.

Para modelar las acometidas en el ATP, se emplea la Rama RLC trifásica (**RLC3, 3-phase**).

Se considera un tramo de 20 m de 3 conductores (1xfase (350 MCM)) con un área cada uno de 177,3 mm<sup>2</sup> para llevar la alimentación desde el barraje principal de la subestación a 460 V hasta la entrada al transformador de aislamiento. Para la determinación de la resistencia óhmica de estos conductores, se utiliza la resistividad a su temperatura límite

de funcionamiento de 90 °C, de modo que se considera la alternativa más desfavorable, y por ende más conservadora.

Para la determinación de la reactancia inductiva de estos conductores, se recurre a un factor empírico relacionado con la longitud aplicable a esta disposición unifilar:

$$R_{ACARGAS} = \rho_{CU-90^{\circ}} * \frac{l}{A} = 0,0229 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m} * \frac{20 m}{177,3 mm^2} = 0,00258 \Omega$$

$$R_{ACARGAS} = 2,58 m\Omega$$

$$X_{LACARGAS} = 0,14 \frac{m\Omega}{m} * l (m) = 0,14 m\Omega * 20 = 2,8 m\Omega$$

Las características del conductor fueron consultadas del catálogo del fabricante Flexotek para conductores de cobre aislados, las cuales se presentan a continuación:

**Tabla 3. Conductores FLEXOTEK – CABLE THWN/THHN 600 V.**

Código	Calibre (AWG/KCM)	Conductor		Espesor nominal del aislamiento / nylon (mm)	Diámetro exterior aprox. (mm)	Peso (kg/gm)
		Número de hilos	Área (mm <sup>2</sup> )			
1101140	14	19	2.082	0.38/0.10	2.9	3
1101120	12	19	3.307	0.38/0.10	3.4	4
1101100	10	19	5.260	0.51/0.10	4.3	6
1101080	8	19	8.367	0.76/0.13	5.7	10
1101060	6	19	13.300	0.76/0.13	6.7	15
1101040	4	19	21.150	1.02/0.15	8.5	24
1101020	2	19	33.620	1.02/0.15	10.1	36
1101110	1/0	19	53.480	1.27/0.18	12.7	56
1101210	2/0	19	67.430	1.27/0.18	13.9	70
1101310	3/0	19	85.010	1.27/0.18	15.2	87
1101410	4/0	19	107.200	1.27/0.18	16.7	108
1102510	250	37	126.700	1.52/0.20	18.5	128
1103010	300	37	152.000	1.52/0.20	19.9	152
1103510	350	37	177.300	1.52/0.20	21.3	177
1104010	400	37	202.700	1.52/0.20	22.5	201
1105010	500	37	253.400	1.52/0.20	24.7	249

## Transformador de aislamiento

Hoy en día, el transformador de aislamiento ha tenido gran acogida a nivel industrial gracias a la disminución de los efectos nocivos que las grandes cargas generan y que afectan a cargas sensibles y/o críticas del sistema eléctrico. Este transformador elimina el riesgo de accidente en caso de contacto unipolar, ayuda a disminuir los efectos de los armónicos.

Se empleó el modelo BCTRAN del ATP (***Two windings***) con el fin de simular el transformador de aislamiento que alimenta cargas sensibles dentro de la planta industrial. Las especificaciones del modelo BCTRAN del transformador son las siguientes:

- Potencia: 400 kVA.
- Voltaje de alta: 460 V.
- Voltaje de baja: 460 V.
- Número de fases: 3.
- Número de devanados: 2.
- Conexión: YYn0.
- Frecuencia: 60 Hz.
- $Z_{cc}$ : 2,5%.
- Tipo: Seco.
- Pérdidas en vacío: 1 kW.
- Pérdidas en carga (ref 85°C): 2.5 kW.

Las características del transformador de aislamiento fueron consultadas del catálogo del fabricante Torytrans con serie TT e IP23, las cuales se presentan a continuación:

**Tabla 4. Datos de placa transformador Torytrans**

<b>Características técnicas</b>	
<b>Potencia</b>	1÷1000 kVA
<b>Tensión PRI</b>	400V
<b>Tensión SEC</b>	230V (Serie TD) 400 V (Serie TT)
<b>Conexión</b>	Yyn0
<b>Frecuencia</b>	50/60 HZ
<b>Temp. ambiente</b>	30 °C
<b>Clase térmica</b>	F (155 °C)
<b>Índice protección</b>	IP-00 (Serie xxS) IP-23 (Serie xxC)
<b>Protecc. Choque elec.</b>	Clase I
<b>Tensión de ensayo</b>	4 Kv
<b>Normas</b>	
UNE EN 61558-1 / IEC 61558-1	
UNE EN 60076-11 / IEC 60076-11	

### **Descripción de las cargas restantes**

Se modelaron motores pequeños de un sistema industrial con el fin de ver el comportamiento que tienen los armónicos generados por el motor de 500 kW sobre dichas cargas. Se empleó el modelo Resistor (**Branch Linear**) con el fin de modelar las cargas restantes. Se representaron dos cargas (C1 y C2) mediante un arreglo de resistencias la cuales corresponden a un motor de 303 W y 423 W a 460 V respectivamente.

$$R_{C1,2} = \frac{V_{1,2f}^2}{P_{1,2f}}$$

$$R_{C1} = \frac{265,58^2}{100,8} = 700 \Omega$$

$$R_{C2} = \frac{265,58^2}{141} = 500 \Omega$$

## Filtro de armónicos

El filtro de armónicos permite mitigar o reducir los niveles de armónicos en un sistema eléctrico, la especificación de los parámetros L y C del filtro de acuerdo a la frecuencia de sintonía del mismo, son los que determinan el comportamiento final de las distorsiones de tensión y corriente.

Capacitor e inductor (**Branch Linear**), el inductor y el capacitor simulan respectivamente la bobina y la compensación reactiva del filtro. Los valores de L y C son los calculados en el diseño del filtro:  $L=0,04 \Omega$ .  $C=2980,4 \text{ uf}$ .

### ✓ **Cálculo de la compensación de reactivos**

La compensación de reactivos depende de la corrección del factor de potencia que se quiere dar al sistema eléctrico, para disminuir el consumo de reactivos. Para este caso se corregirá el factor de potencia de 0,8 p.u a 0,97 p.u para los 500 kW que consume el motor principal de la planta industrial.

Así la potencia reactiva de compensación está dada por:

$$Q_c = P (\tan(\cos^{-1} FP_{viejo}) - \tan(\cos^{-1} FP_{nuevo}))$$

$$Q_c = 500 \text{ kW} (\tan(36,86^\circ) - \tan(14,07^\circ))$$

$$Q_c = 500 \text{ kW} (0,75 - 0,25)$$

$$Q_c = 250 \text{ kVAR}$$

Así, los 250 kVAR es la potencia reactiva "efectiva" de la compensación de reactivos.

## **5. CAPITULO 4**

### **5.1. DISEÑO DEL FILTRO**

Luego de analizar cómo se encuentra conformado el sistema eléctrico se procede con el diseño del filtro partiendo de la fundamentación en los circuitos inductivos y capacitivos y como a través de su configuración ayudan a solucionar el problema de armónicos. Para poder observar los efectos causados por los armónicos en el sistema industrial se debe primero sintonizar el filtro que se va a utilizar, para luego poder pasar por cada uno de los escenarios que se plantean y que son:

- Red sin banco de compensación reactiva.
- Red con banco de compensación reactiva.
- Red con compensación reactiva y filtro armónico.

### **5.2. SELECCIÓN DE FILTRO**

Existen dos tipos de filtros, los pasivos y activos. Los filtros pasivos solo utilizan condensadores, inductancias y resistencias; diferente a los activos que utilizan elementos semiconductores para el control.

Dentro de las principales características de los filtros pasivos son:

- Su operación no es dinámica ya que generalmente están sintonizados a una sola frecuencia.
- Los equipos y el mantenimiento de los mismos tienen un menor costo comparado con los filtros activos.
- Presentan un buen comportamiento energético (pocas pérdidas), excepto en los filtros pasa banda u otros filtros complejos que incluyen resistencias.
- No requieren de un mantenimiento especial.

Los filtros activos son muy flexibles y sus características principales son:

- Dentro de ciertos límites, se pueden adaptar a las frecuencias que deben ser filtradas.
- Presentan un mayor costo frente a los filtros pasivos.
- Requiere de un mantenimiento especial.
- Los filtro de gran tamaño y respuesta rápida son de difícil construcción.

### **5.3. SELECCIÓN DE LA FRECUENCIA DE SINTONÍA DEL FILTRO**

Para la frecuencia de sintonía del filtro pasivo, cuyo criterio utilizado como primera aproximación es la armónica de mayor magnitud que se presenta en el lugar donde se instalará el filtro, para este caso el barraje de baja tensión a 460 V de la subestación de la Planta industrial.

Para conocer la armónica de mayor magnitud, mediante la opción Four al graficar en el Plot XY del ATPDraw la forma de onda de voltaje en el barraje principal a 460 V.

En las Figuras 40 (Anexo M) y 41 (Anexo N) se muestra la magnitud de armónicos en el barraje principal a 460 V de la subestación en por unidad (p.u) del voltaje nominal, sin banco de compensación y con banco de compensación respectivamente.

De dichas figuras se observa que la frecuencia que presenta la magnitud más alta de contenido armónico de tensión es la de orden 5 (300 Hz), ésta sería la frecuencia inicial de sintonización del filtro.

De acuerdo con la norma IEEE Std 1531 el filtro debe sintonizarse a una frecuencia cuyo valor esté entre un 3% y un 15% por debajo de la frecuencia inicial de sintonización. Para este caso, se ha escogido un valor del 6% menor, lo cual corresponde a la frecuencia de 282 Hz.

Teniendo claro lo anterior, se procede a calcular la impedancia efectiva del banco de capacitores mediante la siguiente expresión:

$$X_{eff} = \frac{V_{LL}^2}{Q_c}$$

$$X_{eff} = \frac{460^2}{250 \text{ kVAR}}$$

$$X_{eff} = \frac{460^2}{250 \text{ kVAR}} = 0,85 \Omega$$

La reactancia capacitiva del filtro a la frecuencia fundamental puede ser calculada por medio de la ecuación:

$$X_c = \left( \frac{h^2}{(h^2 - 1)} \right) * X_{eff}$$

Donde:

h: Corresponde a la frecuencia de sintonización del filtro (282 Hz) 4,7 de la frecuencia fundamental

$X_{eff}$ : Impedancia efectiva del banco de capacitores

$$X_c = \left( \frac{4,7^2}{(4,7^2 - 1)} \right) * 0,85 = 0,89 \Omega$$

$$C = \frac{1}{w * X_c} = \frac{1}{377 * 0,89} = 2980,4 \mu F$$

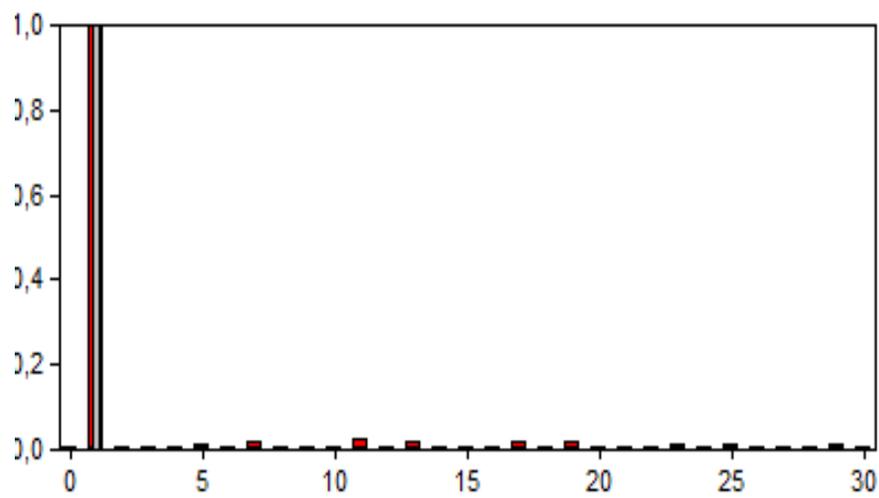
$$X_L = \frac{X_c}{h^2}$$

$$X_L = \frac{0,89}{4,7^2} = 0,04 \Omega$$

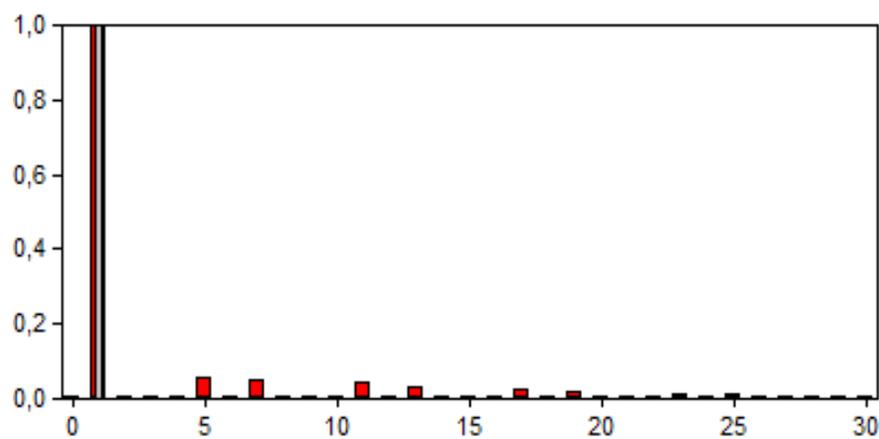
$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{0,04 \Omega}{377} = 106,1 \mu H$$

#### 5.4. VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL FILTRO

En las Figuras 20 y 21 se representan los espectros armónicos de voltaje y corriente respectivamente, en el barraje principal a 460 V de la subestación.



**Figura 20. Espectro armónico de voltaje en el barraje principal de la subestación a 460 V con filtro**

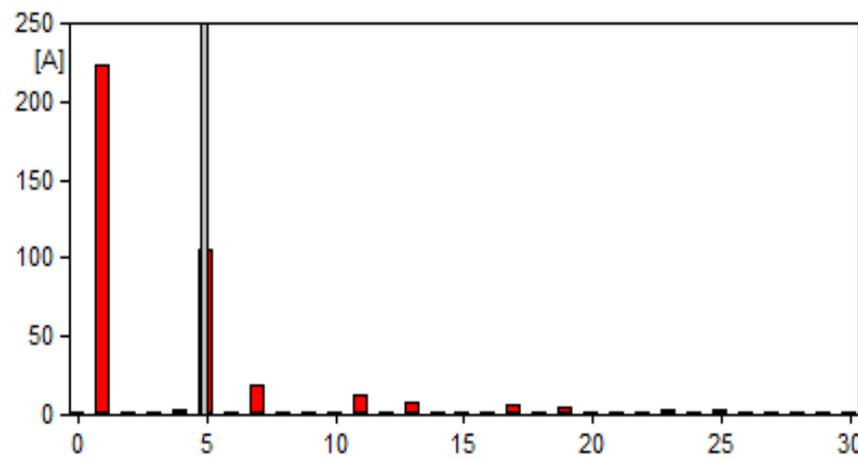


**Figura 21. Espectro armónico de corriente en el barraje principal de la subestación a 460 V con filtro**

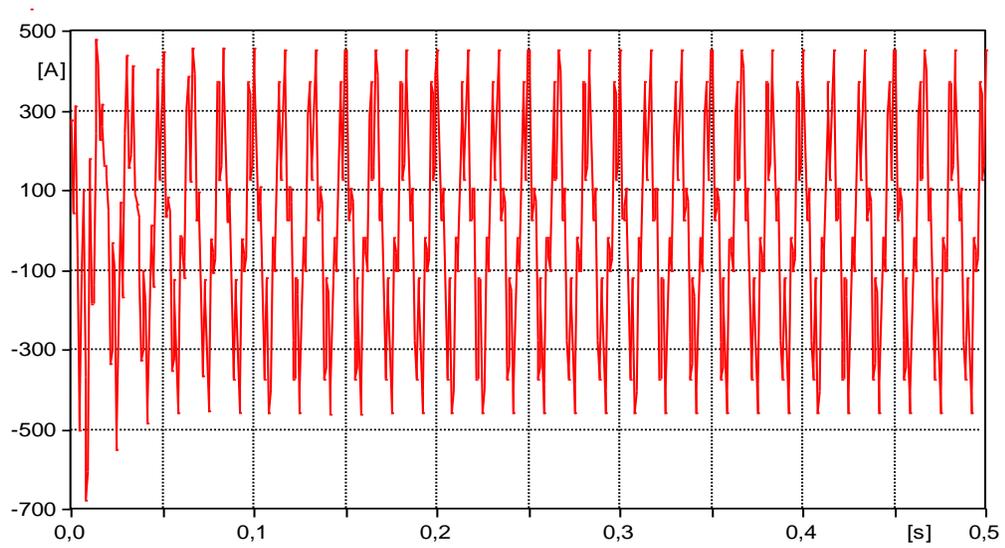
De las figuras anteriores puede notarse una reducción de las armónicas 5ta y 7ma respecto al caso inicial más crítico, el cual corresponde a la condición donde se tiene conectado a la subestación de 460 V el banco de compensación de 250kVAR sin filtro de armónicos, como se aprecia en la figura 19.

La distorsión de tensión de armónicos de orden 5 en el barraje principal de la subestación a 460 V con el filtro son del orden de 1,21%, menores a los obtenidos en el caso sin filtro cuyo valor fue de 4,98%, o el caso más crítico cuando se tiene conectada la compensación, la cual amplifica los armónicos de tensión de orden 5 hasta un valor de 35%.

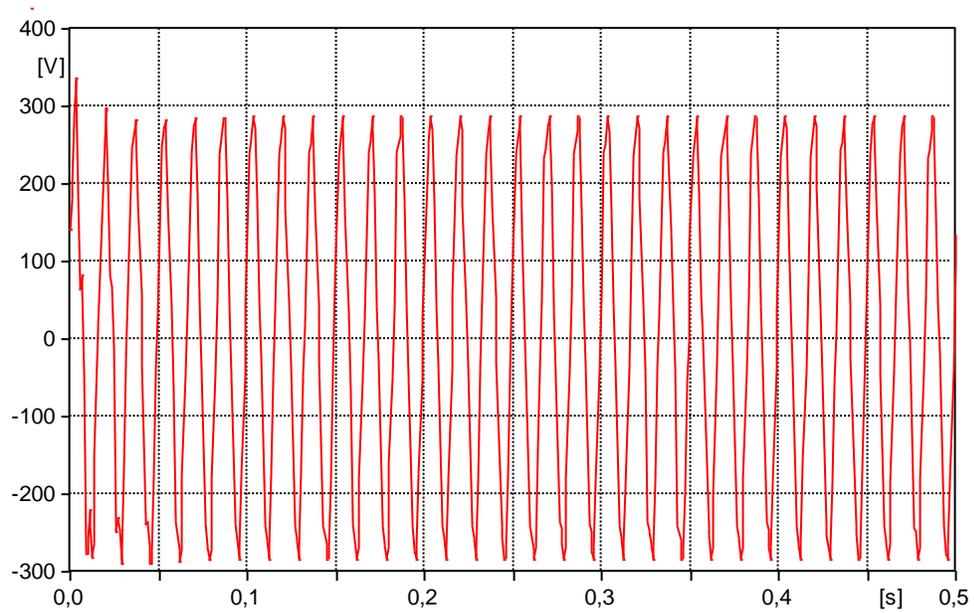
En la Figura 22 se puede observar el espectro de armónicos de corriente por el banco de capacitores con filtro y en las Figuras 23 y 24 las formas de onda de corriente y voltaje en el banco de condensadores cuando el filtro está operando.



**Figura 22. Espectro armónico de corriente por el banco de capacitores con filtro**



**Figura 23. Forma de onda de corriente rms en el banco de condensadores con filtro**



**Figura 24. Forma de onda de voltaje rms fase- tierra en el banco de condensadores con filtro**

## 6. RESULTADOS

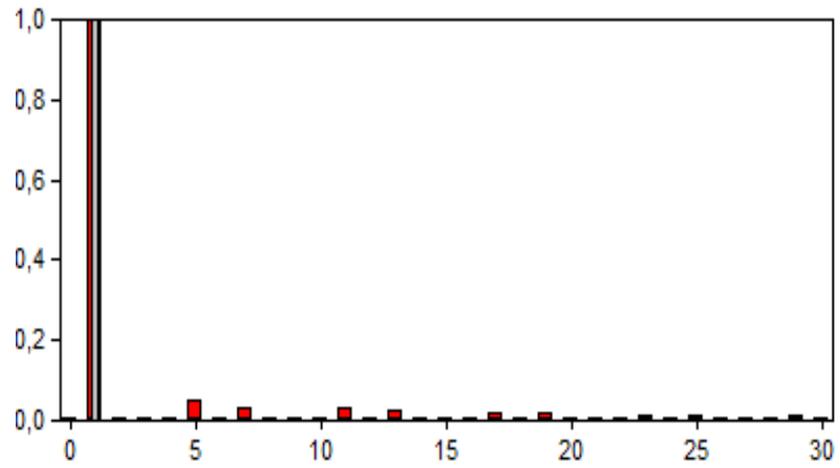
Con base en el capítulo anterior se presenta el comparativo de resultados obtenidos, donde se evidencia como el contenido de armónicos se ve amplificado al entrar en funcionamiento el banco de compensación de potencia reactiva.

El incremento de armónicos ocasiona una disminución en la impedancia de los capacitores por lo tanto hay una circulación de corriente importante por el banco de compensación. Por otra parte, la presencia de inductancia en algún punto de la instalación tiene el riesgo de que se produzcan resonancias en los condensadores, lo que puede aumentar la amplitud de los armónicos presentes en ellos.

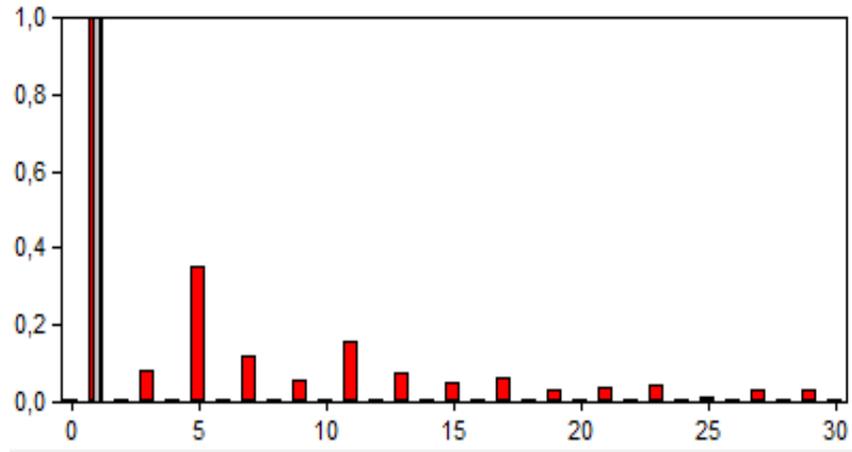
El fenómeno de resonancia puede ocasionar la perforación del aislamiento de los capacitores, provocando daños severos. Esta perforación puede ocurrir por picos de voltaje o corriente al presentarse variación de la carga, en la práctica no se recomienda conectar condensadores en instalaciones que tengan una tasa de distorsión armónica superior al 8%.

En las figuras 20 y 21 se puede observar el espectro de armónicos en la señal de corriente y de voltaje en la barra de 460V al estar operando el filtro de armónicos. Estos filtros aparte de ser utilizados para descontaminar el contenido de armónicos al interior de la industria también ayuda que estos ruidos entren al sistema de distribución del operador de red.

El comportamiento del filtro es ser sensitivos a la impedancia del sistema para el que fue diseñado. Esta impedancia puede cambiar a lo largo del tiempo, en la medida que la carga altera su comportamiento de volts/var, siendo difícil estimar su exactitud si no se tienen mediciones.



**Figura 25. Espectro armónico de tensión sin banco de compensación**



**Figura 26. Espectro armónico de tensión con banco de compensación**

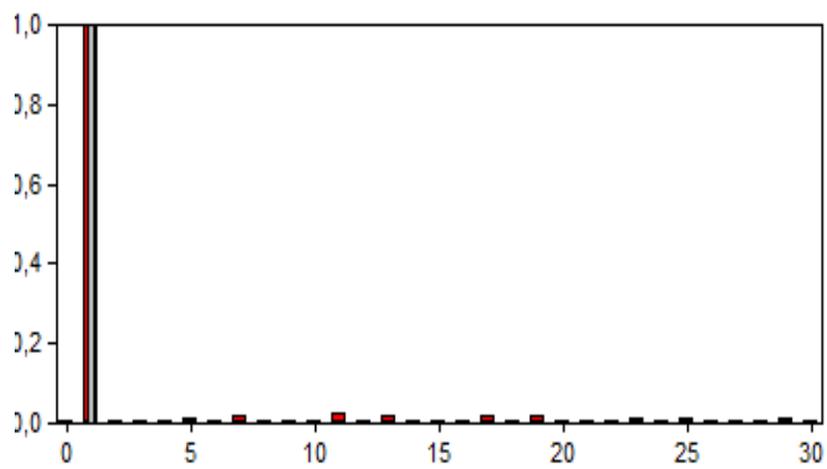


Figura 27. Espectro armónico de voltaje en barra 460V con filtro

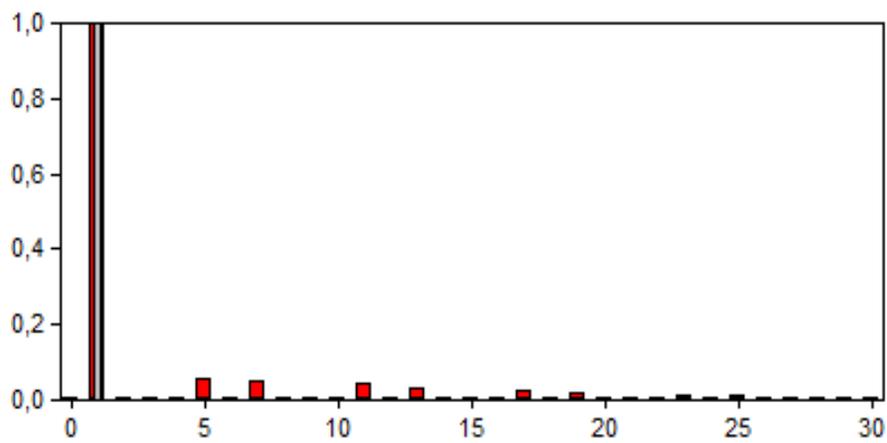


Figura 28. Espectro armónico de corriente en barra 460V con filtro

## **7. CONCLUSIONES**

Luego de repasar en este trabajo las implicaciones y consecuencias que arrojan los fenómenos involucrados en la calidad de la energía se observa la importancia de un estudio de este tipo.

En la fase de diseño de los sistemas industriales se acostumbra solo a corregir el factor de potencia a través de bancos de compensación de potencia reactiva por el temor de la penalización económica que puede ser impuesta por el operador de red, más no se analizan las repercusiones técnicas que se pueden presentar en los dispositivos y equipos que integran la instalación. Estas repercusiones pueden ser aún más importantes que las penalizaciones que impone el operador de red ya que la salida de un sistema, el envejecimiento prematuro de equipos, las altas corrientes homopolares que viajan por los neutros, entre otras, causan pérdidas materiales y económicas que pueden llegar a ser más representativas que el consumo excesivo de potencia reactiva.

Con motivo en lo citado anteriormente y que es el objetivo principal del presente documento cobra gran importancia el diseño e implementación de filtros pasivos de armónicos con los cuales se logra mitigar considerablemente los fenómenos de calidad de potencia, dando como resultado confiabilidad, eficiencia, estabilidad y durabilidad a la instalación aparte de incidir directamente en ahorros energéticos.

## **8. RECOMENDACIONES**

Los sistemas industriales típicamente presentan incremento en sus cargas o también se da el caso de la evolución tecnológica de los dispositivos de control, arranque de motores o variación de velocidad, por citar algunos. En estos casos se recomienda tener vigilancia y control ya que los filtros pasivos se sintonizan en el orden de las frecuencias armónicas a ser eliminadas por lo tanto se salen de su sintonía bajo estas circunstancias puesto que no son dinámicos con la carga sino que se diseñan con una carga o demanda esperada buscando la mitigación de las perturbaciones.

Los filtros pasivos se recomiendan en aquellas instalaciones donde la carga instalada vaya permanecer sin alteraciones durante un tiempo considerable y donde previamente se haya hecho un análisis con la viabilidad técnica y económica para su montaje.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre, I. (2015). *Transmisión eléctrica. Armónicos en sistemas de distribución eléctrica*. Recuperado de <https://transmisionelectrica.wordpress.com/2015/07/10/armonicos-en-sistemas-de-distribucion-electrica/>
- Arcila, J. D. (s.f.). *Armónicos en sistemas eléctricos*. Recuperado de [http://ingenieros.es/files/proyectos/Armonicos\\_en\\_sistemas\\_electricos.pdf](http://ingenieros.es/files/proyectos/Armonicos_en_sistemas_electricos.pdf)
- Congreso de la República. (1994). *Por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética*. Bogotá: Diario Oficial No. 41.434 del 12 de julio.
- Enríquez H., G. (2002). *El ABC de la calidad de la energía eléctrica*. México: Limusa.
- Sánchez P., J., Caicedo D., G. y Castro A., F. (2008). Evaluación de medidores de calidad de potencia eléctrica. *Energía y Computación*, 16(1), 33-41.
- Saucedo M., D. y Taxis V., J. (2008). *Factores que afectan la calidad de la energía y su solución*. México: Instituto Politécnico Nacional.
- Norma Técnica Colombiana NTC-5000, "Calidad de la Potencia Eléctrica (CPE), Definiciones y Términos Fundamentales"
- Norma Técnica Colombiana NTC-5001, "Calidad de la Potencia Eléctrica" (2008)
- IEEE 519-2014, "Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems"
- IEEE 1159-2009, "Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality"

IEEE 1100-2005, "Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment"

IEEE 1531-2003, "Guide for Application and Specification of Harmonic Filters"

IEEE C57.100-2011, "Standard Test Procedure for Thermal Evaluation of Insulation Systems for Liquid-Immersed Distribution and Power Transformers"

## 10. ANEXOS

### Anexo A. Modelo utilizado en ATP para la modelación de la fuente

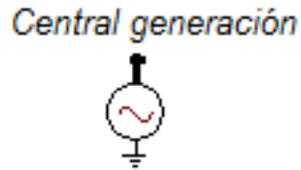


Figura 29. Modelo utilizado en ATP para la modelación de la fuente

### Anexo B. Modelo utilizado en ATP para la modelación del transformador elevador

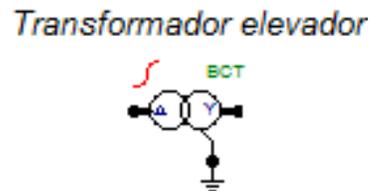


Figura 30. Modelo utilizado en ATP para la modelación del transformador elevador

### Anexo C. Modelo utilizado en ATP para la modelación de la impedancia de red

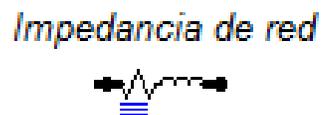


Figura 31. Modelo utilizado en ATP para la modelación de la impedancia de red

### Anexo D. Modelo utilizado en ATP para la modelación del transformador reductor

*Subestación Planta industrial*

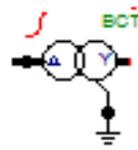


Figura 32. Modelo utilizado en ATP para la modelación del transformador reductor

Anexo E. Modelo utilizado en ATP para la modelación de los medidores de voltaje

*Medidor de voltaje respecto a tierra*

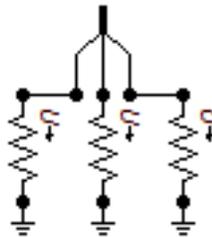


Figura 33. Modelo utilizado en ATP para la modelación de los medidores de voltaje

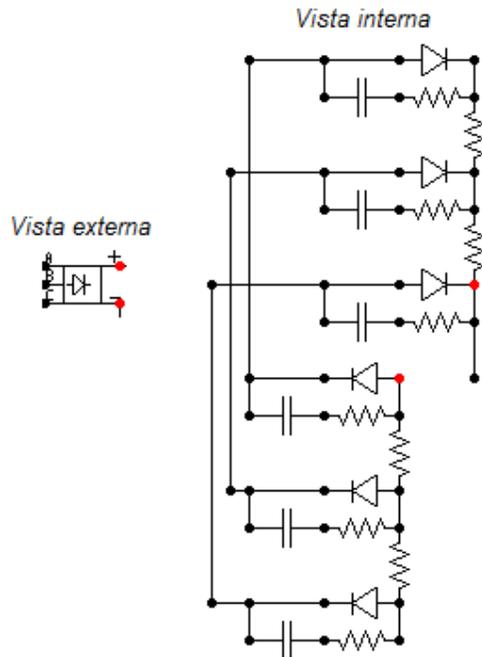
Anexo F. Modelo utilizado en ATP para la modelación de las blindobarras

*Blindobarras para baja tensión 460 V*



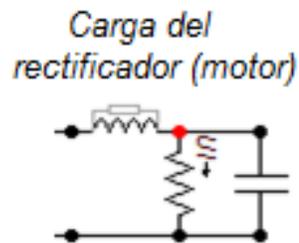
Figura 34. Modelo utilizado en ATP para la modelación de las blindobarras

**Anexo G. Modelo utilizado en ATP para la modelación del rectificador de 6 pulsos**



**Figura 35. Modelo utilizado en ATP para la modelación del rectificador de 6 pulsos**

**Anexo H. Modelo utilizado en ATP para la modelación de la carga del rectificador**



**Figura 36. Modelo utilizado en ATP para la modelación de la carga del rectificador**

Anexo I. Modelo utilizado en ATP para la modelación de acometidas

*Acometida a otras cargas*



Figura 37. Modelo utilizado en ATP para la modelación de acometidas

Anexo J. Modelo utilizado en ATP para la modelación del transformador de aislamiento

*Transformador de aislamiento*

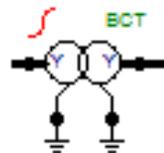


Figura 38. Modelo utilizado en ATP para la modelación del transformador de aislamiento

Anexo K. Modelo utilizado en ATP para la modelación de las cargas restantes

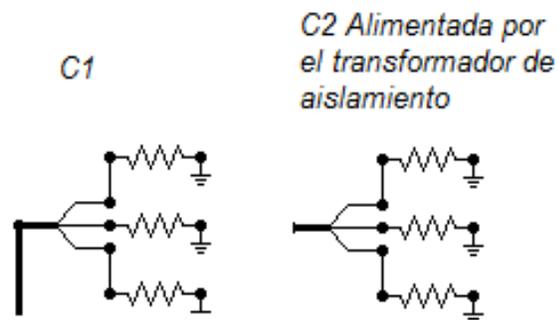
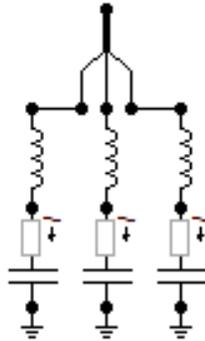


Figura 39. Modelo utilizado en ATP para la modelación de las cargas restantes

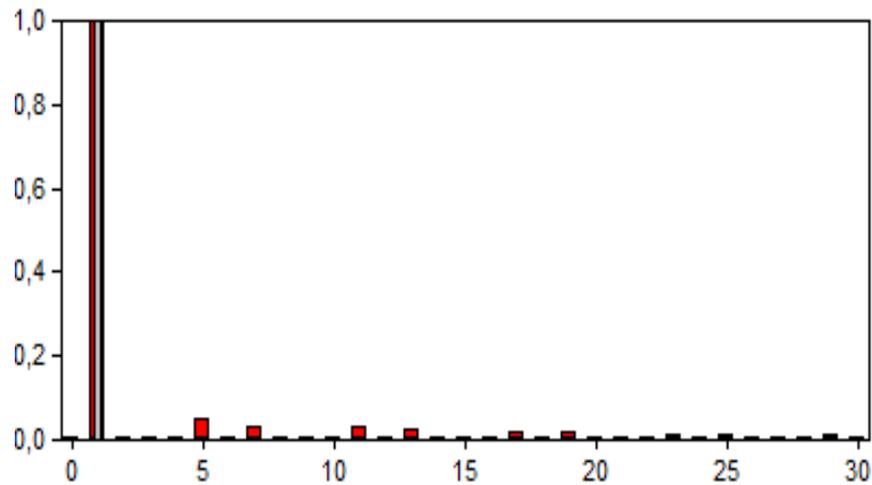
**Anexo L. Modelo utilizado en ATP para la modelación del filtro armónico**

*Filtro de armónicos*



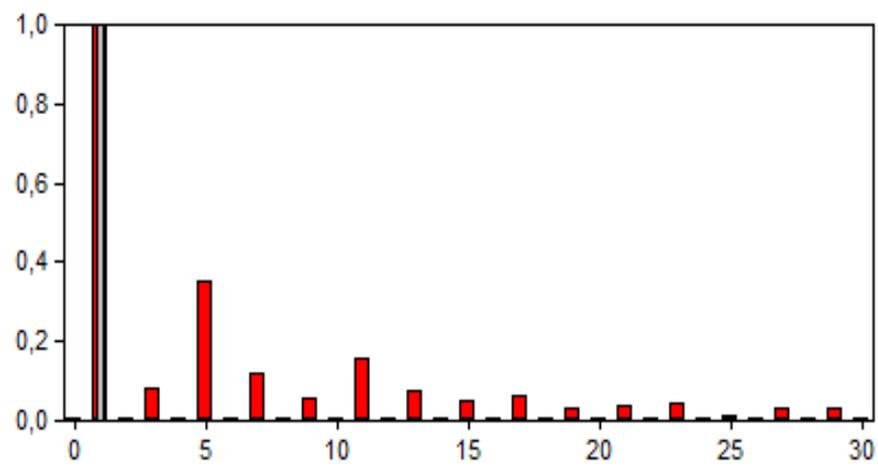
**Figura 40. Modelo utilizado en ATP para la modelación del filtro armónico**

**Anexo M. Espectro armónico de voltaje en el barraje principal de la subestación a 460 V sin banco de compensación**



**Figura 41. Espectro armónico de voltaje en el barraje principal de la subestación a 460 V sin banco de compensación**

**Anexo N. Espectro armónico de voltaje en el barraje principal de la subestación a 460 V con banco de compensación de 250 kVAR**



**Figura 42. Espectro armónico de voltaje en el barraje principal de la subestación a 460 V con banco de compensación de 250 kVAR**