



REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA

“Dr. Antonio Núñez Jiménez”

Trabajo de Diploma

En opción al Título de Ingeniero Eléctrico.

TÍTULO: Propuesta para la reducción de Armónicos en La Empresa de Ingeniería y Proyectos del Níquel.

Diplomante: Yaritcel Cobas Galano.

Tutores: Ing. Osmany Pérez Aballe.

Ing. Gregorio Cobas Tabera.

Curso, 2009-2010

“Año 52 de la Revolución”



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD DE METALURGIA ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA

***Propuesta para la reducción de Armónicos en La
Empresa de Ingeniería y Proyectos del Níquel.***

Diplomante: Yaritcel Cobas Galano.

Tutores: Ing. Osmany Pérez Aballe.

Ing. Gregorio Cobas Tabera.

Curso, 2009-2010

“Año 52 de la Revolución”



Declaración de autoridad

Yo: Yaritcel Cobas Galano.

Autor de este trabajo de Diploma tutorado por el Ing. Osmany Pérez Aballe y el Ing. Gregorio Cobas Tabera certifico la propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo para fines docentes y educativos.

Yaritcel Cobas galano.

(Autor)

Ing. Osmany Pérez Aballe.

(Tutor)

Ing. Gregorio Cobas Tabera.

(Tutor)



Pensamiento

La felicidad, no consiste en alcanzar las cosas que nos gusten; sino, en que nos gusten las cosas que hemos alcanzado.

José María Vargas Vila



Dedicatoria

Dedico este trabajo de diploma:

*A mi madre **Doris Galano Silva:***

Porque gracias a ella he llegado hasta aquí. Porque sin su apoyo, confianza, cariño y dedicación, hoy no sería lo que soy. Gracias por enseñarme a saber siempre lo que quiero, por dejarme decidir y no imponerme nada, Gracias por creer en mí.

*A mi esposo **Weyler Rodríguez De Armas:***

Por ser a tí a quien Amo, por ser mi equilibrio para caminar y una parte fundamental en mi vida.

*A mi hijo **Weyler Rodríguez Cobas:***

Por ser mi fuente de inspiración, por haber llegado y cambiado el sentido a mi vida, por ser todo lo que desde que naciste soy.

*A mi padre **Morialdo Cobas Tabera:***

Por tener las mismas ganas que yo de que terminara esta carrera universitaria, y siempre brindarme su amor y ayuda cuando se lo he pedido.



Agradecimientos

Agradezco:

A mis Padres: *a ustedes dos que han estado a mi lado en el momento que pensé que se derrumbaba mi vida, por haberme traído a la vida. Y enseñarme a andar por ella.*

A Weyler Rodríguez de Armas (mi esposo):

Por velar por nuestro maravilloso bebé mientras le dediqué horas a este trabajo, por las madrugadas que te hice desvelar, gracias por todo lo que me has dado, por todo lo que tengo, por tu amor, gracias.

A Inalvis De Armas:

Por ser una de las principales personas que permitieron con su apoyo que realizara mi sueño. Por apoyarme con mi bello niño, por preocuparte por mí, y por tu paciencia para conmigo.

A Osmany Pérez:

Mi compañero y tutor del trabajo, por ayudarme en toda la investigación, por preocuparse tanto por mí y haberme dedicado tanto tiempo en el trabajo.

A Gregorio Cobas:

Porque a pesar de tu carga en el trabajo aceptaste ser mi tutor, por atenderme cuando lo necesité, y darme el empujón y conocimiento para llegar al fin de mi investigación.

A mi madre Doris Galano:

Por preocuparte por mis cosas y por imprimirme los libros para estudiar.

A mis compañeros de aula:

Por mantenernos como equipo y haber compartido noches y fines de semanas de proyectos en estos años.

A Ignacio Romero (Naché):

Por el tiempo que dedicaste al trabajo mediante mi tutor, gracias por brindarnos tus conocimientos.

A todos y A Dios.

Gracias.



RESUMEN

El siguiente trabajo de diploma incluye un estudio de los diferentes factores que afectan el suministro eléctrico en La Empresa de Ingeniería y Proyectos del Níquel. Se analizará el comportamiento de los armónicos en el Sistema Eléctrico Interno de la Empresa, analizando el comportamiento de las cargas fundamentales de la entidad que son los sistemas de cómputo, equipamiento sensible de un alto costo, adquiridos para producir, procesar, almacenar y proteger toda la información que se genera en la Empresa con el objetivo de preservar su activo fundamental, que es precisamente esta, la información, protegiendo contra variaciones o perturbaciones que se producen en el sistema eléctrico actual y que resultan inadmisibles para este tipo de equipamiento.

Se evaluará la situación energética de la empresa, haciendo una breve descripción de la misma. Se mostrarán los indicadores energéticos utilizados y se abordarán sobre las herramientas utilizadas para el diagnóstico sobre la situación actual del suministro de energía a este tipo de consumidor (ETI). Con estas herramientas se determinarán las regularidades del consumo y de la calidad de la energía; se analizará el comportamiento de los armónicos en el Sistema Eléctrico Interno de la Empresa; así como la propuesta de dos variantes para el mejoramiento de la calidad de la energía (utilización de filtros de armónicos y el cambio de conexionado en los transformadores de suministro de la empresa).

Se definirán y recomendarán las medidas a establecer para el mejoramiento de la energía dentro de los límites permisibles, las normas y requerimientos de seguridad, para la operación eficiente y segura de la instalación con nuevos elementos.



SUMMARY

The following diploma work includes a study of the different factors that affect the electric supply in The Company of Engineering and Project of the Nickel. The behaviour of the harmonic will be analyzed in the Internal Electric System of the Company, analyzing the behaviour of the fundamental loads of the entity that are the computation systems, sensitive equipment of a high cost acquired to take place, to process, to store and to protect all the information that is generated in the Company with the objective of preserving its fundamental asset that is in fact this information, protecting against variations or interferences that take place in the current electric system and that they are inadmissible for this type of equipment of technology of the information.

The energy situation of the company will be evaluated, making a brief description of the same one. The used energy indicators were shown and they were approached on the tools used for the diagnosis on the current situation from the energy supply to client type (ETI). With these tools the regularities of the consumption were determined and of the quality of the energy; the behaviour of the harmonic will be analyzed in the Internal Electric System of the Company; as well as the proposal of two variants for the improvement of the quality of the energy: use of filters of harmonic and the connexions change in the transformers of supply of the company.

They will be defined and recommended the measures to settle down for the improvement of the energy inside the permissible limits, the norms and requirements of security, for the efficient and sure operation of the installation with new elements.



ÍNDICE

Introducción General.	11
Situación problemática.....	12
Campo de acción.	12
Objeto de estudio.....	12
Objetivo.	12
Objetivos Específicos.....	13
Hipótesis.....	13
Tareas.	13
Resultados esperados.	13
Capitulo I: Marco teórico conceptual.....	14
1.1 Estado del Arte.....	14
1.1.1 Teoría de los armónicos.	16
1.1.2 Que son los armónicos.	16
1.1.3 Cómo se producen los armónicos.	18
1.1.4 Límites aceptables y normas.	19
1.1.5 Clasificación de los armónicos.	20
1.1.6 Armónicos de tensión.	21
1.1.7 Armónico de corriente I(a).	22
1.1.8 Armónico cero.	22
1.1.9 Trayectoria de los armónicos.	23
1.1.10 Trayectoria de los armónicos en un sistema inductivo.....	24
1.1.11 Efectos perjudiciales de los armónicos.	24
1.1.12 Efectos de los armónicos en los sistemas eléctricos.....	29
1.1.13 Efectos en los equipos electrónicos sensibles.	29
1.1.14 Efectos en los condensadores.	30
1.1.15 Efectos de los capacitores en las trayectorias de los armónicos.	31
1.1.16 Efectos de los armónicos en transformadores.	31
1.1.17 Efectos de los armónicos en otros equipos.	32
1.1.18 Efectos en el conductor neutro.....	32
1.2 Fenómeno de resonancia en la red.....	33
1.2.1 Fuentes que producen los armónicos en el sistema eléctrico.	34



1.2.2 Acciones de prevención y corrección de efecto de los armónicos.	35
1.3 Medición.....	35
1.3.1Características del equipo de medición.	35
1.3.2 Puntos de medición.....	36
1.3.3 Punto de medición del nivel de armónicos.	38
1.3.4 Uso de los dispositivos de medida.	39
1.4 Las UPS.	39
1.4.1 Clasificación de los distintos tipos de UPS.	40
1.4.2 Problemas eléctricos que las UPS pueden solucionar.....	41
1.5 Filtro.	42
1.5.1 Principio de funcionamiento de los filtros activos, híbridos y pasivos.	43
1.5.2 Principio de funcionamiento.	43
1.5.3 Filtros armónicos, sus funciones y características generales.	44
1.5.4 Criterios de ubicación del filtro.	44
1.5.5 Problemas de los filtros.....	45
1.6 Transformadores.	45
1.6.1 Conexiones de transformadores trifásicos.	46
1.7 Conclusiones.....	46
Capítulo II Análisis energético de la Empresa Ceproníquel.....	47
2.1 Introducción.	47
2.2 Caracterización de la Empresa Ceproníquel.	47
2.2.1 Suministro Eléctrico de la Empresa de Ingeniería y Proyecto del Níquel.	48
2.3 Levantamiento de las cargas.	49
2.4 Características del equipo de medición.	51
2.4.1 Características del Software.....	53
2.5 Análisis del comportamiento de las cargas.....	54
2.5.1 Fuentes conmutadas.	56
2.5.2 Categorización de las fuentes de poder.....	58
2.6 Mediciones Realizadas.	61
2.6.1 Punto donde se realizan las mediciones.	61
CAPITULO III Métodos para la disminución de los armónicos.	67
3.1 Introducción.	67
3.2 Propuesta 1 (Filtro pasa bajo).	67
3.2.1 Ecuaciones y datos generales para el diseño del filtro Pasa Bajo.....	68



3.2.2 Simulación.	70
3.3 Propuesta 2 (Cambio de conexionado del secundario del transformador).....	71
3.3.1 Características del tipo de conexión estrella-delta	72
3.3.2 Ventajas y desventajas de la conexión delta-estrella con respecto estrella-delta	73
3.4 Energía consumida por los armónicos.	74
3.5 Análisis de las pérdidas por concepto de armónicos.	74
3.6 Conclusiones.....	76
Conclusiones Generales.	77
Recomendaciones.	78
BIBLIOGRAFÍA.....	79
Anexos	81
Anexo # 1.....	81
Anexo # 2.....	83
Anexo # 3.....	84
Anexo # 4.....	85



INTRODUCCIÓN GENERAL.

Normalmente cometemos errores al utilizar términos como “Calidad de Servicio Eléctrico” y “Componentes Armónicos en redes Eléctricas”, debido a que encierran variados conceptos y definiciones, los cuales serán abordados en el presente trabajo. Luego, dentro de este conocimiento, al estudiar las perturbaciones eléctricas, es importante introducir algunas nociones para entender el origen, el mecanismo de generación y la posible solución al problema armónico en instalaciones eléctricas.

La calidad de servicio es el conjunto de propiedades y estándares normales que, conforme a la ley y el reglamento vigente, son inherentes a la actividad de distribución de electricidad concesionada, y constituyen condiciones bajo las cuales dicha actividad debe desarrollarse.

La utilización de energía eléctrica requiere un suministro de potencia con frecuencias y tensiones controlables, mientras que su generación y transmisión se realizan a niveles nominalmente constantes.

Esta discrepancia necesita un acondicionamiento o conversión de la potencia que, en general, se realiza mediante circuitos no lineales. Estos circuitos están constituidos por semiconductores que distorsionan las ondas de tensión y corriente.

El comportamiento de circuitos con variaciones topológicas que afectan a las formas de onda no puede ser analizado mediante la teoría fasorial de frecuencia única, se aplica la transformada de Fourier para representar este fenómeno. En estos casos, el estado estacionario es una sucesión de estados transitorios, cuyo estudio requiere de un modelo matemático representado con las herramientas antes mencionadas.

Es importante conocer, antes de estudiar la importancia de estas perturbaciones presentes en las redes eléctricas, que los armónicos son los subproductos de la electrónica moderna, y se manifiestan especialmente donde hay un gran número de computadores, impresoras, motores de velocidad regulable, equipos médicos, ascensores y otros equipos que absorben corriente en forma de impulsos cortos. Estos equipos están diseñados para absorber corriente durante sólo una fracción controlada de la onda de tensión



de alimentación. Esto provoca armónicos en la corriente de carga y, por ende, la distorsión de dicha onda de tensión. Además el sobrecalentamiento de transformadores y conductores neutros; y en ocasiones, el disparo de interruptores automáticos.

Considerando esto, o sea la existencia de armónicos circulantes y las pérdidas provocadas por estas, nos hemos planteado como problema de la presente investigación la necesidad de realizar un estudio que permita proponer métodos para disminuir los niveles de armónicos generados en el sistema interno de la Empresa Ceproníquel.

Para darle solución al problema antes planteado nos proponemos como objetivo general:

Valorar las soluciones de reducir, mediante filtrado, la distorsión de las ondas de tensión y corriente producidas por el sistema eléctrico interno y que contribuya así al mejoramiento de la calidad de la energía¹ del sistema y su eficiencia.

Situación problemática.

Aumento de los armónicos de tensión en las cargas de la instalación después de la conexión de las UPS (proyecto 315).

Campo de acción.

Los armónicos de tensión.

Objeto de estudio.

Las redes de suministro eléctrico en la Empresa de Ingeniería y Proyectos del Níquel.

Objetivo.

Reducción de Armónicos de tensión.

¹Energía Eléctrica, Un Producto con Calidad, CEL. Horacio Torres. ICONTEC.



Objetivos Específicos.

- Evaluar el comportamiento Energético de las redes de suministro Eléctrico de la entidad.
- Proponer métodos para reducir la amplitud de los armónicos.

Hipótesis.

Si se ejecutan una de las variantes propuestas: el filtro para armónicos, o el cambio de conexionado en el secundario del transformador; entonces se lograría la disminución de los armónicos de tensión a valores normados.

Tareas.

- Búsqueda bibliográfica.
- Levantamiento de cargas conectadas a las UPS.
- Realizar mediciones.
- Análisis he interpretación de la mediciones.
- Procesar la información.
- Proponer variantes para eliminar contenidos de armónicos.
- Simulación del filtro.

Resultados esperados.

- Determinación de los niveles de Armónicos.
- Proponer dos variantes para disminuir los armónicos de tensión.
- Reducir la amplitud de los armónicos a valores admisibles.



CAPITULO I: Marco teórico conceptual.

1.1 Estado del Arte.

Los problemas en el sistema de potencia asociado con los armónicos, comenzaron a ser de interés general en la década de los 70, cuando dos desarrollos independientes tuvieron lugar. El primero era el embargo de petróleo, que condujo a incrementos en la electricidad y al ahorro de la energía. Las compañías de distribución de energía y los consumidores industriales comenzaron a instalar condensadores para el mejoramiento del factor de potencia. Los condensadores reducen la demanda de MVA que exige el sistema eléctrico, proporcionando la porción de energía reactiva necesaria de forma local (donde se requiere). Como resultado, se reducen pérdidas de energía eléctrica tanto en la planta industrial como en la red de distribución. Para mejorar el factor de potencia fue necesario incrementar significativamente el número de capacitores conectados en el sistema de potencia.

Como consecuencia, ha habido un aumento igualmente importante en el número de circuitos sintonizados (resonantes) en redes de distribución y plantas. El segundo desarrollo involucrado fue la llegada de la era tecnológica de los semiconductores entre ellos tiristores en bajo voltaje. En los años 60, los tiristores fueron desarrollados para motores de dc y luego durante la década de los 70, utilizados para controlar la velocidad de motores ac. Esto resultó una proliferación de pequeños convertidores operados independientemente sin técnicas de mitigación de armónicos.

Aún con niveles de corriente de armónicos relativamente bajo, un circuito resonante puede ocasionar severos problemas de distorsión en el voltaje e interferencia telefónica. Un circuito resonante paralelo puede amplificar los niveles de corriente armónico a un en el caso de distorsión armónico del voltaje, puede ocasionar esfuerzos en el aislamiento de estos equipos punto tal que produzca falla en los equipos. Los circuitos resonantes serie pueden concentrar el flujo de corrientes armónicos en alimentadores o líneas específicas al punto de producir interferencia (ruidos) telefónica de gran magnitud.



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. Debido a lo extenso de estos problemas, ha sido necesario desarrollar técnicas y lineamientos para la instalación de equipos y control de armónicos. Este segmento discute esos lineamientos y su importancia en el diseño de sistemas.

Las normas estadounidenses con respecto a los armónicos han sido agrupadas por la IEEE en la norma 519: IEEE recomendaciones prácticas y requerimientos para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia. Existe un efecto combinado de todas las cargas no lineales sobre el sistema de distribución, las cuales tienen una capacidad limitada para absorber corrientes de armónicos. Adicionalmente, las compañías de distribución de energía tienen la responsabilidad de proveer alta calidad de abastecimiento en lo que respecta al nivel del voltaje y su forma de onda. La IEEE- 519 hace referencia no solo al nivel absoluto de armónicos producido por una fuente individual sino también a su magnitud con respecto a la red de distribución.

Se debe tomar en cuenta que la norma IEEE- 519 esta limitada por tratarse de una colección de recomendaciones prácticas que sirven como guía tanto a consumidores como a distribuidores de energía eléctrica.

Donde existan problemas, a causa de la inyección excesiva de corriente de armónicos o distorsión del voltaje, es obligatorio para el suministrador y el consumidor, resolver estos problemas.

El propósito principal de la IEEE- 519 es el de recomendar límites previamente establecidos en la distorsión de armónicos, según dos criterios distintos:

1. Existe una limitación sobre la cantidad de corriente de armónicos que un consumidor puede inyectar en la red de distribución eléctrica.
2. Se establece una limitación en el nivel de voltaje armónico que una compañía de distribución de electricidad puede suministrar al consumidor.



Según (abb, 1992) se presenta recomendaciones para la instalación de filtros pasivos para la corrección de los armónicos en sistemas de potencia.

S. karve, x. roig, j. sallent, energía, 1998, se muestra los filtros activos que son utilizados en los sistemas de potencia.

1.1 .1Teoría de los armónicos.

Cualquier onda no senoidal puede ser representada como la suma de ondas senoidales (armónicos) teniendo en cuenta que su frecuencia corresponde a un múltiplo de la frecuencia fundamental (en el caso de la red = 50 o 60Hz), según la relación:

$$v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^{\infty} V_k \sin(\omega_k t + \varphi_k)$$

Donde:

v0 = valor medio de v (t) (onda en estudio).

v1 = amplitud de la fundamental de V (t).

vk = amplitud del armónico de orden k de V (t)

1.1.2 Que son los armónicos.

Los armónicos¹ son distorsiones de las ondas senoidales de tensión y/o corriente de los sistemas eléctricos, debido al uso de cargas con impedancia no lineal, a materiales ferromagnético, y en general al uso de equipos que necesiten realizar conmutaciones en su operación normal.² La aparición de corrientes y/o tensiones armónicos en el sistema eléctrico crea problemas tales como, el aumento de pérdidas de potencia activa, sobretensiones en los condensadores, errores de medición, mal funcionamiento de protecciones, daño en los aislamientos, deterioro de dieléctricos, disminución de la vida útil de los equipos, entre otros.

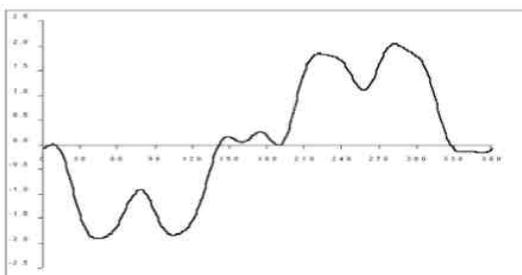
¹ Información Técnica, Generalidades sobre Armónicos, CD Schneider Electric, 1998.



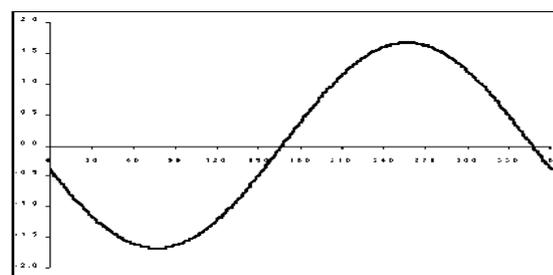
En un sistema de potencia eléctrica, los aparatos y equipos que se conectan a él, tanto por la propia empresa como por los clientes, están diseñados para operar a 50 ó 60 ciclos, con una tensión y corriente senosoidal. Por diferentes razones, se puede presentar un flujo eléctrico a otras frecuencias 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 senosoidales de diferentes frecuencias, incluyendo una referida a la frecuencia fundamental. El término componente armónico o simplemente armónico, se refiere a cualquiera de las componentes senosoidales que representamos en la figuras (1.1). Estas son múltiplo de la fundamental. 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.

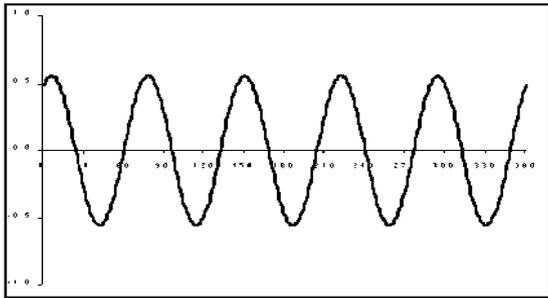
Su orden: hace referencia al valor de su frecuencia referido a la fundamental (60 Hz). Así, un armónico de orden 3 tiene una frecuencia 3 veces superior a la fundamental, es decir $3 * 60 \text{ Hz} = 180 \text{ Hz}$. El orden de armónico, también referido como el rango del armónico, es la razón entre la frecuencia de un armónico f_n y la frecuencia del fundamental (60 Hz).



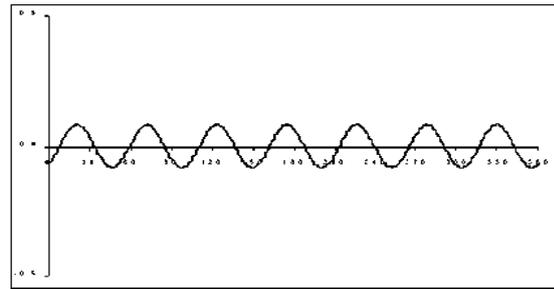
a) función original.



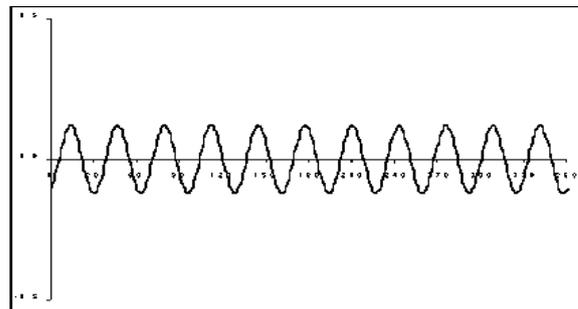
b) Función Fundamental.



c) 5^a armónico.



d) 7^a armónico.



e) 11^a armónico.

Figura (1.1) Forma de onda original y sus componentes armónicos: 1^a, 5^a, 7^a y 11^a.

1.1.3 Cómo se producen los armónicos.

Los dispositivos y los sistemas que producen armónicos se encuentran presentes en todos los sectores, es decir, el industrial, el comercial y el residencial. Los armónicos se producen por cargas no lineales (es decir, cargas que al ser alimentadas por una tensión senoidal, dan como respuesta una onda de intensidad deformada, no lineal). 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. El segundo tipo de elementos que pueden generar armónicos son aquellos que tienen una impedancia dependiente de la frecuencia, es decir para una determinada frecuencia se puede tener una impedancia constante, pero al subir frecuencia la impedancia aumenta proporcionalmente como es el caso de las cargas inductivas o por el contrario disminuye como es el caso de cargas capacitivas¹.

¹ IEEE Manual de Armónicos.



Ejemplos de cargas no lineales:

- Equipo industrial (soldadoras, hornos de arco, hornos de inducción, rectificadores).
- Variadores de velocidad para motores dc o asíncronos.
- SAI.
- Equipos de oficina (ordenadores, fotocopiadoras, fax, etc.).
- Algunos dispositivos con saturación magnética (transformadores).

Ejemplos de impedancia dependiente de la frecuencia:

- Los filtros eléctricos y electrónicos.
- Servomecanismos de motores.
- Variadores de velocidad de motores.

En general los armónicos son causados por cargas “deformates” que absorben corrientes en impulsos bruscos a diferencia de hacerlo suavemente en forma senoidal como es propio de cargas resistivas puras. Cabe aclarar que la frecuencia fundamental es la única capaz de producir potencia activa en el sistema y que los armónicos se comportan como varias fuentes de corriente dispuestas en paralelo y a diferente frecuencia donde la suma de todas es la corriente que alimenta la carga.

1.1.4 Límites aceptables y normas.

Es importante tener siempre la idea de normas que limiten los contenidos de armónicos en los sistemas eléctricos.

NORMA IEEE-519.

Las normas internacionales que aseguran la calidad de la energía están recogidas en la norma IEEE-519. Los niveles de distorsión de armónicos pueden caracterizarse por un completo espectro con magnitudes y ángulos de fase de cada componente armónico individual. También es común usar una cantidad simple llamada THD (Distorsión Total de Armónicos), como una medida de la distorsión de armónico. Para corrientes, los valores de distorsión pueden referirse a una base constante (ejemplo: el valor de la corriente de



carga o demanda de corriente) como es la componente fundamental. Esto provee una referencia constante mientras la fundamental puede variar sobre un amplio rango.

A continuación en la tabla (1.1), se indican los valores límites aceptables para los armónicos de voltaje, note que los límites recomendables se indican para el componente armónico individual máximo y para el THD. Estos límites en la distorsión de voltaje serán en los sistemas de hasta media tensión para la mayoría y más comunes usuarios.

Muchos de los equipos no son afectados por una distorsión de voltaje con niveles por debajo del 8%. De hecho los niveles de compatibilidad de distorsión del voltaje en baja y media tensión especificados en la IEEE-519 son del 8% (este es el nivel de distorsión de voltaje que no debería excederse del 5% del tiempo).

Tabla (1.1) IEEE-519 Límites de distorsión del voltaje THDvn.

Barra de voltaje en PCC (Vn)	Distorsión de los armónicos de voltaje (%)	Distorsión total de voltaje THDvn (%)
$V_1 \leq 69kv$	3.0	5.0
$69kv < V_1 \leq 161kv$	1.5	2.5
$V_1 > 161kv$	1.0	1.5

1.1.5 Clasificación de los armónicos.

Cada armónico tiene un nombre, frecuencia y secuencia. La secuencia se refiere al giro del fosal con respecto a la fundamental (f), por ejemplo, en un motor de inducción, el armónico de secuencia positiva generaría un campo magnético que gira en la misma dirección que la fundamental. Un armónico de secuencia negativa giraría en forma contraria.

Nota: los armónicos 2a, 4a, 6a, 8a, etc., desaparecen cuando las ondas son simétricas (típico para circuitos eléctricos).



Dependiendo de su secuencia y rotación, los armónicos presentan diferentes efectos:

- Secuencia (+): rotación directa, puede producir calentamiento de conductores, rotura de circuitos, etc.
- Secuencia (-): rotación inversa, produce un freno en el motor, además calentamiento de conductores y por ende problemas en el motor.
- Secuencia (0): no tiene sentido de rotación, pero puede causar calentamiento. La secuencia de armónicos cero (múltiplos de la 3a) son llamados "triplens". ver tabla (1.2).

A continuación se indican los once primeros armónicos:

Tabla 1.2 Secuencia de los armónicos.

Armónico	Secuencia. Frecuencia (Hz)	Secuencia
0 (DC)	0	
1 (Fundamental)	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
7	420	+
8	480	-
9	540	0
10	600	+
11	660	-

1.1.6 Armónicos de tensión.

Una red de alimentación puede ser fuente indirecta de armónicos de tensión. La relación entre la corriente de armónico absorbida por cargas no lineales y la impedancia de fuente del transformador de alimentación se rige por la ley de ohm, lo que provoca armónicos de tensión. La impedancia de fuente la constituyen el transformador de alimentación y los componentes de la línea.

Todas las cargas que compartan un transformador o una barra con fuente de carga de armónicos¹ podrán ser afectadas por los armónicos de tensión producidas por los distintos componentes del sistema. Se da la irónica circunstancia de que un computador personal es particularmente sensible a los

¹ Zamora; V. Macho. "Estudio bibliográfico sobre la distorsión de armónico producida por convertidores estáticos". Editado por Iberdrola. ISBN 84-921260-1-9. 1997. 136 pág.



armónicos de tensión. El rendimiento de la fuente de alimentación por condensador y diodos depende críticamente de la magnitud del “peak” de la onda de tensión. Los armónicos de tensión pueden provocar un achatamiento de los máximos de amplitud de la onda de tensión, reduciendo de ese modo el “peak” de tensión. En el peor de los casos puede llegar a “resetearse” el computador a causa de la falla de alimentación.

En el entorno industrial, los motores de inducción y los condensadores para corrección del factor de potencia también pueden resultar gravemente afectados por los armónicos de tensión. Los condensadores de corrección del factor de potencia pueden formar un circuito resonante con las partes inductivas de un sistema de distribución de corriente. Si la frecuencia resonante es coincidente con la frecuencia de la tensión de armónico, la corriente de armónico podrá aumentar considerablemente, sobrecargando los condensadores y quemando los fusibles de estos. Luego, en caso de ocurrir esto la falla del condensador desintoniza el circuito y la resonancia desaparece.

1.1.7 Armónico de corriente I(a).

Un equipo que se alimente de la red monofásica puede alcanzar corriente hasta un mínimo regulado. Normalmente, antes que se alcance este límite el condensador se recarga hasta el valor de pico en el siguiente semiperíodo de la onda senoidal. Este proceso se repite una y otra vez. Básicamente, el condensador sólo absorbe un impulso de corriente durante la cresta de la onda, durante el tiempo restante de la misma; cuando la tensión es inferior al valor residual del condensador, éste no absorbe corriente.

Normalmente las fuentes de alimentación con condensador y diodos que llevan incorporados los equipos de oficina son cargas monofásicas no lineales. En las plantas industriales, por el contrario, las causas más frecuentes de corrientes armónicas son cargas trifásicas no lineales, como motores de accionamiento controlados electrónicamente y fuentes de alimentación ininterrumpidas (UPS).

1.1.8 Armónico cero.

El flujo de corriente directa es el armónico de frecuencia cero, la contaminación con corriente directa de un sistema o potencia es parte de un

estudio teórico completo de todos los armónicos, 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.

Como las frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental, los armónicos en sus diferentes frecuencias siempre estarán en fase con la fundamental y su impacto es básicamente el mismo. Esto significa que la distorsión de armónico que se presenta en la onda de 50 ó 60 ciclos es la misma.

1.1.9 Trayectoria de los armónicos.

Toda corriente eléctrica fluye por donde se le presenta menor resistencia a su paso. Por esta razón las corrientes de armónicos siguen trayectorias distintas, pues se tiene que las impedancias de los sistemas varían según la frecuencia. Donde se tiene que 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. Así los armónicos fluyen hacia donde se le presenta menos resistencia a su paso, como podemos observar en la figura (1.2).

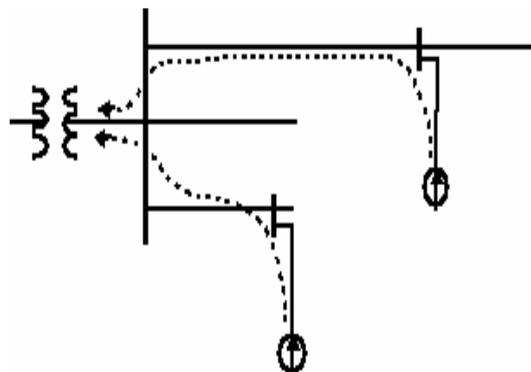


Figura (1.2). Trayectoria de los armónicos.

1.1.10 Trayectoria de los armónicos en un sistema inductivo.

En cambio si al sistema de la figura (1.2) se le incluye un banco de capacitores como se muestra en la figura (1.3) da lugar a una trayectoria distinta para los armónicos.

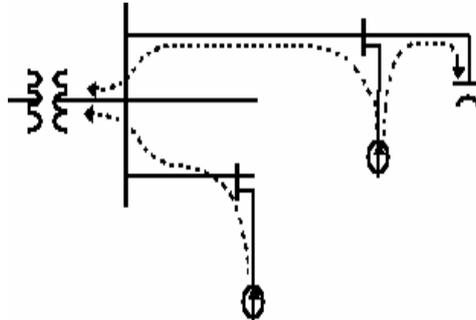


Figura (1.3). Trayectoria de los armónicos en un circuito inductivo.

1.1.11 Efectos perjudiciales de los armónicos.

Los efectos perjudiciales de estos armónicos dependen del tipo de carga encontrada, e incluye:

- Efectos instantáneos.
- Efectos a largo plazo debido al calentamiento.

Efectos instantáneos:

Los Armónicos de voltajes pueden distorsionar los controles usados en los sistemas electrónicos. Ellos pueden por ejemplo afectar las condiciones de conmutación de los tiristores por el desplazamiento del cruce por cero de la onda de voltaje.

Los armónicos pueden causar errores adicionales en los discos de inducción de los metros contadores. Por ejemplo, el error de un metro clase 2 será incrementado a un 0.3 %, en presencia de una onda de tensión y corriente con una tasa del 5 % para el 5to armónico.

Las fuerzas electrodinámicas producidas por las corrientes instantáneas asociadas con las corrientes de armónicos causan vibraciones y ruido, especialmente en equipos electromagnéticos (transformadores, reactores,



entre otros), los torques mecánicos pulsantes, debido a campos de armónicos rotatorios, pueden producir vibraciones en máquinas rotatorias.

Las perturbancias son observadas cuando líneas de comunicación y control son distribuidas a lo largo de líneas de distribución eléctricas que conducen corrientes distorsionadas. Los parámetros que deben tenerse en cuenta incluyen: la longitud que se encuentran dichas líneas en paralelo, las distancias entre los dos circuitos y las frecuencias de armónicos (el acoplamiento aumenta con la frecuencia).

Los armónicos son causantes de numerosos problemas de operación en los sistemas de protección. Entre ellos está la operación incorrecta de fusibles, de interruptores (breakers) y equipos y/o sistemas digitales de protección.

Para el caso de equipos protegidos contra sobrevoltaje, cuyo sistema de protección también estén diseñados para operar con voltajes senosoidales, estos pueden operar incorrectamente ante la aparición de formas de onda no senosoidales. Esta operación incorrecta puede ir desde la sobreprotección del equipo hasta la desprotección del mismo por la no operación ante una forma de onda que podría dañarlo de forma severa. El caso típico se presenta ante formas de onda que presentan picos agudos. Si el dispositivo de medición está diseñado para responder ante valores rms de la forma de onda, entonces estos cambios abruptos pudieran pasar sin ser detectados y conllevarían a la desprotección del equipo ante aquellos picos agudos dañinos, que no provoquen un aumento notable de la magnitud medio cuadrática censada. También pudiera ocurrir el caso contrario, el disparo ante valores no dañinos para el equipo protegido, en estos casos el ajuste de la protección deberá depender de las características de la forma de onda: voltajes pico y rms, tiempo de crecimiento de la onda, entre otros. Las protecciones convencionales no tienen en cuenta todos estos parámetros y lo que toman como base del proceso de protección, lo hacen sobre la suposición de que la forma de onda es puramente senoidal lo cual puede ser aceptado para algunas formas de onda pero incorrecto para otras que pueden ser dañinas.

Efectos a largo plazo:

El principal efecto a largo plazo de los armónicos es el calentamiento.



Calentamiento de capacitores:

Las pérdidas causadas por calentamiento son debidas a dos fenómenos: conducción e histéresis en el dieléctrico. Como una primera aproximación, ellas son proporcionales al cuadrado del voltaje aplicado para conducción y a la frecuencia para histéresis. Los capacitores son por consiguiente sensibles a sobrecargas, tanto debido a un excesivo voltaje a la frecuencia fundamental o a la presencia de tensiones de armónicos.

Estas pérdidas son definidas por el ángulo de pérdida (δ) del capacitor cuya tangente es la razón entre las pérdidas y la energía reactiva producida.

El calor producido puede conducir a un rompimiento dieléctrico.

Calentamiento debido a pérdidas adicionales en máquinas y transformadores:

Pérdidas adicionales en el estator (cobre y hierro) y principalmente en el rotor (devanado de amortiguamiento, y circuito magnético) de máquinas causadas por la diferencia considerable en velocidad entre el campo rotatorio inducido por los armónicos y el rotor. En los transformadores existirán pérdidas suplementarias debido al efecto pelicular, el cual provoca un incremento de la resistencia del conductor con la frecuencia, también habrá un incremento de las pérdidas por histéresis y las corrientes de Eddy o foucault.

Calentamiento de cables y equipos:

Las pérdidas son incrementadas en cables que conducen corrientes de armónicos, lo que incrementa la temperatura en los mismos. Las causas de las pérdidas adicionales incluyen:

- Un incremento en la resistencia aparente del conductor con la frecuencia, debido al efecto pelicular.
- Un aumento del valor eficaz de la corriente para una misma potencia activa consumida.
- Un incremento de las pérdidas dieléctricas en el aislamiento con la frecuencia (si el cable es sometido a distorsiones de tensión no despreciables).



- El fenómeno relacionado con la proximidad, de envolventes, de pantallas (conductores revestidos) puestas a tierra en ambos extremos, entre otros.

De una forma general todos los equipos (cuadros eléctricos) sometidos a tensiones o atravesados por corrientes de armónicos, sufren más pérdidas y deberán ser objeto de una eventual disminución de clase. Por ejemplo, una celda de alimentación de un condensador se dimensiona para una intensidad igual a 1.3 veces la corriente reactiva de compensación. Este sobredimensionamiento no tiene en cuenta sin embargo el aumento del calentamiento debido al efecto pelicular en los conductores.

Muchas de las anomalías que ocasiona la circulación de corrientes de frecuencias que no son propiamente del sistema, a través de él y de los equipos conectados, causando en ocasiones problemas de operación, tanto a la empresa suministradora como al usuario, se deben a las siguientes razones:

- Las frecuencias del flujo de potencia de tensiones y corrientes sobrepuestas a las ondas de flujo de 50 ó 60 ciclos, originan altas tensiones, esfuerzos en los aislamientos, esfuerzos térmicos e incrementan las pérdidas eléctricas.
- Muchos aparatos eléctricos son diseñados para aceptar y operar correctamente en potencia de 50 ó 60 ciclos, pero no responden bien a cantidades significantes de potencia a diferentes frecuencias. Esto puede causar ruido en el equipo eléctrico, problemas mecánicos y en el peor de los casos falla del equipo.
- Los armónicos generados en un sistema eléctrico pueden crear niveles altos de ruido eléctrico que interfieran con las líneas telefónicas cercanas.

La presencia de frecuencias diferentes a la nominal en la tensión y en la corriente, regularmente no son detectables por un monitoreo normal, por mediciones o por el equipo de control; por lo que su presencia no se nota. Por ejemplo los medidores residenciales monofásicos no detectan frecuencias mucho más arriba de 6 ciclos. Frecuentemente la primera indicación de la



presencia significativa de armónicos es cuando causan problemas de operación o fallas del equipo. La Tabla (1.3) Muestra también algunos efectos dañinos que ocasionan los armónicos sobre los elementos eléctricos.

Tabla (1.3) Algunos efectos dañinos que ocasionan los armónicos sobre los elementos eléctricos.

efectos de los armónicos	causa	consecuencia
sobre los conductores	<ul style="list-style-type: none">■ las intensidades armónicas provocan el aumento de la IRMS,■ el efecto pelicular (efecto "skin") reduce la sección efectiva de los conductores a medida que aumenta la frecuencia.	<ul style="list-style-type: none">■ disparos intempestivos de las protecciones,■ sobrecalentamiento de los conductores.
sobre el conductor de neutro	<ul style="list-style-type: none">■ cuando existe una carga trifásica + neutro equilibrada que genera armónicos impares múltiplos de 3.	<ul style="list-style-type: none">■ cierre de los armónicos homopolares sobre el neutro que provoca calentamientos y sobreintensidades.
sobre los transformadores	<ul style="list-style-type: none">■ aumento de la IRMS,■ las pérdidas por Foucault son proporcionales al cuadrado de la frecuencia, las pérdidas por histéresis son proporcionales a la frecuencia.	<ul style="list-style-type: none">■ aumento de los calentamientos por efecto Joule en los devanados,■ aumento de las pérdidas en el hierro.
sobre los motores	<ul style="list-style-type: none">■ análogas a las de los transformadores y generación de un campo adicional al principal.	<ul style="list-style-type: none">■ análogas a las de los transformadores más pérdidas de rendimiento.
sobre los condensadores	<ul style="list-style-type: none">■ disminución de la impedancia del condensador con el aumento de la frecuencia.	<ul style="list-style-type: none">■ envejecimiento prematuro, amplificación de los armónicos existentes.

El mal funcionamiento de ciertos aparatos utilizando la tensión como referencia para el control de los semiconductores o como base de tiempo 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 de armónicos, pueden, por inducción, ser receptores de corrientes que pueden provocar fallos en el funcionamiento de los elementos conectados a ellos.¹

Por último, la circulación de corrientes de armónicos 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

¹ Cuaderno Técnico no 152, Los armónicos en las redes perturbadas y su tratamiento. Schneider Electric.



por las estructuras metálicas de los edificios y, por tanto, creación de campos electromagnéticos perturbadores.

1.1.12 Efectos de los armónicos en los sistemas eléctricos.

El efecto principal causado por los armónicos consiste en la aparición de voltajes no senosoidales en diferentes puntos del sistema. Ellos son producidos por la circulación de corrientes distorsionadas a través de las líneas. La circulación de estas corrientes provoca caída de voltajes deformados que hacen que a los nodos del sistema no lleguen voltajes puramente senosoidales. Mientras mayores sean las corrientes de armónicos circulantes a través de los alimentadores de un sistema eléctrico de potencia, más distorsionados serán los voltajes en los nodos del circuito y más agudos los problemas que pueden presentarse por esta causa. Los voltajes no senosoidales son causantes de numerosos efectos que perjudican los equipos conectados al sistema. Entre estos efectos se pueden mencionar:

- El aumento de los costes de energía.
- Envejecimiento prematuro de los equipos.
- Pérdidas de producción.

1.1.13 Efectos 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 módems, 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 causarles daños.

Existen además equipos electrónicos que necesitan censar 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 estas 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. Como los sistemas de alimentación ininterrumpida la corriente que generan los sistemas informáticos presenta un factor de cresta muy elevado. Un SAI dimensionado teniendo en cuenta exclusivamente la corriente rms que puede que no sea capaz de suministrar la corriente de pico necesaria y puede sobrecargarse.

1.1.14 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 de armónicos¹

¹ Compensación de potencia Reactiva en Sistemas Contaminados con Armónicos, Tesis en opción al título de Máster en Ingeniería Eléctrica. Universidad Central de las Villas. Santa Clara. 1998. Ing. José Ángel González Quintero.



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

1.1.15 Efectos de los capacitores en las trayectorias de los armónicos.

La trayectoria que siguen los armónicos también depende del tipo de sistemas, ya sean monofásicos o trifásicos, así como las conexiones de los transformadores que se encuentra a su paso. Los armónicos que se presentan en sistemas balanceados tienen una relación directa con las componentes de secuencias positiva, negativa y cero.

1.1.16 Efectos de los armónicos en transformadores.

A pesar que 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.

Aumento en las pérdidas:

- Pérdidas I^2r (efecto joule).
- Pérdidas por corrientes de eddy (parásitas).

$$P_e = P_{e,r} \sum_{n=1}^{n=N_{m\acute{a}x}} \left(\frac{I_n}{I_r} \right)^2 * n^2$$



Donde:

I_n : corriente de el armónico, en amperes.

I_r : corriente nominal.

$P_{ex, r}$: pérdidas de eddy a corriente y frecuencia nominal.

➤ Pérdidas adicionales.

$$P_{ex} = P_{ex, r} \sum_{n=1}^{n=nm'x} \left(\frac{I_n}{I_r} \right)^2 * n$$

Donde:

$P_{ex, r}$: pérdidas adicionales a corriente y frecuencia nominal.

En conexiones delta-estrella que alimenten cargas no lineales monofásicas se puede tener:

- Sobrecalentamiento del neutro por la circulación de armónicos "triplens".
- Sobrecalentamiento del devanado conectado en delta.

En caso de que alimenten cargas no lineales que presenten componentes de corriente directa es posible:

- Aumento ligero en las pérdidas del núcleo sin carga.
- Aumento en el nivel de sonido audible.
- Incremento sustancial en la corriente de magnetización.

1.1.17 Efectos de los armónicos en otros equipos.

Para los transformadores que alimenten a cargas no lineales se recomienda:

- Disminuir su capacidad nominal.
- Utilizar transformadores con factor k.

1.1.18 Efectos en el conductor neutro.

Bajo condiciones balanceadas de operación en cargas monofásicas no lineales, el neutro común de los circuitos es portador de armónicos triples de secuencia cero, los cuales son aditivos en el conductor neutro. Bajo



condiciones de desbalance, el neutro común lleva corrientes comprendidas por las corrientes de secuencia positiva procedentes al desbalance del sistema, las corrientes de secuencia negativa procedentes del desbalance del sistema, y las corrientes aditivas de secuencia cero procedentes de los armónicos triples. Un conductor neutro común para tres circuitos ramales monofásicos, puede fácilmente sobrecargarse cuando alimenta, cargas no lineales balanceadas o desbalanceadas.

Las corrientes excesivas en el conductor neutro provocan caídas de voltajes mayores que los normales entre el conductor neutro y tierra en las tomas de 120 volts. Esto puede desestabilizar la operación del equipamiento electrónico sensible, tales como computadoras, que pueden requerir de un receptáculo de tierra aislado.

Las barras de neutro de la pizarra de control representan el primer punto común de conexión de las cargas monofásicas conectadas en delta. Recuérdese que las corrientes de armónicos de secuencia positiva y negativa, asumiendo cargas balanceadas, se cancelan en cualquier punto común de conexión. La barra del conductor neutro también puede sobrecargarse debido a los efectos de cancelación de las corrientes de armónicos de secuencia positiva y negativa entre los conductores que sirven a diferentes cargas. Además, las corrientes de armónicos triplens de secuencia cero fluyen en los conductores neutros, a pesar del balance de las cargas. Las corrientes de armónicos triplens solamente, pueden sobrecargar las barras de neutro. En la práctica, los conductores neutros de circuitos ramales individuales portan corrientes de armónicos de secuencia positiva y negativa provenientes de los desbalances de fase junto a las corrientes de armónicos triplens de secuencia generados por la carga. Las barras de neutro que son dimensionadas para llevar el valor completo de la corriente nominal de fase pueden fácilmente sobrecargarse cuando el sistema de distribución de potencia alimenta cargas no lineales.

1.2 Fenómeno de resonancia en la red.

La impedancia de bobinas y condensadores dependen de la frecuencia. La conexión en serie o paralelo de inductancias y condensadores da lugar a



situaciones singulares, denominadas de resonancia, en las cuales la impedancia se hace mínima o máxima. Estas condiciones de resonancia son precisamente las que se controlan para obtener distintos tipos de filtros.

1.2.1 Fuentes que producen los armónicos en el sistema eléctrico.

La norma IEEE 519-1992, relativa a “prácticas recomendadas y requerimientos para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia” agrupa a las fuentes¹ emisoras de armónicos en tres categorías diferentes:

- Dispositivos electrónicos de potencia.
- Dispositivos productores de arcos eléctricos.
- Dispositivos ferromagnético.

Algunos de los equipos y procesos que se ubican en estas categorías son:

- Motores de corriente directa accionados por tiristores.
- Inversores de frecuencia.
- Fuentes ininterrumpidas (UPS).
- Computadoras.
- Equipos electrónicos.
- Hornos de arco.
- Hornos de inducción.
- Equipos de soldadura.
- Transformadores sobreexcitados.

Fuentes de poder en modo de conmutación:

La mayoría de los equipos electrónicos tales como computadoras personales, máquinas copadoras y fax, cuentan con una fuente regulada por conmutación (switch-mode power supply). Estas fuentes demandan corriente en un pulso corto de cada medio ciclo. Cuando el voltaje se encuentra cerca de su valor máximo. La corriente demandada por estas fuentes tienen una alta distorsión de armónicos total y un alto contenido de tercer armónico.

¹ Fuentes de Distorsión Armónico, Soporte Científico Técnico, Boletín No. 4, Año 1/99 By AWD. FARAGAUS.



1.2.2 Acciones de prevención y corrección de efecto de los armónicos.

En los últimos años, ha tenido lugar un sustancial incremento de la actividad normativa a nivel nacional e internacional para evitar el aumento de la distorsión de armónico en las redes eléctricas.

La adopción de medidas correctoras en su instalación. Cabe citar las siguientes:

- La utilización de filtros: esta medida es una de las más eficaces ya que en la actualidad debido a las cargas no lineales, se les exige el filtro sintonizado a la frecuencia que generen.
- La correcta configuración de equipos de rectificación, en lo que se refiere al número de pulsos, tipo de control (rectificadores), transformadores de alimentación al puente rectificador, etc., de manera que la deformación de la onda de intensidad absorbida no sea importante.
- La alimentación de la carga perturbadora con un transformador de uso exclusivo .por ejemplo, así se hace en el alumbrado de vías públicas con lámparas de descarga.
- La utilización de transformadores con devanados en triángulos en los equipos que forman parte de las redes eléctricas contribuyen a limitar la aparición de tensiones de armónicos homopolares. Ya que van a circular las corrientes de armónicos dentro de la delta.

1.3 Medición.

La medición de los armónicos es de vital importancia, pues con ella se facilita el análisis y control de los armónicos. En la actualidad existe gran cantidad de equipo de medición de armónicos, equipo que en su mayoría, tienen interfase a la computadora con el propósito de almacenamiento y procesamiento de información.

1.3.1 Características del equipo de medición.

El equipo de medición de armónicos debe contar con las siguientes características:

- Medir como mínimo el armónico 25 (1500 hz).
- Mostrar la magnitud y ángulo de los armónicos.



- Mostrar valores rms y thd como mínimo.
- Contar con transductores de corriente y potencial adecuados para frecuencias de hasta 3000 hz. Errores $< 1\%$ y $< 3\%$ para tc's y tp's respectivamente.

Estos equipos pueden ser:

- Osciloscopios.
- Analizadores de armónicos.

1.3.2 Puntos de medición.

Una vez que se tiene el equipo de medición es importante conocer los puntos en los cuales se deben hacer las mediciones para poder tener un conocimiento global de la propagación de los armónicos, estas mediciones deben ser:

- Mediciones de las corrientes de fase y neutro.
- Mediciones de los voltajes de fase.

Las mediciones deben hacerse de acuerdo al sistema, como se muestra a continuación.

Sistemas de distribución:

Para los sistemas de distribución es importante hacer las mediciones ver figura (1.4) en:

- Las subestaciones.
- Los alimentadores.

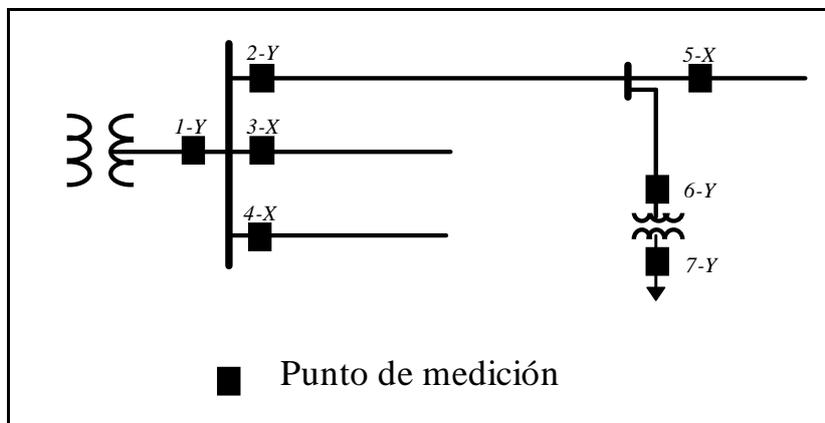


Figura (1.4) Medición en sistemas de distribución.



La importancia de la medición es hacerlas primeramente en el secundario del transformador principal, de tal manera que si se tiene un contenido apreciable de armónicos, se prosiga a identificar la procedencia mediante la medición y discriminación de alimentadores. Como se puede observar en el sistema de la figura (1.4). El número indica el orden de las mediciones y la x indica la medición sin armónicos y la y la medición con armónicos.

Sistemas industriales:

Para las plantas industriales¹ es recomendable hacer las mediciones en los siguientes puntos:

- Punto de conexión con el sistema.
- Nodos internos de la planta.
- Cargas no lineales.
- Bancos de capacitores.

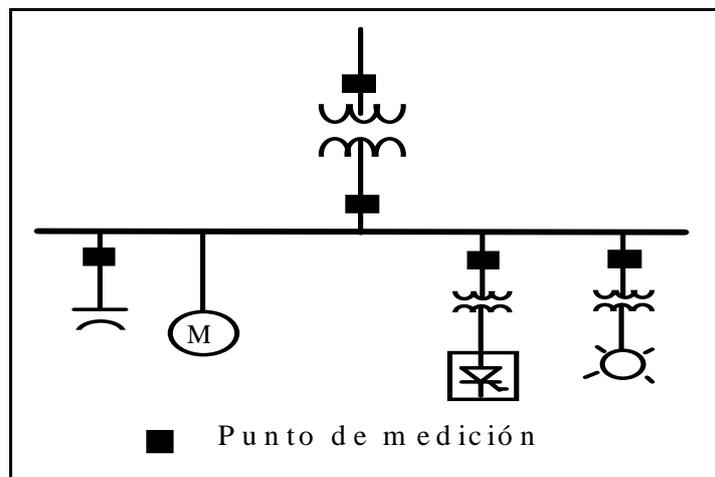


Figura 1.5 Medición en sistemas industriales.

Como se puede observar en la figura (1.5) es de vital importancia saber identificar a las cargas que generan armónicos, pues en las mayorías de los casos estas mediciones son utilizadas por el software de propagación de armónicos para realizar una serie de estudios.

¹ Cahiers techniques, n0152, harmonic in industrial networks. MERLIN GERIN. GROUPE SCHNEIDER.

La medición de la corriente en los bancos de capacitores da un indicativo claro de problemas de resonancia.

Es importante hacer mención de que una vez que se han observado problemas de resonancia mediante la medición en los bancos de capacitores. Es necesario hacer una vez más una serie de mediciones en la planta, pero ahora teniendo todos los bancos de capacitores fuera de operación, esto se hace con el fin de conocer la trayectoria natural de los armónicos en un sistema puramente inductivo. Claro está que en ciertos casos resulta inadmisibles sacar los bancos de capacitores de operación, pero es lo recomendable. También es importante hacer la medición a diferentes períodos del día, pues en muchos de los casos las plantas presentan una operación muy distinta durante el día.

1.3.3 Punto de medición del nivel de armónicos.

Los límites establecidos en la norma IEEE 519-1992 deben aplicarse en la acometida, es decir en el punto donde el suministrador entrega la energía al usuario en cuestión y a partir de ahí puede alimentar a otro usuario.

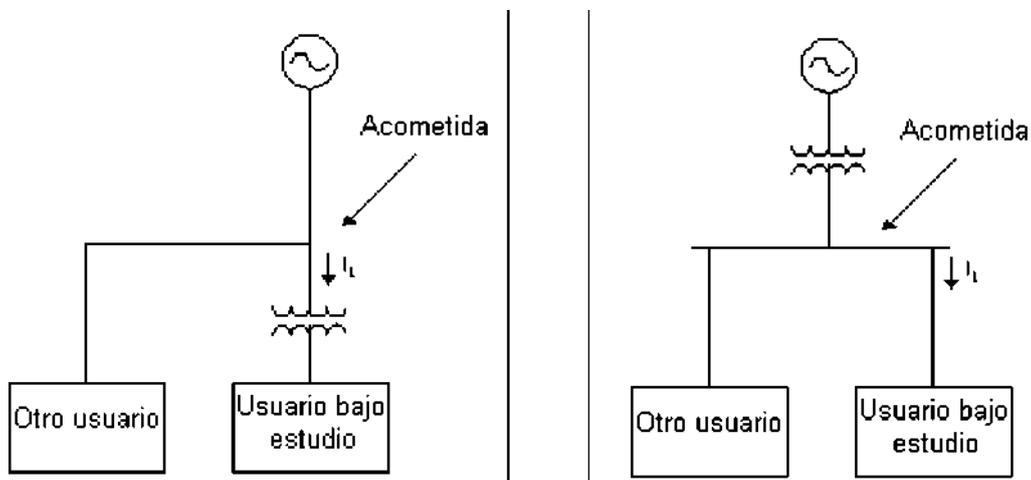


Figura (1.6) Puntos de medición para niveles de armónicos.

La norma puede aplicarse usando el mismo procedimiento por los usuarios para evaluar otros puntos dentro de su instalación, pero diferentes límites de distorsión podrían aplicarse en estos casos ya que aunque en un punto dado los límites se excedan, la interacción de diversas cargas puede producir cancelaciones de armónicos que arrojen valores dentro de los límites en la acometida.



1.3.4 Uso de los dispositivos de medida.

Los dispositivos de medida sirven para mostrar tanto los efectos instantáneos como a largo plazo de los armónicos. Los análisis requieren valores cuyas duraciones oscilen desde pocos segundos a varios minutos en períodos de observación de una serie de días.

Entre los valores necesarios se incluyen:

- Las amplitudes de las intensidades de armónicos y las tensiones.
- El contenido armónico individual de cada rango de armónico de la intensidad y la tensión.
- La THD de la intensidad y la tensión.

Cuando sea aplicable el desplazamiento de fase entre la tensión armónico, la intensidad del mismo rango armónico y la fase de los armónicos con respecto a la referencia común (por ejemplo, la tensión fundamental).

1.4 Las UPS.

Una UPS es un equipo electrónico capaz de generar energía eléctrica a partir de una batería, o conjunto de baterías. De esta manera, se puede proveer de energía eléctrica a diversos equipos de oficina (tales como computadoras, calculadoras de escritorio, centrales telefónicas y fax, módems, impresoras, etc.) Cuando se registra un corte de energía.

Pero además, las UPS cuentan con filtros y estabilización, lo cual le permite, cuando hay energía eléctrica, acondicionar la misma, mejorando su calidad, de manera que sus equipos reciben una mejor "alimentación". Cuentan, entre otras cosas, con filtros de protección para línea telefónica y de datos, protegiendo de esta manera su fax/módems y su placa de red.

Lo fundamental de una UPS es su calidad, su tiempo de conmutación, y saber si cuenta con filtros de ruido y estabilización de línea.



1.4.1 Clasificación de los distintos tipos de UPS.

Las técnicas de construcción de UPS se han diversificado y en la actualidad existe una gran confusión de términos para describir los productos presentes en el mercado de los UPS, hasta el punto en que a veces tienden a confundir a los consumidores.

Esta es la razón por la cual la comisión internacional electromecánica (IEC), que es la organización global líder en la preparación y publicación de estándares y normas internacionales en las áreas eléctricas y electrónicas, ha establecido estándares para diferenciar los distintos tipos de UPS y los métodos para medir su desempeño. Las normas de este comité han sido adoptadas también por CENELEC, el comité europeo de estandarización.

El estándar IEC 62040-3 y su equivalente europeo en 50091-3 definen en la actualidad claramente tres tipos de UPS estándares y la forma de medir su desempeño, en términos de la dependencia de la salida respecto a la entrada:

- Vfd o standby pasivo, donde la salida de la UPS depende del voltaje y la frecuencia de la entrada. Este es el tipo más básico.
- Vi o line-interactive, donde la salida de la UPS depende de la frecuencia de entrada, pero las variaciones del voltaje son acondicionadas (independiente). Esta es una tecnología de protección intermedia.
- Vfi o doble conversión, donde la salida de la UPS es independiente del voltaje y la frecuencia de entrada. Es la tecnología más avanzada de protección.

Estas normas sirven en la actualidad para la implementación de los distintos estándares nacionales europeos y americanos y son la base de las especificaciones técnicas en propuestas internacionales o contratos de grandes empresas.

La tecnología denominada conversión delta es un caso particular más complejo de las UPS del tipo vi o line-interactive, por lo cual no clasifica en la categoría más exigente, que corresponde a las UPS vfi o doble conversión.



1.4.2 Problemas eléctricos que las UPS pueden solucionar.

Picos de voltajes:

Incrementos de voltaje de corta duración, aproximadamente 5 centésimas de segundo. Si son de mayor duración se denomina sobrevoltaje o sobretensión. Los picos son causados generalmente por desconexión o apagado de motores eléctricos de gran porte, como aire acondicionado central, compresores de aire, etc.

Cuando suceden estos los picos se transmiten mediante las líneas de alimentación.

Resultado: posibles problemas de datos en chips cmos y otros chips tipo eprom; errores de escritura en el disco, corrupción de archivos, daños en el disco.

Bajas tensiones:

Son bajas de tensión, en general de poca duración, provocadas por alta demanda de energía, como arranques de motores eléctricos potentes. También ocasionado durante conmutación de líneas, donde alguna de ellas deba absorber la demanda de potencia de otra que sale de servicio. Resultado: oscilaciones en pantalla, descontrol del sistema, pérdida de datos y archivos corruptos, interrupción de transferencias de archivos.

Supresores de descargas:

Incremento dramático y repentino de la tensión causada comúnmente por descargas atmosféricas o cuando la tensión es restablecida después de un corte. Las descargas pueden hacerse presentes a través de la alimentación, red de datos y líneas telefónicas.

Resultado: destrucción de la cpu, módems, placa de red, disco, e inclusive el monitor y algunos periféricos.



Cortes de alimentación:

Pérdida total de alimentación, causada por sobrecarga de la red de alimentación, tormentas, inundaciones, accidentes, fenómenos naturales, cortocircuito.

Resultado: pérdida de los datos en proceso, frecuente corrupción de archivos y daños al sistema operativo, desconexión e interrupción de los servicios en línea.

Ruido:

Ruido electromagnético en la línea de alimentación, producido generalmente por motores universales, interferencia electromagnética y de radiofrecuencia, que ocasiona que la forma de la onda de la alimentación no sea perfectamente senoidal y pura. El ruido puede ser intermitente o crónico. Resultado: corrupción de datos, problemas en medios magnéticos, interferencia en la pantalla del monitor.

1.5 Filtro.

Entendemos por filtro la combinación de capacitores, inductancias y resistencias o al menos uno de estos elementos reactivos que están configurados para reducir la corriente de armónico y exhibir una impedancia mínima a la corriente fundamental a 60 hz, como la corriente armónico produce una caída de tensión menor en la impedancia de la red, la corriente armónico se va por el filtro preferentemente y la impedancia total equivalente del sistema a esa frecuencia determinada es menor, lo que significa que la distorsión de tensión disminuye.¹ Se utilizan para bloquear o atrapar la energía de los armónicos de tal manera que no fluya por los equipos o que no entre al sistema, son elementos cuya impedancia varía con la frecuencia.

¹ A.M. Golé; M. Meisingset. "An AC Active filter for use at capacitor commutated HVDC converters". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, N° 2, April 2001, pp. 335-341



1.5.1 Principio de funcionamiento de los filtros activos, híbridos y pasivos.

Activos: Estos sistemas, incluyen electrónica de potencia y están instalados en serie o en paralelo con la carga no lineal, compensan la intensidad de armónicos o la tensión de la carga.

Híbridos: La combinación de los filtros pasivos y activos en un único sistema es lo que podemos llamar filtros híbridos, esta nueva solución de filtrado ofrece las ventajas de los dos tipos de filtros y abarca una amplia gama de niveles de potencia y rendimiento.

Pasivos: Un circuito LC, sintonizado a cada rango armónico que se va a filtrar, se instala en paralelo con la carga no lineal este circuito de derivación absorbe los armónicos, evitando así que circulen por la red de distribución. De manera general, el filtro pasivo se ajusta a un rango de armónicos próximo al que se desea eliminar. Se pueden utilizar varias ramificaciones de filtros¹ conectadas en paralelo si se necesita una reducción significativa de la distorsión global.

1.5.2 Principio de funcionamiento.

Pasa bajo:

Este filtro permite sólo el paso de frecuencias por debajo de una frecuencia en particular llamada frecuencia de corte (f_c) y elimina las frecuencias por encima de esta frecuencia.

Filtros pasa bajo de 2do orden:

Esta clase de tipo de filtros deja pasar todas las frecuencias desde 0Hz hasta la frecuencia de corte (f_c) y bloquea todas las frecuencias por encima de f_c . Este filtro no produce desfase en todas las frecuencias de la banda pasante, la ausencia del desfase es importante cuando la señal no es senoidal.

¹ H. Akagi. "New trends in active filters for power conditioning". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, N° 6, Nov. /Dec. 1996, pp. 1312-1321.



Como siempre se asume el condensador y se halla la resistencia; pero la resistencia debe estar comprendido entre 1kw y 100kw con el fin de encontrar la respuesta óptima del filtro.

Filtros pasa alto de 2do orden:

Este filtro elimina todas la frecuencias que van desde 0hz hasta la f_c , y permite el paso de todas las frecuencias por encima de la f_c . Un filtro ideal paso alto tiene una atenuación infinita en la banda eliminada, atenuación 0 en la banda pasante y una transición vertical, la banda eliminada comprende las frecuencias entre 0 y la f_c .

1.5.3 Filtros armónicos, sus funciones y características generales.

Los filtros pueden usarse para:

- Mejorar el factor de potencia.
- Reducir armónicos.
- Reducir corrientes de retorno por el neutro en sistemas trifásicos.
- Minimizar el impacto sobre los transformadores de distribución.
- Generador depósitos de los efectos armónicos.
- Liberar capacidad de distribución.

1.5.4 Criterios de ubicación del filtro.

- Con la existencia de cargas altamente contaminantes.
Se debe ubicar el filtro en el lado de baja tensión; de esta forma el transformador de potencia sirve de amortiguador (aislante de armónicos) tanto de las corrientes de armónicos provenientes de otras cargas como de las corrientes de armónicos generada por la carga, lográndose aislar el problema.
- La existencia de cargas de armónicos distribuidas.

Los filtros deben ser ubicados en media tensión y en lugares estratégicos (óptimos) para evitar la excesiva circulación de corrientes de armónicos por el sistema.



1.5.5 Problemas de los filtros.

Uno de los mayores problemas de los filtros es que se produzca la desintonía de estos. Los cuatro eventos más comunes que pueden dar como resultado una desintonización del filtro son:

- Deterioro de los condensadores, lo cual disminuye la capacitancia total y con esto aumenta la frecuencia a la cual el filtro fue sintonizado.
- Tolerancia de fabricación tanto en el reactor como en los condensadores.
- Variación de temperatura.
- Variación en el sistema.

Típicamente, los filtros se sintonizan aproximadamente entre un 3% y un 10% por debajo de la frecuencia deseada, esto para tener la opción de una buena operación del filtro en un rango mayor de tiempo de vida útil. De los cuatro eventos mencionados anteriormente los tres primeros tienen que ver con variaciones propias de los elementos constitutivos de los filtros, mientras que el último depende de las variaciones del equivalente del sistema.

1.6 Transformadores.

El transformador es un dispositivo que convierte energía eléctrica de un cierto nivel de voltaje, en energía eléctrica de otro nivel de voltaje, por medio de la acción de un campo magnético. Está constituido por dos o más bobinas de alambre, aisladas entre si eléctricamente por lo general y arrolladas alrededor de un mismo núcleo de material ferromagnético. El núcleo se construye de hierro porque tiene una gran permeabilidad, o sea, conduce muy bien el flujo magnético. La forma del núcleo se muestra en la figura (1.7) esta forma es la que usan en los transformadores. Obsérvese que el flujo siempre toma la trayectoria más cercana en el entrehierro. En un transformador, el núcleo desde el punto de vista eléctrico tiene una misión fundamental es la vía por la que discurre el flujo magnético. A través de las partes de la culata conduce el flujo magnético siguiendo un circuito prescrito, de una columna a otra.

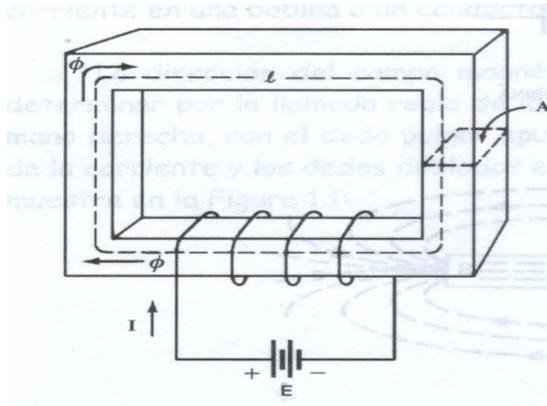


Figura 1.7 Muestra la forma del núcleo.

1.6.1 Conexiones de transformadores trifásicos.

Existen varias conexiones de transformadores trifásicos, estas son:

- Delta-Estrella
- Delta - Delta
- Estrella- Delta
- Estrella- Estrella.

1.7 Conclusiones.

Mediante los epígrafes antes explicados, cuyo objetivo es el dominio teórico de los fundamentos básicos a tener en cuenta para el desarrollo de la investigación, podemos comenzar con el análisis de los portadores energéticos de la empresa Ceproníquel, así como la determinación y propuesta a soluciones para los problemas de calidad de energía.



CAPÍTULO II: Análisis energético de la Empresa Ceproníquel.

2.1 Introducción.

En este capítulo se realiza un profundo estudio energético de la empresa con el objetivo de caracterizar las cargas no lineales y las posibles fuentes de armónico del sistema. Esta caracterización la realizaremos mediante un conocimiento teórico detallado de las cargas y haciendo mediciones sobre las mismas. Evaluaremos su impacto y las fuentes de armónicos sobre el sistema. Para esto utilizaremos un analizador de redes capaz de censar cada uno de los parámetros necesarios para evaluar de forma fiable el comportamiento del sistema interno.

2.2 Caracterización de la Empresa Ceproníquel.

Es la Empresa de Ingeniería y Proyectos de la Unión Cubaníquel cuyo objeto empresarial es prestar los servicios de ingeniería y consultoría para objetivos e instalaciones de la industria y minería del Níquel, así como para obras de infraestructura. Fundada en 1985, Formado por personal de una Industria con más de 55 años de experiencia en la Producción de Níquel.

Ventas Anuales: 4.8 Millones. Ceproníquel ha evolucionado enfocándose en la entrega y realización de proyectos de mayor valor agregado, siempre orientados a las necesidades y requerimientos de sus clientes y de acuerdo a las características específicas de sus procesos. Desarrolla desde el estudio básico de una necesidad específica en procesos metalúrgicos hasta la implementación completa de la solución tecnológica. Dispone de una experiencia demostrada en la gerencia, desarrollo, control, puesta en marcha y operación de exitosos proyectos para Clientes en una gran diversidad de áreas como: ingeniería, minería, geología y dirección integrada de proyectos., cuenta con un personal altamente calificado de (187 empleados) y tecnología de diseño de última generación. Desde Octubre del año 2002 logró la certificación de su Sistema de Gestión de la Calidad según la norma internacional ISO-9001:94, con las entidades certificadoras Lloyd's Register Quality Assurance y la Oficina Nacional de Normalización. En Octubre del 2003 realizó la transición a la norma ISO-9001:2000, manteniendo hasta nuestros días dicha certificación. En los últimos años la Empresa ha logrado mantener un



crecimiento integral sostenido y una mejora continua de todos sus procesos, garantizando oportunamente la capitalización de sus recursos materiales y humanos. Cuenta con avanzadas tecnologías de la información que permiten la comunicación en línea entre diferentes especialidades y entre Clientes externos e internos.

2.2.1 Suministro Eléctrico de la Empresa de Ingeniería y Proyecto del Níquel.

El Sistema de Suministro Eléctrico de la Empresa de Proyectos del Níquel se realiza desde el SEN a través de doble circuito, uno desde la línea eléctrica 33/022 kV y otra de 13.8/022 kV que funciona como emergencia mediante un interruptor de transferencia. La principal alimentación es la de 33 kV que alimenta la Planta de agua de la Fábrica Ernesto Che Guevara. El mismo es radial simple con distribución a baja tensión. La alimentación a 13,8 kV, la de emergencia, se hace desde el circuito residencial 13,8 kV, que alimenta al reparto Armando Mestres, en la cual existe un transformador en aceite de 100 KVA, 13,8/19,05-0,24/0,12 kV, 3Ø, 60 Hz, conexión Delta-Estrella aterrado. La salida de estos dos transformadores se alimenta al Transfer Switch.

Desde se alimenta una Pizarra general de Distribución (931-PGD), desde esta se alimenta el panel de Fuerza de Aires acondicionado (975-PF) y un Panel General de Distribución de Alumbrado (932-PGA), desde donde se alimentan 4 paneles de alumbrado y tomacorrientes que alimentan toda la carga por piso. (Ver figura 2.1) Esquema Monolineal, plano 001 en el anexo 1).

Las cargas eléctricas en la Empresa de Ceproníquel están agrupadas en Alumbrado, Computadoras, Fotocopiadoras entre otras.

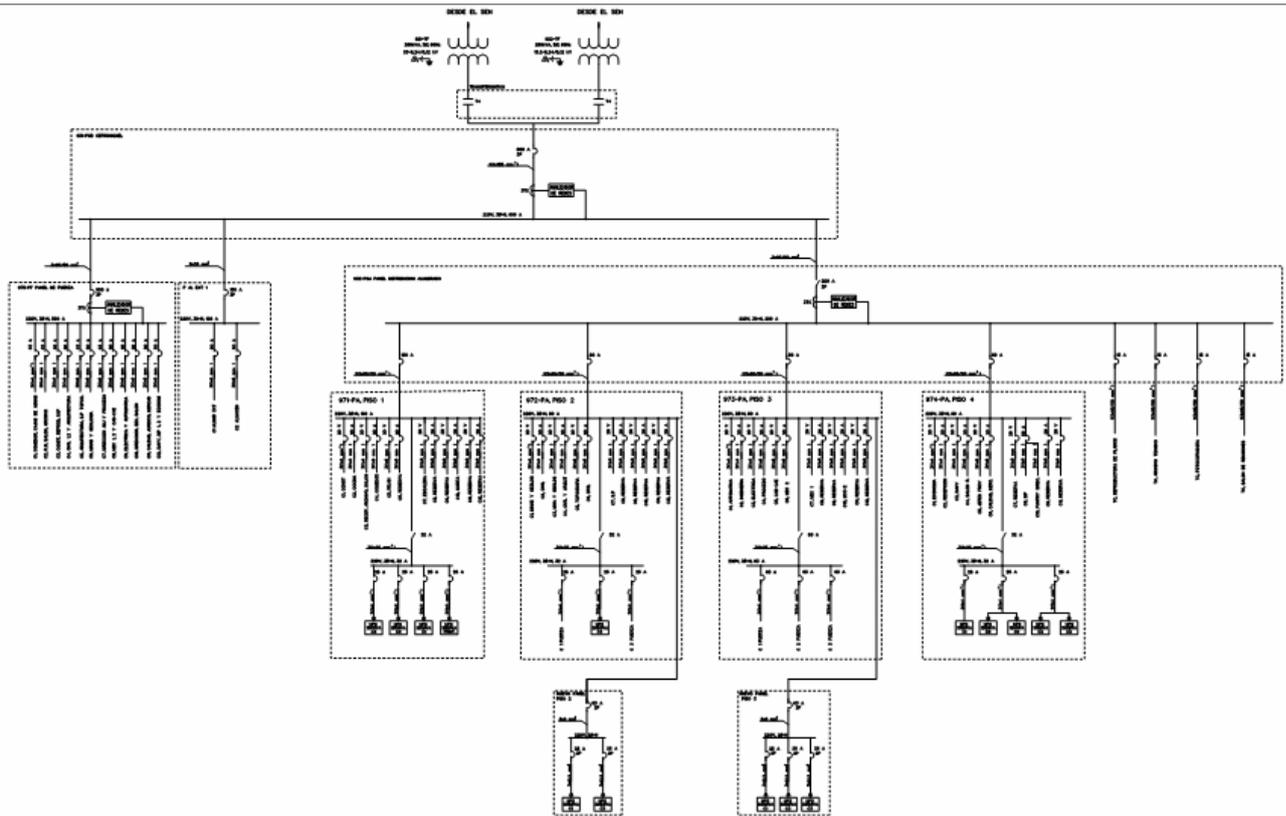


Figura (2.1) Monolineal de la Empresa Ceproníquel.

2.3 Levantamiento de las cargas.

Los equipos eléctricos han sido capaces de operar satisfactoriamente con variaciones relativamente amplias de los tres parámetros fundamentales (tensión, corriente, y frecuencia) En los últimos diez a quince años se han agregado a los sistemas eléctricos un elevado número de equipos modernos, no tan tolerantes a estas variaciones, Lo que ha cambiado las características de carga de las instalaciones. Tal es el caso de la Empresa Ceproníquel donde se muestra en la tabla (2.1) el levantamiento de sus cargas en el suministro interno.



Tabla (2.1) Potencia de los equipos de cómputo e informática instalados en Ceproníquel.

EQUIPOS	Cantidad	Pu (W)	Pn(W)	Potencia demandada (kW)	Potencia a consumir (Kw.)
COMPUTADORAS	141	132	1861	16,6	11,02
DISPLAY	235	120	2820	25,1	16,69
IMPRESORA A4	19	880	1672	14,9	9,9
IMPRESORA A4	4	600	2400	2,1	1,42
IMPRESORA A3	2	920	1840	1,6	1,09
PLOTTER	4	1400	5600	5	3,31
SCANNER	3	720	2160	1,9	1,28
FOTOCOPIADORAS	8	1380	1104	9,8	6,53
CIRCUITO CERRADO DE TV	1	1200	1200	1,1	0,71
PIZARRA TELEFONICA	1	750	750	0,7	0,44

Tabla (2.2) El por ciento de la Potencia nominal que representan los equipos de cómputo e informática.

EQUIPOS	POTENCIA(w)	% POTENCIA(W)
COMPUTADORAS	1861	8,693418041
DISPLAY	2820	13,17326108
IMPRESORA A4	1672	7,810529266
IMPRESORA A4	2400	11,21128603
IMPRESORA A3	1840	8,595319288
PLOTTER	5600	26,1596674
SCANNER	2160	10,09015743
FOTOCOPIADORAS	1104	5,157191573
CIRCUITO CERRADO DE TV	1200	5,605643014
PIZARRA TELEFONICA	750	3,503526884
TOTAL DE CARGAS	21407	100

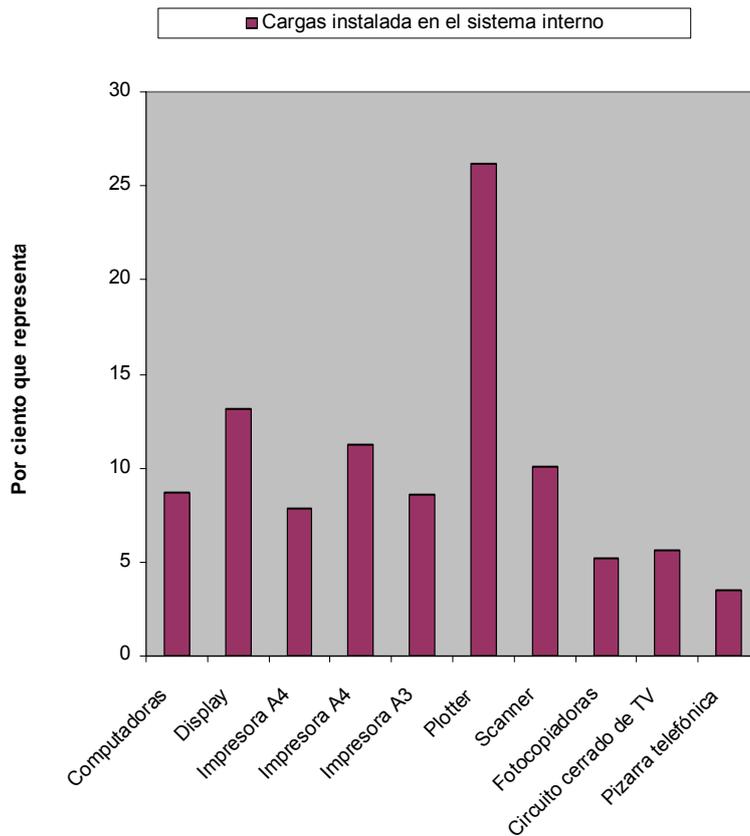


Grafico (2.1) Por ciento de la Potencia nominal de los equipos de cómputo e informática.

Después de haber calculado el por ciento de la Potencia nominal de las cargas (ver tabla 2.2) y representarlo gráficamente (ver gráfico 2.1) podemos observar que el mayor peso de consumo para los equipos de cómputo en la empresa recae sobre el Plotter que representa un 26.15%, seguido por los display 13.17 %, y son los responsables de que con las UPS instaladas hayan distorsión armónicos. Donde este caso indican que entre el Plotter y los Display se consume aproximadamente el 39.33 % de la Energía Eléctrica.

2.4 Características del equipo de medición.

Se utilizó un Analizador de redes Programable interlogger de 8 canales (versión 1.3).



Especificaciones del equipo:

Tipos de redes a medir:

1 fase 2 hilos ,1 fase 3 hilos, 3 fases 3 hilos (triángulo) ,3 fases 4 hilos (estrella), 2 ½ elementos vatimétricos.

Mediciones:

- Lecturas de mínima, máxima y medias instantáneas, 4 corrientes y tensiones.
- Frecuencia instantánea (canal 1).
- Valor medio de las potencias activa, reactiva, aparente y factor de potencia para 3 canales.
- Valor instantáneo de la DTA (tensión), DTA (corriente), componente armónico hasta el 31° (corriente), memorización de la forma de onda para tres canales.
- Demanda.
- Análisis gráficos y tabulares de todas las lecturas, incluyendo los cálculos de magnitudes angulares para los armónicos de corriente y tensión.

Rango de medidas:

- Tensión 240/600V (+25% de sobretensión).
- Corriente 1V (admisible pinzas de 5 a 3000A).
- Frecuencia 45 a 65Hz.

Relación tensión/corriente

- Ajustable hasta 50.000:1.

Precisión

- Tensión (0.5% de la lectura).
- Corriente (0.5% de la lectura).
- Frecuencia (0.5% de la lectura).

Velocidad de muestreo

- 128 muestra por ciclos.

Memoria

- Tarjeta de memoria RAM de hasta 2MB.

Capacidad

- RAM interna de 128 KB.



Tratamiento

- Circular una vez saturada.

Comunicaciones

- RS 232, 9600 baudios.
- Tarjeta SRAM, PCMCIA.

Alimentación

- Se autoalimenta de la línea desde 80 hasta 750V.
- Batería interna 6V.

Condiciones de servicio

- Desde -20°C hasta 50°C.
- Desde 0 hasta 90% de humedad relativa sin condensación.

Dimensiones

- 25x25x18 cm.

Peso

- 5.5 Kg.

Necesidades para el Software

- Data trend para Windows versión 1.31 o superior.
- PC de 25 Mhz 80386 o compatible, coprocesador matemático
- Memoria RAM mínima de 4MB, Windows 3.1 o mejor.
- Espacio mínimo de 4 MG en el disco duro.
- Monitor.
- Teclado.

2.4.1 Características del Software.

Este software empleado para descargar los datos desde el analizador es el Data Trend versión 8.4, este nos brinda las posibilidades de analizar los datos y exportarlos en Excel. Algunos de los datos que podemos descargar son:

Corriente:

Que no es más que número de cargas que atraviesan normalmente la sección transversal en la unidad del tiempo y se conoce como intensidad de corriente eléctrica. Y se mide en Ampere (A).

Tensión:

Es el trabajo por unidad de carga realizado por el dispositivo que recibe el nombre de voltaje diferencial de potencial y se mide en Volt (V).



THD:

Es la relación entre el valor eficaz de las componentes de armónicos de tensión o intensidad y el correspondiente valor fundamental.

Armónicos:

Son distorsiones de las ondas senosoidales de tensión y/o corriente de los sistemas eléctricos, debido al uso de cargas con impedancia no lineal, a materiales ferromagnéticos, y en general al uso de equipos que necesiten realizar conmutaciones en su operación normal.

Factor de potencia:

El factor de potencia es la relación entre la potencia activa y la potencia aparente del circuito, es una medida del grado de aprovechamiento de la energía eléctrica.

La potencia:

Es el trabajo realizado por unidad de tiempo. En caso eléctrico, se mide por el desplazamiento de cargas eléctricas a través de un campo (fuerza) eléctrico.

2.5 Análisis del comportamiento de las cargas.

Mediante la investigación en La Empresa de Ingeniería y Proyectos Ceperoníquel se hizo un levantamiento de cargas donde la mayor carga son computadoras, por ser la información su activo fundamental. Las mismas funcionan en base a una fuente de alimentación la cual es un puente rectificador, el cual tiene la característica natural de generar armónicos. A continuación se enlistan una serie de elementos de cómputo que son lo que ocasionan la generación de armónicos.

Tabla 2.3 CPU Packard Bell 100-125 Volts 3 amperes.

			Frecuencia	59.8
	Voltaje	Corriente	Watts (P)	40.00
RMS	132.60	0.56	VA (S)	74.00
Pico/Rms	1.39	2.91	VAr (Q)	23.00
THD Fund	1.59	120.29	VAd (D)	57.85
Factor K		17.56	FP	0.54
			Fdesp	0.86



Tabla 2.4 Datos del Monitor Láser 120 Volts 0.9 amp.

			Frecuencia	59.96
	Voltaje	Corriente	Watts (P)	13.00
RMS	134.98	0.14	VA (S)	18.00
Pico/Rms	1.4	2.11	VAr (Q)	4.00
THD Fund	0.76	80.82	VAd (D)	11.78
Factor K		22.94	FP	0.71
			Fdesp	0.95

Tabla 2.5 Datos de una Impresora matriz de puntos Epson L 1000 120 Volts 1.8 amp.

			Frecuencia	59.96
	Voltaje	Corriente	Watts (P)	44.00
RMS	134.79	0.56	VA (S)	75.00
Pico/Rms	1.39	2.98	VAr (Q)	15.00
THD Rms	0.92	77.15	VAd (D)	58.85
THD Fund	0.92	121.25	FP	0.60
Factor K		19.74	Fdesp	0.95

Tabla 2.6 Datos del equipo de cómputo: Monitor, CPU e impresora.

			Frecuencia	59.96
	Voltaje	Corriente	Watts (P)	-0.10
RMS	132.66	1.09	VA (S)	0.15
Pico/Rms	1.39	2.88	VAr (Q)	0.01
THD Fund	1.04	110.48	VAd (D)	0.111
Factor K		14.18	FP	0.66
			Fdesp	0.99



2.5.1 Fuentes conmutadas.

Las fuentes conmutadas son las causantes del mayor número de armónicos a la salida de la fuente, esto lo origina el troceado de corriente directa que con su switcheo introduce impurezas a la forma de onda resultante.

Etapas de las fuentes conmutadas:

- Rectificador AC-CD.
- Transformador (ferrita).
- Estabilizadores.
- Filtros.

Las fuentes de poder de CA se utilizan por lo común como fuentes alternas para cargas críticas y en aplicaciones en las que las alimentaciones normales de CA no están disponibles. Las fuentes de poder alternas también se conocen como sistemas de fuentes de poder ininterrumpibles (UPS). A continuación se representa la configuración de las UPS Figura(2.2). La carga de la figura (2.2a) esta normalmente alimentada desde la fuente principal de CA y el rectificador mantiene la carga completa en la batería. Si la alimentación falla, la carga se conmuta a la salida del inversor, que a continuación se hace cargo del suministro principal. Esta configuración requiere cortar el circuito en forma momentánea, y la transferencia mediante un interruptor de estado sólido por lo general toma de 4 a 5 μ s. El inversor opera únicamente durante el tiempo en que existe la falla de la alimentación.

La carga de la figura (2.2 b) opera en forma continua y su salida está conectada con la carga. No es necesario desconectar la alimentación en caso de una falla de la fuente. El rectificador¹ alimenta al inversor y mantiene la carga en batería de respaldo el inversor puede utilizarse para condicionar la alimentación a la carga en la batería, a fin de proteger la carga de los transitorios en la alimentación principal, y de mantener la frecuencia de la carga en el valor deseado. En caso de una falla del inversor, la carga se transfiere a la alimentación principal.

¹ Cuaderno Técnico n0 183, Armónicos: rectificadores y compensadores activos. Schneider Electric.

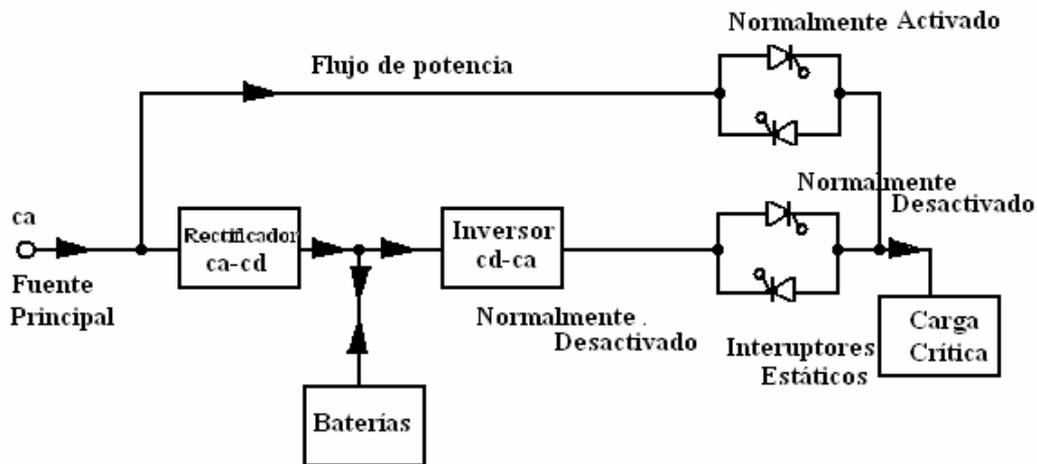


Figura (2.2a) Carga normalmente conectada a la fuente principal de CA.

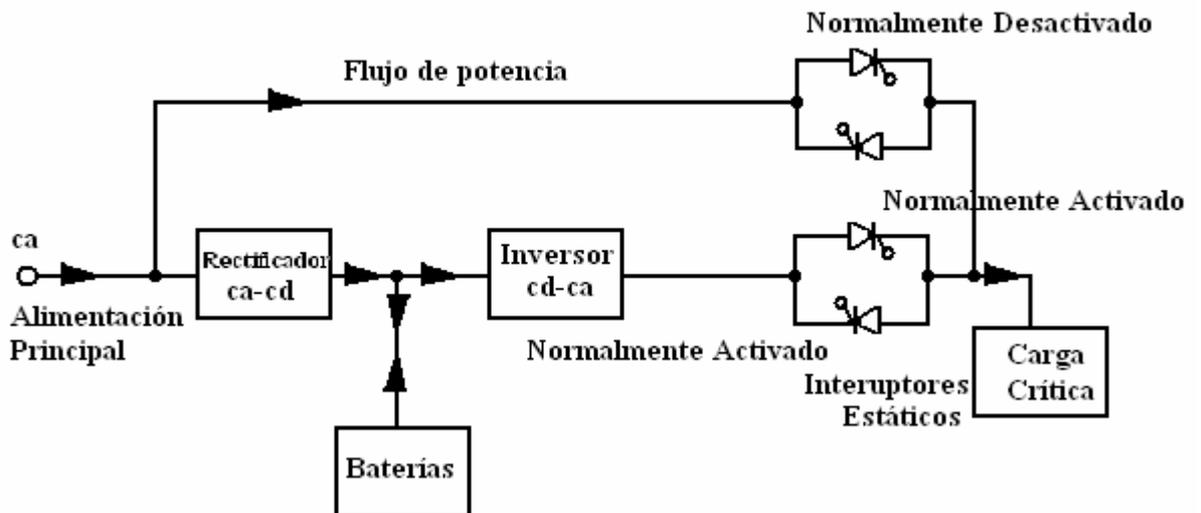


Figura (2.2b) Carga normalmente conectada al inversor.

Figura (2.2) configuración de UPS.

La batería de respaldo por lo general es de tipo de níquel-cadmio o plomo-ácido, una batería de níquel-cadmio es preferible a la de plomo-ácido, dado que el electrolito de una batería de níquel-cadmio no es corrosivo y no emite gases explosivos. Tiene una vida más larga debido a su capacidad de soportar el

sobrecalentamiento o la descarga. Sin embargo, su costo es por lo menos tres veces al de una batería de plomo-ácido. Un arreglo alterno de un sistema UPS aparece en la figura (2.3) está formado de una batería, un inversor y un interruptor estático. En caso de una falla en la energía, la batería alimenta al inversor. Cuando la alimentación principal está activa, el inversor opera como rectificador y carga la batería. En este arreglo, el inversor tiene que operar a la frecuencia fundamental de salida. En consecuencia no se utiliza la capacidad de alta frecuencia del inversor para reducir el tamaño del transformador. En forma similar a las fuentes de poder en CD.

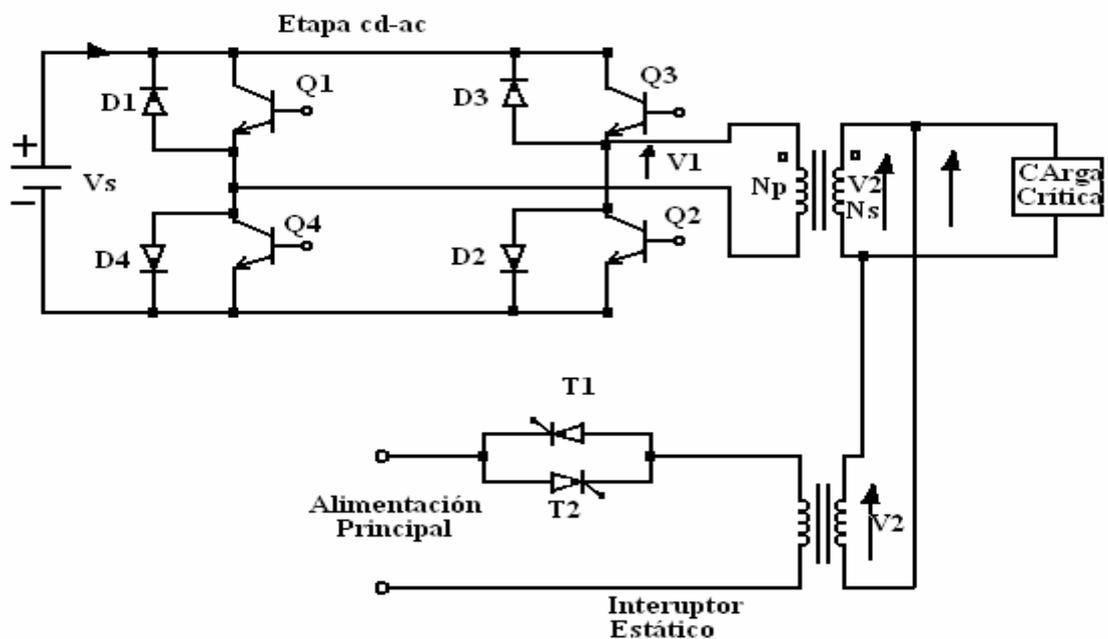


Figura (2.3) Disposición del sistema UPS.

2.5.2 Categorización de las fuentes de poder.

Las fuentes de poder se pueden categorizar en tres tipos:

1. Fuentes de poder de CA en modo interrumpido.
2. Fuentes de poder de CA resonantes.
3. Fuentes de poder de CA bidireccional.

Fuentes de poder de CA en modo interrumpido:

El tamaño del transformador de la figura (2.3) puede reducirse mediante la adición de un enlace de alta frecuencia de cd tal y como se muestra en la figura (2.4).

Existen dos inversores:

El inversor del lado de la entrada opera con un control PWM a muy alta frecuencia, a fin de reducir el tamaño del transformador y el filtro de cd en la entrada del inversor del lado de la salida.¹ El inversor del lado de la salida opera a la frecuencia de salida.

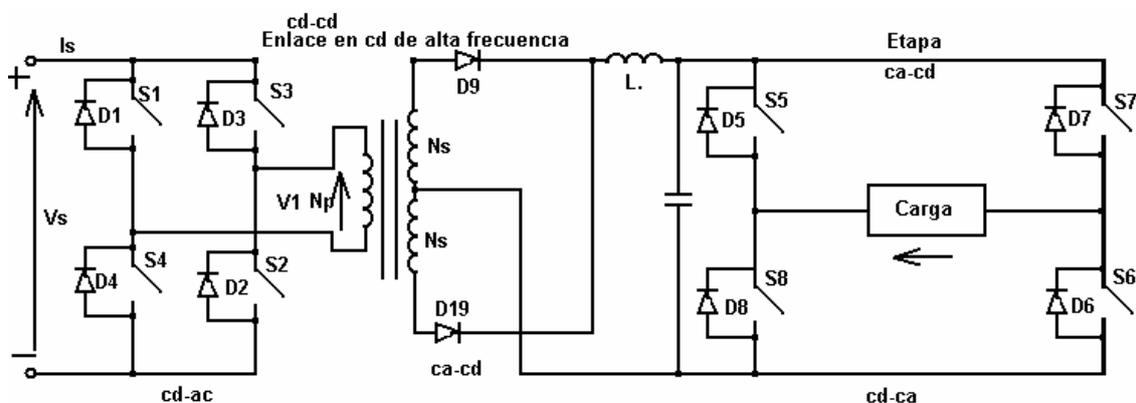


Figura (2.4) Fuentes de poder de CA en modo interrumpido.

Es necesario el convertir una fuente de cd de voltaje fijo a una fuente de cd de voltaje variable. Un pulsador se puede considerar como el equivalente a un transformador de ca con una relación de vueltas que varía en forma continua. Al igual que un transformador, puede utilizarse como una fuente de cd reductora o elevadora de voltaje.

El principio de la operación reductora:

El principio de esta operación puede explicarse a partir de la figura (2.5a) Cuando se cierra SW durante un tiempo t_1 , el voltaje de entrada V_s aparece a través de la carga. Si el interruptor se mantiene abierto durante un tiempo t_2 , el

¹ H. Rashid Muhammad. "Electrónica de Potencia circuitos dispositivos y aplicaciones" Tomo I y II.

voltaje a través de la carga es cero. Las formas de ondas correspondientes al voltaje de salida y de la corriente de carga se muestran en la figura (2.5b).

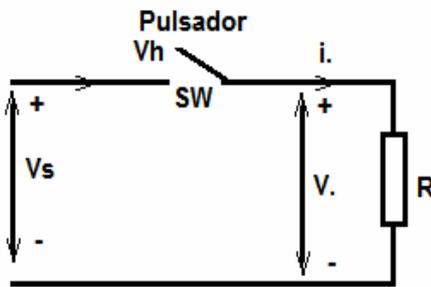


Figura (2.5a) Circuito.

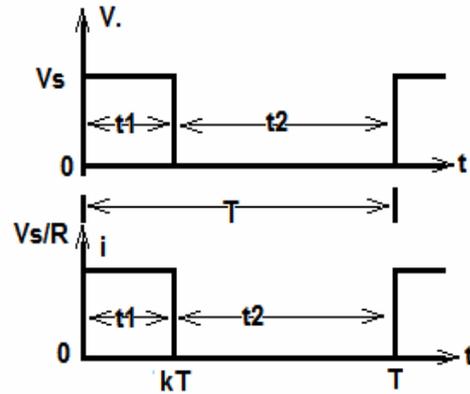


Figura (2.5b) Forma de onda.

Figura (2.5) Pulsador reductor con carga resistiva.

El voltaje promedio de salida esta dado por:

$$V_a = \frac{1}{T} \int_0^{t_1} v_0 dt = \frac{t_1}{T} V_s = f t_1 V_s = k V_s$$

Y la corriente promedio de carga, $I_a = V_a/R = kV_s/R$, donde T es el período de pulsación, $k = t_1/T$ es el ciclo de trabajo del pulsador, y f es frecuencia de pulsación. El valor rms del voltaje de salida se determina a partir de

$$V_0 = \left(\frac{1}{T} \int_0^{kt} v_0^2 dt \right)^{\frac{1}{2}} = \sqrt{k} V_s$$

Si suponemos un pulsor sin pérdidas, la potencia de entrada al pulsador es la misma que la potencia de salida, y esta dada por:

$$P_1 = \frac{1}{T} \int_0^{kt} v_0 i dt = \frac{1}{T} \int_0^{kt} \frac{v_0^2}{R} dt = k \frac{V_s^2}{R}$$

La resistencia efectiva de entrada, vista por la fuente es:



$$R = \frac{V_s}{I_a} = \frac{V_s}{kV_s IR} = \frac{R}{k}$$

Se puede variar el ciclo de trabajo k desde 0 hasta 1 así se varia t_1 , T , o bien f . Por lo tanto, al controlar k se puede variar el voltaje de salida V_0 desde 0 hasta V_s , y se puede controlar el flujo de potencia.

1. Operación a frecuencia constante.

La frecuencia de pulsación f (o el período de pulsación T) se mantiene constante variando solo el tiempo activo t_1 . El ancho del pulso se varía por lo que este equipo de control se conoce de modulación por ancho de pulso (PWM).

2. Operación a frecuencia variable.

Varía la frecuencia de pulsación f . Ya sea el tiempo activo, es decir t_1 , o el tiempo inactivo t_2 , se mantiene constante. Esto se conoce como modulación por frecuencia. La frecuencia debe variarse en un amplio rango de salida del voltaje. Este tipo de control generará armónicos a frecuencias no predecibles y el diseño del filtro resultará difícil.

2.6 Mediciones Realizadas.

Para realizar estudios detallados es necesario realizar mediciones, estas son el punto de partida para verificar los resultados de los estudios teóricos, verificar la validez de la hipótesis con que se realizaron la simulación y poder construir modelos para estudiar las diferentes condiciones de operación del sistema, de las mediciones es que evaluamos el estado del sistema eléctrico y así determinamos la necesidad de realizar estudios completos.

2.6.1 Punto donde se realizan las mediciones.

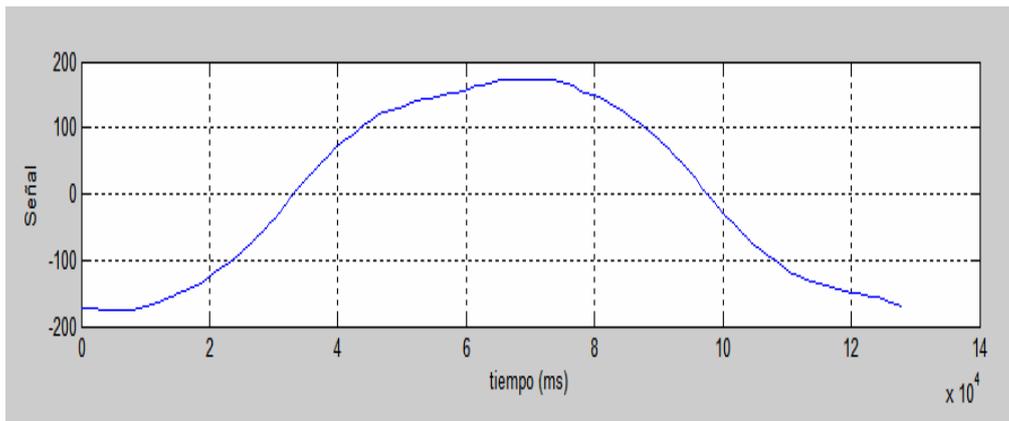
Las mediciones en el análisis del comportamiento de los armónicos de tensión las realizamos en el 4to Piso, porque el mismo resulta ser característico en la empresa (Ver anexo 2). donde se toma una parte del tiempo de medición.

Estas mediciones se realizaron con un intervalo de muestreo y secuencia de 1 minuto para lograr la aproximación aceptable entre el cálculo y las mediciones de la contaminación armónica total, a través del parámetro o variable de

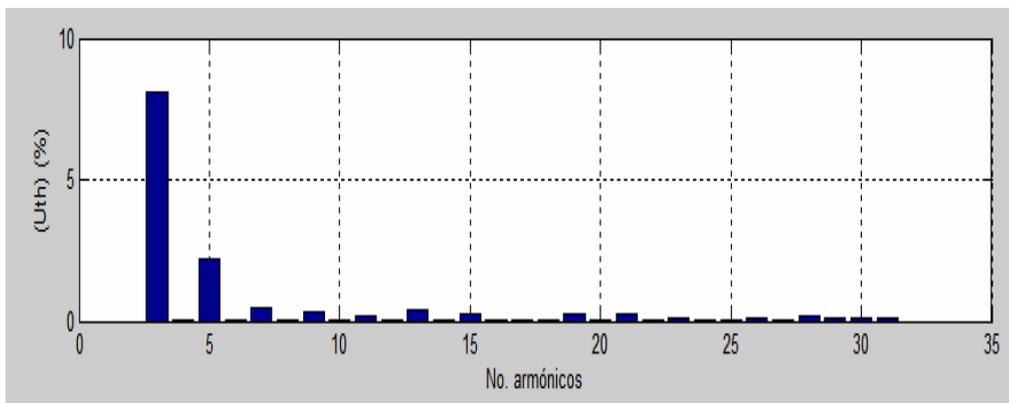


medición THD (Total Harmonic Distortion) ver totalidad de los resultados de las mediciones en los anexos (3).

Este programa tiene como base hardware un analizador de redes. El número de armónicos se toma hasta el 31° y con su importancia precalculada. Mediante la representación gráfica se obtuvo la onda deformada real (ver gráfico 2.2), se observa las distorsiones de armónicos de tensión medidas en el nodo principal (ver gráfico (2.3) y gráfico (2.4). Estos niveles de armónicos se originan por los elementos como las fuentes de alimentación de los equipos de cómputo. Comparándolo con los objetivos podemos observar que el armónico del orden 3° supera los límites inadmisibles a 8.4%, antes expuesto en el capítulo I, podemos ver estas distorsiones fundamentalmente cuando el equipamiento de cómputo esta funcionando, es decir mediante el horario laboral.



(Gráfico 2.2) La onda de armónicos.



Gráfica (2.3) THD% de Tensión en función al No. Armónicos.

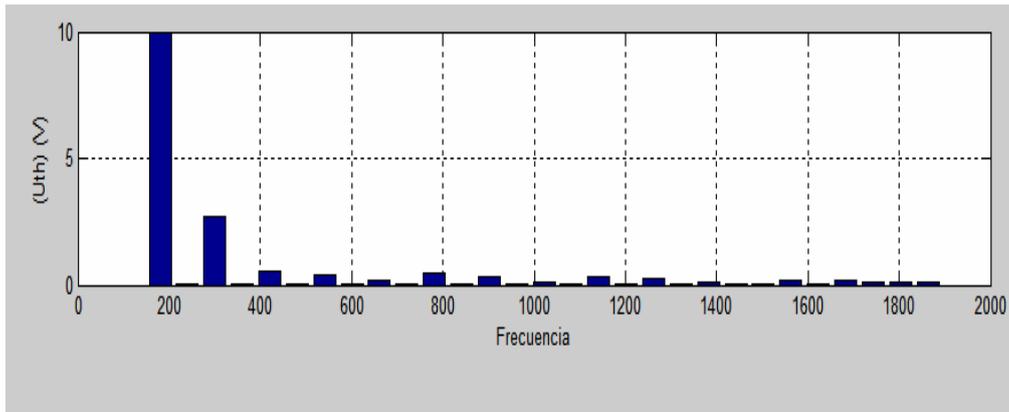


Grafico (2.4) THD en función a la frecuencia.

2.7 Comportamiento del Factor de potencia.

El factor de potencia es la relación entre la potencia activa y la potencia aparente del circuito, es una medida del grado de aprovechamiento de la energía eléctrica.

En el gráfico (2.5) se muestra que el factor de potencia en el horario laboral donde se conectan la mayoría de las cargas esta por debajo de lo normado, el valor promedio de este es de 0.56 lo que nos muestra el escaso coeficiente de utilización de la energía, a causa de los altos contenido de armónicos en la entidad. Por lo que se concluye que este nodo requiere de atención inmediata.

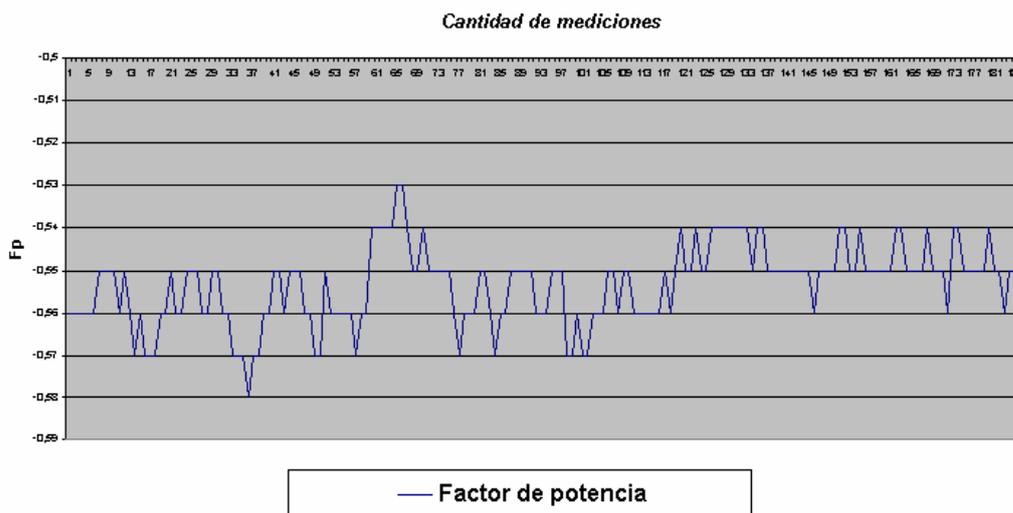


Gráfico 2.5 Factor de potencia.



2.8 Transformada rápida de Fourier para determinación de armónicos de una matriz de cualquier rango.

Extendiendo el período de integración T a infinito, la diferencia entre las frecuencias de armónicos tienden a cero y x (nf) se convierte en una función continua de la frecuencia que depende de:

$$x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt$$

Que se conoce como transformada directa de Fourier, y que convierte una señal en el campo del tiempo en una señal en el campo de la frecuencia.

Transformada Discreta de Fourier:

Cuando la señal ha sido muestreada en el dominio del tiempo, se utiliza la transformada discreta de Fourier, que se define por el par de expresiones siguientes:

$$x(f_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(t_n)e^{-j2\pi kn/N}$$

$$x(t_n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(f_k)e^{j2\pi kn/N}$$

Donde f_k y t_n son las frecuencias y los tiempos obtenidos en el muestreo de la señal y N es la cantidad de muestras por ciclo empleadas.

Expresión Matricial:

Si se declara la constante $W = \exp. (j2\pi/N)$, entonces puede declararse la siguiente expresión matricial para la transformada discreta de Fourier:

$$\begin{bmatrix} x(f_0) \\ x(f_1) \\ \vdots \\ x(f_k) \\ \vdots \\ x(f_{N-1}) \end{bmatrix} = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ 1 & W & & W^n & & W^{N-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 1 & W^k & & W^{kn} & & W^{k(N-1)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 1 & W^{N-1} & \dots & W^{(N-1)n} & \dots & W^{(N-1)^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t_0) \\ x(t_1) \\ \vdots \\ x(t_n) \\ \vdots \\ x(t_{N-1}) \end{bmatrix}$$



Transformada Rápida de Fourier:

El cálculo de la expresión matricial precedente requiere la realización de N^2 multiplicaciones complejas, lo que hace impráctico computacionalmente el cálculo de la transformada discreta en su forma original.

No obstante, para resolver este problema se ha creado un algoritmo de cálculo que solo requiere efectuar $1/N \cdot \log_2(N)$ multiplicaciones, lo que significa un gran ahorro de tiempo.

Este algoritmo se conoce como Transformada Rápida de Fourier (FFT), y el mismo está implementado en diversos sistemas computacionales disponibles.

Cálculo de la FFT:

Utilizando este análisis podemos descomponer una señal en sus componentes armónicos, por ejemplo si tenemos una señal cuadrada la cual podemos escribir como:

$$f(t) = \frac{4v}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \text{sen} n\omega_0 t = \frac{4v}{\pi} \left(\text{sen} \omega_0 t + \frac{1}{3} \text{sen} 3\omega_0 t + \frac{1}{5} \text{sen} 5\omega_0 t + \dots \right)$$

La aplicación de la FFT a la forma de onda del ejemplo considerado, con 12 muestras por ciclo y empleando la función `fft` del Matlab sería:

```
f = 60;  
w = 2*pi*f;  
T = 1/f;  
N = 12;  
t = 0: T/N: T*(1-1/N);  
v = 100*sin (w*t) + 25*sin (3*w*t) + 20*sin (5*w*t);  
X = 1/N * fft (v);
```

2.9 Conclusiones.

Después de haber realizado las mediciones y analizado los resultados del comportamiento de las cargas, pudimos notar el nivel de distorsión que presentan los armónicos y como principal nos aparece el 3°. Causando problemas en el sistema eléctrico de la Empresa. Por lo que es primordial



sobre la base del montaje del filtrado o cambio del conexionado del transformador darle solución a este inconveniente, que es de interés para la empresa por ser la misma una empresa de procesar y controlar información.



CAPITULO III: Métodos para la disminución de los armónicos.

3.1 Introducción.

En el capítulo anterior pudimos observar mediante las mediciones realizadas la presencia del 3° armónico con una amplitud de 8.4% estando estos valores fuera de las normas (IEEE-519). Con el conocimiento teórico alcanzado desde el capítulo I, podemos ver los efectos que ocasionan para la calidad de energía los armónicos de tensión. En este capítulo pretendemos para enfrentar estos problemas, proponer dos métodos con el fin de disminuir la cantidad y la amplitud de los armónicos de tensión, y logrando así la disminución de las pérdidas eléctricas por estos conceptos, además de aumentar la vida útil de los equipos.

3.2 Propuesta 1 (Filtro pasa bajo).

Después de un profundo análisis para determinar cual de las variantes de los filtros a utilizar, determinamos que el más conveniente es el filtro pasa bajo por lo que pretendemos darles los elementos necesarios para su diseño y montaje.

El filtro pasa bajo permite sólo el paso de frecuencias por debajo de una frecuencia en particular llamada frecuencia de corte (F_c) y elimina las frecuencias por encima de esta frecuencia. La reactancia capacitiva cambia con la frecuencia. Para altas frecuencias X_c es baja logrando con esto que las señales de estas frecuencias sean atenuadas. En cambio a bajas frecuencias (por debajo de la frecuencia de corte) la reactancia capacitiva es grande, lo que causa que estas frecuencias no se vean afectadas o son afectadas muy poco por el filtro. La reactancia inductiva (X_L) cambia con la frecuencia. Para altas frecuencias X_L es alta logrando con esto que las señales de estas frecuencias sean atenuadas. En cambio a bajas frecuencias, (por debajo de la frecuencia de corte) la reactancia inductiva es pequeña, lo que causa que estas frecuencias no se vean afectadas o son afectadas muy poco por el filtro. La frecuencia de corte es aquella donde la amplitud de la señal entrante cae hasta un 70.7 % de su valor máximo.



Ventajas del filtro pasa bajo:

- Este circuito absorberá las corrientes de armónicos, evitando su circulación en el circuito de alimentación.
- Se usa para eliminar los armónicos de orden bajo (inferiores al armónico oncenno).
- La frecuencia fundamental puede proporcionar la potencia reactiva requerida en la red.
- Tienen bajas pérdidas que están asociadas a la resistencia del inductor.

3.2.1 Ecuaciones y datos generales para el diseño del filtro Pasa Bajo.

Datos tomados del analizador de redes con el que se hicieron las mediciones (referente al mismo en el Capítulo II).

Factor de potencia: FP= -0, 56

La cantidad de vuelta: n=1

Inductores: L1=0.024 (H) L2=0.024 (H)

Corrientes: I1 (A) =8 A I2(A)= U2/Z2

Tensiones: U1 (V)=220V U2 (V)= 110V

Impedancia del filtro: $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ (ohm) $Z_2 = \frac{U^2_2}{S}$ (Ω)

Reactancia capacitiva: $X_C = \frac{-1}{2\pi fC}$, (F)

Velocidad angular: $\omega = 2 \times \pi \times n \times f$ (rad/s)

Resistencias del circuito: R2=10(ohm) R1=1(Mohm)



$$R = \sqrt{Z^2 - X_L^2} \quad (\Omega) \quad R_2 = \frac{P_2}{(I_2^2 \times Fp)} \quad (\Omega)$$

Potencia activa:

$$P_2 = \frac{P_1 \times n \%}{100} \quad (w) \quad P1=S/fp$$

Potencia Reactiva: $Q_2 = \sqrt{S^2 - P^2}$ (VAr)

Capacitancia: $C = 2 \times C_{12}$ (F)

Inductancia $L_1 = \frac{V^2}{(h^2 \times Q \times 2\pi \times f)}$

Capacitores: $C_1 = C_2$ (μF) $C_2 = 1000000 \times C$ (μF)

$$C_{12} = \frac{1}{w \times X_c} \quad (F)$$

Coefficiente de Transformación:

$$k = \frac{U_1}{U_2} \quad k_1 U_2 = \frac{U_1 \times 22}{42} \quad (V)$$

$$k_2 U_2 = \frac{U_1 \times 22}{40} \quad (V) \quad k_3 U_2 = \frac{U_1 \times 22}{38} \quad (V)$$

En la tabla (3.1) podemos ver los resultados del cálculo del filtro pasa bajo que proponemos.

Tabla (3.1) Resultados de los cálculos para el filtro pasa bajo.

Elementos	Cálculos
L1 (H)	0.024
L2 (H)	0.024
U1 (V)	220
I1 (A)	8
R1 (Ω)	10
U2 (V)	110
I2 (A)	16
R2 (M Ω)	1
C1(F)	6800
C12(micro F)	3.3
C2(pF)	6800
P(kW)	2
Transformador	220V/110V

3.2.2 Simulación.

Con los resultados obtenidos de la tabla (3.1) podemos realizar la simulación utilizando el software workbench del filtro pasa Bajo el cual podemos ver su circuito a continuación figura (3.1).

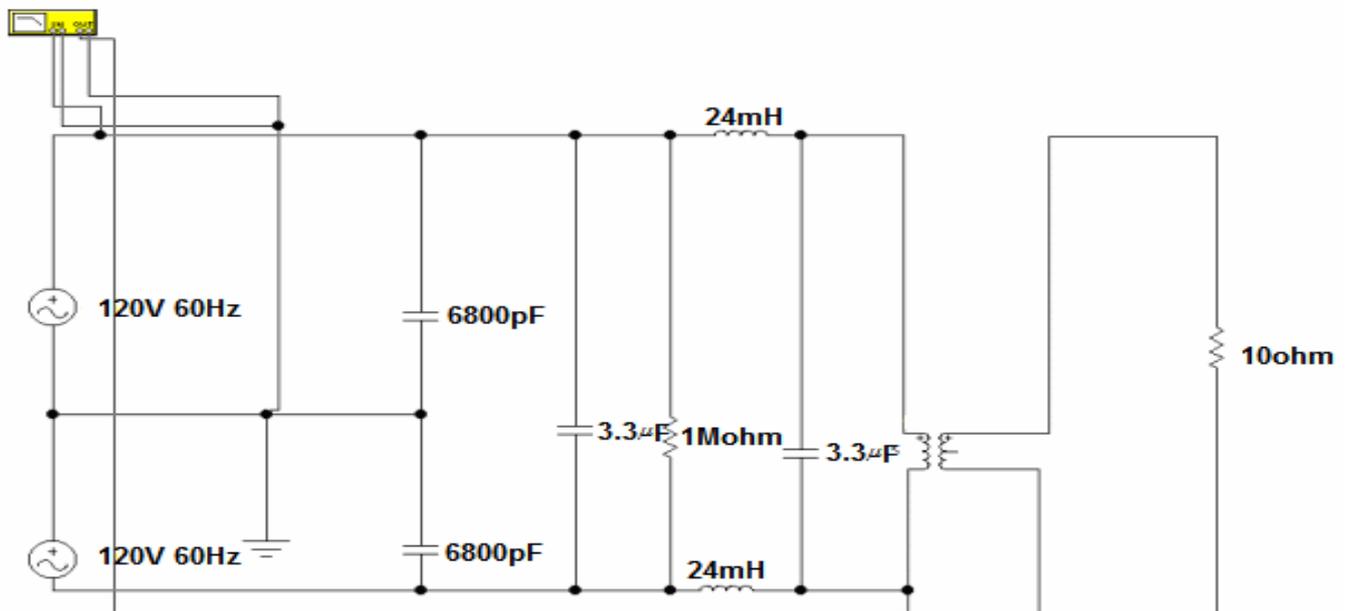


Figura (3.1) Circuito del filtro pasa bajo.

Simulación del filtro:

En la simulación pudimos obtener el gráfico (3.1) del comportamiento de la frecuencia donde se aprecia que para frecuencias menores a la del 3°



armónico (180 Hz) varía muy poco la forma de onda. Y para los armónicos del 3° al 11° se obtiene todavía una buena respuesta del filtro, gráfico (3.2), no siendo así para armónicos superiores a estos, aunque es bueno destacar que afectan muy poco a nuestro sistema esos armónicos superiores.

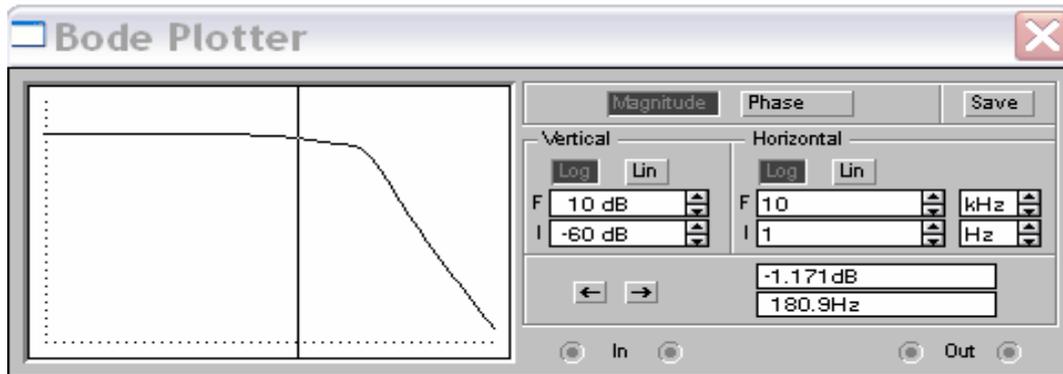


Gráfico (3.1). Representación de la frecuencia para 3° armónico.

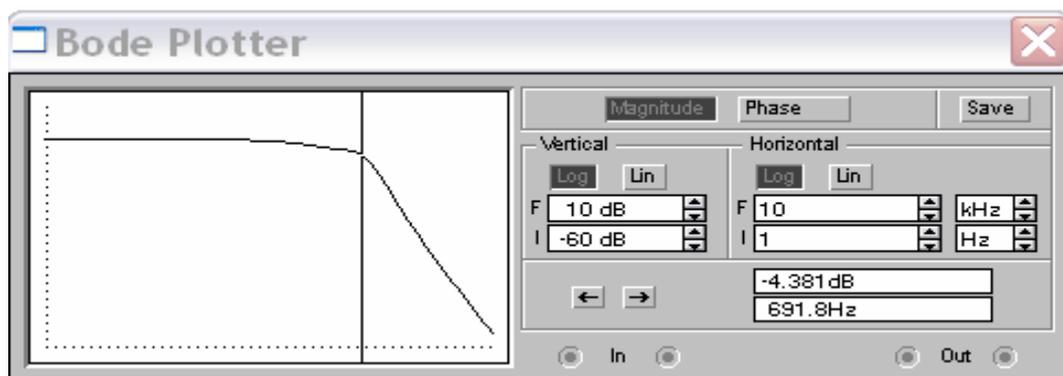


Gráfico (3.2) Representación de la frecuencia hasta armónico 11°.

3.3 Propuesta 2 (Cambio de conexionado del secundario del transformador).

Casi todos los sistemas importantes de generación y distribución de potencia del mundo son, hoy en día, sistemas de c.a. trifásicos¹. Puesto que los sistemas trifásicos desempeñan un papel muy importante en la vida moderna, Un transformador trifásico consta de tres transformadores monofásicos, bien separados o combinados sobre un núcleo. Los primarios y secundarios de

¹ Transformadores, J. Rosslyn, Editorial DALMAU Y JOVER S.A. 1952

cualquier transformador trifásico pueden conectarse independientemente en estrella (Υ) o en su caso en delta (Δ). Por lo que en este capítulo proponemos como 2da variante el cambio del transformador de la Empresa.

- Conexión estrella (Υ)- delta (Δ).
- Conexión delta (Δ)- estrella (Υ).

La conexión Υ - Δ de los transformadores trifásicos se ilustra en la figura 3.2

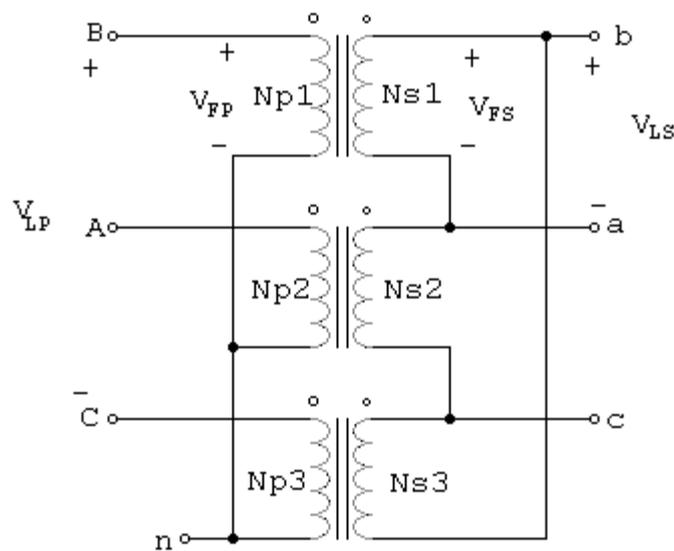


Figura (3.2) Conexión Υ - Δ .

3.3.1 Características del tipo de conexión estrella-delta

En esta conexión el voltaje primario de línea se relaciona con el voltaje primario de fase mediante $V_{LP} = \sqrt{3} * V_{FP}$, y el voltaje de línea secundario es igual al voltaje de fase secundario $V_{LS} = V_{FS}$. La relación de voltaje de cada fase es

$$V_{FP} / V_{FS} = a$$

¹ TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS INDUSTRIALES, Pedro Camarena M. 2 Edición, Editorial Continental S.A.



De tal manera que la relación total entre el voltaje de línea en el lado primario del grupo y el voltaje de línea en el lado secundario del grupo es

$$VLP / VLS = (\sqrt{3} * VFP) / VFS$$

$$VLP / VLS = (\sqrt{3} * a)$$

3.3.2 Ventajas y desventajas de la conexión delta-estrella con respecto estrella-delta

Ventajas (Estrella-Delta):

- Se eliminan las tensiones del tercer armónico por la circulación de la corriente de este en el secundario en triángulo.
- El neutro del primario se puede conectar con la tierra.
- El neutro del primario se mantiene estable por el secundario en triángulo.

Es la conexión más conveniente para los transformadores reductores de tensión, debido a las características inherentes de los enrollamientos en estrella para altas tensiones y de los enrollamientos en triángulo para las bajas tensiones.

Esta conexión también es más estable con relación a las cargas desbalanceadas, puesto que la delta (Δ) redistribuye parcialmente cualquier desbalance que se presente.

En razón de la conexión delta (Δ), el voltaje secundario se desplaza 30° con relación al voltaje primario del transformador. La conexión que se muestra en la figura (3.2) hará que el voltaje secundario se atrase, si la secuencia es abc. Si la secuencia del sistema fase es acb, entonces la conexión que se ve en la figura (3.2) hará que el voltaje secundario se adelante al voltaje primario en 30° .¹

¹ TRANSFORMER BOOK, "Johnson and Phillips, Ltd."



Inconvenientes.

No se puede disponer de un neutro en el secundario para conectar con la tierra o para una distribución de cuatro cables, a menos que se disponga un aparato auxiliar.¹

Un defecto en una fase hace que no pueda funcionar la batería o unidad trifásica hasta que se la repare.

El enrollamiento en triángulo puede resultar débil mecánicamente en el caso de un transformador² elevador con una tensión en el secundario muy alta, o con una tensión secundaria medianamente alta y potencia pequeña.

Aplicaciones.

La aplicación principal de esta conexión tiene efecto en los transformadores reductores para alimentar una carga equilibrada trifásica.

3.4 Energía consumida por los armónicos.

La energía consumida en la red por los armónicos es una energía no útil, y entra a los gastos de la Empresa por concepto de gastos eléctricos.

$$P_{\text{perdidas}} = U_h \times I_h \times Fp$$

3.5 Análisis de las pérdidas por concepto de armónicos.

Teniendo en cuenta que los valores de THD se dan en por cientos de los valores medios de tensión y corriente respectivamente, nos dimos a la tarea de calcular las amplitudes de dichos valores como se muestra a continuación. Los valores de los cálculos se muestran en (la tabla 3.2):

$$THD(U) = THD(U)\% \times U$$

$$THD(I) = THD(I)\% \times I$$

THD → Distorsión de armónicos.

¹ Maquinas eléctricas, Stephen Champan, Tercera Edición

²E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr. Stephen D, Umans. Máquinas Eléctricas.



Luego con estos valores se calcula la potencia consumida por cada uno de los armónicos individualmente, multiplicando el valor de la tensión por la corriente de los armónicos y finalmente se multiplica por el factor de potencia.

$$P (W) = U (V) * I(A) * FP$$

P (W) → Potencia activa.

Si sumamos cada una de las potencias disipadas por los armónicos individualmente obtendremos una potencia total de consumo a la salida de 58.47 Wh.

Tabla 3.2 Distorsión de armónicos, pérdidas.

No.Armónico	% THD	THD U(V)	U(V)	% THD	THD I(A)	I (A)	FP	P(W)
	U(V)			I (A)				
3° Armónico	8.4	11	129.9	75.2	8	10.2	-0.6	-49.28
5° Armónico	2.19	3	129.9	44.47	5	10.2	-0.6	-8.4
7° Armónico	0.44	1	129.9	17.59	2	10.2	-0.6	-1.12
9° Armónico	0.3	0.39	129.9	7.5	1	10.2	-0.6	0.2184
11° Armónico	0.15	0.195	129.9	7.59	1	10.2	-0.6	0.1092
Totales	11.48	15.585	649.5	152.35	17	51	-2.8	-58.4724

De los datos de consumo de energía y de lo que se paga a la empresa eléctrica (Anexo 4) podemos calcular aproximadamente lo que vale un kWh de energía consumido. Si a estos valores los multiplicamos por las horas de trabajo diario, mensuales o anuales, tendremos entonces lo que nos ahorraríamos por concepto de energía consumida por los armónicos en cada uno de estos períodos de tiempo. Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Gasto en cuc de la empresa por concepto de armónicos.

E(Wh)	1 Día cuc	1 Mes cuc	1 Año cuc
58.47	3.86	92.84	1040.6



Sería bueno aclarar que estos valores son ideales puesto que con ninguna de las variantes se eliminaría el total de los armónicos sino que se reducirían a valores por debajo de los normados por la IEEE -519.

De todas formas es bueno destacar que es significativo el valor anual ahorrado por concepto de armónicos 1040.6 cuc un valor relativamente alto si se compara con lo que costaría la implementación de algunas de las variantes planteadas.

3.6 Conclusiones.

- Calculamos el filtro que responde a frecuencias bajas.
- Analizamos las ventajas y desventajas de la eliminación de armónicos, cambiando el conexionado del secundario del transformador a delta.
- Calculamos las pérdidas eléctricas por conceptos de armónicos y su equivalente en divisa.



CONCLUSIONES GENERALES.

Como resultado de la investigación realizada se ha podido llegar a las siguientes conclusiones:

- En la investigación teórica se plantearon las bases para el desarrollo del trabajo.
- Se demostró mediante mediciones realizadas la existencia de perturbaciones en las redes.
- Se demostró que existe un amplio espectro de soluciones para disminuir el contenido de armónicos en las redes eléctricas de la empresa.
- Se propusieron dos variantes para mejorar los sistemas eléctricos con el objetivo de llevarlos a valores bajos compatible con las normas publicadas al respecto.
- El análisis económico demostró que existen posibilidades reales de aplicación de las variantes planteadas.



RECOMENDACIONES.

En este trabajo de tesis además de determinar las causas de la distorsión de armónico también proponemos:

1. Implementar una de las variantes propuestas considerando la eficiencia para la reducción de armónicos y sus ventajas técnicas-económicas.
2. Realizar estudios similares en otros circuitos de La Empresa para comparar la homogeneidad de esta.
3. Buscar criterios de optimización para ampliar las ventajas que brindan las variantes.



BIBLIOGRAFÍA

- A.M. Golé; M. Meisingset. "An AC Active filter for use at capacitor commutated HVDC converters". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, Nº 2, April 2001, pp. 335-341
- Cahiers techniques, n0152, harmonic in industrial networks. MERLIN GERIN. GROUPE SCHNEIDER.
- Cuaderno Técnico n0 152, Los armónicos en las redes perturbadas y su tratamiento. Schneider Electric.
- Compensación de potencia Reactiva en Sistemas Contaminados con Armónicos, Tesis en opción al título de Máster en Ingeniería Eléctrica. Universidad Central de las Villas. Santa Clara. 1998. Ing. José Ángel González Quintero.
- Cuaderno Técnico n0 183, Armónicos: rectificadores y compensadores activos. Schneider Electric.
- Distribución Eléctrica, Autor Incógnito.
- E. FITZGERALD, CHARLES KINGSLEY, JR. STEPHEN D, UMANS. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.
- Energía Eléctrica, Un Producto con Calidad, CEL. Horacio Torres. ICONTEC.
- Energice programa de adiestramiento de Video de Armónicos de Sistema, Tecnologías de Poder, SA.
- Fuentes de Distorsión Armónico, Soporte Científico Técnico, Boletín No. 4, Año I/99 By AWD. FARAGAUSS.
- H. Akagi. "The state of the art of power electronics in Japan". IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 13, Nº 2, March 1998, pp. 345-356
- H. Akagi. "New trends in active filters for power conditioning". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, Nº 6, Nov. /Dec. 1996, pp. 1312-1321.
- Harmonic Control in Electric Power Systems (IEEE Std. 519 1992), Technical Document, ROBICON.
- H. Rashid Muhammad. "Electrónica de Potencia circuitos dispositivos y aplicaciones" Tomo I y II.
- IEEE Manual de Armónicos



- IEEE Std.519, "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems".
- Información Técnica, Generalidades sobre Armónicos, CD Schneider Electric, 1998.
- J. Arrillaga, D. EL A. Bradley, y P. S. Bodger, Energiza Armónicos de Sistema, John Wiley & Hijos, 1985. [Respalde a la Distribución de Biblioteca]
- P.T. Cheng; S. Bhattacharya; D.M. Divan. "Application of dominant harmonic active filter system with 12 pulse nonlinear loads". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, N° 2, April 1999, pp. 642-647
- Power Quality ISSues-Standards and Guidelines, IEEE Transactions on Industry Applications, vol 32, num. 3, mayo/jun 1996, pp. 625-632, 18 refs.
- Trober Dick-"Trouble shooting harmonics in a modern office building."En: Electricity 7bday, Vol 3, N'2.Feb.1991, pp.33-35.
- STEPHEN CHAPMAN. MÁQUINAS ELÉCTRICAS
- Zamora; V. Macho. "Estudio bibliográfico sobre la distorsión armónico producida por convertidores estáticos". Editado por Iberdrola. ISBN 84-921260-1-9. 1997. 136 pags.
- Transformadores, J. Rosslyn, Editorial DALMAU Y JOVER S.A. 1952
- Maquinas eléctricas, Stephen Champan, Tercera Edición.
- [3] TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS INDUSTRIALES, Pedro Camarena M. 2 Edición, Editorial Continental S.A.
- [4] TRANSFORMER BOOK, "Johnson and Phillips, Ltd."



ANEXOS

Anexo # 1

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

APC SMART SERIES - DE PISO

ESPECIFICACIONES	SU1000INET	SU1400INET	SU2200INET	SU3000INET	SU5000I	
Software Power Chute Plus	Soporte para Windows NT, 2000, Novel Netware, Window95/98, Incluye plug-ins SNMP Agent para DELL, Compaq, HP e IBM managers					
Receptáculos de salida	4	4	8 + 1		8 + 2	
Número de espacios para smarslot	1				2	
Dimensiones (mm)	216 x 170 x 439		432 x 196 x 546		439x229x665	
Peso neto	18.8kg	24.1kg	50.8kg	55.8kg	95.3kg	
Tensión nominal de entrada	230Vac, una fase, 50 o 60Hz (auto seleccionable)					
Tiempo de transferencia (habitual)	2 milisegundos , incluyendo tiempo de detección					
Tensión de salida en batería	Salida de onda senosoidal pura a 230VCA +/-5%, -10% tras aviso de batería baja, sincronizada con la red					
Operación SmartBoost™ y SmartTrim™	Operación en línea para entrada entre 176 y 282 VCA. La salida será de 196 a 253 VCA. SmartBoost aumenta la tensión en 12% si la entrada está entre 176 y 196VCA. SmartTrim reduce la tensión un 12% si la entrada es de 253 a 282 VCA. Los puntos de transferencia son ajustables según la necesidad mediante el software					
Capacidad (VA, W)	1000 / 670	1400 / 950	2200 / 1600	3000 / 2250	5000 / 3750	
Grado de energía de sobretensión capacidad máxima actual	480 Joules, 6,5kA					
Restricción normal de modalidad común tiempo de respuesta	0ns, <5ns habitual					
Baterías	Selladas, ácido y plomo sin mantenimiento con una vida útil habitual de 3 a 6 años					
Tiempo de recarga al 90% de capacidad	3 horas					
BTU's (h.)	100	135	275	375	430	
CON UNA CARGA DE:	CARGA (WATTS) / VOLTS AMP.	1000	1400	2200	3000	5000
Sistema / equipos electrónicos 1	130 / 200	1h 14m	2h 7m	4h 15m	4h 20m	6h 17m
Sistema / equipos electrónicos 2	195 / 300	46m	1h 22m	5h 58m	3h 3m	4h 39m
Sistema / equipos electrónicos 3	260 / 400	30m	58m	2h 14m	2h 19m	3h 38m
Sistema / equipos electrónicos 4	325 / 500	21m	43m	1h 45m	1h 50m	2h 58m
Sistema / equipos electrónicos 5	390 / 600	15m	33m	1h 25m	1h 29m	2h 29m
Sistema / equipos electrónicos 6	455 / 700	11m	26m	1h 10m	1h 14m	2h 7m
Sistema / equipos electrónicos 7	520 / 800	9m	21m	1h	1h 4m	1h 50m
Sistema / equipos electrónicos 8	585 / 900	7m	17m	51m	53m	1h 36m



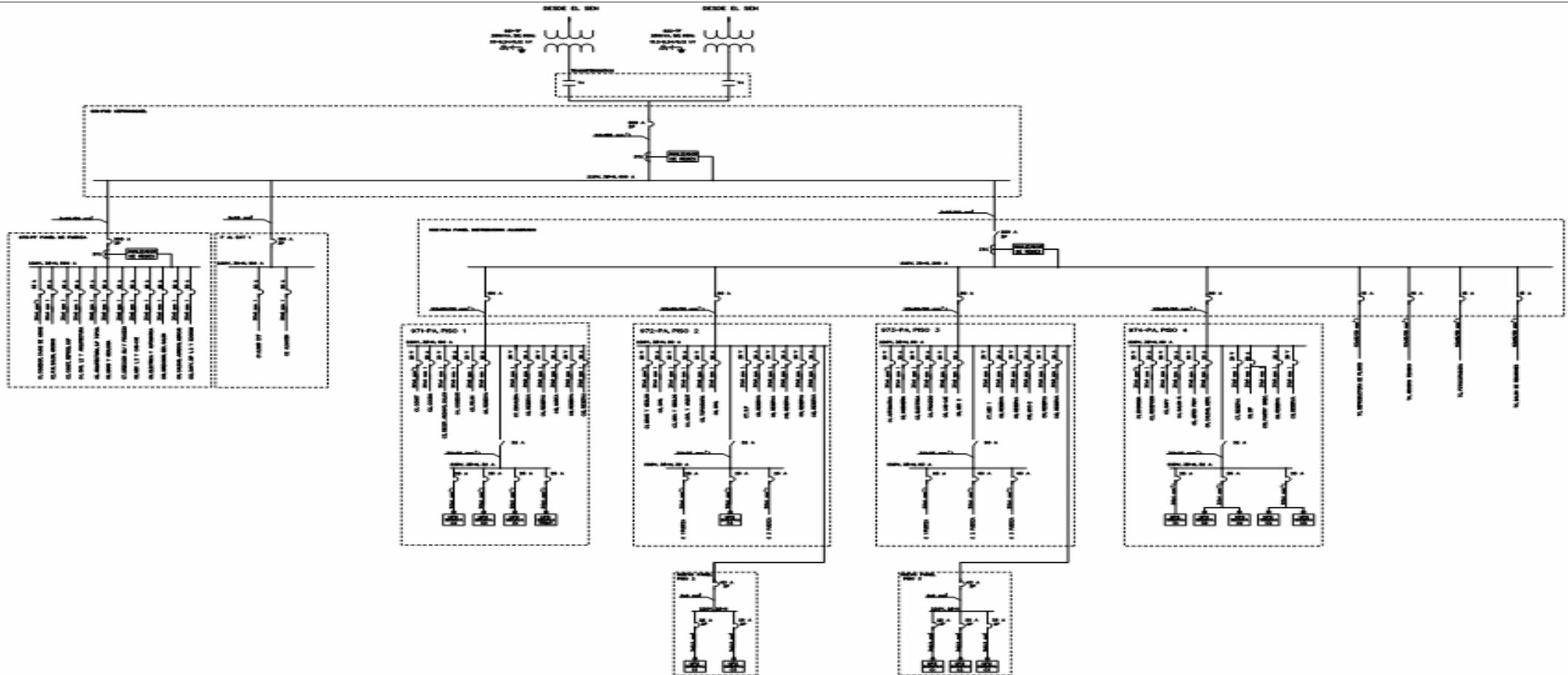
Propuesta para la reducción de Armónicos en La Empresa de Proyectos del Níquel.

Sistema / equipos electrónicos 9	650 / 1000	6m	14m	44m	46m	1h 25m
Sistema / equipos electrónicos 10	780 / 1200	No	9m	34m	37m	1h 8m
Sistema / equipos electrónicos 11	910 / 1400	No	7m	26m	28m	56m
Sistema / equipos electrónicos 12	1040 / 1600	No	No	21m	22m	47m
Sistema / equipos electrónicos 13	1300 / 2000	No	No	14m	15m	34m
Sistema / equipos electrónicos 14	1430 / 2200	No	No	11m	12m	29m
Sistema / equipos electrónicos 15	1625 / 2500	No	No	No	5m	23m
Sistema / equipos electrónicos 16	1950 / 3000	No	No	No	No	17m
Sistema / equipos electrónicos 17	3500 / 5000	No	No	No	No	6m

Nota: La carga indicada en la presente tabla es indicativa, la autonomía deberá ser calculada teniendo en cuenta la carga total real.



Anexo # 2





Anexo # 3

Time	U(V)	THDV 3 %	U(V) 3 thd	THD I 3%	I (A)	I (A) 3 thd	Fp	P(W)	S(VA)	Q (VAR)	MI3	MI5	MI7	MI9
13:25	129,9	8,1	10,5219	75,2	10,2	7,6704	-0,56	758.54	1338.24	-1102.51	75,2	44,47	17,59	7,5
13:26	129,7	7,9	10,2463	74,58	10,2	7,60716	-0,56	750.2	1337.58	-1104.83	74,58	46,22	20,82	6,93
13:27	129,7	7,94	10,29818	76,11	10,2	7,76322	-0,56	757.59	1345.16	-1119.86	76,11	46,35	19,84	7,89
13:28	129,6	7,99	10,35504	76,59	10,2	7,81218	-0,56	763.84	1348.47	-1123	76,59	46,39	19,49	8,44
13:29	129,9	8,04	10,44396	74,79	10,2	7,62858	-0,56	749.35	1335.5	-1098.14	74,79	44,02	17,78	8,11
13:30	129,9	8,07	10,48293	77,73	10,2	7,92846	-0,56	758.73	1340.99	-1037.42	77,73	46,76	19,67	9,07
13:31	130	8,03	10,439	75,93	10,2	7,74486	-0,55	735.71	1325.55	-1082.14	75,93	46,19	17,14	5,99
13:32	130,2	8,03	10,45506	76,2	10,2	7,7724	-0,55	745.75	1335.31	-1072.24	76,2	46,61	18,43	5,49
13:33	130,6	8,13	10,61778	74,49	10,2	7,59798	-0,55	751.72	1347.05	-1055.97	74,49	43,15	17,42	7,91
13:34	130,5	8,12	10,5966	74,13	10,2	7,56126	-0,55	746.41	1339.1	-1208.89	74,13	42,51	17,3	7,73
13:35	130,2	8,13	10,58526	75,15	10,2	7,6653	-0,56	755.32	1338.34	-1305.3	75,15	44,65	17,84	7,17
13:36	130,2	8,1	10,5462	75,07	10,2	7,65714	-0,55	747.17	1337.3	-1148.74	75,07	45,27	18,01	8
13:37	130,2	8,17	10,63734	74,38	10,2	7,58676	-0,56	768.86	1352.93	-1118.61	74,38	44,54	17,96	8,47
13:38	130,2	8,01	10,42902	74,35	10,2	7,5837	-0,57	779.28	1361.26	-1119.63	74,35	43,66	16,5	6,76
13:39	130,2	8,05	10,4811	74,25	10,2	7,5735	-0,56	760.15	1346.68	-1067.22	74,25	42,51	15,18	8,12
13:40	130,2	8,21	10,68942	-75,27	10,2	-7,67754	-0,57	783.64	1369.88	-1065.9	-75,27	43,09	17,59	6,36
13:41	130,2	8,18	10,65036	72,22	10,2	7,36644	-0,57	793.49	1383.71	-1052.71	72,22	45,1	16,64	6,57
13:42	130,2	8,18	10,65036	73,79	10,2	7,52658	-0,57	785.63	1377.93	-1022.53	73,79	43,79	16,53	6,73
13:43	130,3	8,22	10,71066	73,86	10,2	7,53372	-0,56	753.23	1342.6	-1022.52	73,86	44,75	16,39	6,61
13:44	130,2	8,15	10,6113	73,29	10,2	7,47558	-0,56	751.53	1340.23	-1010.85	73,29	43,48	16,02	6,04
13:45	130	8,21	10,673	74,26	10,2	7,57452	-0,55	756.45	1351.41	-1013.94	74,26	43,03	16,64	8,23



Anexo # 4

Plan Electricidad	D. Contratada CUC	Perdidas		Lectura del Metro		Consumo KWh			Importe CUC	Factor K	Factura Total CUC
		%	CUC	Anterior	Actual	Perdidas	Activo	Total			
24 870.00	125.00	7.23	129.43	7 627.00	7 760.00	1 153.91	15 960.00	17 113.91	1 790.22	2.5493	2 044.65
25 000.00	125.00	6.14	119.13	7 760.00	7 902.00	1 046.26	17 040.00	18 086.26	1 940.30	2.5879	2 184.44
25 000.00	125.00	7.34	-1 844.62	7 902.00	6 082.00	-16 030.56	-218 400.00	-234 430.56	-25 131.03	2.6152	-26 850.64
25 000.00	125.00	5.38	135.89	6 082.00	6 257.00	1 129.80	21 000.00	22 129.80	2 525.75	2.7335	2 786.64
22 610.00	125.00	6.05	139.20	6 257.00	6 417.00	1 161.60	19 200.00	20 361.60	2 300.81	2.7235	2 565.01
23 000.00	125.00	5.75	132.05	6 417.00	6 580.00	1 124.70	19 560.00	20 684.70	2 296.45	2.6683	2 553.49
21 500.00	125.00	5.64	133.14	6 580.00	6 752.00	1 164.10	20 640.00	21 804.10	2 360.67	2.5994	2 618.81
26 000.00	125.00	5.49	143.12	6 752.00	6 929.00	1 166.08	21 240.00	22 406.08	2 606.96	2.7895	2 875.08
	125.00			6 929.00							
	125.00			0.00							
	125.00			0.00							
	125.00			0.00							
192 980.00	1 500.00	6.13	- 912.66			-8 084.12	-83 760.00	-91 844.12	-9 309.86	2.6583	-9 222.52