

**CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA Y APLICACIONES CON
ATP CON ÉNFASIS EN ARMÓNICOS**

JUAN CARLOS GARRIDO HOYOS
MIGUEL ANGEL ORTEGA BELTRÁN

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARTAGENA D.T. y C

2007

**CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA Y APLICACIONES CON
ATP CON ÉNFASIS EN ARMÓNICOS**

JUAN CARLOS GARRIDO HOYOS
MIGUEL ANGEL ORTEGA BELTRÁN

**Monografía presentada para optar al título de
Ingeniero electricista**

Director:
SALOMÓN ZARUR
Ingeniero electricista

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARTAGENA D.T. y C

2007

Cartagena de Indias D. T. y C., Agosto de 2007

Señores

COMITÉ CURRICULAR

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

La ciudad

Respetados señores:

Tengo el agrado de presentar a su consideración, estudio y aprobación la monografía titulada “**CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA Y APLICACIONES CON ATP CON ÉNFASIS EN ARMÓNICOS**”, desarrollado por los estudiantes JUAN CARLOS GARRIDO HOYOS y MIGUEL ÁNGEL ORTEGA BELTRÁN, lo presento formalmente a comité para su evaluación.

Atentamente,

SALOMÓN ZARUR

Ingeniero electricista

Cartagena de Indias D. T. y C., Agosto de 2007

Señores

COMITÉ CURRICULAR

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

La ciudad

Respetados señores:

Con toda atención nos dirigimos a ustedes, con el fin de presentar a su consideración, estudio y aprobación la monografía titulada **“CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA Y APLICACIONES CON ATP CON ÉNFASIS EN ARMÓNICOS”**, como requisito parcial para aprobar el Minor en Sistemas de Potencia.

Atentamente,

JUAN C. GARRIDO HOYOS
C.C. 73.180.784 Cartagena

MIGUEL A. ORTEGA BELTRÁN
C.C. 8.853.031 Cartagena

Cartagena de Indias D. T. y C., Agosto de 2007

AUTORIZACIÓN

Nosotros JUAN CARLOS GARRIDO HOYOS y MIGUEL ANGEL ORTEGA BELTRÁN, autorizamos a la Universidad Tecnológica de Bolívar para hacer uso del trabajo **“CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA Y APLICACIONES CON ATP CON ÉNFASIS EN ARMÓNICOS”**, y publicarlo en el catálogo online de la biblioteca.

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Cartagena de Indias D. T. y C. ____ de ____ de 200____

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Efecto de los armónicos en dispositivos eléctricos.	33
Tabla 2. Secuencia de armónicos.	38
Tabla 3. Orden y magnitud de cada armónico.	39
Tabla 4. Relación entre las secuencias y las armónicas.	44
Tabla 5. Límites de distorsión de voltaje.	66
Tabla 6. Límites de distorsión de corriente para sistemas de 120 V a 69 KV, (Máxima corriente de distorsión en % de I_L . Para armónicas impares).	66
Tabla 7. Límites de distorsión de corriente para sistemas de 69 001 V a 161 KV, (Máxima corriente de distorsión en % de I_L . Para armónicas impares).	67
Tabla 8. Límites de distorsión de corriente para sistemas mayores a 161 KV, (Máxima corriente de distorsión en % de I_L . Para armónicas impares).	67

LISTA FIGURAS

	pág.
Figura 1. Onda senoidal a la frecuencia fundamental (60Hz) y su segundo, tercero, cuarto y quinto armónico.	23
Figura 2. Flujo de corriente del tercer armónico en un transformador trifásico conexión Ye con neutro a tierra.	27
Figura 3. Espectro de línea de una onda.	40
Figura 4. Trayectoria de las armónicas en un sistema inductivo.	42
Figura 5. Efecto de los capacitores en las trayectorias de las armónicas.	42
Figura 6. Relación entre las armónicas y las componentes de secuencia.	45
Figura 7. Circulación de la tercera armónica por el neutro de transformadores.	46
Figura 8. Efectos en la variación de los tamaños de los condensadores.	51

Figura 9. Efecto de la variación de carga resistiva en la resonancia paralela.	51
Figura 10. Gráfico de ondas de tensión y corriente para cargas no lineales (distorsión armónica).	54
Figura 11. Filtro activo Shunt.	60
Figura 12. Filtros pasivos shunt.	60
Figura 13. Respuesta de un filtro de sintonización.	61
Figura 14. Respuesta de un filtro pasa altas.	62
Figura 15. Sistema industrial.	63
Figura 16. Sistema con filtro para la 5 ^a armónica.	64
Figura 17. Respuesta del sistema al ser utilizado el banco de capacitores como parte del filtro.	65
Figura 18. Sistema de distribución con carga lineal.	74
Figura 19. Sistema de distribución con carga no lineal.	75
Figura 20. Sistema de distribución con carga lineal, no lineal y con filtro.	77
Figura 21. Voltaje del lado de alta tensión del transformador sin carga no lineal.	79

Figura 22. Voltaje del lado de baja tensión del transformador sin carga no lineal.	79
Figura 23. Corriente del lado de baja tensión del transformador sin carga no lineal.	80
Figura 24. Voltaje en el nodo de prueba solo con carga lineal.	80
Figura 25. Voltaje con contenido de armónicos con carga no lineal.	81
Figura 26. Corriente con carga no lineal.	82
Figura 27. Voltaje en el nodo de prueba con filtro.	83
Figura 28. Corriente con carga no lineal y filtro.	84
Figura 29. Sistema sin banco de condensadores.	86
Figura 30. Tensión en la barra de 480 V.	86
Figura 31. Corriente en la barra de 480 V.	87
Figura 32. Sistema con banco de condensadores.	88
Figura 33. Tensión en la barra de 480 V con banco de condensadores.	88
Figura 34. Corriente en 480 V con banco de condensadores.	89

Figura 35. Barrido de frecuencia con banco de condensadores.	90
Figura 36. Sistema con filtro de armónica 2.5.	90
Figura 37. Tensión en la barra de 480 V con filtro.	91
Figura 38. Corriente en 480 V con filtro.	91
Figura 39. Barrido de frecuencia con filtro sintonizado en la armónica 2.5.	92

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo 1. Contenido armónico del voltaje en el nodo de prueba solo con carga lineal.	97
Anexo 2. Contenido armónico del voltaje con contenido de armónicos con carga no lineal.	98
Anexo 3. Contenido armónico de la corriente con carga no lineal.	99
Anexo 4. Contenido armónico del voltaje en el nodo de prueba con filtro.	100
Anexo 5. Contenido armónico de la corriente con carga no lineal y filtro.	101
Anexo 6. Contenido armónico de la corriente en la barra de 480 V.	102
Anexo 7. Contenido armónico de la corriente en 480 V con banco de condensadores.	103
Anexo 8. Contenido armónico de la corriente en 480 V con filtro.	104

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	16
OBJETIVO GENERAL	19
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1. CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA	20
2. ARMÓNICOS	22
2.1 ARMÓNICOS TRIPLES	26
2.2 ORIGEN DE LOS ARMÓNICOS	28
2.3 FUENTES DE ARMÓNICOS	30
2.4 EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS	31
2.4.1 Efectos de los armónicos en los motores	34
2.4.2 Efectos de los armónicos en los filtros pasivos	35
2.4.3 Efectos de los armónicos en los equipos electrónicos sensibles	35
2.4.4 Efectos de los armónicos en los transformadores	36
2.4.5 Efectos en los condensadores	37
2.5 SECUENCIA DE LOS ARMÓNICOS	37
2.6 ESPECTRO DE LÍNEA	38
2.7 ARMÓNICOS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS	40

2.8	TRAYECTORIA DE LOS ARMÓNICOS	41
2.9	FRECUENCIAS DE LOS ARMÓNICOS	46
2.10	CARACTERÍSTICA DE LA RESPUESTA DE IMPEDANCIA DEL SISTEMA	47
2.10.1	Impedancia del sistema	47
2.10.2	Impedancia del condensador	48
2.10.3	Resonancia paralela	49
2.10.4	Efectos de la resistencia y cargas resistivas	51
2.11	ARMÓNICA CERO	52
2.12	DISTORSIÓN ARMÓNICA	53
2.12.1	Valores de distorsión	54
2.13	MÉTODOS PARA ANALIZAR LOS ARMÓNICOS	56
2.14	ELIMINACIÓN DE ARMÓNICAS	58
2.14.1	Técnicas para la mitigación de armónicas	58
2.15	NORMAS INTERNACIONALES REFERENTES AL CONTROL DE ARMÓNICAS	65
3.	SIMULACIONES	68
3.1	SIMULACIÓN DE SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN EN ATP	68
3.2	SIMULACIÓN DE UNA PLANTA INDUSTRIAL	85
	CONCLUSIONES	93
	BIBLIOGRAFÍA	95
	ANEXOS	96

INTRODUCCIÓN

La calidad del servicio de la energía eléctrica (CEL) ha sido dividida en dos grandes partes: la primera, relacionada directamente con la continuidad del servicio, se ha denominado Calidad del Suministro de Energía Eléctrica (CSE); y la segunda, relacionada exclusivamente con la forma de onda de las señales responsables de la potencia (tensión y corriente), se ha denominado Calidad de la Potencia Eléctrica (CPE).

Los conceptos asociados a la calidad del suministro de energía eléctrica son la continuidad y la confiabilidad; las variables generalmente usadas para su evaluación son la cantidad de interrupciones y su duración; según lo anterior se han definido indicadores que facilitan su calificación, estos son el indicador de duración de las interrupciones y el indicador de frecuencia promedio de las interrupciones.

Asumiendo que una empresa prestadora del servicio de electricidad entrega un producto a un usuario, dicho producto es precisamente energía eléctrica, por unidad de tiempo constituye la potencia eléctrica; ahora bien, para que exista transferencia de potencia eléctrica, debe existir una diferencia de potencial entre los extremos del circuito, y una circulación de cargas eléctricas debida a esta diferencia de potencial, sin alguna de estas condiciones no puede existir transferencia de potencia; el servicio de electricidad consiste entonces en que las empresas le “ponen” al usuario una diferencia de potencial ó tensión, y este último hace circular la corriente al conectar su carga al sistema, dándose una transferencia de potencia desde la fuente (generadores de las empresas) hasta la carga del usuario, que la utiliza finalmente para

realizar un trabajo (iluminación, movimiento, acondicionamiento de temperatura, etc.); puede decirse que la tensión está impuesta por la empresa prestadora del servicio, pero la corriente la determina el usuario.

Debido a la importancia que representa la energía eléctrica en nuestra vida, la cual es usada en la iluminación, en la operación de diversos equipos, video, aire acondicionado y sistemas de cómputo, así como en procesos industriales como de servicio, es importante contar con una buena calidad de energía, ésta además se ha empleado en la fabricación de la mayoría de las cosas que utilizamos; por consiguiente los disturbios y variaciones de voltaje que se producen en la red eléctrica afectan directamente al usuario.

Por dar un ejemplo, las caídas de voltaje por sólo cinco milisegundos son capaces de hacer que una computadora pierda su información o causar errores, es por esto que el incremento en el equipo de procesamiento de datos (computadoras) ha marcado al problema de la calidad de la energía como un problema muy serio.

Los disturbios no sólo afectan al equipo de los consumidores, sino que también perjudica la operación de la red de suministro. Los disturbios mencionados causan problemas como los que se citan a continuación:

- Operación incorrecta de controles remotos.
- Sobrecalentamiento de cables.
- Incremento de las pérdidas reactivas de los transformadores y motores.

- Errores en medición.
- Operación incorrecta de sistemas de protección, entre otros.

Debido a estos problemas, algún componente de cualquier equipo puede sufrir un daño considerable al presentarse algún transitorio que rebase su nivel de aislamiento; otro ejemplo, un rectificador puede llegar a fallar si es expuesto a un voltaje transitorio arriba de cierto nivel.

A continuación se muestran algunos tipos de consumidores que requieren forzosamente equipos de acondicionamiento para mantener un buen nivel de calidad de energía eléctrica:

- Sistemas de información que utilizan equipo de cómputo.
- Departamentos de paramédicos y bomberos.
- Empresas públicas (Gas, agua, energía eléctrica).
- Aeropuertos.
- Instituciones financieras.
- Departamento de policía, entidades gubernamentales, etc.

Siendo los anteriores motivos suficientes para que al estudio de la calidad de la potencia eléctrica y todos aquellos fenómenos que la afectan directamente se les pongan la atención que se merecen, realizamos este texto con lo relativo a los mismos.

OBJETIVO GENERAL

Estudiar la calidad de la energía eléctrica, enfocado principalmente en los armónicos, ya que estos son uno de los fenómenos que más la afectan, conocer los fundamentos de éstos en los sistemas eléctricos, explicar su generación y transmisión, así como el comportamiento de los equipos tanto generadores como consumidores de armónicos y su problemática, simular sistemas de distribución industriales y domésticos con el ATP para conocer el comportamiento con carga lineales, no lineales y filtros.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir uno de los principales fenómenos que degrada la Calidad de la energía eléctrica como son los armónicos, sus orígenes, las consecuencias en los equipos y las principales soluciones.
- Encontrar caminos efectivos para corregir los disturbios y variaciones de voltaje en el lado del usuario, y proponer soluciones para corregir las fallas que se presentan en el lado del sistema de las compañías suministradoras de energía eléctrica, para lograr con ello un suministro de energía eléctrica con calidad.
- Analizar resultados que se pueden obtener con el ATP a partir de un problema planteado.

1. CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA

Formalmente, la CPE puede definirse de la manera que lo hace el instituto EPRI (Electric Power Research Institute) de los Estados Unidos: "Cualquier problema de potencia manifestado en la desviación de la tensión, de la corriente o de la frecuencia, de sus valores ideales que ocasione falla o mala operación del equipo de un usuario"; esta definición puede complementarse con lo que dice la recomendación IEEE 519 de 1992: "el término se refiere a una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente eléctricas, en un tiempo dado y en una ubicación dada en el sistema de potencia"; en este comentario se señala el carácter fenomenológico de las características de la potencia, que es la base de la estructura que se planteará.

Potencia es mucho más que la derivada de la energía con respecto al tiempo, la medición y análisis de la función de la potencia son de gran importancia tanto para el proveedor de energía eléctrica como para el usuario; el proveedor de electricidad entiende esto como la carga de penalidades para altas demandas, pésimos factores de potencia y algunas veces distorsión en la forma de onda, los usuarios eléctricos por su parte entienden como el suministro de energía dentro de los parámetros contractuales; es decir, amplitud y frecuencia determinada con un porcentaje de error que no afecte sus instalaciones, que cubra por entero sus requerimientos en cuanto a cantidad y por eso comienzan a recobrase de esto con la incorporación de procesos de control estadísticos y sistemas de producción basados en la calidad.

En lo fundamental, el voltaje ideal es una senoide de amplitud y frecuencia constante; sin embargo en la práctica esta situación no existe, necesitamos de la capacidad de medir y calcular, predecir y comparar la imperfección de varios sistemas y establecer límites aceptables en varias aplicaciones.

El uso creciente de aparatos electrónicos está creando un deterioro de la calidad de la energía eléctrica; los equipos informáticos, impresoras, equipos de soldaduras, los variadores de velocidad, o las instalaciones fotovoltaicas y los aerogeneradores, entre otros, son ejemplos de dispositivos electrónicos que generan los denominados “armónicos de intensidad”, que se propagan por todo el sistema de distribución eléctrica, estos armónicos deforman la onda de la tensión eléctrica, lo que conlleva a una falta de calidad de la potencia; de esta manera, se contribuye al deterioro o a que se produzcan fallos en el funcionamiento de los aparatos que dependen de la energía eléctrica.

En sistemas eléctricos de distribución de potencia, tradicionalmente se esperaba que la forma de onda del voltaje suministrado por una empresa distribuidora fuera sinusoidal y sobre esa base está diseñado y manufacturado la mayoría de elementos del sistema; el crecimiento continuo de los sistemas eléctricos de distribución de potencia y la inclusión dentro de ellos de un mayor número de elementos no lineales, han contribuido al incremento de la presencia de formas de onda no sinusoidales en el suministro de la energía eléctrica.

Los armónicos esencialmente introducen una componente de pérdidas y mal funcionamiento de equipos, por lo que su estudio principalmente en lo relacionado al tema de calidad de la potencia eléctrica es de alta importancia.

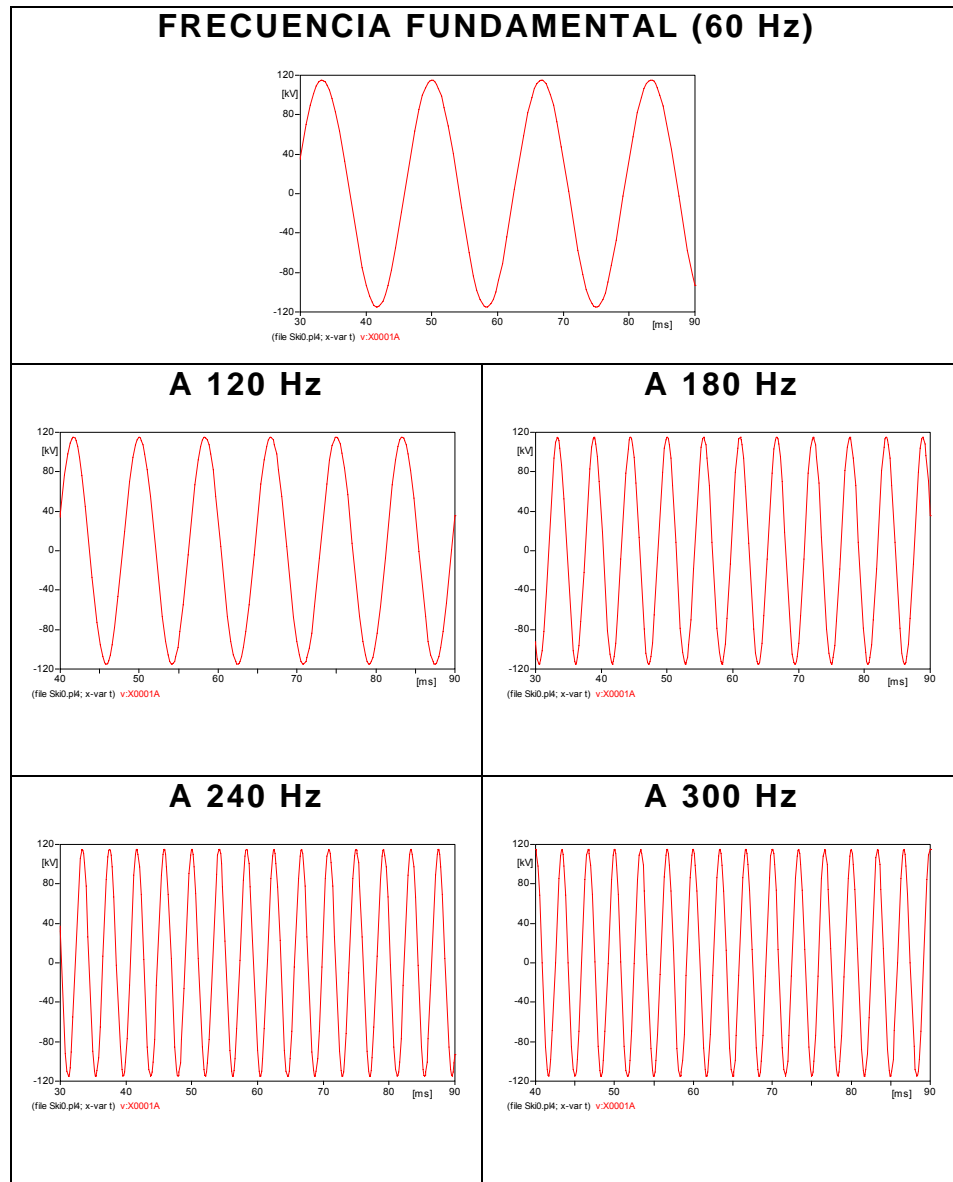
2. ARMÓNICOS

Teóricamente la onda de voltaje suministrada a un usuario y la corriente resultante, son ondas senoidales perfectas; sin embargo, esto no es así, ya que estas ondas se distorsionan por las características de las cargas y de los transformadores; en el caso del tercer armónico generado en los transformadores, las conexiones delta-ye, mitigan el efecto a lo largo del sistema por ser corrientes de secuencia cero.

Una carga no lineal a la cual se aplica un voltaje que puede tener un bajo contenido de armónicos, genera una corriente distorsionada, la cual ocasiona voltajes distorsionados a lo largo del sistema conteniendo frecuencia de componentes que pueden ser armónicos o múltiplos de la frecuencia fundamental, o frecuencias interarmónicas, es decir, frecuencias que no son múltiplos de la fundamental.

En un sistema de potencia eléctrica, los aparatos y equipos que se conectan a el, tanto por la propia empresa como por los clientes, están diseñados para operar a 50 ó 60 ciclos, con una tensión y corriente sinusoidal; por diferentes razones, se puede presentar un flujo eléctrico a otras frecuencias de 50 ó 60 ciclos sobre algunas partes del sistema de potencia o dentro de la instalación de un usuario; la forma de onda existente esta compuesta por un número de ondas sinusoidales de diferentes frecuencias, incluyendo una referida a la frecuencia fundamental. En la figura 1 se observa una onda sinusoidal a la frecuencia fundamental (60 Hz) más varias ondas de frecuencia distintas.

Figura 1. Onda senoidal a la frecuencia fundamental (60 Hz) y su segundo, tercero, cuarto y quinto armónico.



Los armónicos se definen habitualmente con los dos datos más importantes que les caracterizan, 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 fundamental (60 Hz). Así, un armónico de tercer orden tiene una frecuencia 3 veces superior a la fundamental, es decir, $3 * 60 \text{ Hz} = 180 \text{ Hz}$.

El orden del armónico, también referido como el rango del armónico, es la razón entre la frecuencia de un armónico f_n y la frecuencia fundamental (60 Hz).

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad (\text{Por principio, la fundamental } f_1 \text{ tiene rango } 1).$$

Cualquier fenómeno periódico puede ser representado por una serie de Fourier:

$$y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n \sqrt{2} \sin (n\omega t - \delta_n)$$

Donde:

Y_0 = Es la componente de corriente directa, la cual es generalmente cero en sistemas eléctricos de distribución,

Y_n = Valor rms de la componente (n^{th}) armónica,

φ_n = Angulo de fase de la componente (n^{th}) armónica cuando $t = 0$.

La cantidad de armónicos es generalmente expresada en términos de su valor rms dado que el efecto calorífico depende de este valor de la onda distorsionada.

Para una onda sinusoidal el valor eficaz es el máximo valor dividido por raíz de 2; para una onda distorsionada bajo condiciones de estado estable, la energía disipada por el efecto Joule es la suma de las energías disipadas por cada una de las componentes armónicas:

$$RI^2 t = RI_1^2 t + RI_2^2 t + \dots + RI_n^2 t$$

Donde:

$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2$$

O también:

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^{n-\infty} I_n^2}$$

(Suponiendo que la resistencia se tome como una constante).

Este cálculo permite intuir uno de los principales efectos de los armónicos que es el aumento de la intensidad eficaz que atraviesa una instalación debido a las componentes armónicas que lleva asociada una onda distorsionada.

El por ciento de armónico y la distorsión total armónica cuantifican la disturbancia armónica que puede existir en una red de suministro eléctrico. La tasa de armónicos o por ciento de armónicos, expresa la magnitud de cada armónico con respecto a la fundamental.

La distorsión total armónica (THD), cuantifica el efecto térmico de todos los armónicos. La CIGRE propone la siguiente expresión para el cálculo de esta magnitud:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n-\infty} Y_n^2}}{Y_1}$$

Donde:

Y_n : Magnitud del armónico n.

Y_1 : Magnitud de la onda de frecuencia fundamental.

2.1 ARMÓNICOS TRIPLES

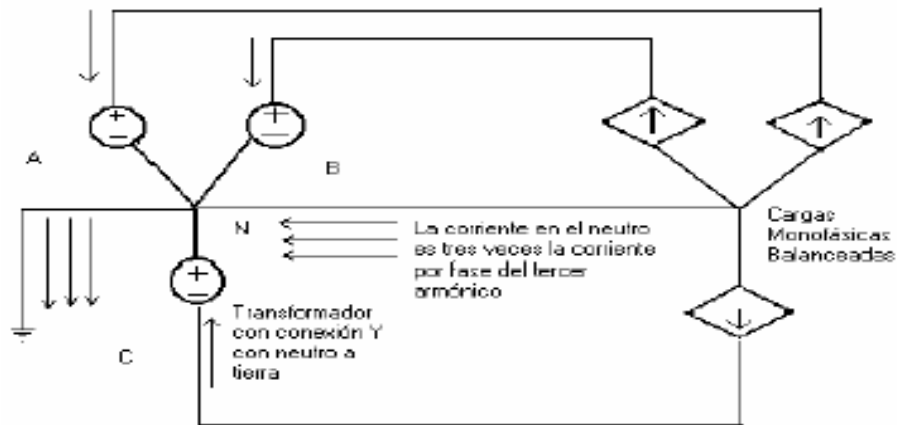
Son múltiplos enteros e impares del tercer armónico (3, 9, 15, 21,...) y son de secuencia cero, éstos son producidos por cargas monofásicas la cuales están alimentadas por conexiones Ye con neutro a tierra; los armónicos triples ocasionan problemas a los sistemas (transformador y carga) que tienen esta conexión, debido a que circula un flujo de corriente por el neutro. El problema más común ocasionado por los armónicos triples, es la sobrecarga por el neutro e interferencia telefónica, también se sabe que ciertos equipos operan muy mal, por que el voltaje línea-neutro es terriblemente distorsionado produciendo una caída de voltaje por el neutro.

Las corrientes se suman en el punto del neutro, la resultante de la componente fundamental es cero, pero en cambio la componente del tercer armónico es tres veces la corriente armónica de fase del tercer armónico, ya que estas se encuentran en fase.

La conexión de los devanados de un transformador es de gran consideración debido a que en él circulan flujos de corriente armónica de las triples causadas por las cargas no-lineales.

En el caso de la conexión con neutro a tierra, en donde la corriente entra por el lado de Y proveniente de cargas no-lineales, una corriente circulará por el neutro del transformador.

Figura 2. Flujo de corriente del tercer armónico en un transformador trifásico conexión Ye con neutro a tierra.



En la figura 2 se ilustra el flujo de corriente del tercer armónico en un transformador trifásico con conexión Ye con neutro a tierra. Cuando la conexión es Y-Y ambas a tierra, se origina un balance del flujo de las triples en ambos lados del transformador (baja-alta) permitiendo la circulación de ellas.

Algunas deducciones referentes al caso son las siguientes:

- En transformadores con conexión a neutro, es susceptible a sobrecalentamiento cuando estos alimentan a cargas no-lineales monofásicas, por presentar alto contenido del tercer armónico.
- El flujo de corriente de los armónicos triples puede ser interrumpido con la conexión apropiada de un transformador de aislamiento.
- Eliminando la conexión del neutro en uno o ambos lados del transformador (conexión Y-Y), permite bloquear el flujo de corriente armónica.

➤ Se considera que la conexión Y-Y con un solo punto conectado al neutro puede ser más susceptible a conducir las triplas armónicas.

2.2 ORIGEN DE LOS ARMÓNICOS

En general, los armónicos son producidos por cargas no lineales, lo cual significa que su impedancia no es constante (está en función de la tensión), estas cargas no lineales a pesar de ser alimentadas con una tensión sinusoidal adsorben una intensidad no sinusoidal, pudiendo estar la corriente desfasada un ángulo Φ respecto a la tensión, para simplificar se considera que las cargas no lineales se comportan como fuentes de intensidad que inyectan armónicos en la red.

Las cargas armónicas no lineales más comunes son las que se encuentran en los receptores alimentados por electrónica de potencia tales como: variadores de velocidad, rectificadores, convertidores, etc., otro tipo de cargas tales como: reactancias saturables, equipos de soldadura, hornos de arco, etc., también inyectan armónicos, el resto de las cargas tienen un comportamiento lineal y no generan armónicos.

Existen dos categorías generadoras de armónicos: la primera es simplemente las cargas no lineales en las que la corriente que fluye por ellas no es proporcional a la tensión; transformadores, reguladores y otros equipos conectados al sistema pueden presentar un comportamiento de carga no lineal y ciertos tipos de bancos de transformadores multifase conectados en estrella-estrella con cargas desbalanceadas o con problemas en su puesta a tierra; diodos, elementos semiconductores y transformadores que se saturan son ejemplos de equipos generadores de armónicos,

estos elementos se encuentran en muchos aparatos eléctricos modernos, invariablemente esta categoría de elementos generadores de armónicos, lo harán siempre que estén energizados con una tensión alterna; estas son las fuentes originales de armónicos que se generan sobre el sistema de potencia.

El segundo tipo de elementos que pueden generar armónicos son aquellos que tienen una impedancia dependiente de la frecuencia; los usuarios residenciales, comerciales e industriales, tienen una gran cantidad de equipos como hornos de microondas, computadoras, sistemas con control robótico, televisión, VCR, estéreos y otros equipos, todos estos equipos contribuyen con la generación de cantidades variables de armónicos, aún ventiladores eléctricos y simples motores de inducción trabajando sobrecargados pueden contribuir a la creación de armónicos; las salidas de armónicos de estos múltiples aparatos pueden sumarse y originar problemas en el sistema de potencia.

Los sistemas de iluminación del tipo lámparas de descarga o lámparas fluorescentes son generadores de armónicos de corriente, una tasa del 25% del tercer armónico es observada en ciertos casos, la tasa individual del tercer armónico puede incluso sobrepasar el 100% para ciertas lámparas fluocompactadas modernas, y por tanto hay que prestar una atención especial en el cálculo de la sección y la protección del neutro, ya que este conduce la suma de las corrientes de tercera armónica de las tres fases, por lo que puede ser sometido a peligrosos sobrecalentamientos si no es seleccionado adecuadamente.

Las máquinas rotativas producen armónicos de rango elevado y de amplitud normalmente despreciable; las pequeñas máquinas

sincrónicas son sin embargo, generadoras de tensiones del tercer armónico que pueden tener una incidencia sobre:

- El calentamiento permanente (aun sin defecto) de las resistencias de puesta a tierra del neutro de los alternadores.
- El funcionamiento de los relés amperimétricos de protección contra los defectos de aislamiento.

Los armónicos son atenuados de una manera normal a medida que la potencia eléctrica es adsorbida, en raros casos pueden contribuir a la potencia real que toma un motor y no presentan ningún efecto positivo, en general los armónicos producen calor a medida que circulan por los conductores y aparatos eléctricos; por otro lado cuando los armónicos se combinan con armónicos generados por diferentes fuentes, pueden propagarse a diferentes distancias.

2.3 FUENTES DE ARMÓNICOS

Al considerar los efectos de la distorsión armónica, la primera reacción es concentrar los esfuerzos en las fuentes individuales no lineales de gran potencia y, en particular, en los convertidores estáticos de las grandes industrias; sin embargo los componentes de generación, transporte y utilización de la potencia nunca son perfectamente lineales y pueden dar lugar a niveles de distorsión que no deben ignorarse.

La magnitud y cantidad de los armónicos producidos dependen del punto de operación del equipo.

Las fuentes armónicas se pueden generalizar de tres maneras:

- Dispositivo de arco eléctrico: se incluye hornos de arco y soldadores de arco, lámparas de descarga de arco (fluorescentes, mercurio – vapor, sodio – vapor, etc.) con balastos electrónicos.
- Convertidores de electrónica de potencia: monofásicos y trifásicos como convertidores de velocidad variable para motores (ASD), fuentes electrónicas, fuentes interrumpidas de potencia (UPS), convertidores de motores dc, cargas de baterías, balastos electrónicos y otras aplicaciones de rectificadores/inversores.
- Equipos saturables: transformadores, motores.

2.4 EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS

Los efectos de los armónicos en un sistema de potencia son agudos ya que ellos influyen en las pérdidas, en el mal funcionamiento y en el desempeño del sistema; a menos que los armónicos sean controlados a límites aceptables, los equipos de potencia, incluso los equipos electrónicos pueden dañarse resultando en paros y costos al sistema.

Los efectos causados por los armónicos son debido a la distorsión de corriente y voltaje; la corriente produce efectos de sobrecalentamiento e interferencia con el sistema de comunicación, mientras que los efectos de la distorsión de voltaje más común son: el de degradar el aislamiento y el de disminuir la vida útil del equipo. Se describe algunos de los efectos comunes de armónicos:

- Aumento de las pérdidas dentro de los equipos, cables, líneas, etc.
- Torque reducido y pulsativo en máquinas giratorias.
- Envejecimiento prematuro debido al aumento del esfuerzo del aislamiento del equipo.
- Aumento del ruido en equipos giratorios y estáticos.
- Mala operación de equipo sensible a la forma de onda.
- Amplificación sustancial de corrientes y voltajes debido a las resonancias.
- Interferencia en comunicaciones debido al acoplamiento inductivo entre los circuitos de potencia y comunicación.

Los armónicos pueden ocasionar también errores de disparo a los tiristores en equipos convertidores y en instalaciones SVC, inexactitudes en las mediciones, y falsos disparos en los dispositivos de protección; el desempeño de los equipos de los consumidores tales como controladores de velocidad de motores y fuentes de alimentación de computadoras, puede ser adversamente afectados por los armónicos, además, las corrientes armónicas que fluyen sobre las líneas de potencia pueden inducir ruido sobre líneas cercanas de comunicación.

La distorsión armónica de voltaje puede ocasionar esfuerzos en el aislamiento de equipos, particularmente en condensadores; cuando los armónicos deforman el voltaje en el banco de condensadores, el voltaje pico puede ser lo suficientemente alto

como para ocasionar una descarga parcial o efecto corona, dentro del dieléctrico del condensador, esto puede producir eventualmente un cortocircuito entre bornes y carcasa y hacer fallar al condensador. Las corrientes armónicas altas también ocasionan el disparo de fusibles en bancos de condensadores, esto ocasiona la pérdida de una fuente de alimentación reactiva al sistema, lo que puede ocasionar otros problemas.

Tabla 1. Efecto de los armónicos en dispositivos eléctricos.

EFFECTOS DE LOS ARMÓNICOS	CAUSAS	CONSECUENCIAS
Sobre los conductores	*Las intensidades armónicas provocan el aumento de la I_{RMS} . *El efecto pelicular (Efecto "skin") reduce la sección efectiva de los conductores a medida que aumenta la frecuencia.	*Disparos intempestivos de las protecciones. *Sobrecalentamiento de los conductores.
Sobre el conductor de neutro	*Cuando existe una carga trifásica + neutro equilibrada que genera armónicos impares múltiplos de 3.	*Cierre de los armónicos homopolares sobre el neutro que provoca calentamientos y sobreintensidades.
Sobre los transformadores	*Aumento de la I_{RMS} . *Las pérdidas por Foucault son proporcionales al cuadrado de la frecuencia, las pérdidas por histéresis son proporcionales a la frecuencia.	*Aumento de los calentamientos por efecto Joule en los devanados. *Aumento de las pérdidas en el hierro.
Sobre los motores	*Análogas a las de los transformadores y generación de un campo adicional al principal.	*Análogas a las de los transformadores más pérdidas de rendimiento.
Sobre los condensadores	*Disminución de la impedancia del condensador con el aumento de la frecuencia.	*Envejecimiento prematuro, amplificación de los armónicos existentes.

En la tabla 1 se mencionan algunos efectos perjudiciales que ocasionan los armónicos en los aparatos y sistemas de poca corriente:

- El mal funcionamiento de ciertos aparatos que utilizan la tensión como referencia para el control de los semiconductores o como base de tiempos para la sincronización de ciertos equipos.
- Perturbaciones porque se crean campos electromagnéticos; así, cuando los conductores de baja intensidad o de transmisión de datos están muy próximos a cables de gran potencia por los que circulan corrientes armónicas, pueden, por inducción, ser receptores de corrientes que pueden provocar fallos en el funcionamiento de los elementos conectados a ellos.
- Por último, la circulación de corrientes armónicas por el neutro provoca una caída de tensión en el conductor, así, si el sistema de puesta a tierra del neutro es el TN-C, las masas de los diversos equipos no quedan a la misma tensión, lo que por su propia naturaleza provoca perturbaciones en los intercambios de información entre receptores inteligentes, además hay circulación de corrientes por las estructuras metálicas de los edificios y, por tanto, creación de campos electromagnéticos perturbadores.

2.4.1 Efectos de los armónicos en los motores. Pueden ser muy afectados por la distorsión de tensión puesto que ésta es trasladada como flujo armónico dentro del motor; los flujos armónicos no contribuyen al torque del motor puesto que rotan a una frecuencia diferente e inducen corrientes de alta frecuencia en el rotor.

Los problemas de calentamiento comienzan cuando la distorsión armónica total de voltaje (THDv) alcanza valores mayores al 8.0 %.

2.4.2 Efectos de los armónicos en los filtros pasivos. En los filtros pasivos también pueden aparecer problemas de sobreesfuerzo del aislamiento por sobretensión o sobrecorriente en sus elementos componentes. Estos filtros son los más empleados en la descontaminación armónica de los sistemas eléctricos debido a su bajo costo económico y facilidad de operación; también se hace necesario tener en cuenta en el diseño de los mismos la presencia de armónicos.

2.4.3 Efectos de los armónicos en los equipos electrónicos sensibles. Existen numerosos equipos modernos que son muy sensibles a los cambios producidos en el voltaje de alimentación de los mismos; entre ellos están: las computadoras, los modems, las tarjetas de electrónica compleja (de captación de datos, de comunicaciones, etc.), las cargas registradoras y muchos otros equipos domésticos y de oficina; estos equipos al estar constituidos por complejas y delicadas configuraciones de elementos de baja potencia, necesitan de una fuente de alimentación muy estable que les provea de un voltaje dc de rizado casi nulo, para ello necesitan de una fuente primaria de ac y de un bloque rectificador con fuente de voltaje estabilizada, en algunos casos este bloque de alimentación no posee el grado de invulnerabilidad necesario para soportar ciertos grados de distorsión de la onda de voltaje, por esta razón los delicados circuitos son sometidos a variaciones notables en el lado dc de sus fuentes, afectando el funcionamiento de los mismos; esta es la causa del re-arranque de computadoras y de la pérdida de control de las cajas registradoras sometidas a voltajes altamente contaminados, además, los equipos con alto nivel de integración en sus elementos componentes que estén sometidos a voltajes distorsionados por armónicos durante prolongados períodos de tiempo, pueden presentar daños irreparables, en su gran parte

estos daños provocan la inutilidad total del componente integrado del equipo en cuestión.

En el caso de los equipos que necesitan de un potencial de tierra nulo, si están conectados a conductores de neutro por los que circulan corrientes de armónicos, entonces se verán sometidos a voltajes de neutro a tierra ciertamente peligrosos que pueden causarle daños.

Existen además equipos electrónicos que necesitan sensar las magnitudes de fase para tener una noción de tiempo con respecto a los comienzos de los períodos de las corrientes y voltajes de alimentación, normalmente basan su funcionamiento en la detección del cruce por cero de las magnitudes que chequean, cuando éstas están sometidas a los efectos de distorsión de las cargas no lineales, puede darse el caso de que aparezcan cruces por cero de las formas de onda en momentos que no coinciden con el cambio de signo del lóbulo (positivo o negativo) de la onda que se tome de referencia, estas detecciones incorrectas pueden dar lugar a operaciones erróneas y en algunos casos al no funcionamiento de los equipos que controlan.

2.4.4 Efectos de los armónicos en los transformadores.

Aunque los transformadores son dimensionados para la operación con cargas de 60 Hz, cuando estos alimentan cargas no lineales evidencian un incremento notable en sus pérdidas tanto en las de núcleo como las de cobre; las corrientes armónicas de frecuencias más altas provocan pérdidas de núcleo incrementadas en proporción al cuadrado de la corriente de carga rms y en proporción al cuadrado de frecuencia debido al efecto pelicular, el incremento en las pérdidas de cobre se debe a la circulación de corrientes armónicas de secuencia positiva y negativa

transportadas en los conductores de fase provenientes de cargas generadoras de armónicos monofásicas y trifásicas, y a la circulación de las corrientes armónicas triples de secuencia cero que son transportadas en los conductores neutros desde las cargas monolineales generadoras de armónicos.

2.4.5 Efectos en los condensadores. La impedancia de los condensadores disminuye al aumentar la frecuencia, por tanto, si la tensión está deformada por los condensadores que se usan para la corrección del factor de potencia, circulan corrientes armónicas relativamente importantes; por otra parte, la existencia de inductancias en algún punto de la instalación tiene el riesgo de que se produzcan resonancias con los condensadores, lo que puede hacer aumentar mucho la amplitud de los armónicos en los mismos; este fenómeno de resonancia puede ocasionar que sea perforado el aislamiento de los capacitores provocando daños severos, esta perforación puede ocurrir tanto por picos de voltaje como de corriente a través de los mismos aún cuando el diseño básico (a la frecuencia de operación) prevea pocas posibilidades de falla ante los picos de cargas operados y a los niveles de voltaje y de corrientes esperados.

En la práctica, no se recomienda conectar condensadores en instalaciones que tengan una tasa de distorsión armónica superior al 8%.

2.5 SECUENCIA DE LOS ARMÓNICOS

En el caso que el sistema sea trifásico y sus cargas armónicas balanceadas, los armónicos de voltajes y corrientes tienen secuencias positivas, negativas o cero.

Se considera de gran importancia establecer la secuencia correspondiente a cada uno de los armónicos, debido a que la respuesta del sistema de potencia es diferente para cada secuencia.

Debemos considerar que el sistema trifásico es balanceado con secuencia positiva ABC, secuencia negativa ABC; y cada secuencia está defasada 120°. Las de secuencia cero están en fase.

Se puede expresar de manera sencilla la secuencia de giro de los armónicos en el sistema de potencia así:

Tabla 2. Secuencia de armónicos.

Fase	Fundamental	Armónico 2	Armónico 3	Armónico 4	Armónico 5	Armónico 6
A	e	$2(e)$	$3(e)$	$4(e)$	$5(e)$	$6(e)$
B	$e + 240^\circ$	$2(e + 240^\circ)$	$3(e + 240^\circ)$	$4(e + 240^\circ)$	$5(e + 240^\circ)$	$6(e + 240^\circ)$
C	$e + 120^\circ$	$2(e + 120^\circ)$	$3(e + 120^\circ)$	$4(e + 120^\circ)$	$5(e + 120^\circ)$	$6(e + 120^\circ)$
Sec	+	-	0	+	-	0

La secuencia de los otros armónicos se puede inferir siguiendo el patrón de la tabla anterior.

2.6 ESPECTRO DE LÍNEA

Una gráfica que representa cada una de las amplitudes armónicas de una onda se llama espectro de línea, las líneas decrecen rápidamente a medida que la serie converge rápidamente; el contenido armónico y el espectro de línea de una onda son parte

de la naturaleza propia de la onda y nunca cambian, independientemente del método de análisis, para calcular la magnitud de cada una de las líneas del espectro se consideran las siguientes ecuaciones:

$$C_0 = \frac{1}{2}a_0 \quad \text{y} \quad C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

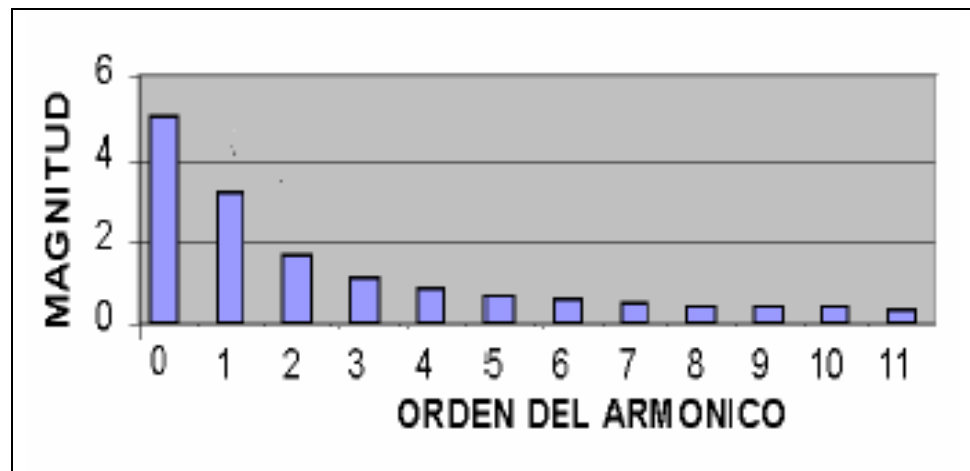
Se puede observar en la tabla 3 y figura 3 un espectro de línea para la función $f(\theta)$ con su magnitud de cada armónico presente que se da a continuación, y se calcula las magnitudes para cada armónico utilizando la expresión anterior y conociendo la serie de dicha onda:

$$f(\theta) = 5 - \frac{10}{\pi} \text{sen}\theta - \frac{10}{2\pi} \text{sen}2\theta - \frac{10}{3\pi} \text{sen}3\theta - \dots = 5 - \frac{10}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen}(n\theta)}{n}$$

Tabla 3. Orden y magnitud de cada armónico

ORDEN DEL ARMÓNICO	MAGNITUD DEL ARMÓNICO
0	5
1	3.1827342
2	1.5913671
3	1.0609114
4	0.79568355
5	0.63654684
6	0.5304557
7	0.45467631
8	0.39784178
9	0.35363713
10	0.31827342
11	0.28933947

Figura 3. Espectro de línea de una onda.



2.7 ARMÓNICOS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

La distorsión de formas de onda de corriente y voltaje debida a las armónicas es uno de los fenómenos que afectan la confiabilidad del sistema y por lo tanto la calidad de la energía; el acoplamiento magnético, causa que algunas armónicas de frecuencias elevadas produzcan interferencia en los sistemas de comunicación, sobre todo en líneas telefónicas, este problema no es nuevo, sin embargo, debido al notable incremento de cargas no lineales conectadas al sistema eléctrico, el nivel promedio de armónicas en el sistema eléctrico de potencia se incrementa cada día más, las cargas no lineales son como hornos de arco y de inducción, así como de cargas controladas por dispositivos electrónicos tales como SCR's, transistores de potencia, etc., la disponibilidad y el relativo bajo costo de estos dispositivos ha expandido en gran medida su uso en casi todo tipo de cargas industriales y comerciales.

Un factor menos extendido pero de importancia, que acentúa la inyección de armónicas en los sistemas eléctricos, es el drástico

cambio de la filosofía del diseño del equipo utilizado en los sistemas eléctricos de potencia; en el pasado, los fabricantes tendían a diseñar la mayoría de sus equipos sobre rangos mayores al requerido, ahora, con el objeto de ser competitivos, los equipos de potencia tienen que ser diseñados sobre rangos críticos, como en el caso de equipos con núcleo de hierro, esto significa que sus puntos de operación están cada vez más cerca de la característica no lineal, es decir, muy cerca de la saturación del núcleo, lo que resulta una clara fuente de armónicas.

Por lo anterior, el modelado de los elementos del sistema de potencia ante señales armónicas cada vez es más importante, de ésta manera, la modelación viene con los métodos de simulación los cuales son muy importantes debido principalmente a dos razones:

- Investigar los problemas potenciales latentes en los sistemas eléctricos que se pueden presentar al conectar una gran carga no lineal.
- Simular y probar perspectivas de solución a problemas existentes de una forma analítica

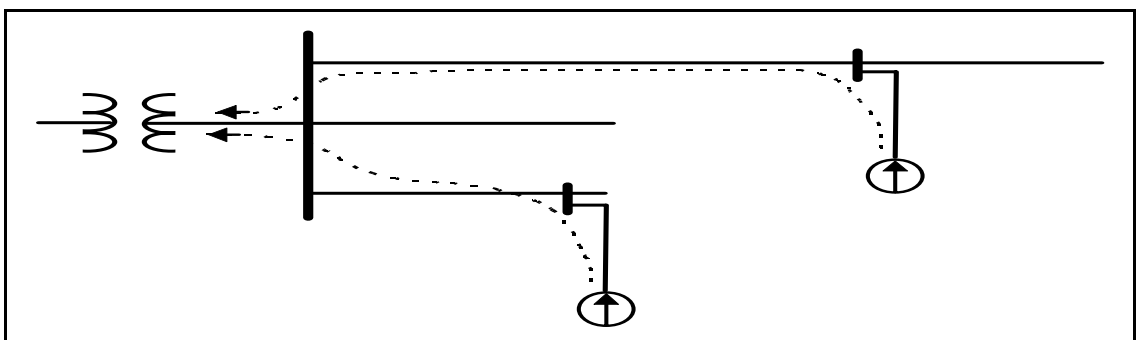
De esta manera, es deseable llevar a cabo un análisis de armónicas de un sistema eléctrico de potencia, así como se hacen estudios de flujos de carga, corto circuito, estabilidad y caída de tensión.

2.8 TRAYECTORIA DE LOS ARMÓNICOS

Toda corriente eléctrica fluye por donde se le presenta menor resistencia a su paso, por esta razón las corrientes armónicas

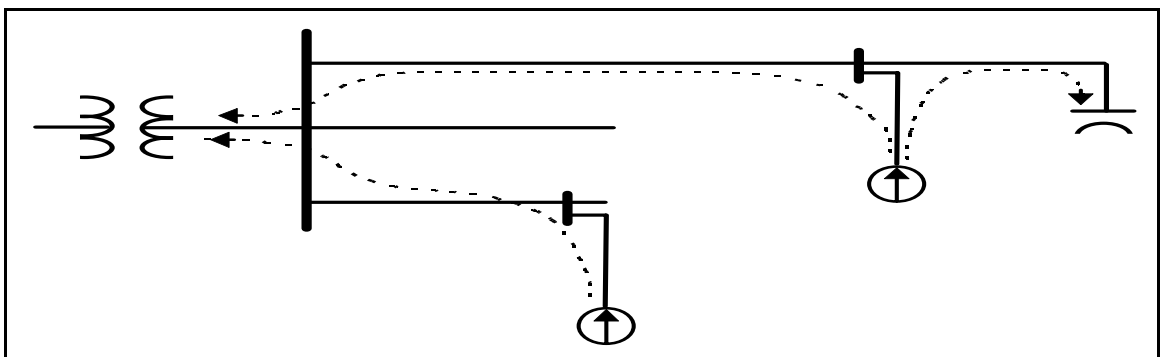
siguen trayectorias distintas, pues se tiene que las impedancias de los sistemas varían según la frecuencia, donde la reactancia inductiva se incrementa con la frecuencia y la resistencia se incrementa en menor medida, mientras que la reactancia capacitiva disminuye con la frecuencia, esto se muestra en la figura siguiente:

Figura 4. Trayectoria de las armónicas en un sistema inductivo.



Si al sistema de la figura 4 se le incluye un banco de capacitores como se muestra en la figura 5, da lugar a unas trayectorias distintas para las armónicas.

Figura 5. Efecto de los capacitores en las trayectorias de las armónicas.



La trayectoria que siguen las armónicas también depende del tipo de sistemas, ya sean monofásicos o trifásicos, así como las conexiones de los transformadores que se encuentran a su paso.

Las armónicas que se presentan en sistemas balanceados tienen una relación directa con las componentes de secuencias positiva, negativa y cero.

Esto se puede ver en el siguiente sistema trifásico balanceado

$$\begin{aligned} I_a &= I \operatorname{sen}(h \delta_a) \\ I_b &= I \operatorname{sen}(h \delta_b) \\ I_c &= I \operatorname{sen}(h \delta_c) \end{aligned}$$

Para que sea un sistema trifásico balanceado, entonces:

$$\begin{aligned} \delta_a &= \omega t \\ \delta_b &= \omega t - 120^\circ \\ \delta_c &= \omega t + 120^\circ \end{aligned}$$

De esta manera para los diferentes valores de h se tiene que:

Para h=1

$$\begin{aligned} I_a &= I \operatorname{sen}(\delta_a) = I \operatorname{sen}(\omega t) \\ I_b &= I \operatorname{sen}(\delta_b) = I \operatorname{sen}(\omega t - 120^\circ) \\ I_c &= I \operatorname{sen}(\delta_c) = I \operatorname{sen}(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \quad \text{secuencia positiva}$$

Para h=2

$$\begin{aligned} I_a &= I \operatorname{sen}(2\delta_a) = I \operatorname{sen}(2\omega t) = I \operatorname{sen}(2\omega t) \\ I_b &= I \operatorname{sen}(2\delta_b) = I \operatorname{sen}(2\omega t - 240^\circ) = I \operatorname{sen}(2\omega t + 120^\circ) \\ I_c &= I \operatorname{sen}(2\delta_c) = I \operatorname{sen}(2\omega t + 240^\circ) = I \operatorname{sen}(2\omega t - 120^\circ) \end{aligned} \quad \text{secuencia negativa}$$

Para $h=3$

$$\begin{aligned}
 I_a &= I \operatorname{sen}(3\delta_a) = I \operatorname{sen}(3\omega t) && = I \operatorname{sen}(3\omega t) \\
 I_b &= I \operatorname{sen}(3\delta_b) = I \operatorname{sen}(3\omega t - 360^\circ) = I \operatorname{sen}(3\omega t) \\
 I_c &= I \operatorname{sen}(3\delta_c) = I \operatorname{sen}(3\omega t + 260^\circ) = I \operatorname{sen}(3\omega t) \quad \text{secuencia cero}
 \end{aligned}$$

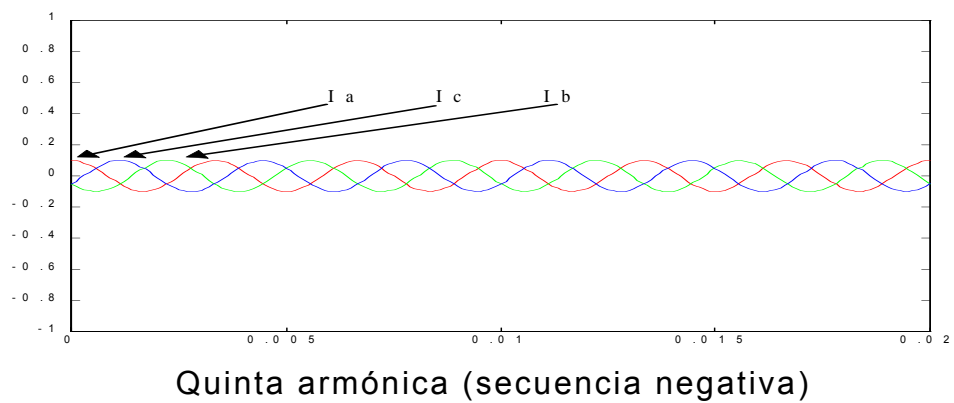
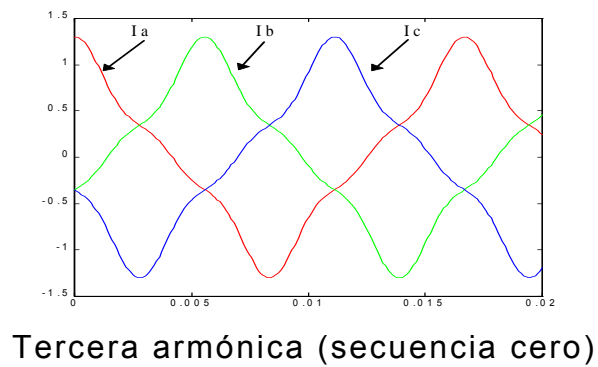
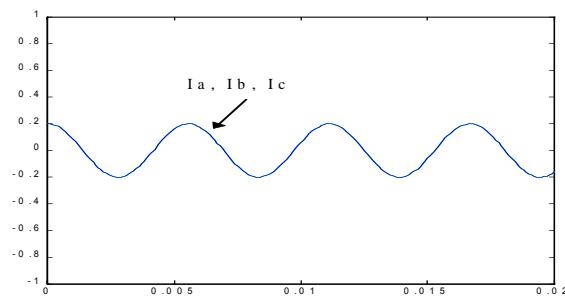
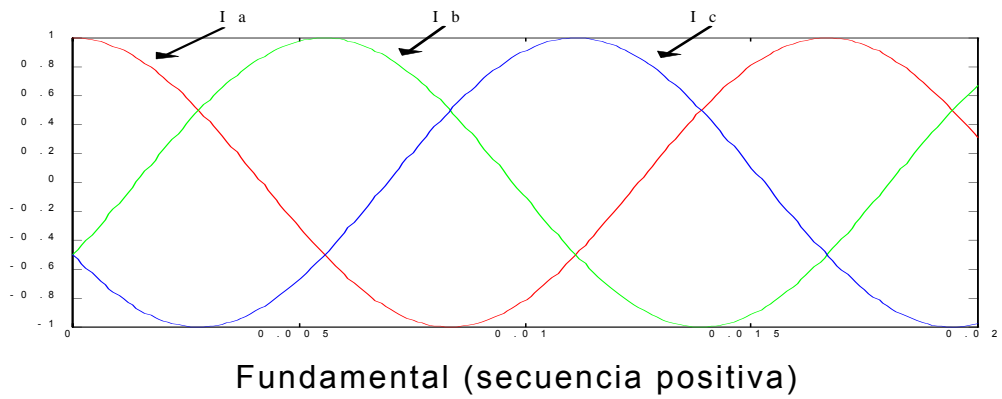
De aquí en adelante se repiten las secuencias, quedando así la relación que existe entre las armónicas y las secuencias mostradas en la tabla 4.

Tabla 4. Relación entre las secuencias y las armónicas.

Secuencias	1	2	0	1	2	0	1	2
Armónicas	1	2	3	4	5	6	7	8

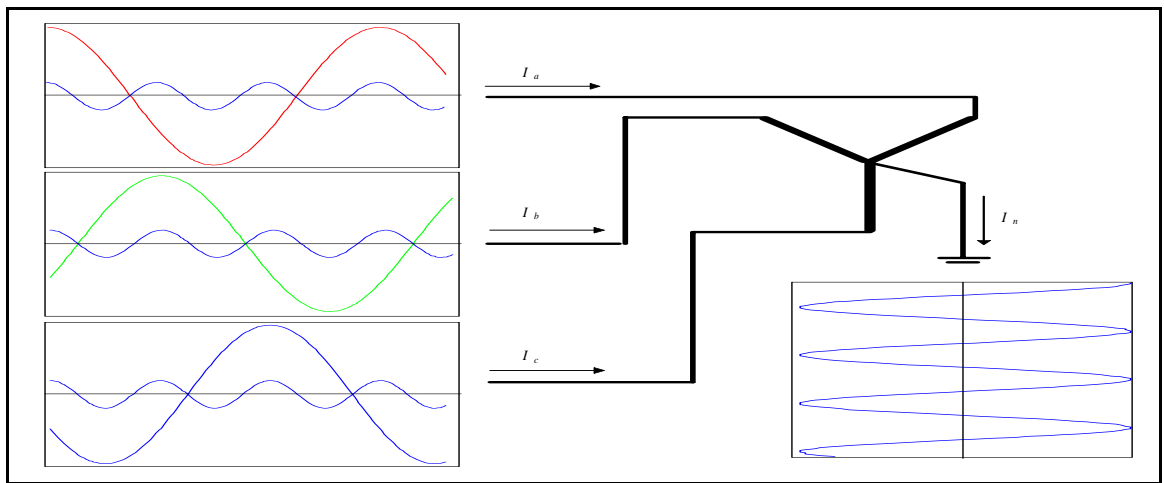
De esta manera el comportamiento de las armónicas es similar al comportamiento de las secuencias, es por esta razón que ante la presencia de armónicas en la corriente del sistema, se tengan corrientes que circulan de una manera similar a las corrientes de secuencia.

Figura 6. Relación entre las armónicas y las componentes de secuencia.



De esta manera se tiene que como las corrientes de secuencia cero tienden a fluir por los neutros del sistema, entonces este comportamiento lo tienen las armónicas múltiplos de tres. Este efecto se puede ver en la figura 7.

Figura 7. Circulación de la tercera armónica por el neutro de transformadores.



2.9 FRECUENCIAS DE LOS ARMÓNICOS

Las frecuencias de los armónicos que más problemas generan en el flujo de potencia, son aquellas que son múltiplos enteros de la fundamental como son: 120, 180, 240, 300 y 360 ciclos/segundos y las que siguen; en contraste las frecuencias no armónicas, por ejemplo 217 ciclos/segundo, generalmente son generadas e inyectadas al sistema de transmisión y distribución con algún objetivo especial, estos casos son producidos deliberadamente o en algunos casos inadvertidamente.

Es más difícil detectar una armónica que no es múltiplo de la frecuencia fundamental, porque no altera la longitud de onda de la misma manera, esto significa que no se ve un cambio estable en el

osciloscopio cuando se estudia la onda, sin embargo, una vez que se detecta es mucho más fácil identificar su origen.

2.10 CARACTERÍSTICA DE LA RESPUESTA DE IMPEDANCIA DEL SISTEMA

La respuesta del sistema para cada una de las frecuencias armónicas determina el verdadero impacto de las cargas no-lineales en la distorsión de voltaje armónico, lo que permite determinar las corrientes armónicas que producirán efectos nocivos en las redes cercanas al punto donde se encuentra la fuente de armónicos.

2.10.1 Impedancia del sistema. A frecuencia fundamental, los sistemas son principalmente inductivos. La impedancia del sistema se conoce algunas veces como reactancia de corto circuito (X_{sc}); la impedancia de corto circuito (Z_{sc}) es una cantidad que se utiliza en gran medida para el análisis de armónicos, si no se dispone directamente esta puede ser calculada con los datos del estudio de corto circuito, tanto con la potencia de corto (MVA_{sc}) y la corriente de corto (I_{sc}) de la siguiente manera:

$$Z_{sc} = R_{sc} + jX_{sc} [\Omega] \qquad Z_{sc} = \frac{Kv^2}{MVA_{sc}} = \frac{I_{sc}}{\sqrt{3} Kv}$$

Donde:

Z_{sc} = impedancia de corto-circuito

R_{sc} = resistencia de corto-circuito

X_{sc} = reactancia de corto-circuito

Kv = voltaje línea-línea, Kv

I_{sc} = corriente de cortocircuito, A

MVA_{sc} = MVA_{sc} de corto circuito trifásico

Usualmente se asume que la impedancia es puramente reactiva, no se debe olvidar ajustar la reactancia por la frecuencia; la reactancia para el armónico h (orden del armónico) se determina por la reactancia a frecuencia fundamental, X_1 así:

$$X_h = hX_1$$

En los sistemas de potencia se puede asumir que la resistencia no cambia significativamente cuando se estudia los efectos de los armónicos por debajo de la novena componente; en líneas y cables, la resistencia varía aproximadamente la raíz-cuadrada de la frecuencia cuando el efecto skin llega a ser importante en el conductor para frecuencias altas.

Para los niveles de tensión utilizados por los sistemas de potencia industrial, la reactancia equivalente del sistema es dominada a menudo por la impedancia del transformador de servicio, una buena aproximación de la (X_{sc}) puede ser en base de la impedancia del transformador (X_{tx}) así:

$$X_{sc} = X_{tx}$$

La impedancia del transformador (X_{tx}) en ohms puede determinarse por la impedancia dada porcentualmente, (Z_{tx}) dato que se encuentra en la placa del transformador y se calcula así:

$$X_{\alpha} = \left(\frac{Kv_{\phi\phi}^2}{MVA_{3\phi}} \right) \cdot Z_{\alpha} (\%) [\Omega]$$

2.10.2 Impedancia del condensador. Los condensadores son elementos muy utilizados, su presencia en los sistemas eléctricos de potencia industrial y en los sistemas de distribución alteran la

impedancia del sistema que varía con la frecuencia; los condensadores no crean armónicos, pero puede atribuirse la grave distorsión armónica debido a su presencia.

A medida que la frecuencia aumenta la reactancia capacitiva, X_C decrece, presentando así un camino de baja impedancia para la corriente armónica; en el condensador, la reactancia capacitiva X_C se calcula así:

$$X_c = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \quad [\Omega]$$

Las unidades de la capacitancia (C) es en faradios. La reactancia capacitiva equivalente línea-neutro para un banco de condensadores a frecuencia fundamental normalmente se calcula de la siguiente manera:

$$X_c = \frac{KV^2}{Mvar} = \frac{KV^2(1000)}{Kvar} \quad [\Omega]$$

2.10.3 Resonancia paralela. Este es uno de los efectos más comunes en los sistemas de potencia industrial ya que siempre que haya circuitos con inductancia y capacitancia siempre van a tener una o más frecuencias naturales, esto sucede cuando la reactancia capacitiva e inductiva del sistema se igualan ($X_C = X_L$), originando una alta impedancia vista por la fuente de armónicos. Aparece entonces un circuito resonante paralelo cuya frecuencia aproximada es:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Luego:

$$h_r = \sqrt{\frac{X_c}{X_{sc}}} = \sqrt{\frac{MVA_{sc}}{Mvar_{cap}}} = \sqrt{\frac{kVA_{tx} \cdot 100}{kvar_{cap} \cdot Z_{tx} (\%)}}$$

Donde:

h_r = razón de la frecuencia de resonancia y frecuencia de la red

X_C = reactancia capacitiva

X_{SC} = reactancia de corto-circuito del sistema

MVA_{SC} = MVA de corto-circuito del sistema

$M var_{cap}$ = M var del banco de condensadores

kVA_{tx} = kVA nominal del transformador

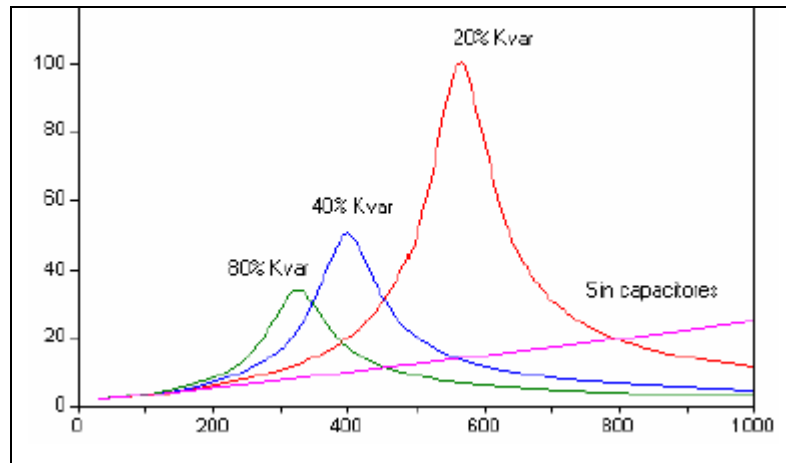
Z_{tx} = impedancia del transformador

$K var_{cap}$ = k var nominal del banco de capacitores

El fenómeno de resonancia produce una amplificación de corriente produciendo en los capacitores daño en su aislamiento, o eventualmente explotan, así mismo, estas corrientes armónicas también producen sobretensiones que se suman a la tensión total aplicada al capacitor y pueden dañar al dieléctrico.

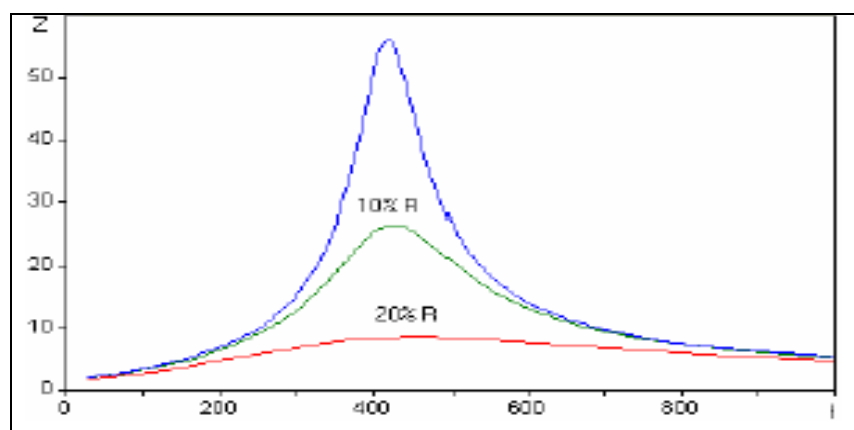
La variación del tamaño de los capacitores influye en la impedancia resultante del sistema vista por la fuente de corriente armónica, como se puede ver en la figura 8.

Figura 8. Efectos en la variación de los tamaños de los condensadores.



2.10.4 Efectos de la resistencia y cargas resistivas. La resistencia es un elemento que ayuda a amortiguar la respuesta en frecuencia de los sistemas eléctricos, es algunas veces suficiente para evitar la corriente y el voltaje ocasionado por la resonancia armónica.

Figura 9. Efecto de la variación de carga resistiva en la resonancia paralela.



La figura 9 muestra la impedancia característica de un circuito resonante, para diferentes cantidades de carga resistiva en paralelo con la capacitancia.

Para valores pequeños de carga resistiva ($\pm 10\%$ de la carga total) puede tener una significativa reducción en el pico de la impedancia generada por la resonancia; igualmente, si hay una longitud significativa de líneas o cables entre la barra del condensador y el transformador, la resonancia puede ser suprimida, ya que las líneas y cables pueden sumar una significativa cantidad de resistencia al circuito equivalente.

En el caso que el transformador domine la impedancia del sistema y tenga la relación X/R alta, la resistencia es relativamente baja, entonces la impedancia de resonancia presentará un valor alto y su gráfica será muy aguda, esto comúnmente causa falla en los condensadores, transformadores o fallas en los equipos de carga.

Los motores de cargas son principalmente inductivos y proporcionan un pequeño amortiguamiento, el uso de pequeñas porciones de potencia Horse Power (H. P.) de motores puede contribuir significativamente, debido a que la aparente relación X/R es más baja que los grandes motores trifásicos.

2.11 ARMÓNICA CERO

El flujo de corriente directa es la armónica de frecuencia cero, la contaminación con corriente directa de un sistema o potencia es parte de un estudio teórico completo de todas las armónicas, ya sea en el dominio del tiempo o de la frecuencia, generalmente la presencia de tensión o corriente directa es una señal de una pobre puesta a tierra, severo desbalance de carga o daño de algún

equipo; aún con la presencia de una pequeña señal, existe el problema de puesta a tierra, flujo en el conductor neutro o desbalance interno.

2.12 DISTORSIÓN ARMÓNICA

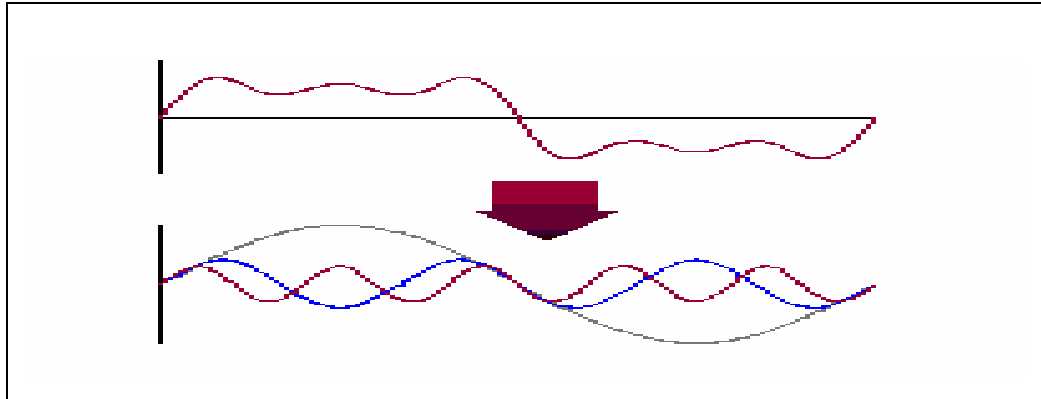
El uso de equipo electrónico moderno ha cambiado nuestras vidas, proporcionándonos mayor comodidad y dependencia eléctrica, pero este hecho ha cambiado también la característica de la carga en las instalaciones modernas.

Los equipos electrónicos han ganado el nombre de "Carga no lineal"; debido a su particular característica de consumir corriente no senoidal al aplicársele alimentación senoidal, con lo cual se produce una distorsión de las señales de tensión y corriente a lo largo del sistema de distribución eléctrica, produciendo algunos efectos adversos, como lo son:

- Corrientes excedentes por el neutro.
- Altos niveles de voltaje de neutro a tierra.
- Recalentamiento en transformadores.
- Reducción en la capacidad de distribución.
- Penalización por bajo factor de potencia.

El problema con cargas no lineales, es la forma no sinusoidal que la corriente adopta, producto de las diferentes ondas (múltiplos enteros de la fundamental), que a ella se suman y que son originadas por las cargas no lineales, esta deformación de las señales de tensión y corriente se expresa usualmente en términos de "Distorsión Armónica".

Figura 10. Gráfico de ondas de tensión y corriente para cargas no lineales (distorsión armónica).



La distorsión armónica describe la variación en estado estacionario o continuo en la forma de onda de la frecuencia fundamental, para esta condición de estado estacionario las frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental; los síntomas típicos de problemas de armónicas incluyen disparo en falso de fusibles, disparos inexplicables de interruptores, sobrecalentamiento de transformadores y de motores, funcionamiento defectuoso de impulsores, relevadores, computadoras, etc.

2.12.1 Valores de distorsión. Los valores de distorsión están definidos en % de cantidades eléctricas, estos valores son muy utilizados para conocer el grado de contaminación de las redes eléctricas.

➤ **Distorsión armónica total**

Para el voltaje

$$T H D_v = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots}}{V_1} \times 100$$

Para la corriente

$$T H D_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots}}{I_1} \times 100$$

Para armónicas individuales

$$I H D_n = \frac{V_n}{V_1} \times 100$$

➤ **Distorsión total de demanda**

$$T D D = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots}}{I_{d e m - m a x}} \times 100$$

➤ **Interferencia telefónica**

$$I . T . = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} (I_h T I F_h)^2}$$

(TIF) Factor de Influencia Telefónica, es una medición de la sensibilidad entre el sistema telefónico y el oído humano a varias frecuencias.

➤ **Factor K**

En la gran mayoría de los casos cuando un transformador alimenta cargas no lineales, este transformador se sobrecalienta aun cuando no ha alcanzado sus KVA nominales.

Se estima que el calentamiento de los transformadores debido a las armónicas es directamente proporcional al cuadrado de la armónica multiplicado por las pérdidas que esta produce, de esta manera aparece el factor K el cual es aplicado a transformadores.

Este factor K viene especificado en los datos de placa de algunos transformadores, indicando la capacidad del transformador para alimentar cargas no lineales sin exceder la temperatura de operación a la cual están diseñados, esto es:

$$Factor \quad K = \sum_{h=1}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_{rms}} \right)^2 h^2$$

Donde:

I_h : es la corriente para un valor de armónico.

h : es el número del armónico.

I_{rms} : es la corriente promedio a la frecuencia fundamental.

Donde la corriente de la expresión anterior es la corriente de la carga no lineal la cual será o es alimentada por el transformador.

Los factores K más comunes de transformadores son de 4 y 13, los cuales son utilizados para alimentar cargas que utilizan rectificación principalmente.

2.13 MÉTODOS PARA ANALIZAR LOS ARMÓNICOS

Existe una gran variedad de métodos analíticos usados para estudiar los armónicos y evaluar las soluciones de su problemática; todos los métodos de análisis de armónicos emplean aproximaciones, linealizaciones de uno u otro tipo, presentando ventajas y desventajas, ocasionalmente dos o más métodos nos darán ligeras diferencias en los resultados cuando se usan para

estudiar el mismo problema, en muy raras ocasiones pueden tenerse recomendaciones contradictorias de cómo reducir los armónicos; en general, estos métodos pueden agruparse en cuatro principales categorías:

➤ **Método de frecuencia:** el método de la frecuencia parece ser el mejor para identificar los armónicos que pueden causar problemas en circuitos y diferentes sistemas y donde pueden existir problemas de resonancia; en este análisis se pueden escoger los armónicos de frecuencia 60, 120, 180, 240, 300 etc. ciclos/seg usando los valores de impedancias para las frecuencias mencionadas anteriormente y representando como generadores de armónicos a sus fuentes, esta aproximación tiene la ventaja de que los programas de flujo de carga normales pueden ser usados para los flujos armónicos, identificando de esta manera los flujos de armónicos a través del sistema, desafortunadamente el método de las frecuencias algunas veces falla en el diagnóstico de los problemas de las armónicos por diferentes razones, entre ellas tenemos: El flujo armónico y el flujo de frecuencia fundamental son aditivos, esta superposición puede causar saturación y otros problemas con cargas no lineales.

➤ **Análisis linealizados:** usualmente se aplican las técnicas de inyección de corriente, se utilizan para estudiar fuentes armónicas compuestas de varias ondas cuadradas, los equipos y circuitos deben ser representados como conjuntos de elementos lineales conectados en serie y en paralelo, o al menos lineales con cada rango de frecuencia, las ventajas de este método son su relativa simplicidad, su buena representación de por qué y cómo las armónicas son creadas y cómo se propagan; modelos de este tipo son frecuentemente construidos, después de que la naturaleza general de los armónicos en un sitio en particular son conocidas

como un modelo para estudio del comportamiento y propagación de los armónicos de una manera más detallada.

➤ **Análisis no lineal en el dominio del tiempo:** directamente se aplica a cargas no lineales simulando modelos en el dominio del tiempo; en programas tales como el EMTP o como mejor se conoce actualmente ATP, así como lo que se ha llamado simulación armónica en el tiempo con modelos para el flujo de potencia, los cuales calculan el aspecto de flujos de potencia usando modelos de cargas no lineales y modelos en líneas de equipos eléctricos representando sus impedancias a través del aspecto de frecuencias. El ATP es la mejor herramienta para hacer análisis de problemas severos, su aproximación es muy buena y presenta una buena habilidad para realizar interacciones complejas de energía y equipo, es el método preferido para evaluar los transitorios originados por armónicos como los causados por las corrientes de inrush originados por los transformadores.

➤ **Método Wavelet:** esta teoría utiliza análisis tanto en el dominio de la frecuencia como en el tiempo; se recomienda aplicar dos o los 3 métodos discutidos anteriormente para evaluar los problemas de armónicos, tal vez los resultados serán diferentes, pero esto identifica los límites del conocimiento acerca del problema que se analiza y que se tiene un rango amplio de posibles soluciones que deben ser exploradas.

2.14 ELIMINACIÓN DE ARMÓNICAS

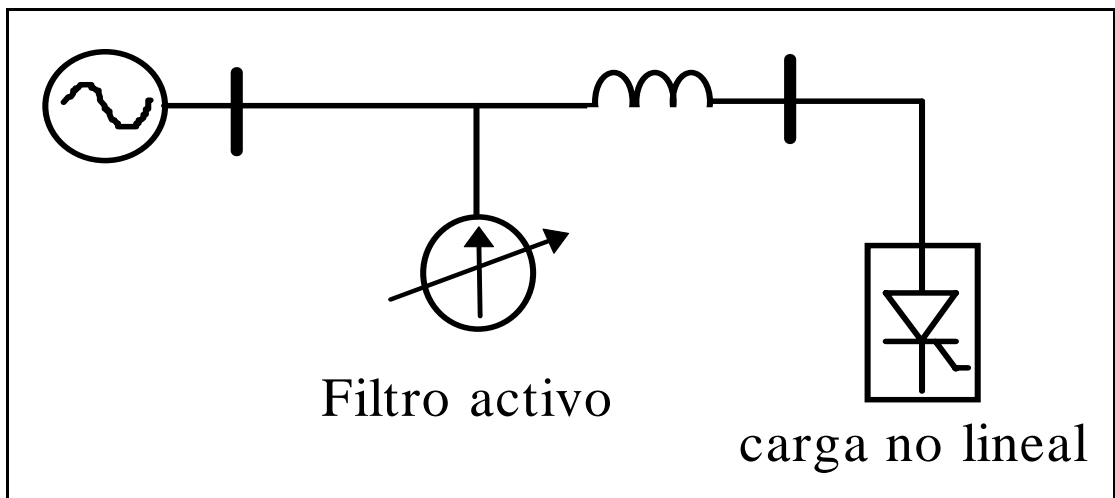
2.14.1 Técnicas para la mitigación de armónicas. La forma de mitigar estos problemas se pueden enumerar de la siguiente manera:

➤ **Reducir la aportación de corrientes armónicas:** cuando se trata de fuentes de armónicas provenientes de lámparas, es recomendable utilizar conexión delta-estrella del transformador de alimentación con el fin de atrapar las armónicas de secuencia cero; si las armónicas provienen de un transformador, lo mejor será cambiar el transformador o liberarle carga, si se trata de un controlador de velocidad, una buena opción es conectar un reactor limitador en la alimentación de tal manera que atenúe la magnitud de las armónicas además de servir como protección para estados transitorios, si se trata de un rectificador de 6 pulsos, una opción es cambiarlo por uno de 12 pulsos, aunque económicamente no puede ser factible, en caso de tener varias cargas que utilicen rectificación conectadas a una misma barra, entonces lo recomendable es que unos rectificadores se alimenten de un transformador delta-estrella y otros de un delta-delta, esto con el fin de que se tenga cancelación de armónicas.

➤ **Utilizando filtros sintonizados:** la utilización de filtros es una buena opción pero no siempre es la más económica o factible, pues depende mucho de qué problema se esté tratando.

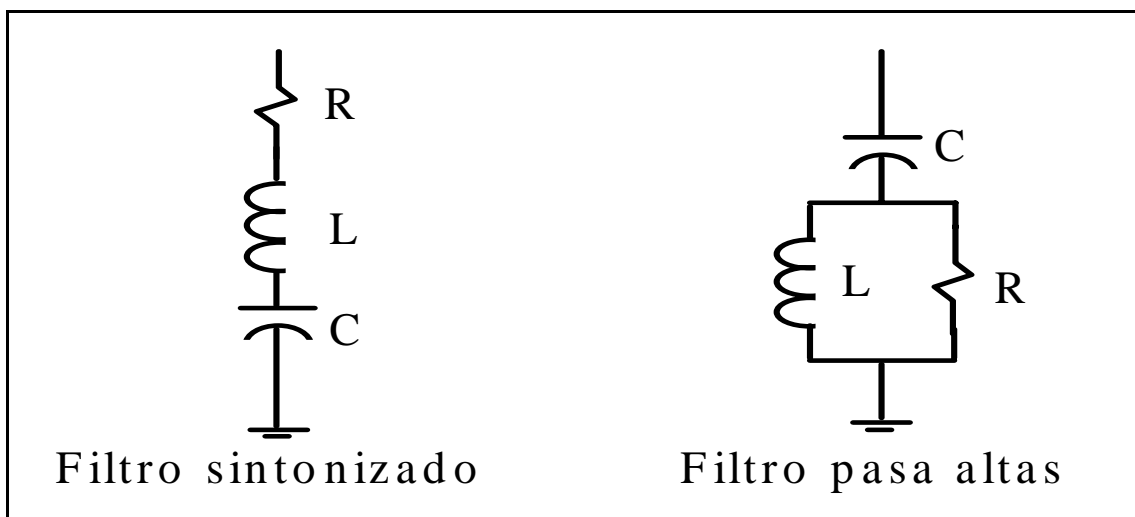
- **Filtros activos:** el principio de los filtros activos consiste en una fuente controlada de corriente cuyas armónicas tienen la misma magnitud y desfasadas 180° de las armónicas a eliminar.

Figura 11. Filtro activo Shunt.



- **Filtros pasivos:** es un filtro que se sintoniza para una armónica en especial o un rango determinado; estos filtros son los más utilizados en los sistemas eléctricos por su bajo costo y fácil instalación, aunque en algunos casos trae consigo problemas de resonancia.

Figura 12. Filtros pasivos shunt.



El filtro lo que hace es presentar una impedancia baja a una corriente de una frecuencia determinada, esto significa que los elementos del filtro entran en resonancia serie, ocasionando la circulación de esta corriente, de esta manera a partir de un valor del banco de capacitores se obtiene el valor del reactor del filtro:

$$X_{cap} = \frac{K V^2}{M V ar_{CAP}} \quad X_{reac} = \frac{X_{cap}}{h^2}$$

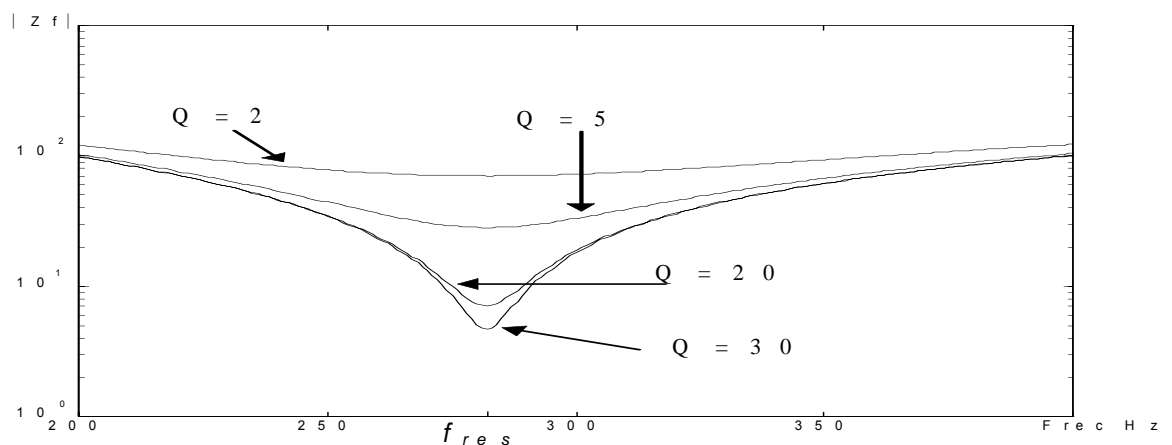
Donde h es la armónica a la cual esta sintonizado el filtro, y por tanto a la corriente que se quiere drenar.

- **Filtro sintonizado:** el cálculo de la resistencia del filtro está dado por la siguiente expresión:

$$R = \frac{X_{reac}(f_{res})}{Q}$$

Q Factor de calidad $20 < Q < 30$

Figura 13. Respuesta de un filtro de sintonización.



La figura 13 muestra la respuesta del filtro sintonizado ante diferentes factores de calidad.

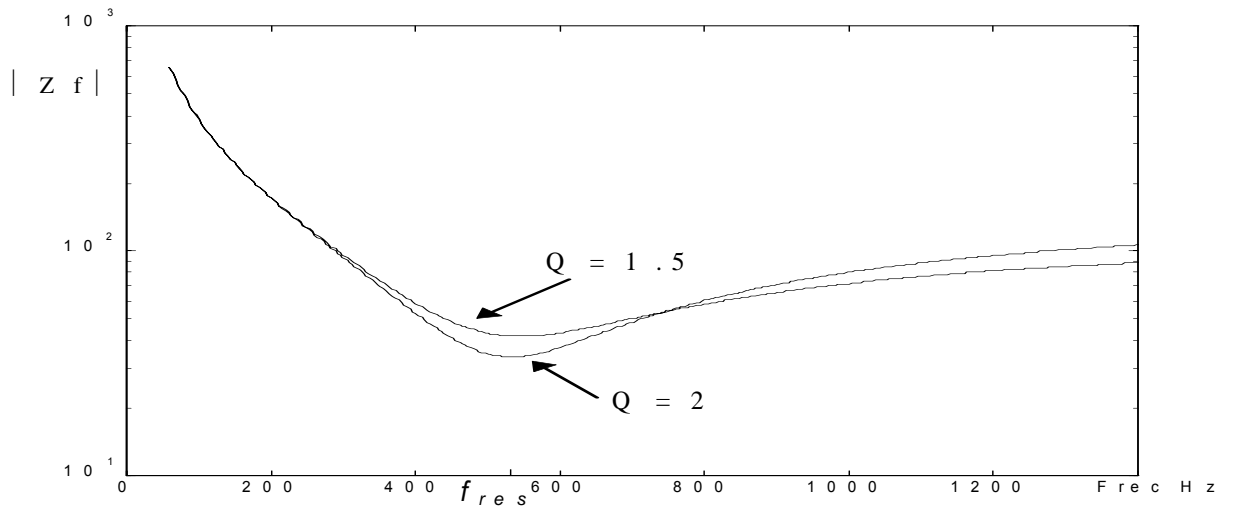
- **Filtro pasa altas:** para el filtro pasa altas el cálculo de la resistencia esta dado por:

$$R = QX_{\text{reac}}(f_{\text{res}})$$

Q Factor de calidad $0.5 < Q < 2$

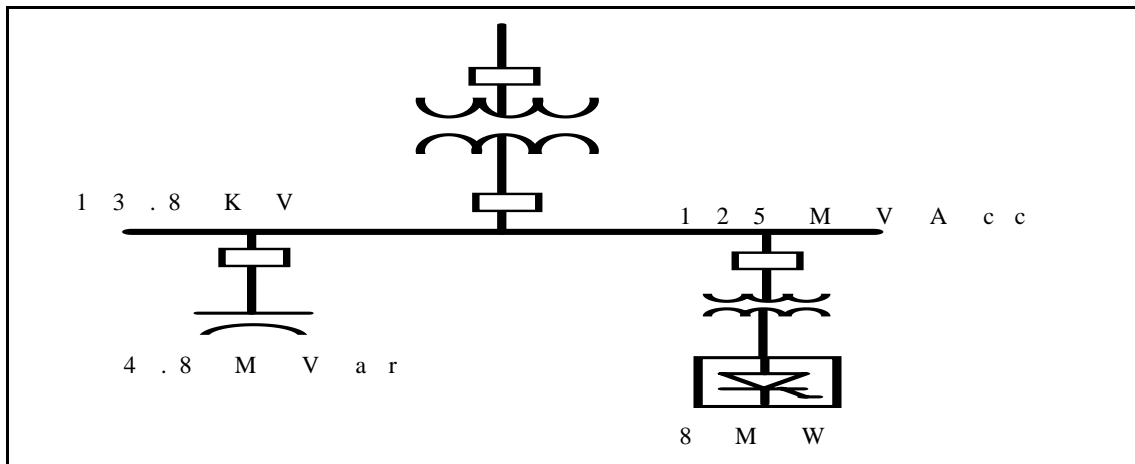
De esta manera la respuesta de este filtro para diferentes valores de factor de calidad se observa en la figura 14.

Figura 14. Respuesta de un filtro pasa altas.



En los casos prácticos, muchas veces esta resistencia es la propia del reactor, por lo que no se hace necesario la utilización de resistencias adicionales.

Figura 15. Sistema industrial.



El sistema de la figura 15 muestra un sistema el cual puede presentar problemas de armónicas por el hecho de tener una carga que las genera y un banco de capacitores el cual es usado para corregir el factor de potencia.

El análisis comienza en conocer la posibilidad de la existencia de algún problema de resonancia, esto se hace mediante:

$$f_{res} = \sqrt{\frac{MVA_{CC}}{MVar_{CAP}}} \times 60 \text{ Hz} = \sqrt{\frac{125}{4.8}} \times 60 = 306.18 \text{ Hz}$$

$$SCR = \frac{MVA_{CC}}{MW_{rect}} = \frac{125}{8} = 15.62$$

Como en este caso se tiene que el SCR es menor que 20 y la frecuencia de resonancia es muy cercana a la quinta armónica, armónica que es generada por el rectificador, por tal motivo es recomendable instalar un filtro de quinta armónica.

Filtro para eliminar la quinta armónica

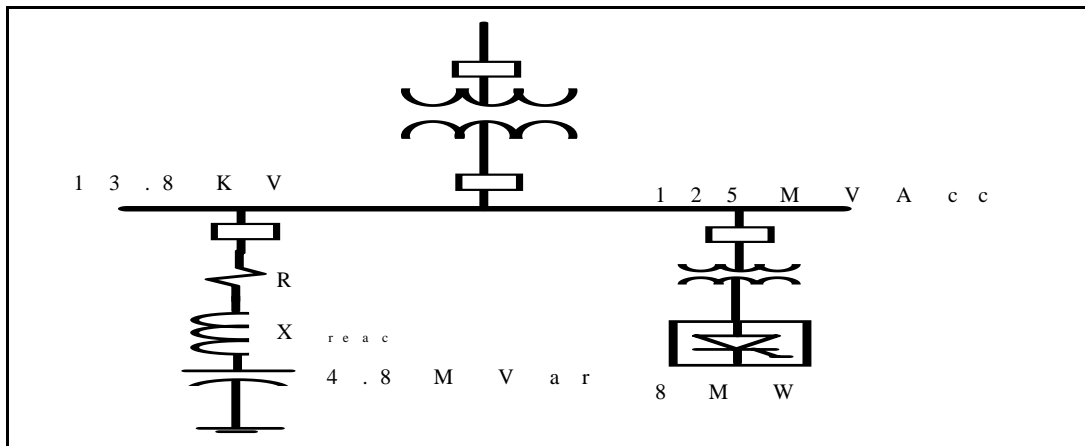
$$X_{cap} = \frac{13.8^2}{4.8} = 39.67 \Omega \text{ a } 60 \text{ Hz}$$

$$X_{react} = \frac{X_{cap}}{5^2} = \frac{39.67}{25} = 1.587 \Omega \text{ a } 60 \text{ Hz}$$

Para Q=20

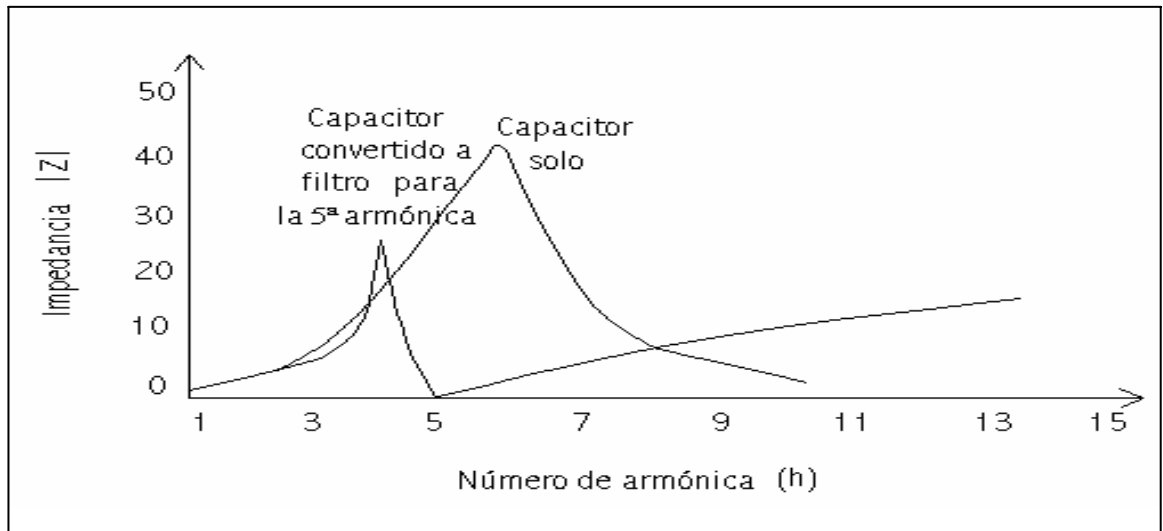
$$R = \frac{X_{react}(f_{res})}{Q} = \frac{5 \times 1.587}{20} = 0.40 \Omega$$

Figura 16. Sistema con filtro para la quinta armónica.



Los efectos del filtro cambian la respuesta a la frecuencia del sistema como se muestra en la figura 17 por lo que es importante tener presente los problemas que se pueden tener por una mala sintonización del filtro.

Figura 17. Respuesta del sistema al ser utilizado el banco de capacitores como parte del filtro.



El filtro sintonizado es utilizado para eliminar en forma individual las armónicas más bajas como la tercera, quinta y séptima; en cambio el filtro pasa altas es utilizado para eliminar un rango de armónicas las cuales tienen un valor pequeño de corriente, por lo general son usados para eliminar de la armónicas once en adelante.

2.15 NORMAS INTERNACIONALES REFERENTES AL CONTROL DE ARMÓNICAS

- IEEE 519 (EE.UU).
- IEC 36.05 (EUROPA).
- DIN 57160 (ALEMANIA).
- G 5/3 (INGLATERRA).
- AS 2279 (AUSTRALIA).

Pero las recomendaciones más utilizadas son las expuestas mediante el Estándar 519 del IEEE. La tendencia impulsada por la Comisión Federal de Electricidad, es de implantar la norma estándar IEEE-519, aunque hasta ahora solo ha aparecido una especificación provisional (CFE L0000-45), la cual se basa en dicha norma, esta especificación entró en vigor a partir del 21 de Abril de 1995 y la cual se encuentra en revisión.

Las recomendaciones del IEEE std 519 “IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems” son las siguientes:

Tabla 5. Límites de distorsión de voltaje.

Voltaje de la barra	IHD	THD
$\leq 69 \text{ KV}$	3.0	5.0
$69 \text{ KV} < V_{\text{barra}} \leq 161 \text{ KV}$	1.5	2.5
$> 161 \text{ KV}$	1.0	1.5

Tabla 6. Límites de distorsión de corriente para sistemas de 120 V a 69 KV, (Máxima corriente de distorsión en % de I_L . Para armónicas impares).

I_{CC} / I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Para armónicas pares se incrementa el límite en 25% de las impares.

Tabla 7. Límites de distorsión de corriente para sistemas de 69 001 V a 161 KV, (Máxima corriente de distorsión en % de I_L . Para armónicas impares).

I_{CC} / I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20<50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50<100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100<1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	2.5	3.0	1.25	0.7	10.0

Para armónicas pares se incrementa el límite en 25% de las impares.

Tabla 8. Límites de distorsión de corriente para sistemas mayores a 161 KV, (Máxima corriente de distorsión en % de I_L . Para armónicas impares).

I_{CC} / I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
>50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Para armónicas pares se incrementa el límite en 25% de las impares

I_{CC} Corriente máxima de corto circuito

I_L Corriente máxima de demanda (fundamental)

3. SIMULACIONES

3.1 SIMULACIÓN DE SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN EN ATP

En el ATP/EMTP, el cual es un software para el estudio de transitorios en sistemas eléctricos, podemos analizar las distorsiones que se presentan en la tensión y la corriente debido a la presencia de cargas no lineales.

BARRA TRIFÁSICA DE 138 KV

La fuente de voltaje es introducida como un voltaje pico línea la cual es $138000 * \sqrt{\frac{2}{3}} * 1.02 = 114930V$

Component: Ac3ph.sup

Attributes

DATA	VALUE
Amp.	114930
f	60
pha	0
A1	0
Tstart	-1
Tstop	1

NODE	PHASE	NAME
AC3	ABC	

Group No: 0 Edit1 Label: Fuente

Comment: 138 kV * 1.02 Infinite Bus

Type of source
 Current
 Voltage

Hide
 Lock

⚡ ? OK Cancel Help

LINEA TRIFÁSICA EQUIVALENTE A 138 KV

$$Z^+ = \frac{1}{34.4} \text{ pu (10 MVA base) con } \frac{X(60\text{Hz})}{R} = 5 \text{ entonces}$$

$$Z^+ = 0.570 + j2.85\% \text{ y } Z^0 = 2.5Z^+ = 1.425 + j7.13\%$$

$$Z_{\text{propia}} = \frac{Z^0 + 2Z^+}{3}, \quad Z_{\text{mutua}} = \frac{Z^0 - Z^+}{3}$$

IMPEDANCIA DEL SISTEMA

$$Z_{\text{propia}} = \frac{1.425 + j7.13 + 1.140 + j5.70}{3} = 0.855 + j4.28\%$$

$$Z_{\text{mutua}} = \frac{1.425 + j7.13 - 0.570 - j2.85}{3} = 0.285 + j1.427\%$$

$$Z_{\text{base}} = \frac{138^2}{10} = 1904.4 \Omega$$

$$R_{\text{propia}} = 16.28\Omega, \quad L_{\text{propia}} = \frac{0.0428 * 1904.4}{120\pi} * 1000 = 216\text{mH}$$

$$R_{\text{mutua}} = 5.43\Omega, \quad L_{\text{mutua}} = \frac{0.01427 * 1904.4}{120\pi} * 1000 = 72.1\text{mH}$$

La capacitancia paralelo es cero

Component: Linepi_3.sup

Attributes

DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
R11	16.28	IN1	ABC	
R21	5.43	OUT1	ABC	
R22	16.28			
R31	5.43			
R32	5.43			
R33	16.28			
L11	216			
L21	72.1			

Group No: 0 Edit1 Label: Línea 1

Comment: 138kV system short circuit impedance

Hide
 Lock
 \$Vintage.1

LINE
 OK Cancel Help

TRANSFORMADOR

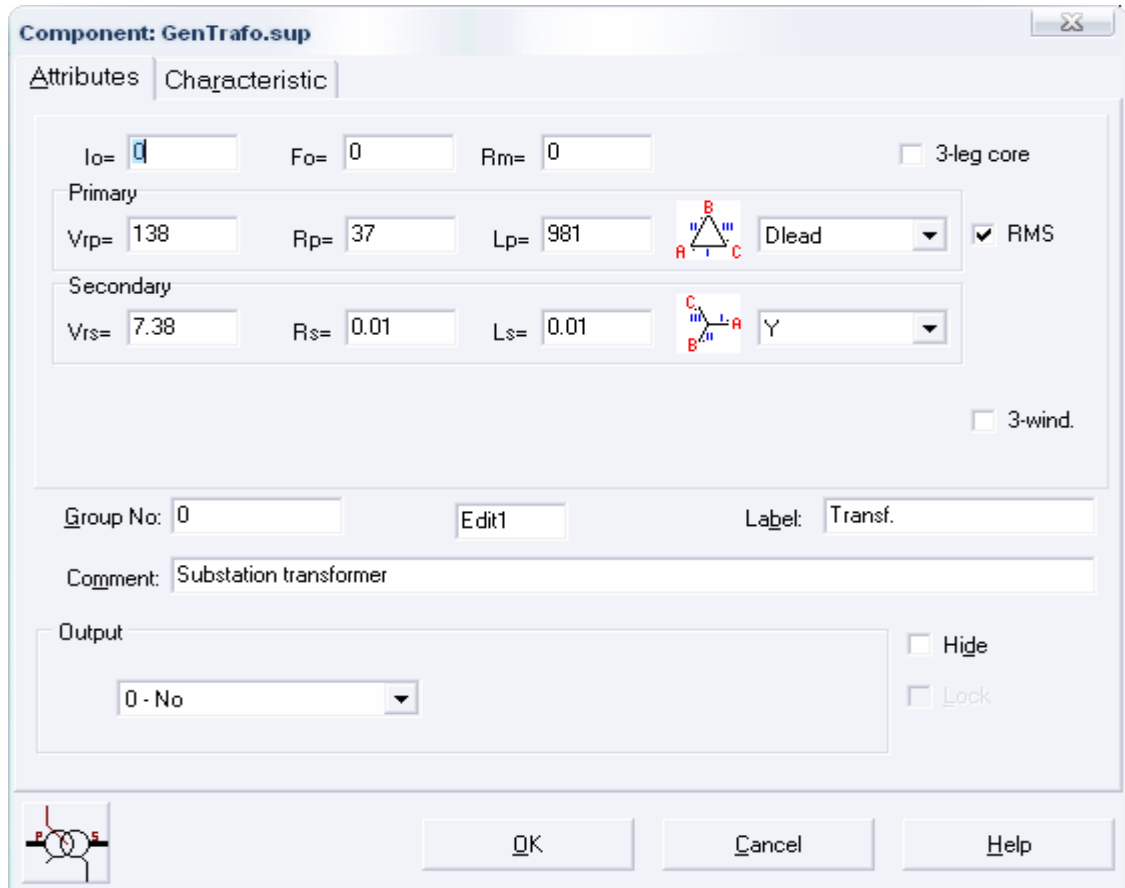
$$Z_T = (\Omega) = Z_T (\text{pu sistema base}) * Z_{\text{base}}$$

$$= 0.065 * 1904.4 * [\cos(\tan^{-1} 10) + j\sin(\tan^{-1} 10)]$$

$$= 12.32 + 123.2 \Omega$$

$$R_T = 12.32 \Omega, L_T = \frac{123.2}{120\pi} * 1000 = 327 \text{mH}$$

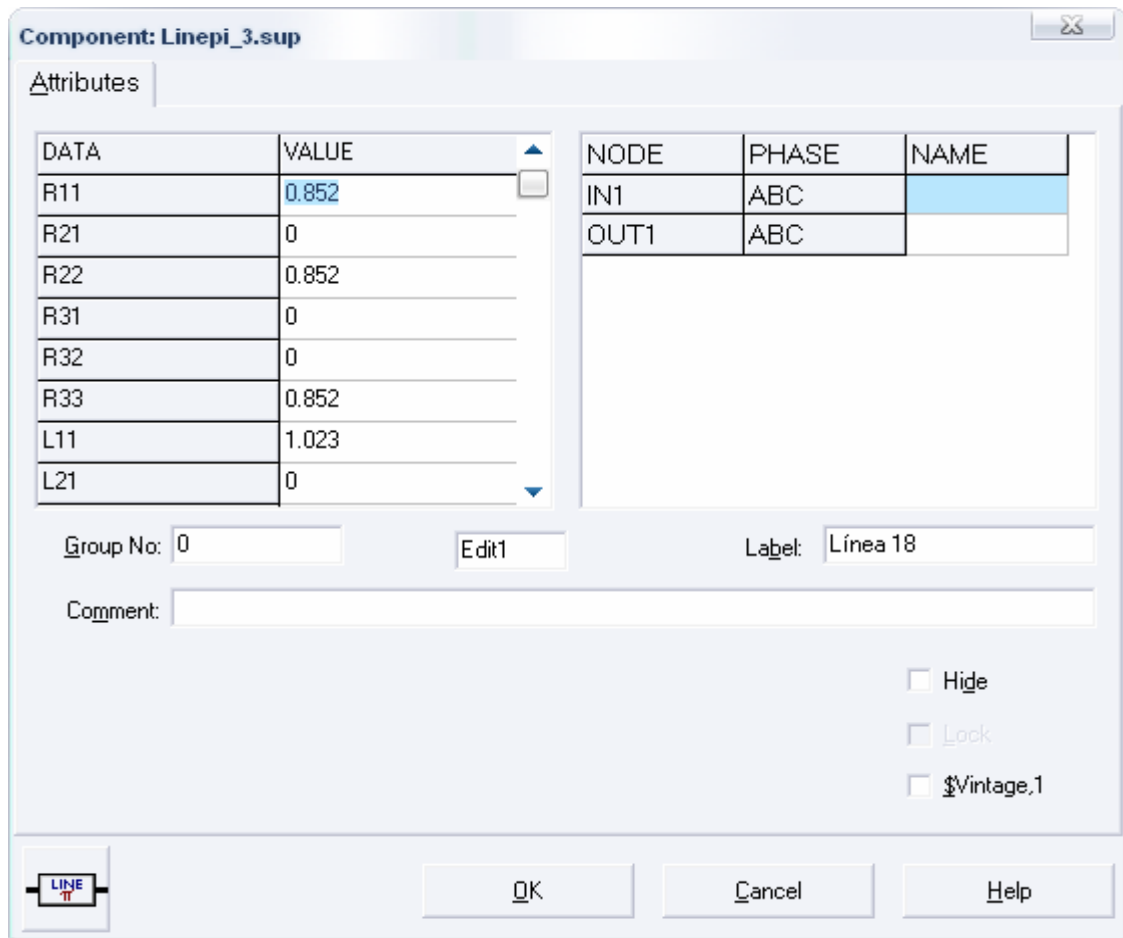
$$R_T = 3 * 12.32 = 37.0 \Omega, L_T = 3 * 327 = 981 \text{mH}$$



$$R_{propia} = R^+ = 0.852, L_{propia} = L^+ = 1.023\text{mH}$$

$$C_{propia} = 2\pi\epsilon_0 \epsilon_r \text{ Farads/metro}$$

$$C_{propia} = 2\pi * 8.854 * 10^{-12} * 2.25 * \frac{4324\text{ft}}{3.2808\text{ft/ m}} * 10^6 = 0.1650\mu\text{F}$$



Carga lineal

$$R = \frac{3V_{LN}^2}{P_{3\phi}} = \frac{3 * (7200)^2}{500000 * 0.85} = 366\Omega$$

$$L = \frac{3V_{LN}^2}{\omega Q_{3\phi}} * 1000 = \frac{3 * (7200)^2}{120\pi * 500000 * \sqrt{1 - 0.85^2}} * 1000 = 1566\text{mH}$$

User specified: LOADY ✖

Atributes

DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
RA	366		ABC	
LA	1566			
RB	366			
LB	1566			
RC	366			
LC	1566			

Group No: Label:

Comment:

User specified

\$\include:

Send parameters
 Internal phase seq.

Hide
 Lock

Figura 18. Sistema de distribución con carga lineal.

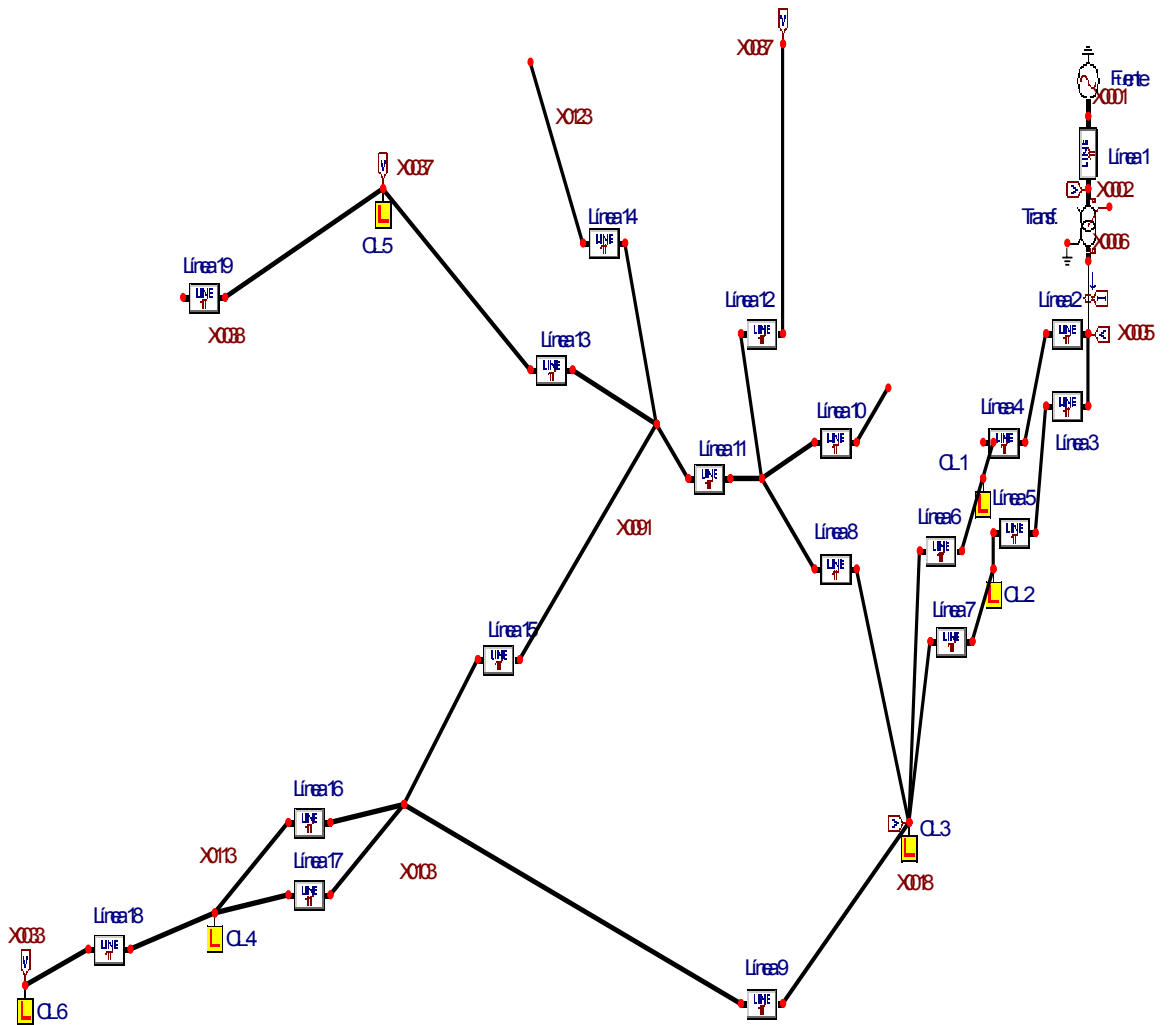
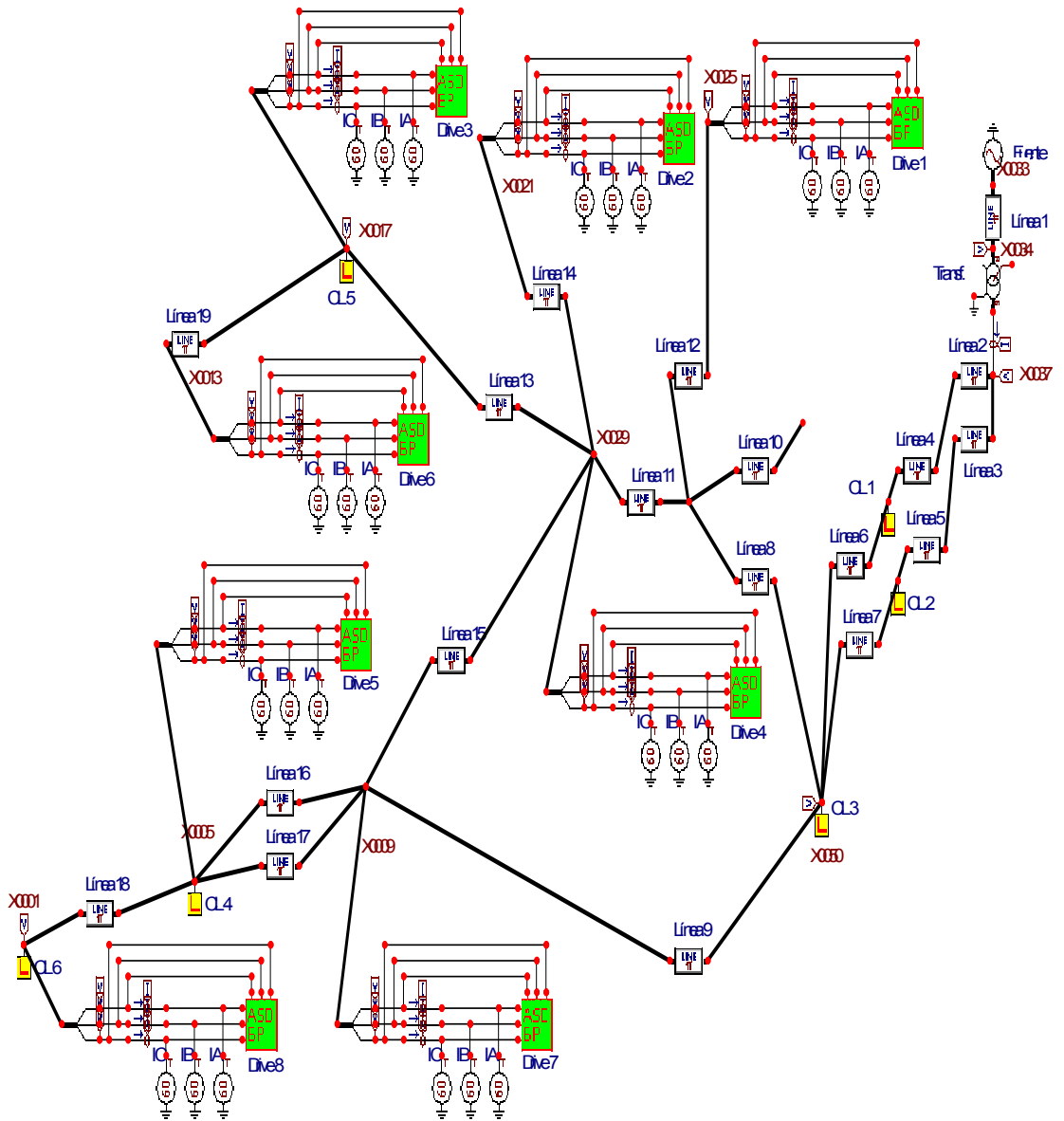


Figura 19. Sistema de distribución con carga no lineal.



Carga no lineal (drive)

$$KVA = \frac{HP * 0.746 W / HP}{DPF} = \frac{200 * 0.746}{0.85} = 175.5$$

MODEL: ASD6P

Attributes

DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
KVA3P	175.5	VLNA	A	
DPF	0.85	VLNB	B	
VLNRMS	7200	VLNC	C	
PSHIFT	0	AMPSA	1	
SHAPE	0	AMPSB	1	
F	60	AMPSC	1	

Group No: 0 Edit1 Label: Drive 8

Comment: 200HP

Models

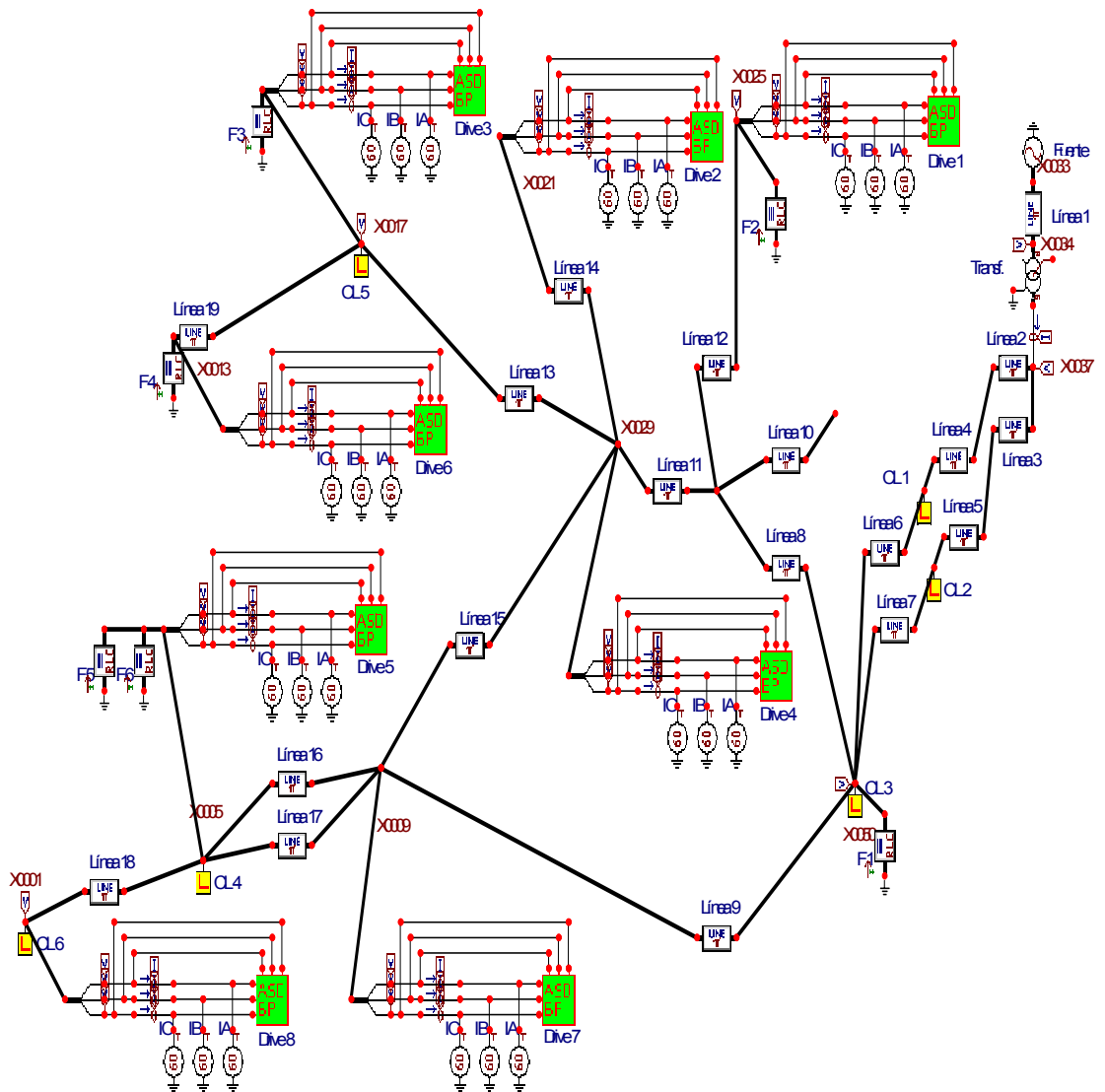
Model file: C:\atp\draw37\mod\Asd6p. Browse... Use As: ASD6P

Hide
 Lock

ASD6P

OK Cancel Help

Figura 20. Sistema de distribución con carga lineal, no lineal y con filtro.



Filtros (elementos trifásicos RLC shunt)

Cada fase tiene 100 kVAr, la capacitancia correspondiente línea – neutro es:

$$Q_{1\phi} = V_{LN}^2 \omega C, C = \frac{Q_{1\phi}}{V_{LN}^2 \omega} = \frac{100.000}{7200^2 * 120\pi} = 5.12 * 10^{-6} = 5.12 \mu\text{F}$$

La inductancia serie para cada fase es:

$$\omega_{res} = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \text{so } L = \frac{1}{\omega_{res}^2 C} = \frac{1}{\omega_{res}^2 C} = \frac{1}{(5 * 120\pi)^2 * 5.12 * 10^{-6}} = 55.0\text{mH}$$

$$R = \frac{X(60\text{Hz})}{50} = \frac{120\pi * 0.055}{50} = 0.451\Omega$$

Component: Rlc3.sup

Attributes

DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
R_1	0.415	IN1	ABC	
L_1	55	OUT1	ABC	X0005
C_1	5.12			
R_2	0.415			
L_2	55			
C_2	5.12			
R_3	0.415			
L_3	55			

Group No: 0 Edit1 Label: F 5

Comment: 300kVAr, 5th

Output: 1 - Current

Hide
 Lock
 \$Vintage.1

OK Cancel Help

Figura 21. Voltaje del lado de alta tensión del transformador sin carga no lineal.

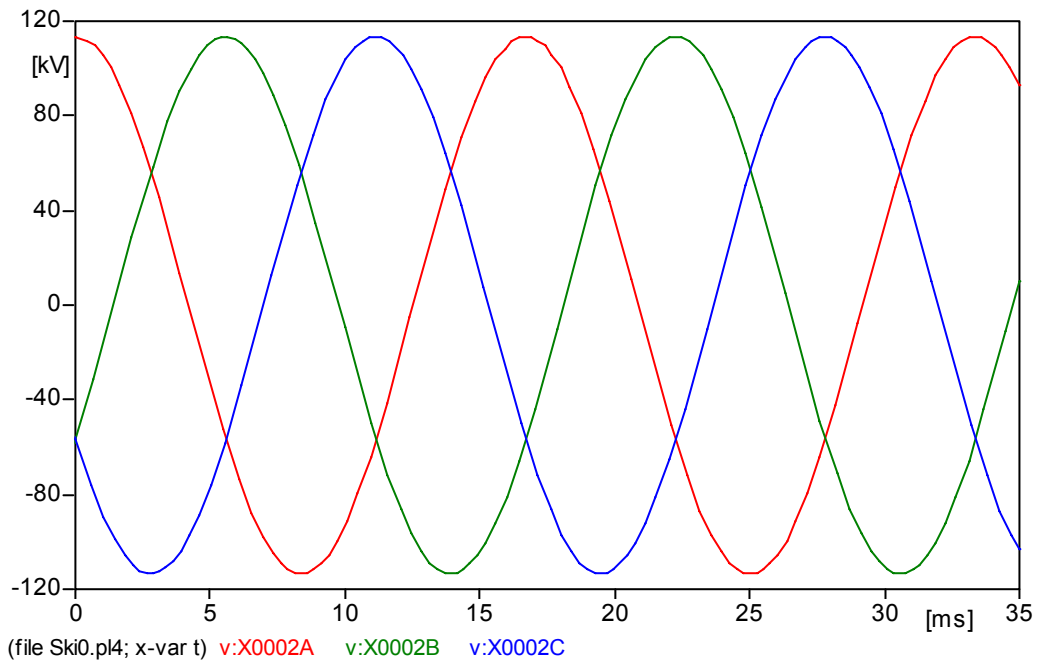


Figura 22. Voltaje del lado de baja tensión del transformador sin carga no lineal.

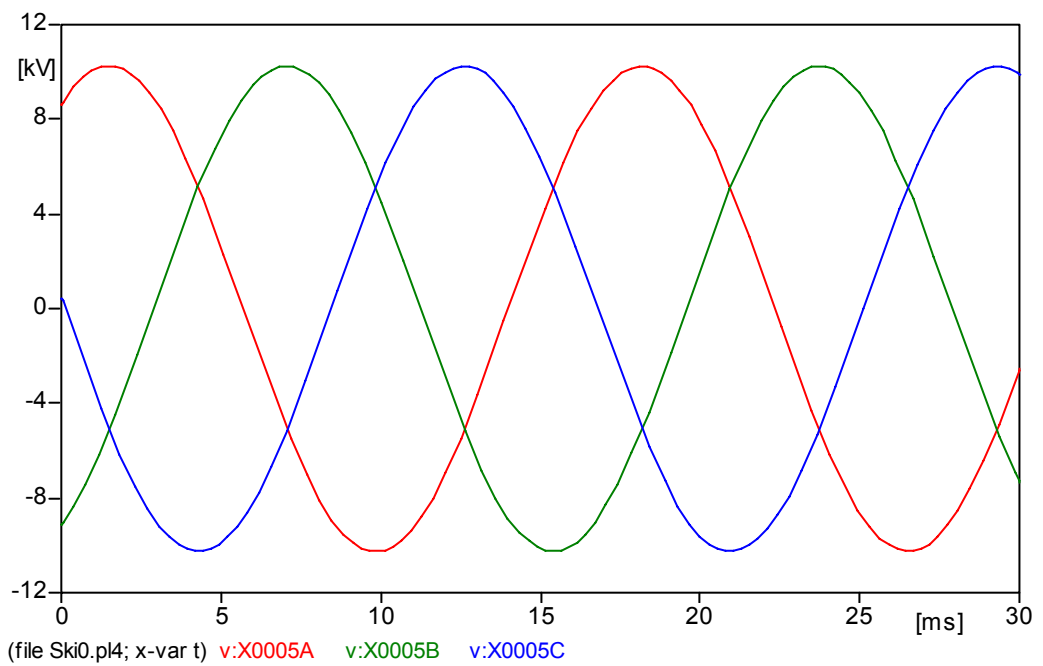


Figura 23. Corriente del lado de baja tensión del transformador sin carga no lineal.

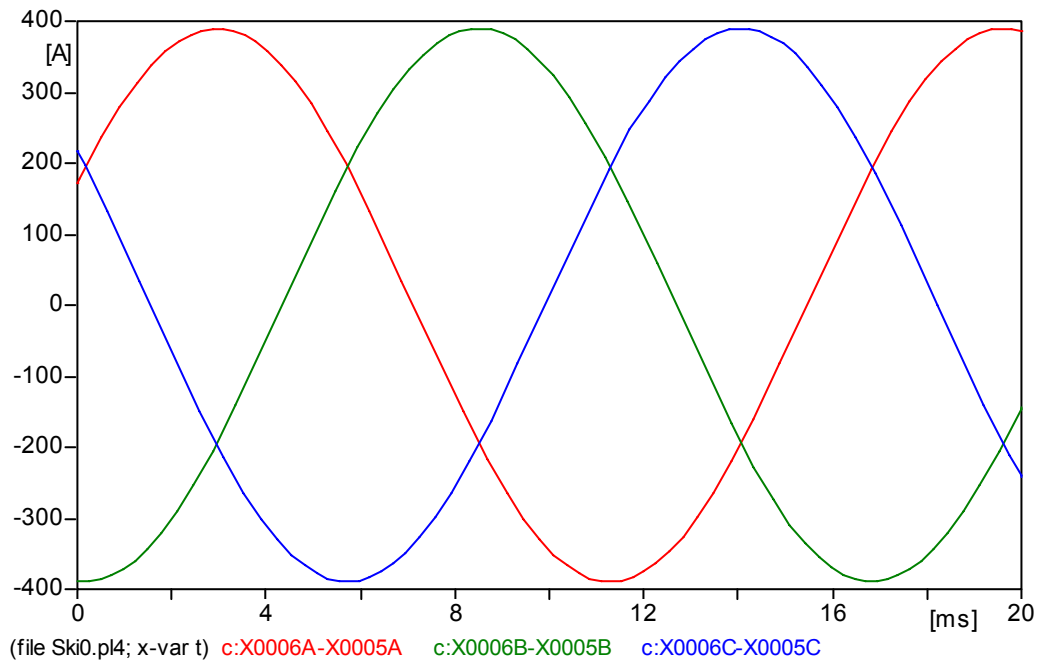
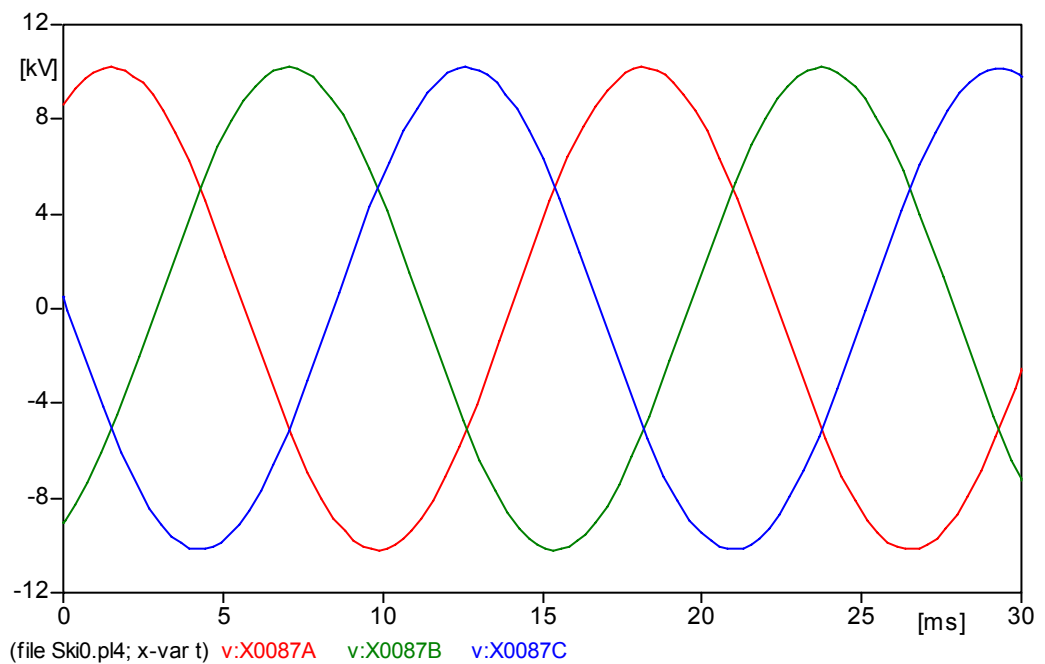


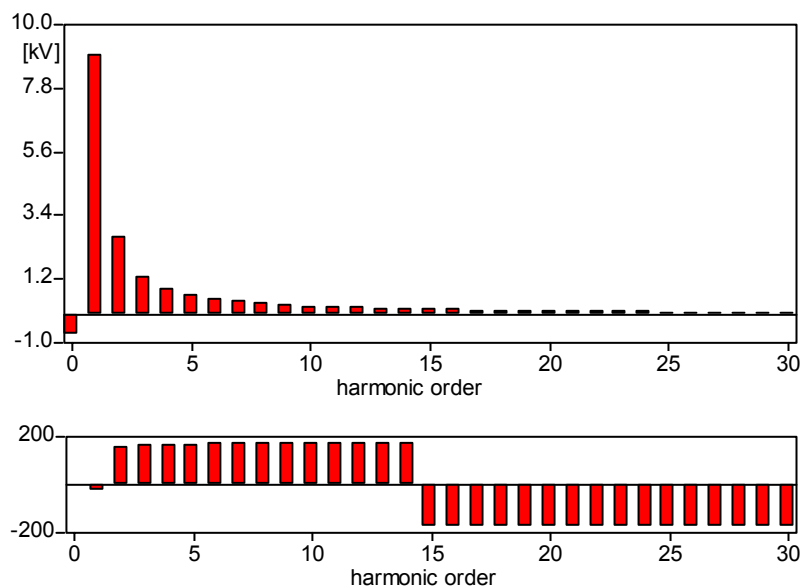
Figura 24. Voltaje en el nodo de prueba solo con carga lineal.



MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 20/07/2007

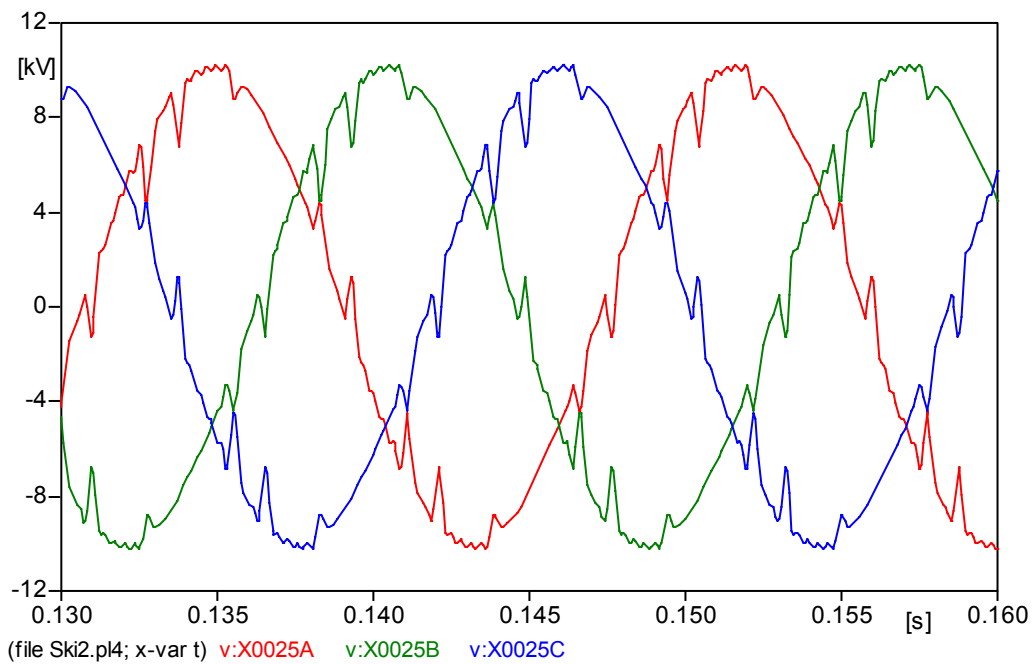
File Ski0.pl4 Variable v.X0087B [peak]

Initial Time: 0,15 Final Time: 0,17



(Ver anexo 1)

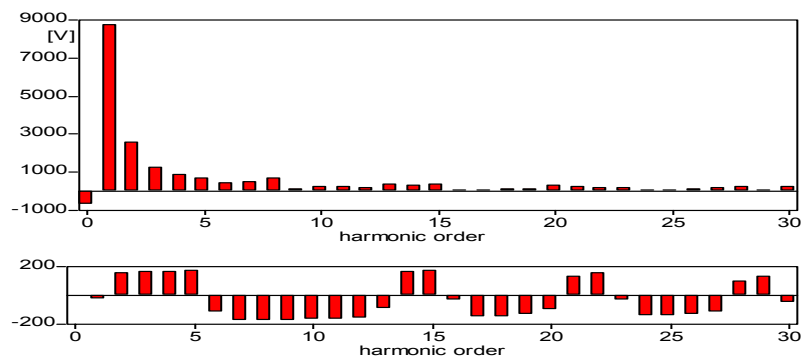
Figura 25. Voltaje con contenido de armónicos con carga no lineal.



MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 17/07/2007

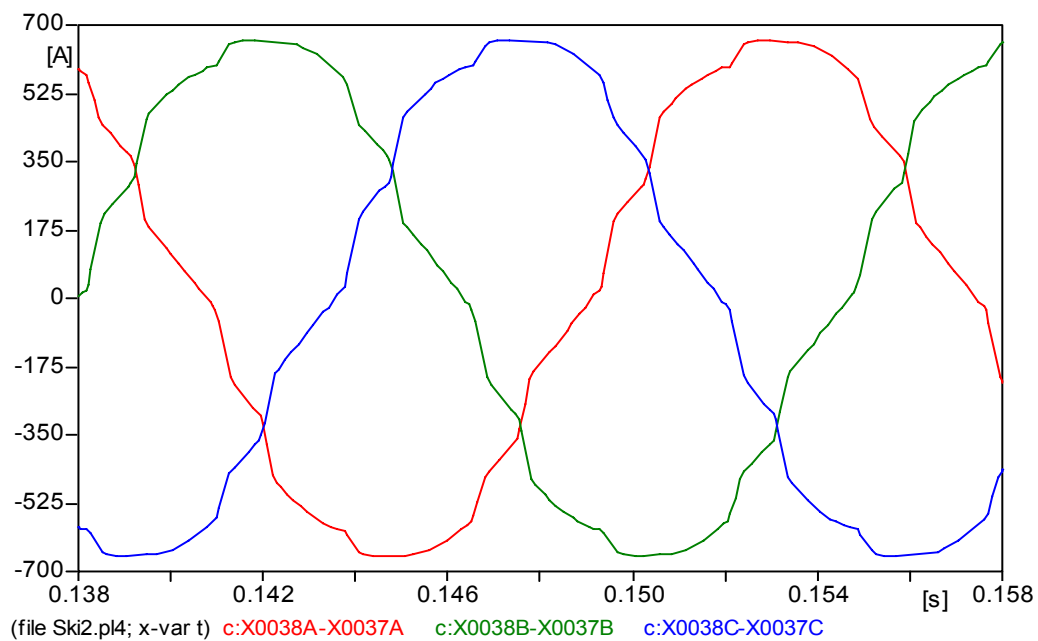
File Ski1.pl4 Variable v:X0025B [peak]

Initial Time: 0,15 Final Time: 0,17

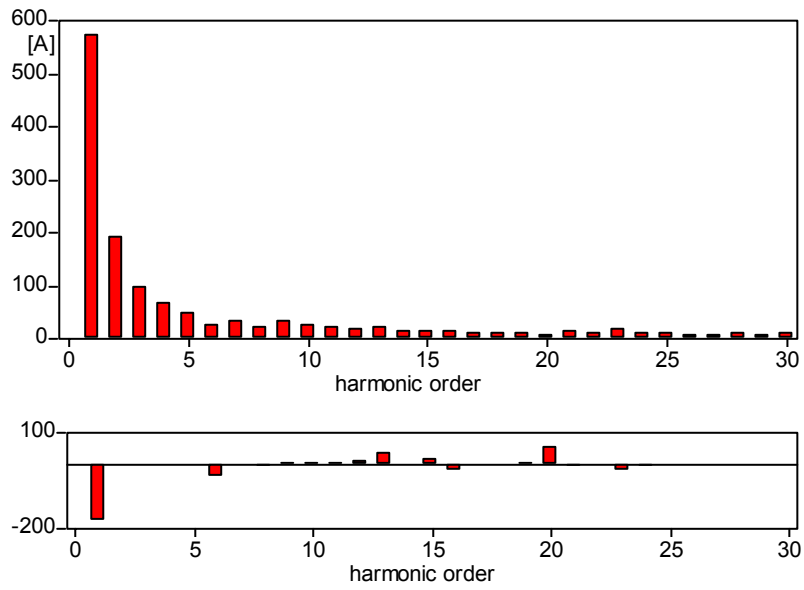


(Ver anexo 2)

Figura 26. Corriente con carga no lineal.

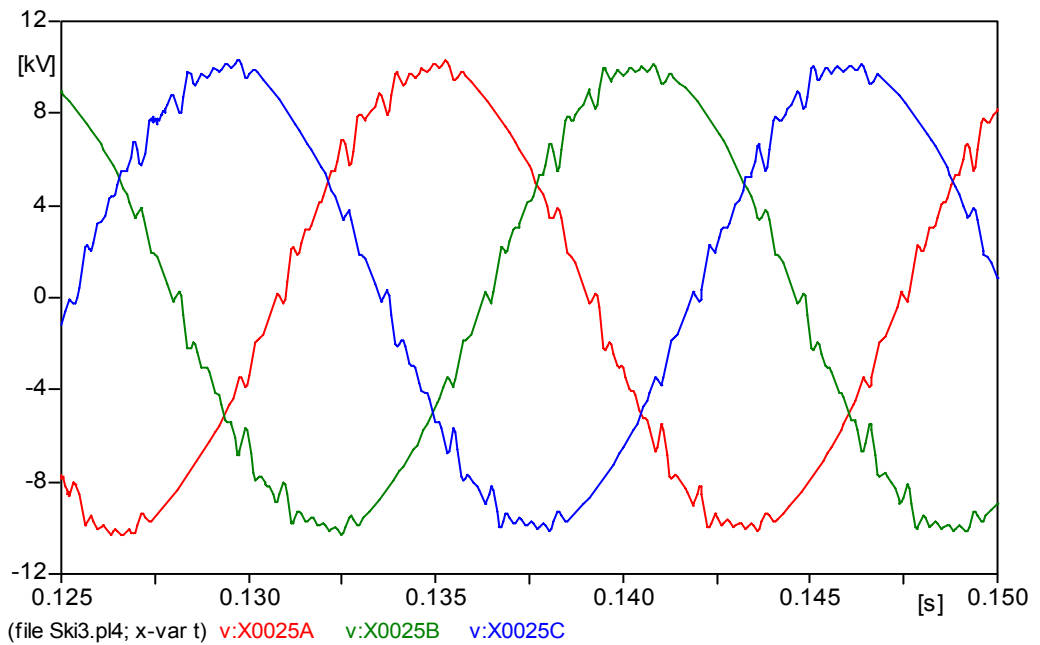


MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 22/07/2007
 File Ski2.pl4 Variable c:X0038C-X0037C [peak]
 Initial Time: 0,15 Final Time: 0,17

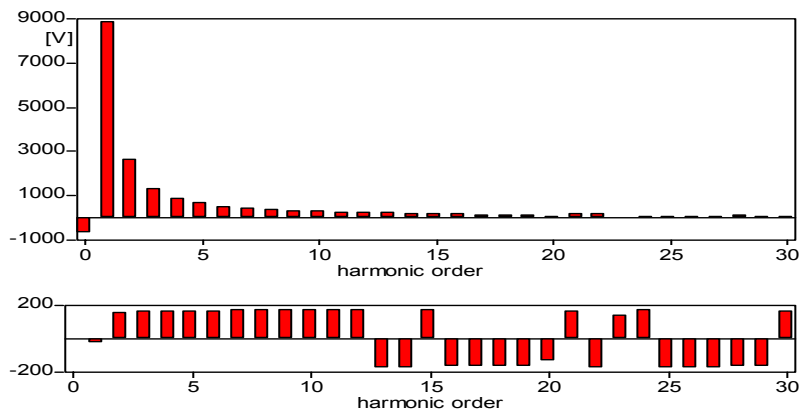


(Ver anexo 3)

Figura 27. Voltaje en el nodo de prueba con filtro.

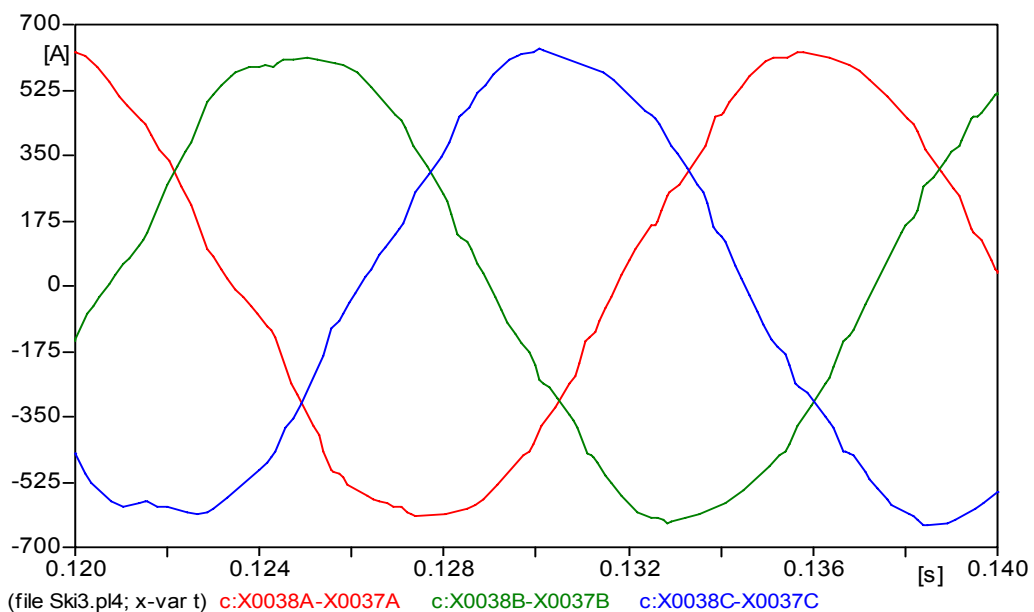


MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 17/07/2007
 File Ski3.pl4 Variable v:X0025B [peak]
 Initial Time: 0,15 Final Time: 0,17

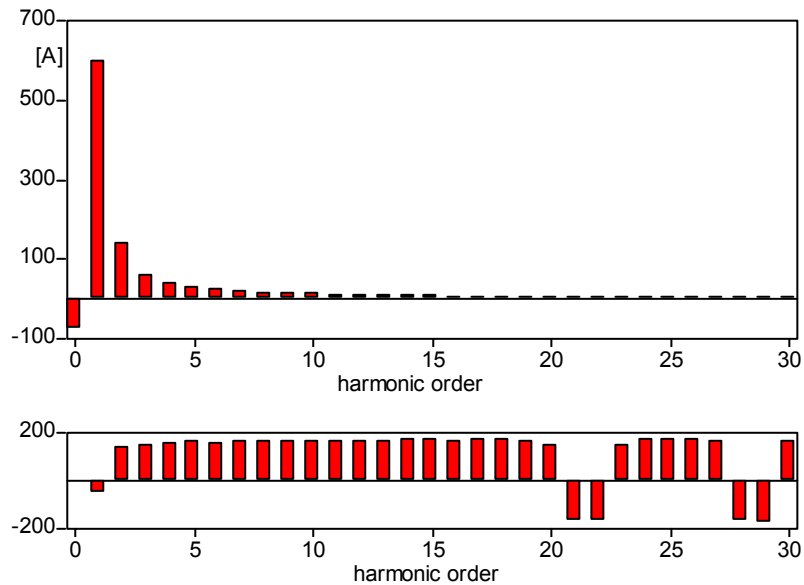


(Ver anexo 4)

Figura 28. Corriente con carga no lineal y filtro.



MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 22/07/2007
File Ski3.pl4 Variable c:X0038B-X0037B [peak]
Initial Time: 0,15 Final Time: 0,17



(Ver anexo 5)

3.2 SIMULACIÓN DE UNA PLANTA INDUSTRIAL

Consiste en una planta industrial alimentada desde un circuito de 34.5 Kv y potencia de cortocircuito de 250MVA. La planta la conforman un transformador de potencia de 10 Mva, 34.5/0.48 Kv, una carga no lineal de 4 Mw con factor de potencia de 0.85 y una carga lineal de 2.5 Mw y 2.0 Mvar.

La modelación en el ATP nos permite ver las formas de onda de las tensiones y corrientes en el lado de alta y de baja tensión del transformador.

También podemos llevar a cabo un barrido en frecuencia de la impedancia vista desde la barra de 480 V, lo cual nos permite determinar si al colocar un banco de condensadores para corregir el factor de potencia, se puede presentar resonancia paralela entre la inductancia de la red y la capacitancia del banco, lo cual puede

generar corrientes armónicas elevadas que pueden afectar al banco.

Figura 29. Sistema sin banco de condensadores.

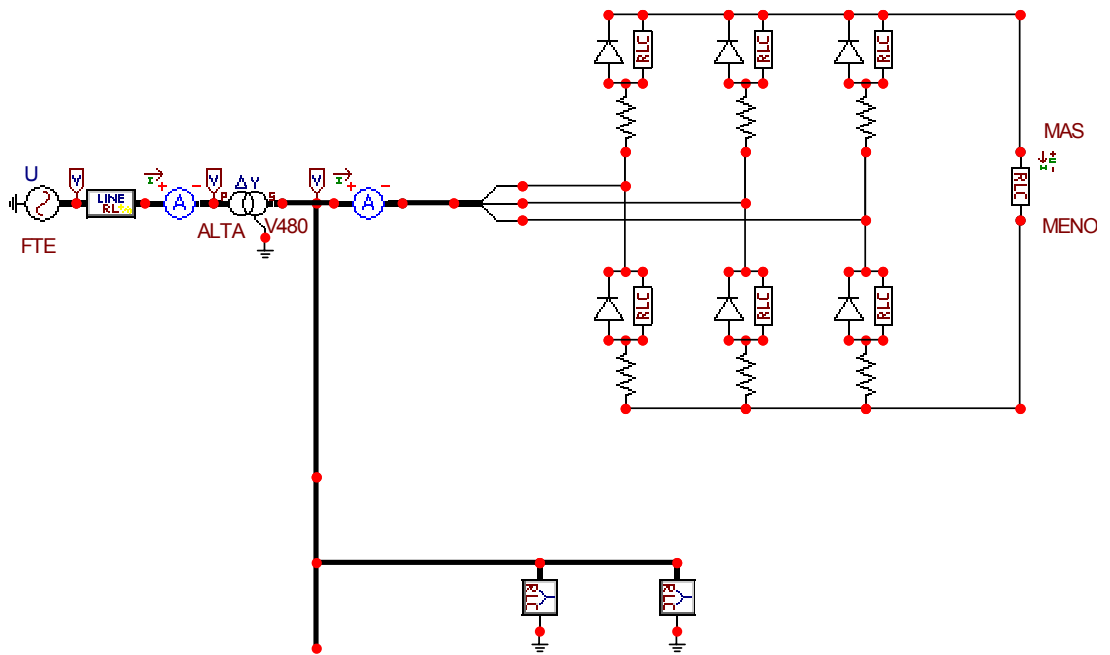


Figura 30. Tensión en la barra de 480 V.

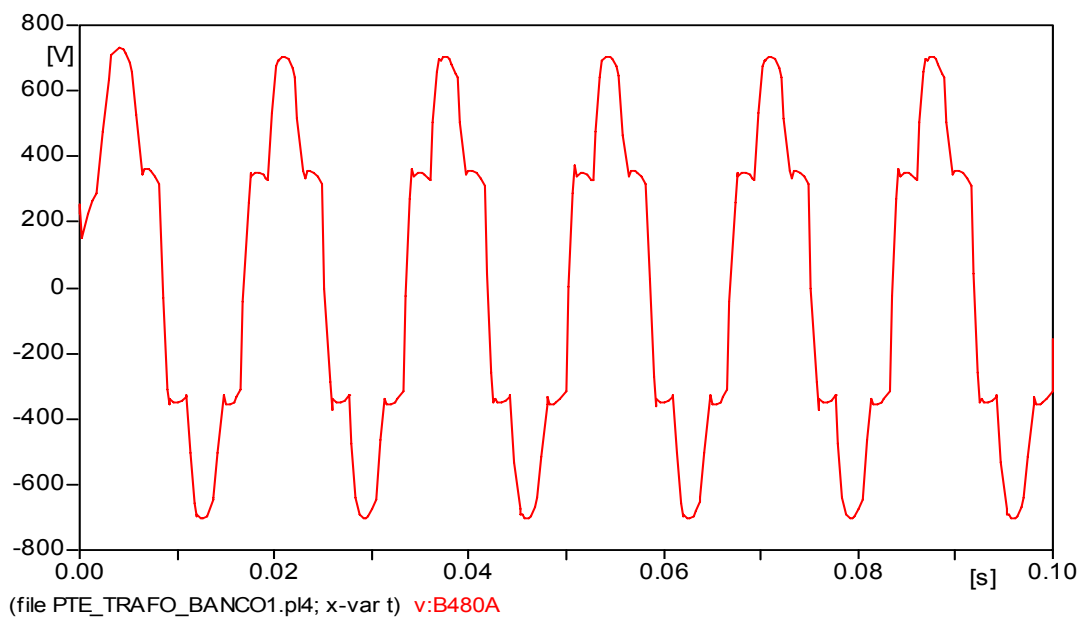
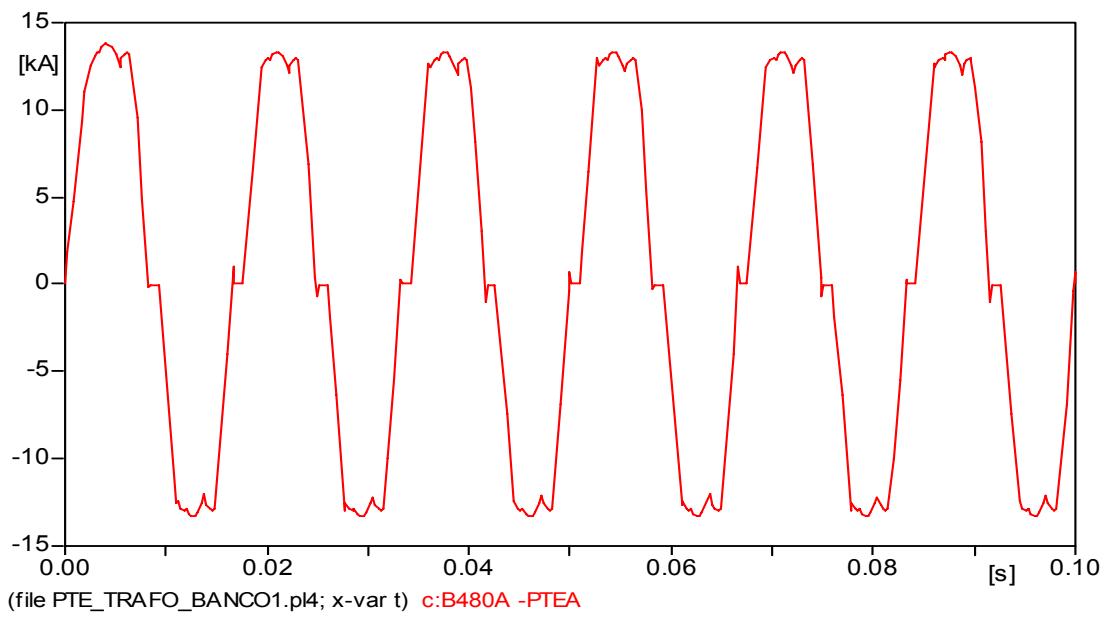
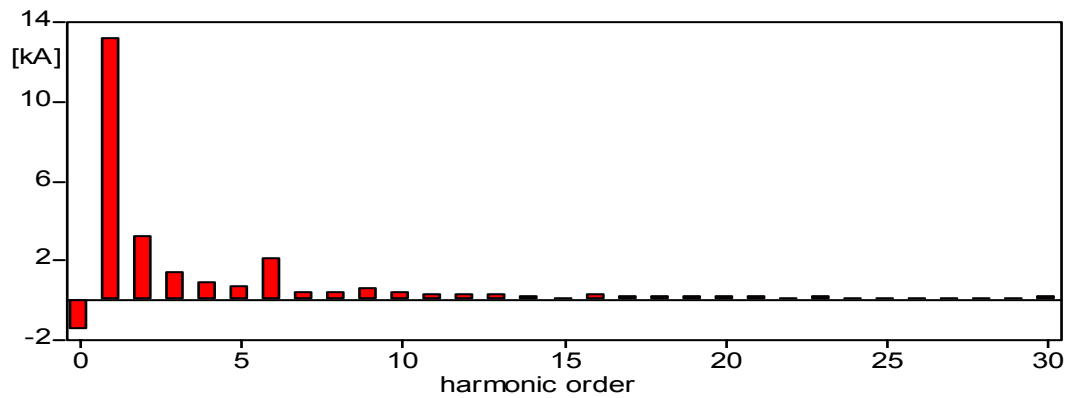


Figura 31. Corriente en la barra de 480 V.



MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 13/05/2007
File PTE_TRAFO_BANCO1.pl4 Variable c:B480A -PTEA [peak]
Initial Time: 0,08 Final Time: 0,1



(Ver anexo 6)

Figura 32. Sistema con banco de condensadores.

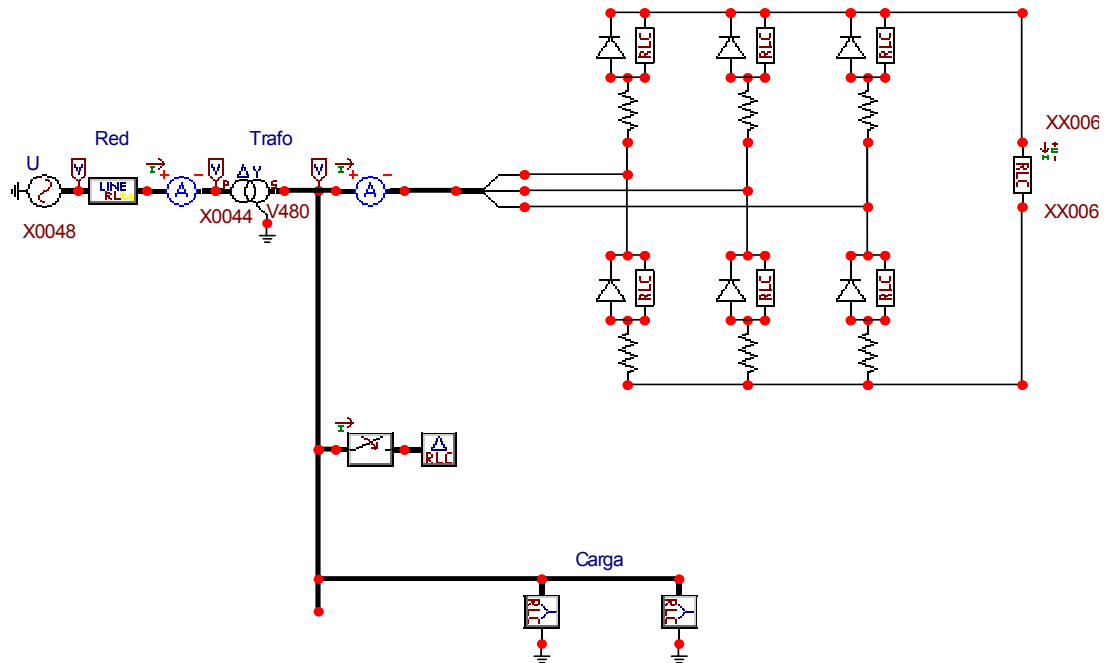


Figura 33. Tensión en la barra de 480 V con banco de condensadores.

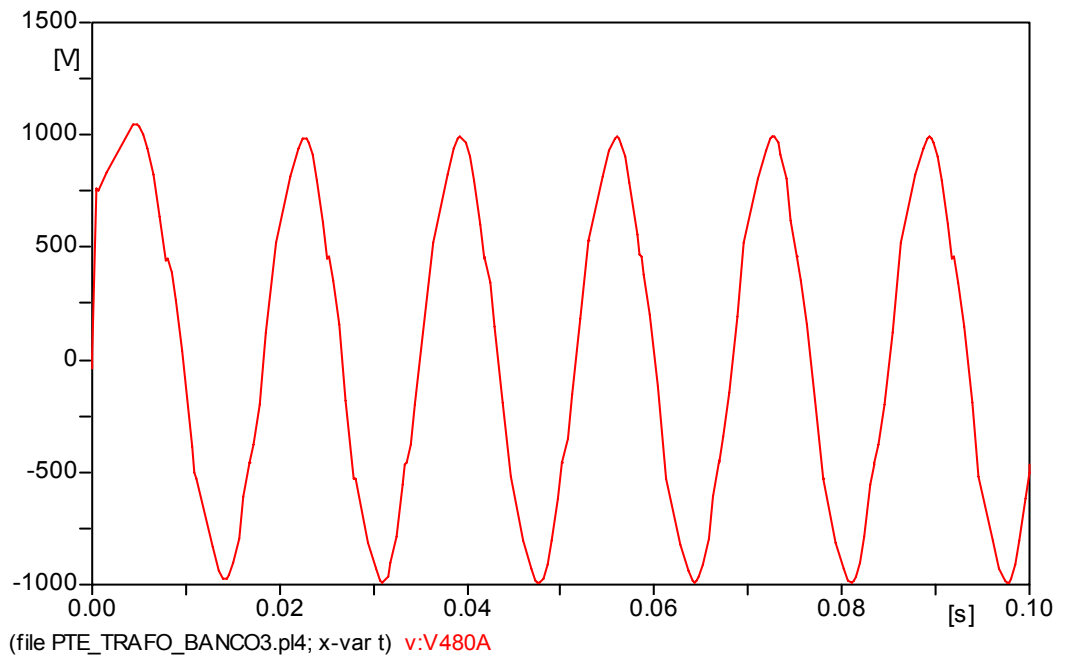
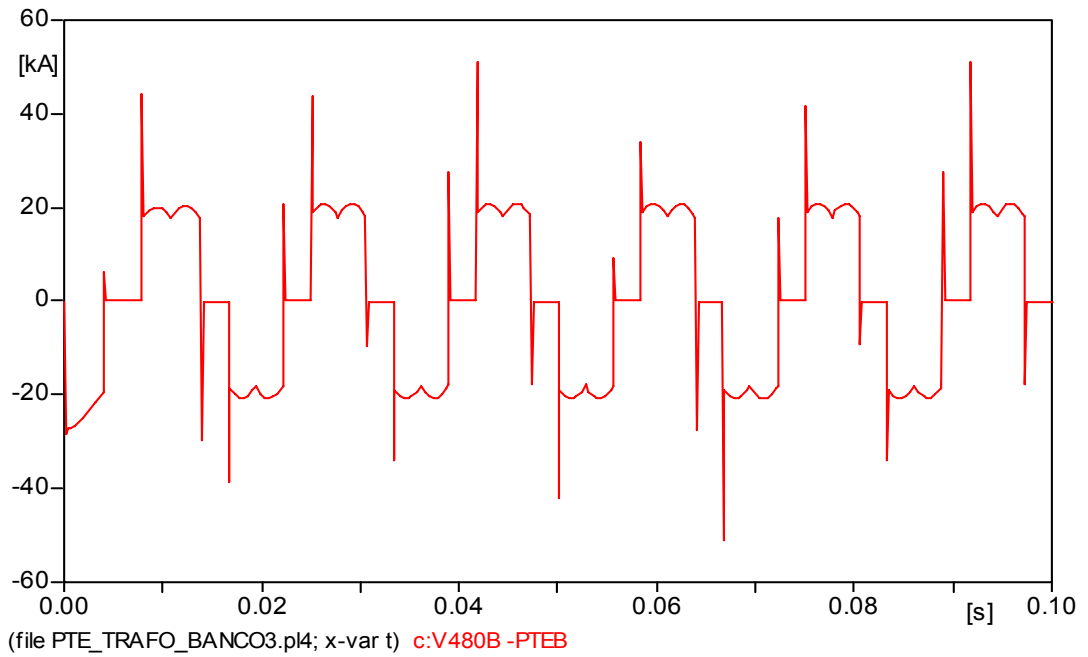


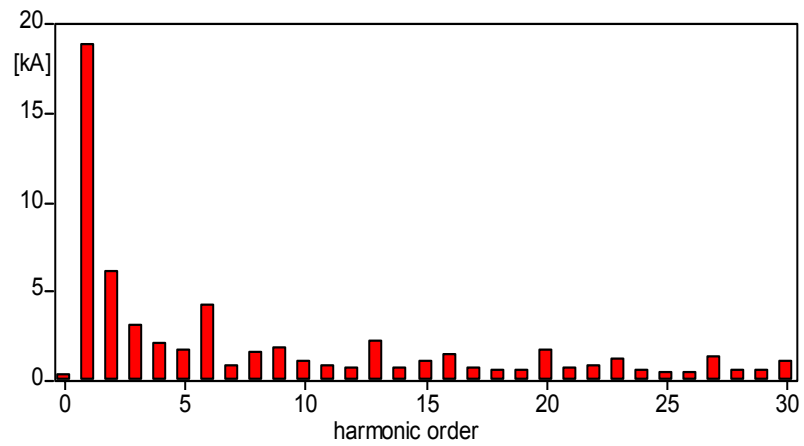
Figura 34. Corriente en 480 V con banco de condensadores.



MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 13/05/2007

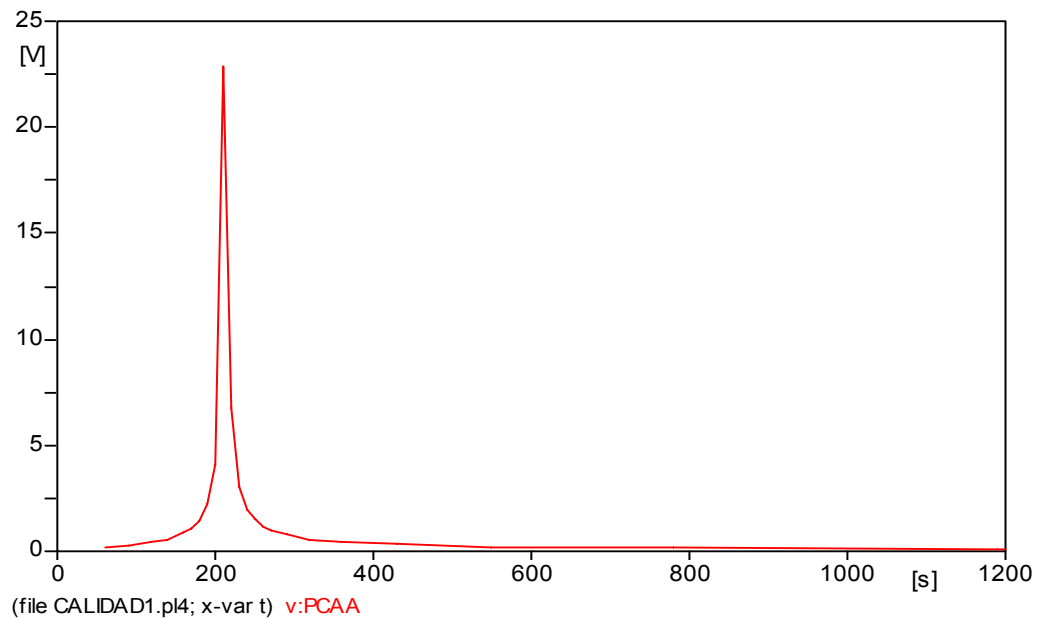
File PTE_TRAFO_BANCO3.pl4 Variable c:V480B -PTEB [peak]

Initial Time: 0,08 Final Time: 0,1



(Ver anexo 7)

Figura 35. Barrido de frecuencia con banco de condensadores.



Este gráfico nos indica que se puede presentar Resonancia Paralela en el lado de 480 V, a una frecuencia cercana a la cuarta armónica, lo cual puede producir elevadas corrientes armónicas que pueden destruir los condensadores.

Figura 36. Sistema con filtro de armónica 2.5.

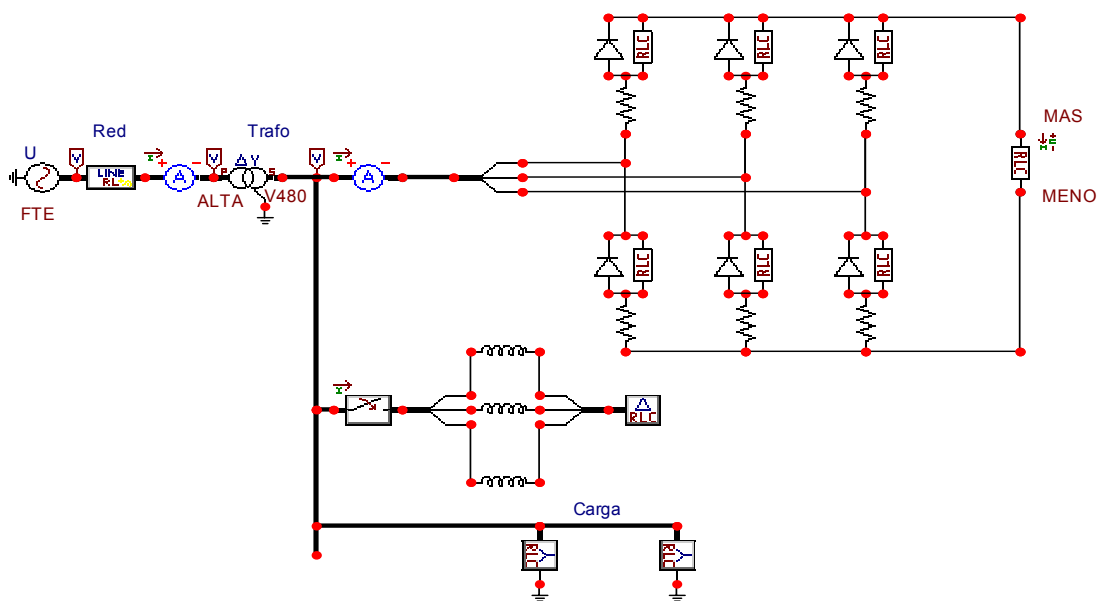


Figura 37. Tensión en la barra de 480 V con filtro.

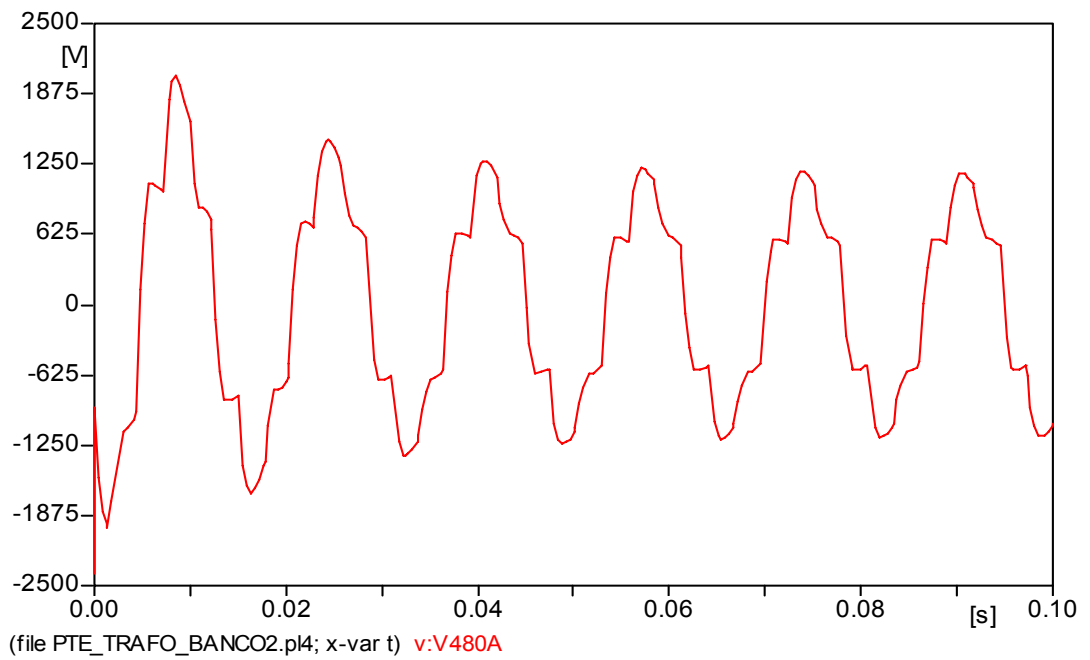
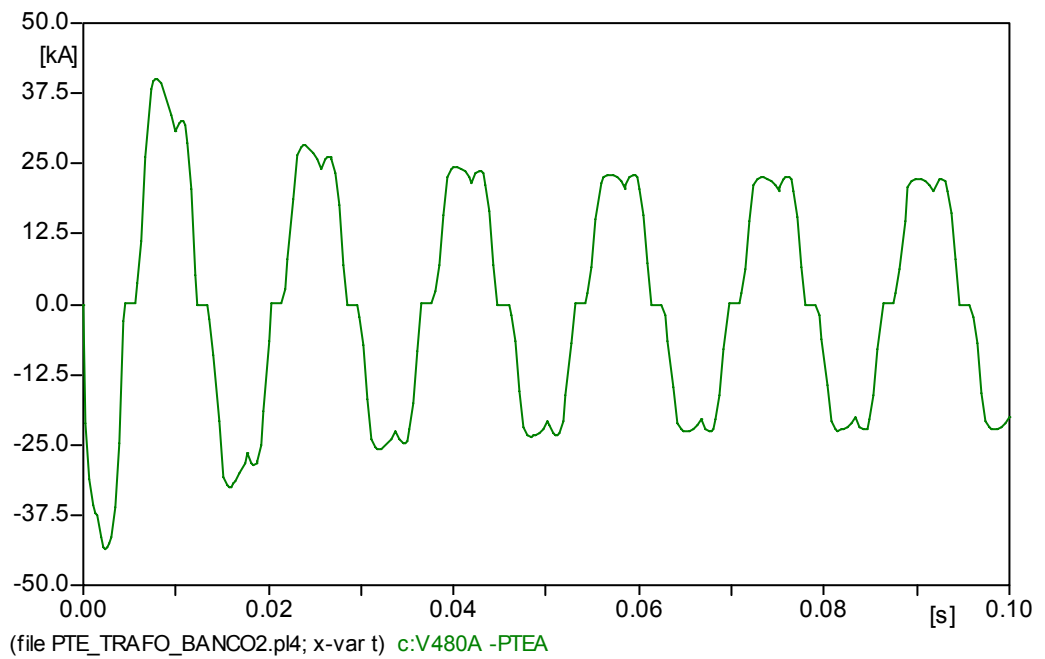


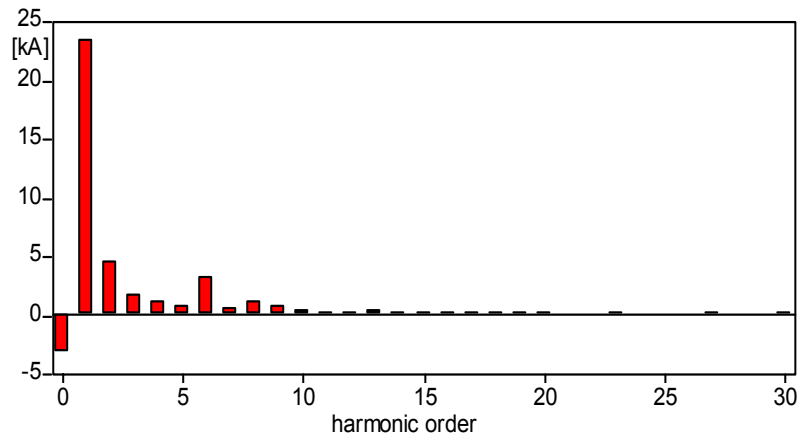
Figura 38. Corriente en 480 V con filtro.



MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 13/05/2007

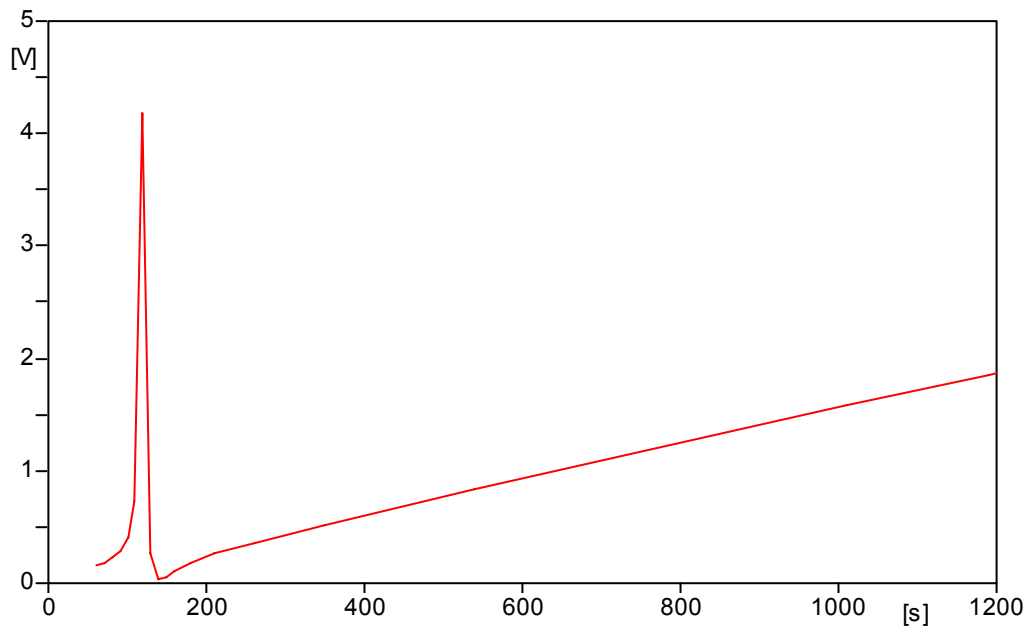
File PTE_TRAFO_BANCO2.pl4 Variable c:V480A -PTEA [peak]

Initial Time: 0,08 Final Time: 0,1



(Ver anexo 8)

Figura 39. Barrido de frecuencia con filtro sintonizado en la armónica 2.5.



(file CALIDAD1.pl4; x-var t) v:PCAA

Se observa en esta gráfica que la frecuencia de resonancia se ubica en un armónico más bajo y tiene un rango más estrecho, lo cual no produce corrientes elevadas.

CONCLUSIONES

El aumento en el uso de convertidores estáticos, tanto en equipos de control industrial como en aplicaciones domésticas, combinado con el aumento en el uso de los condensadores para el mejoramiento del factor de potencia, han creado problemas generalizados y debido a lo extenso de estos problemas, ha sido necesario desarrollar técnicas y lineamientos para la instalación de equipos y control de armónicos, estos dispositivos (equipos informáticos, impresoras, equipos de soldaduras, variadores de velocidad, instalaciones fotovoltaicas, aerogeneradores, entre otros) llamados fuente de armónicos o cargas no-lineales originan problemas tanto en los sistemas de potencia industrial y comercial, los cuales deben ser tenidos en cuenta.

La idea fundamental de este texto fue resaltar la importancia que tiene la calidad de la energía eléctrica en nuestras vidas y principalmente estudiar uno de los fenómenos que la afectan como son los armónicos, conocer su origen, sus causas, sus efectos, su generación y transmisión, etc; además realizamos dos simulaciones en ATP, una se hizo de un sistema de distribución y la otra de una planta industrial, para observar detalladamente las tensiones, las corrientes, los voltajes, etc.

En estas simulaciones se puede observar que un sistema de distribución con carga lineal posee una distorsión armónica total considerable ya que estas cargas no son puramente resistivas debido a que contienen una pequeña componente inductiva y capacitiva; al instalarle condensadores para corregir el factor de potencia se observa que pueden producir resonancia paralela con el sistema debido a la frecuencia de estos y aumento de la

distorsión armónica total debido a valores inadecuados de diseño e instalación en puntos indiferentes al origen del problema (flujo de potencia reactiva) y al instalar filtros ya descritos anteriormente se observa como mejora la distorsión armónica total debido a que estos presentan una baja impedancia con respecto al sistema haciendo circular las corrientes armónicas para determinadas frecuencias por estos filtros.

BIBLIOGRAFÍA

- ❖ DE TORRES, María Teresa. La calidad de la potencia eléctrica, Universidad de los Andes-Facultad de ingeniería. Santa Fé de Bogotá. pág. 1-20. 2003
- ❖ SANKARAN, C. Power Quality. Washintong D. C. pág. 12-24. 2002.
- ❖ GUERRA PACHECO, Jesús María. Guía para un estudio de armónicos en los sistemas de potencia industrial y comerciadle media o baja tensión. Universidad Nacional de Colombia. Mc Graw Hill. 2 ed. pág. 27-32. 2004.
- ❖ GRADY, Mack. Understanding Power System Harmonics. University of Texas at Austin. pág. 21-49. 2003.

ANEXOS

Anexo 1. Contenido armónico del voltaje en el nodo de prueba solo con carga lineal.

MC's PlotXY - Fourier chart(s).
File Ski0.pl4 Variable v:X0087B [peak]
Initial Time: 0,15 Final Time: 0,17

Harm.	Amplitude	Phase
0	-706,44	0,0000E+00
1	9048,7	-30,773
2	2758,8	163,63
3	1370,1	169,17
4	940,78	172,09
5	723,95	173,93
6	590,98	175,22
7	500,39	176,18
8	434,4	176,94
9	384,06	177,57
10	344,34	178,1
11	312,16	178,57
12	285,53	178,98
13	263,14	179,35
14	244,03	179,7
15	227,52	-179,99
16	213,12	-179,69
17	200,45	-179,41
18	189,21	-179,15
19	179,16	-178,89
20	170,14	-178,65
21	161,98	-178,42
22	154,58	-178,19
23	147,82	-177,97
24	141,64	-177,75
25	135,95	-177,54
26	130,7	-177,33
27	125,85	-177,13
28	121,34	-176,93
29	117,15	-176,74
30	113,24	-176,55

THD=39,35%

Anexo 2. Contenido armónico del voltaje con contenido de armónicos con carga no lineal.

MC's PlotXY - Fourier chart(s).
File Ski1.pl4 Variable v:X0025B [peak]
Initial Time: 0,15 Final Time: 0,17

Harm.	Amplitude	Phase
0	-739,18	0,0000E+00
1	8762,3	-32,918
2	2626	163,25
3	1307,8	170,06
4	908,35	174,05
5	714,77	176,8
6	474,18	-118,83
7	551,95	-177,98
8	709,1	-175,47
9	174,01	-177
10	258,08	-172,5
11	258,72	-168,51
12	249,81	-160,17
13	435,07	-99,247
14	331,81	168,44
15	420,55	175,39
16	113,99	-40,17
17	114,25	-151,33
18	142,22	-150,96
19	166,76	-139,96
20	359,87	-105,81
21	263,04	135,99
22	233,23	159,23
23	230,47	-40,42
24	78,219	-143,48
25	101,29	-147,22
26	127	-138,41
27	243,74	-118,21
28	252,03	101,64
29	103,48	141
30	256,92	-51,593

THD=40,008%

Anexo 3. Contenido armónico de la corriente con carga no lineal.

MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 22/07/2007

File Ski2.pl4 Variable c:X0038C-X0037C [peak]

Initial Time: 0,15 Final Time: 0,17

Harm.	Amplitude	Phase
0	1,0466	0,0000E+00
1	574,37	-179,77
2	195,29	0,59976
3	99,043	0,92947
4	68,308	1,2394
5	52,457	1,5401
6	27,561	-40,74
7	34,267	0,41327
8	23,447	-9,9618
9	34,455	10,762
10	27,702	8,8566
11	24,471	9,9232
12	22,252	13,493
13	25,439	42,696
14	18,582	2,8278
15	18,157	19,884
16	16,646	-22,49
17	14,279	-2,2051
18	13,012	4,0482
19	11,466	11,898
20	9,6903	60,838
21	16,566	-12,119
22	11,732	3,9571
23	20,363	-24,658
24	12,752	-8,066
25	11,444	-4,518
26	10,508	-2,5524
27	9,0491	-0,48761
28	11,79-2,0651	
29	10,077	-0,43782
30	11,576	-2,4168

THD=44,314%

Anexo 4. Contenido armónico del voltaje en el nodo de prueba con filtro.

MC's PlotXY - Fourier chart(s).
File Ski3.pl4 Variable v:X0025B [peak]
Initial Time: 0,15 Final Time: 0,17

Harm.	Amplitude	Phase
0	-748,07	0,0000E+00
1	8930,5	-33,136
2	2671,8	162,38
3	1321,4	168,61
4	907,2172,07	
5	705,42	174,39
6	546,16	171,32
7	476,91	177,26
8	402,4178,46	
9	374,87	176,15
10	331,85	178,06
11	299,99	178,99
12	274,16	179,79
13	252,84	-179,85
14	234,9-179,2	
15	216,74	178,1
16	198,55	-172,47
17	186,78	-174,43
18	174,11	-173,2
19	158,75	-169,67
20	122,39	-141,66
21	212,82	173,43
22	195,44	-178,7
23	46,141	144,1
24	118,61	179,67
25	119,61	-178,44
26	114,34	-177,74
27	98,298	-179,75
28	141,57	-170,06
29	119,73	-171,28
30	107,53	170,04

THD=38,469%

Anexo 5. Contenido armónico de la corriente con carga no lineal y filtro.

MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 22/07/2007
File Ski3.pl4 Variable c:X0038B-X0037B [peak]
Initial Time: 0,15 Final Time: 0,17

Harm.	Amplitude	Phase
0	-75,508	0,0000E+00
1	600,73	-55,674
2	142,4144	
3	64,748	154,49
4	42,631	160,88
5	31,791	166,68
6	27,135	166,32
7	22,172	169,34
8	20,096	170,89
9	17,358	171,25
10	15,309	172,46
11	13,769	173,37
12	12,464	173,94
13	10,763	171,49
14	10,739	177,41
15	10,375	176,63
16	9,2167	174,54
17	8,6191	175,77
18	7,9941	175,71
19	7,2738	174,22
20	5,5677	156,25
21	8,6209	-169,37
22	7,3047	-169,19
23	8,0338	156,03
24	6,5495	175,32
25	6,1655	177,18
26	5,8473	177,21
27	5,5163	173,47
28	5,6527	-171,01
29	5,2216	-176,08
30	5,7219	174,8

THD=29,256%

Anexo 6. Contenido armónico de la corriente en la barra de 480 V.

MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 13/05/2007
File PTE_TRAFO_BANCO1.pl4 Variable c:B480A -PTEA [peak]
Initial Time: 0,08 Final Time: 0,1

Harm.	Amplitude	Phase
0	-1537,7	0,0000E+00
1	13202	-50,149
2	3236,2	149,51
3	1493,4	158,61
4	989,67	163,98
5	709,49	168,41
6	2138,2	134,83
7	495,74	155,59
8	502,22	96,24
9	696,05	-161,44
10	462,3-170,65	
11	395,62	-174,13
12	338,75	-175,29
13	384,74	141,31
14	272,83	-159,76
15	155,84	-162,56
16	399,42	-169,73
17	276,56	-168,28
18	255,28	-170,02
19	239,27	-167,59
20	228,19	177,36
21	205,93	-157,95
22	163,88	-162,65
23	237,05	-159,31
24	180,09	-158,97
25	172,56	-164,05
26	169,41	-163,32
27	149,95	178,04
28	172,38	-140,62
29	138,02	-146,81
30	223,72	-157,29

THD=34,892%

Anexo 7. Contenido armónico de la corriente en 480 V con banco de condensadores.

MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 13/05/2007

File PTE_TRAFO_BANCO3.pl4 Variable c:V480B -PTEB [peak]

Initial Time: 0,08 Final Time: 0,1

Harm. Amplitude Phase

Harm.	Amplitude	Phase
0	480,89	0,0000E+00
1	18900	174,73
2	6195,6	2,3183
3	3153,5	6,7105
4	2178,2	10,715
5	1776	15,449
6	4335,7	151,59
7	939,71	48,106
8	1735,6	130,44
9	1984,5	-2,3163
10	1160	15,165
11	904,85	25,851
12	853,43	36,647
13	2266,2	119,8
14	851,99	14,605
15	1147,5	91,429
16	1593,8	-26,056
17	858,97	9,2454
18	678,78	26,375
19	669,78	34,627
20	1771,7	90,335
21	759,51	-29,145
22	919,34	54,668
23	1370,8	-59,078
24	674,99	-1,1089
25	539,62	22,799
26	508,06	27,134
27	1463,1	61,21
28	745,3	-82,345
29	737,93	17,809
30	1201,3	-99,581

THD=55,304%

Anexo 8. Contenido armónico de la corriente en 480 V con filtro.

MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 13/05/2007
File PTE_TRAFO_BANCO2.pl4 Variable c:V480A -PTEA [peak]
Initial Time: 0,08 Final Time: 0,1

Harm.	Amplitude	Phase
0	-3393,4	0,0000E+00
1	23564	-110,73
2	4612,1	52,37
3	1854,2	38,767
4	1142,6	27,818
5	840,14	17,192
6	3392,9	132,61
7	599,54	-10,609
8	1227	-53,139
9	880,88	77,056
10	472,06	54,238
11	377,32	45,276
12	335,26	44,304
13	544,53	78,602
14	255,81	-2,4069
15	211,32	-15,731
16	372,44	45,085
17	255,86	31,335
18	232,729	651
19	229,25	32,356
20	329,14	50,521
21	152,76	-30,311
22	121,87	-12,646
23	318,72	28,062
24	180,85	16,253
25	167,35	15,114
26	166,35	15,094
27	197,19	16,786
28	54,365	-3,6316
29	102,47	10,783
30	190,12	5767

THD=27,663%