



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**SOLUCIÓN A LOS PROBLEMAS DE CORRIENTES Y
VOLTAJES ARMÓNICOS EN LOS SISTEMAS
INDUSTRIALES**

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

P R E S E N T A N:

ENRIQUE OLAF MORALES GARCÍA
JORGE LUIS RODRÍGUEZ GONZÁLEZ

T U T O R:
ING. FRANCISCO CUEVAS ARTEAGA



2012

AGRADECIMIENTOS

A mi Padre **DIOS**. Porque que al renunciar a mis sueños egoístas del mundo, valió la pena, porque conocí a DIOS y lo dejé vivir en mi corazón. A él de bebo todo porque sin él en mi vida no hubiera cumplido uno de mis más anhelados sueños, el haber terminado la licenciatura.

DIOS es el único que lo puede todo. Lo que para nosotros es imposible para él es posible, porque siendo sus hijos él nos dará todo lo mejor, solo él nos pide que nos dejemos dirigir y hagamos su voluntad.

DIOS fue el que me levantó en los momentos más difíciles, me mostro que valía la pena luchar por nuestros más preciados anhelos y sobre todo cumplir nuestros propósitos.

Isaías 40 ²⁸ *¿No has sabido, no has oído que el Dios eterno es Jehová, el cual creó los confines de la tierra? No desfallece, ni se fatiga con cansancio, y su entendimiento no hay quien lo alcance.*²⁹ *Él da esfuerzo al cansado, y multiplica las fuerzas al que no tiene ningunas.*³⁰ *Los muchachos se fatigan y se cansan, los jóvenes flaquean y caen,*³¹ *pero los que esperan a Jehová tendrán nuevas fuerzas; levantarán alas como las águilas; correrán, y no se cansarán; caminarán, y no se fatigarán.*

A mis papás. DIOS estará agradecido contigo y con mis papás **Carlos y Guadalupe** porque tú eres sabio y sabes porque me diste estos papás, gracias por esas bendiciones que recibí durante mi formación y sobre todo porque les diste sabiduría para que me pusieran en tus caminos.

Efesios 6 ¹ *Hijos, obedeced en el Señor a vuestros padres, porque esto es justo.*² *Honra a tu padre y a tu madre, que es el primer mandamiento con promesa,*³ *para que te vaya bien, y seas de larga vida sobre la tierra.*

A **Carlos Edgar** mi hermano y **Elizabeth** mi cuñada y sus dos bendiciones que Dios les dio **Karla** y **Carlos** mis sobrinos. Gracias Dios por ser tan misericordioso conmigo por haberme dado un hermano así como él, de él aprendí muchas cosas y su ejemplo me ha servido para seguir y seguir adelante, por su esposa al ver ese complemento como familia y por mis sobrinos al ver ese corazón dispuesto al mandato de DIOS.

A **Juan Carlos** mi cuñado y **Alma Idalia** mi hermana y su bendición **Keila**. A ellos por ver en esos momentos difíciles el lado agradable de la vida y sobre todo cuando se pasan pruebas porque Dios está siempre para tenernos en el hueco de su mano y a mi sobrina por mostrarme ese corazón noble.

A **Juan Hiram** mi futuro cuñado e **Isis Inna Iveth** mi hermana, que me mostraron por qué es importante hacer la voluntad de Dios y sobre todo por su obediencia, porque

cumpliendo eso Dios nos llenará de sus promesas y sus bendiciones que él prometió para todos sus hijos que lo aman.

A **Laura Iraís**. A esta preciosa mujer que me ha acompañado durante esta etapa de estudiante, gracias a ella porque siempre me ha mostrado el por qué uno debe cumplir sus anhelos, sus sueños y sus metas. Gracias a DIOS por haberte puesto en mi vida y por ser mi novia, y si es la voluntad de DIOS estaremos juntos.

Santiago 1 ¹² *Bienaventurado el varón que soporta la tentación; porque cuando haya resistido la prueba, recibirá la corona de vida, que Dios ha prometido a los que le aman.*

A la **Universidad Nacional Autónoma de México**. Gracias a DIOS por crear a la máxima casa de estudios y por existir la **Facultad de Ingeniería** a la que le debo mi formación académica, la **UNAM** me dio el privilegio de ser parte de su comunidad desde la iniciación universitaria, el bachillerato y la licenciatura.

A la **Comisión Federal Electricidad**, gracias a esta paraestatal porque ahí me brindaron todo el apoyo para realizar este trabajo y sobre todo al área de Unidad de Ingeniería Especializada (UIE), a todo el personal que conforma esta área por su infinito apoyo.

Al M. en C. **Gilberto Enríquez Harper** por su apoyo infinito y por brindar sus aportaciones para este trabajo.

Al Ingeniero **Francisco Cuevas Arteaga** por ser nuestro tutor y por su motivación para el término de este trabajo, por enseñarnos que los logros más difíciles en la vida valen la pena porque tienen un propósito grande en la vida.

Contenido

<i>OBJETIVO</i>	9
<i>DEFINICIÓN</i>	9
<i>MÉTODO</i>	9
<i>INVENTARIO</i>	9
<i>RESULTADOS</i>	9
<i>INTRODUCCIÓN</i>	10
CAPITULO I	12
Disturbios que afectan la Calidad de la Energía y fuentes de corrientes armónicas	12
1.1. Calidad de la Energía	12
1.1.1. La importancia de la calidad de la energía	12
1.1.2. ¿Qué es la calidad de la energía?	12
1.1.3. Tipos de disturbios en los Sistemas Eléctricos de Potencia	13
1.1.3.1. Transitorios	13
1.1.3.2. Variaciones de voltaje de larga duración	15
1.1.3.3. Variaciones de voltaje de corta duración	17
1.1.3.4. Desbalance de voltaje	19
1.1.3.5. Distorsión en la forma de onda	20
1.1.3.6. Fluctuaciones de voltaje (Flicker)	23
1.1.3.7. Variaciones en la frecuencia	24
1.1.3.8. Curva CBEMA	24
CAPITULO II	26
Análisis Armónico	26
2.1. Introducción a las armónicas	26
2.2. Definición de armónica	26
2.3. Distorsión armónica	28
2.3.1. Descomposición de una onda distorsionada en sus armónicas	29
2.4. Componentes simétricas y secuencia armónica	30
2.5. Distorsión Armónica Total	31
2.6. Fuentes de armónicas	32
2.6.1. Fuentes tradicionales de armónicas	32
2.6.2. Nuevas fuentes de armónicas	38

2.7.	Características de la respuesta del sistema	40
2.7.1.	Impedancia del sistema	40
2.7.2.	Impedancia capacitiva.....	41
2.7.3.	Resonancia paralelo	42
2.7.4.	Resonancia serie	44
2.8.	Normatividad sobre el problema de armónicas	45
2.8.1.	Norma IEEE Std. 519-1992	45
2.8.2.	Norma CFE L0000-45-1995.....	47
2.9.	Efectos de las armónicas en los sistemas eléctricos	52
2.9.1.	Efectos en el sistema de potencia	52
2.9.2.	Efectos en los circuitos de comunicaciones.....	53
CAPITULO III		55
Modelado de un Sistema de Potencia Industrial		55
3.1.	Definición de un Sistema de Potencia y su Clasificación.	55
3.1.1.	Generación	55
3.1.2.	Transmisión	55
3.1.3.	Sub-transmisión	55
3.1.4.	Distribución.....	55
3.2.	Modelado de un Sistema de Potencia con el Programa de DIGSILENT	56
3.2.1.	Introducción al DIGSILENT.....	56
3.2.2.	Modelado de un Sistema de Potencia con DIGSILENT	56
3.2.2.1.	Descripción de la interfaz.....	56
3.2.2.2.	Algunos pasos para modelar un Sistema de Potencia en el DIGSILENT 60	
3.2.2.3.	Creando elementos del Sistema de Potencia	63
3.2.2.4.	Creando componentes del Sistema de Potencia.....	64
3.2.2.5.	Creando barras	64
3.2.2.6.	Creando elementos de rama	65
3.2.2.7.	Creando elementos de un solo puerto.....	66
3.2.2.8.	Editando los componentes del Sistema de Potencia	67
3.2.2.9.	Editando barras.....	67
3.2.2.10.	Editando elementos de rama.....	69
3.2.2.11.	Editando elementos de un solo puerto.....	69

3.2.2.12.	Efectuando cálculo de corto circuito	70
3.2.2.13.	Efectuando un flujo de potencia	71
3.2.2.14.	Realizar cálculo de Armónicos:.....	73
CAPITULO IV	.....	79
SOLUCIÓN A PROBLEMAS DE ARMÓNICOS	.....	79
4.1. Dimensionamiento y especificación del filtro de corriente armónica de 5^o orden.	.....	80
4.1.1. Dimensionamiento del filtro de 5 ^a armónica de 1.5 [MVAR] en 4.16 [kV], 45 MVAcc, 6.245 KAcc.	.....	80
4.1.1.1. Componentes del filtro	80	
4.1.1.2. Especificación de la unidad capacitadora utilizando el concepto de gradiente de potencial	82	
4.1.1.3. Reactor del filtro para la 5 ^a armónica	83	
4.1.1.4. Calidad del filtro:	85	
4.1.1.5. Protecciones del filtro:.....	86	
4.1.1.8. Aplicación de la especificación CFE L0000-45-2005	96	
4.1.1.9. Diagrama unifilar de la Industria. En la figura 4.9 se muestra un diagrama unifilar como el que se puede ver normalmente en la industria con diversas cargas las cuales pueden generar armónicos.	96	
CAPITULO V	.....	108
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	.....	108
5.1. Conclusiones	.....	108
5.2. Recomendaciones	.....	109
5.2.1. Recomendaciones hacia los filtros.....	110	
5.2.2. Recomendaciones hacia los Transformadores	112	
5.3. Ahorro	113	
5.3.1. Necesidades en Industria	114	
5.3.2. Necesidades del cliente	118	
5.3.3. Beneficios para el cliente.....	119	
5.3.4. Etapas estudio de armónicos.....	119	
BIBLIOGRAFÍA	120	

OBJETIVO

Solucionar problemas de corrientes y voltajes armónicos que se presentan en los sistemas eléctricos industriales, comerciales y de empresas suministradoras de energía eléctrica.

DEFINICIÓN

En los sistemas eléctricos industriales y comerciales se instalan cargas no lineales de gran capacidad las cuales generan corrientes armónicas que distorsionan la forma de onda de voltaje afectando a los equipos de control, comunicación, bancos de capacitores, transformadores y equipo eléctrico diverso.

Así que se modelará un sistema eléctrico industrial en el cual se presenten problemas de armónicos y se analizarán las opciones viables para mejorar la calidad de la energía.

MÉTODO

Se modela un Sistema Eléctrico Industrial el cual contiene cargas no lineales, se realizará el estudio de flujos de potencia y se determinan las soluciones para mejorar la PQ lo cual lleva a dimensionar bancos de capacitores o filtros de corrientes armónicas.

INVENTARIO

- Análisis de Circuitos Eléctricos.
- Sistemas Eléctricos de Potencia I, II
- Protección de Sistemas Eléctricos
- Fundamentos de Control
- Dispositivos de Circuitos Electrónicos
- Electrónica de Potencia

RESULTADOS

Tener un Sistema Eléctrico Industrial eficiente, con alta calidad de energía. Se obtendrá el conocimiento necesario para el modelado de cada uno de los componentes de los sistemas eléctricos de potencia para los estudios de flujos de potencia y cálculo de corrientes de corto circuito, su análisis y el dimensionamiento de bancos de capacitores y filtros de corrientes armónicas.

INTRODUCCIÓN

La calidad de la energía se entiende cuando la energía eléctrica es suministrada a los equipos y dispositivos con las características y condiciones adecuadas que les permita mantener su continuidad sin que se afecte su desempeño ni provoque fallas a sus componentes.

En México se cuenta con la "Ley del servicio público de energía eléctrica y su reglamento 1993" que define las condiciones de suministro de la energía eléctrica, estableciendo en el capítulo V artículo 18 del suministro y venta de energía eléctrica que

"El suministrador de energía eléctrica deberá ofrecer y mantener el servicio en forma de corriente alterna en una, dos o tres fases, a las tensiones alta, media y baja disponibles en la zona de que se trate, observando que:

- La frecuencia sea de 60 Hz, con una tolerancia de 0.8% en más o menos
- Que las tolerancias en el voltaje de alta, media o baja tensión, no excedan de 10% en más o en menos y tiendan a reducirse progresivamente".

El término "*calidad de energía eléctrica*" se emplea para describir la variación de la tensión, corriente y/o frecuencia en el sistema eléctrico.

Históricamente, la mayoría de los equipos son capaces de operar satisfactoriamente con variaciones relativamente amplias de estos tres parámetros. Sin embargo, en los últimos diez años se han agregado al sistema eléctrico un elevado número de equipos, no tan tolerantes a estas variaciones, incluyendo a los controlados electrónicamente.

Algo del control se hace directamente a través de convertidores de potencia, como son impulsores de ca, cd y fuentes de energía conmutadas, además del equipo electrónico que está en los controles periféricos, como computadoras y controladores lógicos programables (PLC's). Con la disponibilidad de estos complejos controles, se desarrolló un control de procesos mucho más preciso y un sistema de protección mucho más sensible; lo que hace a éstos aún más susceptibles a los efectos de los disturbios en el sistema eléctrico.

Los disturbios en el sistema de potencia que se han considerado normales durante muchos años, ahora pueden causar problemas en el sistema eléctrico industrial, con la consecuente pérdida de producción. Adicionalmente, deben tomarse en cuenta nuevas medidas para desarrollar un sistema eléctrico confiable, mismas que anteriormente no se consideraron significativas.

Es importante darse cuenta de que existen otras fuentes de disturbios que no están asociadas con el suministro eléctrico de entrada, estas pueden incluir descargas electrostáticas, interferencia electromagnética radiada y errores de operadores. Adicionalmente, los factores mecánicos y ambientales juegan un papel en los disturbios del sistema, estos pueden incluir temperatura, vibración excesiva y conexiones flojas.

En la actualidad cada vez es más extendido el uso de equipo electrónico sensible y continuamente las velocidades de procesamiento se incrementan por lo que es indispensable que las instalaciones se realicen con apego a las normas, se cuente con equipos de protección adecuado y se reduzcan los disturbios en el sistema eléctrico, para lo cual es importante establecer una coordinación entre la compañía suministradora, los fabricantes de equipos y los usuarios.

Cuatro parámetros pueden servir como referencia para clasificar los disturbios de acuerdo a su impacto en la calidad de la energía:

- Variaciones de frecuencia que raramente ocurren en sistemas alimentados por las compañías suministradoras, siendo más común que se encuentren en sistemas aislados de motor-generador en los que las variaciones de carga provocan variaciones de frecuencia.
- Variaciones de amplitud pueden ocurrir en diferentes formas y rangos de duración que van desde transitorios de muy corta duración hasta condiciones de estado estable.
- Desbalanceo entre las fases de un sistema polifásico causado principalmente por la operación de cargas monofásicas desiguales que afectan principalmente a máquinas rotatorias y circuitos rectificadores trifásicos.
- Variaciones en la forma de onda de voltaje o corriente producidos por cargas no lineales, denominada distorsión armónica.

CAPITULO I

Disturbios que afectan la Calidad de la Energía y fuentes de corrientes armónicas.

1.1. Calidad de la Energía

1.1.1. La importancia de la calidad de la energía

La principal razón por la que hay interés en los estudios de calidad de energía es de tipo económico. En los últimos años, se ha incrementado el número de cargas sensibles a las variaciones de los parámetros en el suministro de energía eléctrica.

No sólo los consumidores domésticos o comerciales se ven afectados en este sentido, también se ven inmersos los consumidores industriales y las propias empresas suministradoras y distribuidoras de energía eléctrica que utilizan en la mayor parte de los casos, los avances de la electrónica de potencia.

1.1.2. ¿Qué es la calidad de la energía?

La calidad de la energía puede definirse como la ausencia de problemas manifestados en voltaje, corriente y frecuencia que pueden conducir a una falla o salida de operación en el equipo de los usuarios finales.

La calidad del suministro está definida por tres factores importantes: continuidad del servicio (considerando el mínimo de fallas del suministro de potencia), limitación de las variaciones de voltaje y control de la frecuencia eléctrica a su valor nominal.

Debido a la importancia que representa la energía eléctrica en nuestra vida y la forma en que repercuten los problemas de calidad del servicio, podemos decir que el propósito de la calidad de la energía es encontrar métodos efectivos para evitar o atenuar los disturbios a los límites permitidos por las normas de tal manera que los usuarios y empresas suministradoras no se vean afectados, así como proponer soluciones para corregir problemas típicos de sags, flicker y corrientes y voltajes armónicos en las empresas industriales y comerciales.

1.1.3. Tipos de disturbios en los Sistemas Eléctricos de Potencia

1.1.3.1. Transitorios

El término transitorio es utilizado para denotar las variaciones indeseables y momentáneas en la forma de onda de corriente o voltaje.

El transitorio puede aparecer en la instalación del usuario debido a disturbios en el sistema de distribución de la empresa suministradora o a disturbios dentro de la propia instalación del usuario. La duración de los transitorios puede ser de nanosegundos a varios milisegundos.

Algunas de las fuentes de transitorios generadas en el sistema de distribución de la empresa suministradora son:

- Rayos que inciden en las fases de las líneas de transmisión.
- Rayos que inciden en los hilos de guarda de las líneas de transmisión y subestaciones.
- Operación de interruptores y cuchillas.
- Fallas de aislamiento.
- Operación de recierre en alimentadores.
- Switcheo de bancos de capacitores.

Algunas de las fuentes de transitorios generadas en las instalaciones del usuario son:

- Descargas atmosféricas.
- Switcheo de capacitores.
- Conmutación de diodos y tiristores.
- Switcheo de cables.
- Operación de interruptores y cuchillas.

- Operación de fusibles limitadores de corriente.

Los transitorios pueden clasificarse en dos categorías: transitorios de impulso y transitorios oscilatorios.

Transitorios de impulso

Es un cambio súbito de voltaje, corriente o ambas, a una frecuencia distinta de la fundamental; es unidireccional en su polaridad. Se caracterizan por ondas de sobretensión de frente rápido y de aumento relativamente lento en la escala de tiempo que se maneja. Por ejemplo, un impulso transitorio de $1.2 \times 50 \mu\text{s}$, de 2000 V, se eleva desde cero a su valor pico de 2000 V en $1.2 \mu\text{s}$ y después decae a la mitad de su valor pico en $50 \mu\text{s}$. La causa más común de los impulsos transitorios son las descargas atmosféricas.

Los impulsos transitorios pueden excitar la frecuencia natural de los circuitos del sistema de potencia y producir transitorios oscilatorios.

Transitorios oscilatorios

Transitorios cuyo valor instantáneo de voltaje o corriente cambia rápidamente de polaridad. Pueden ser causados, por ejemplo, por la desconexión de líneas y energización de bancos de capacitores y transformadores de potencia. Un ejemplo de transitorio oscilatorio es el que se muestra en la figura 1.1.

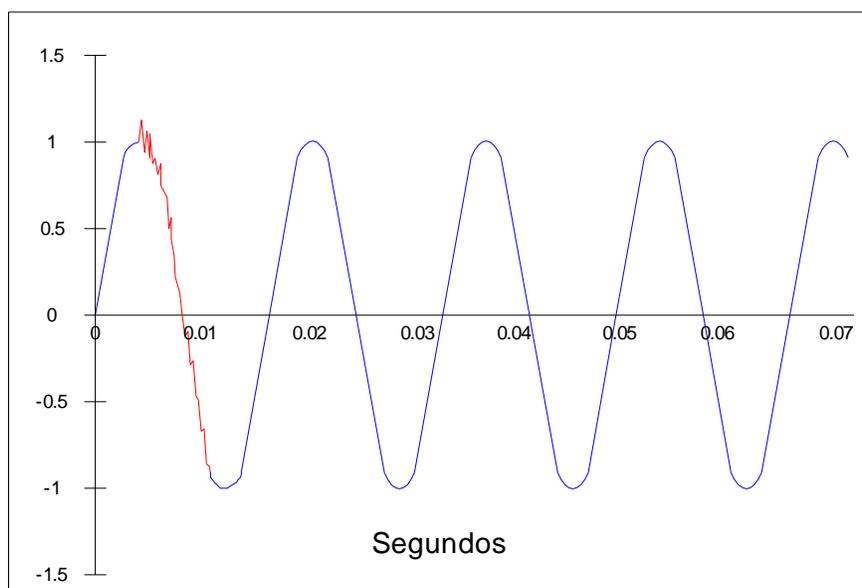


Fig. 1.1 Ejemplo de un transitorio oscilatorio

En base a la magnitud de frecuencia y su duración, los transitorios oscilatorios se clasifican en tres categorías: transitorios de baja, media y alta frecuencia.

1.1.3.2. Variaciones de voltaje de larga duración

Son variaciones de voltaje a la frecuencia del sistema por tiempos mayores a 1 minuto. Estas variaciones son causadas por variaciones en la carga y por las operaciones de switcheo en el sistema.

La duración de estas variaciones depende de la operación del equipo para soporte de voltaje; por ejemplo, reguladores de voltaje o sistemas de excitación de generadores.

Las variaciones de larga duración pueden ser sobrevoltajes o bajos voltajes; generalmente, no son consecuencia de una falla en el sistema y son causados por variaciones en la carga y operaciones de switcheo.

Sobrevoltaje de larga duración

Un sobrevoltaje es un incremento en el valor de voltaje RMS mayor del 110% por más de 1 minuto, como se muestra en la figura 1.2.

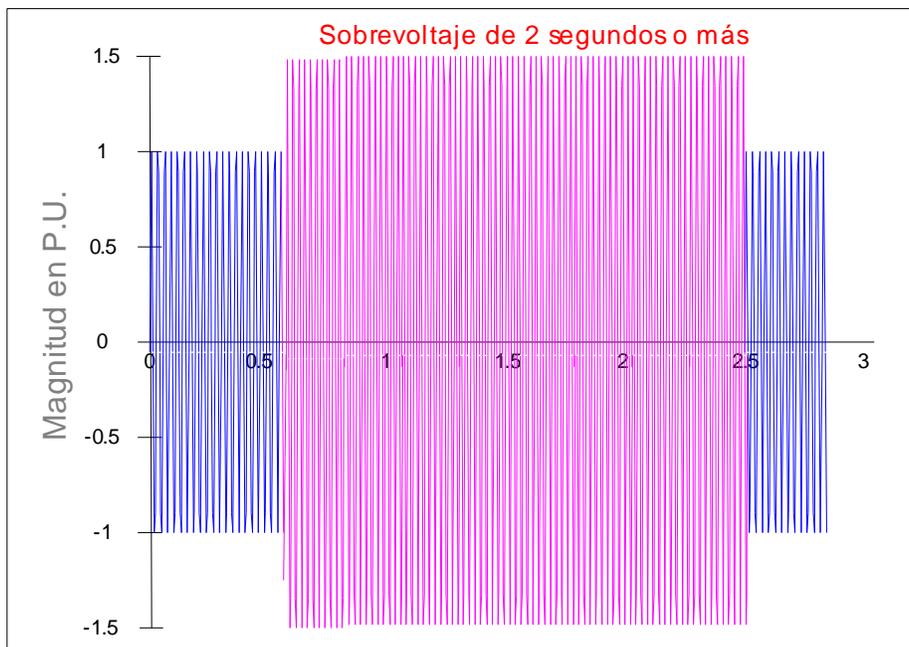


Fig.1.2 Condición de sobrevoltaje

Usualmente, los sobrevoltajes son producto del switcheo de cargas, como la desenergización de cargas muy grandes o la energización de bancos de capacitores. También son causados por la debilidad en el sistema y una inadecuada regulación y control del mismo.

Bajo voltaje de larga duración

El bajo voltaje es un decremento en el valor de voltaje RMS menor al 90% por más de 1 minuto como se muestra en la figura 1.3.

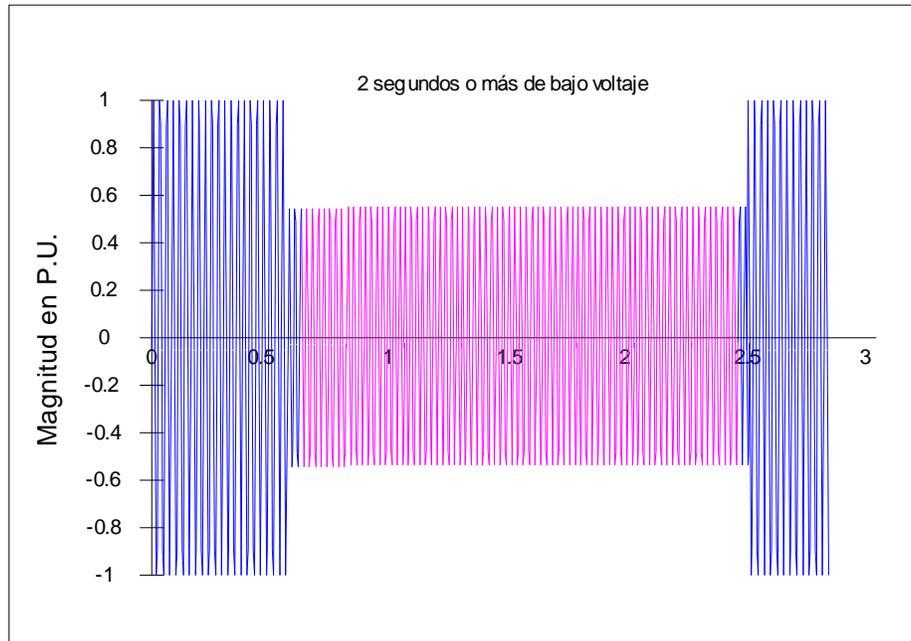


Fig. 1.3 Condición severa de bajo voltaje

Los bajos voltajes también son producto del switcheo de cargas, pero con efectos opuestos a los sobrevoltajes. Por ejemplo, la energización de una carga conduce a una caída de voltaje, hasta que el equipo de regulación u otro dispositivo compensen dicho cambio.

En el arranque de motores, la corriente típica de arranque de un motor puede variar de 6 a 10 veces la corriente de carga nominal. El bus detecta una impedancia muy baja durante el arranque originando un bajo voltaje en el sistema.

Interrupciones sostenidas

Interrupciones de voltaje con una duración mayor a un minuto y que requieren de la intervención del personal para restaurar el sistema.

1.1.3.3. Variaciones de voltaje de corta duración

Las variaciones de voltaje de corta duración son causadas por condiciones de falla o switcheo de cargas o pérdidas intermitentes de conexiones en la instalación y su duración está limitada a 3 segundos. La falla puede provocar caídas de voltaje temporales (sags) o sobrevoltajes temporales (swells), dependiendo de su localización y las condiciones del sistema.

Interrupciones

Una interrupción es una pérdida de potencia menor a 0.1 pu por un periodo de tiempo no mayor a un minuto, como se muestra en la figura 1.4.

Las interrupciones pueden resultar de fallas en el sistema de potencia, fallas en el equipo o mal funcionamiento del control.

La duración de una interrupción debida a una falla en el sistema está determinada por el tiempo de operación de los dispositivos de protección utilizados.

Las interrupciones se clasifican de acuerdo a su tiempo de duración en:

- Interrupción instantánea. De 0.5 a 30 ciclos
- Interrupción momentánea. De 30 ciclos a 3 segundos
- Interrupción temporal. De 3 segundos a 1 minuto

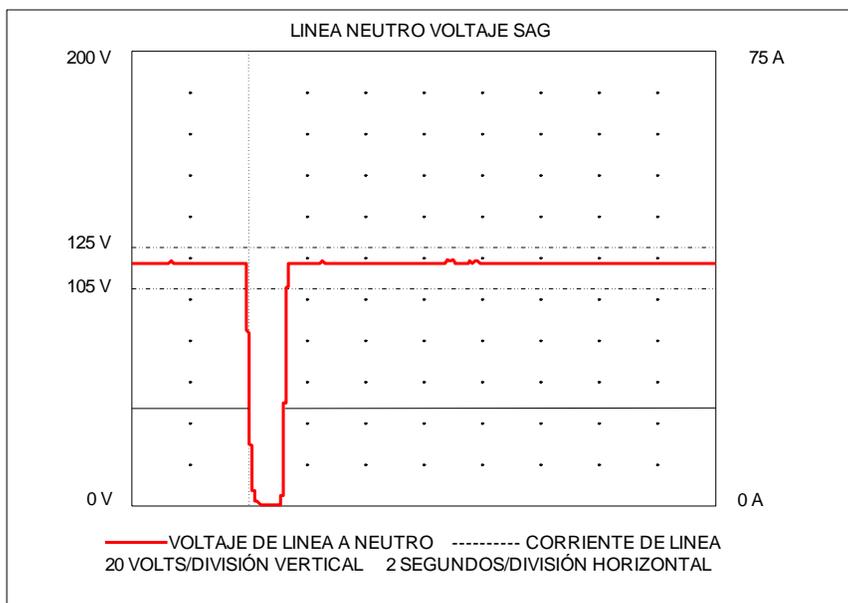


Fig. 1.4 Interrupción

Sags de voltaje

Un sag de voltaje es un decremento entre 0.1 y 0.9 pu en el valor de voltaje RMS a la frecuencia fundamental, con una duración de 0.5 ciclos a 1 minuto.

En la figura 1.5 se muestra una duración típica de los sags que es de 10 a 500 milisegundos, pero podrían alcanzar los 2 segundos (120 ciclos).

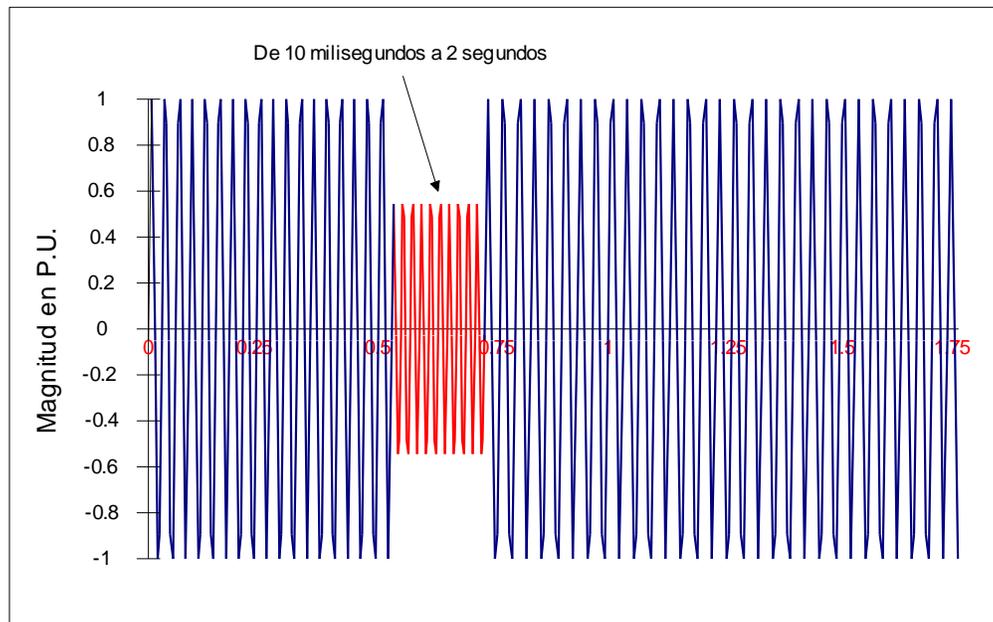


Fig. 1.5 Sag debido a una falla en un alimentador

Los sags generalmente son asociados con fallas en el sistema, pero también pueden ser causados por arranque de motores, energización de cargas pesadas o por fallas en alimentadores adyacentes y su duración depende de los tiempos de libramiento de la corriente de falla. Los sags más comunes son debidos a fallas de línea a tierra, pero los más severos son debidos a fallas trifásicas.

El problema más común causado por el sag es el disparo indeseado de los controladores de proceso y apertura de contactos de contactores.

Swells de voltaje

Un swell de voltaje es un incremento entre el 1.1 y 1.8 pu en la magnitud del voltaje RMS en cualquiera de las fases del sistema como se muestra en la figura 1.6. La duración del swell puede ser de 0.5 ciclos a 1 minuto.

El swell puede ser causado por fallas en el sistema, aunque no son tan comunes como en los sags, energización de bancos de capacitores y switcheo de cargas.

Los swells son caracterizados por su magnitud y duración; la severidad de un swell de voltaje durante una falla depende de la localización de la falla, la impedancia y el aterrizamiento del sistema.

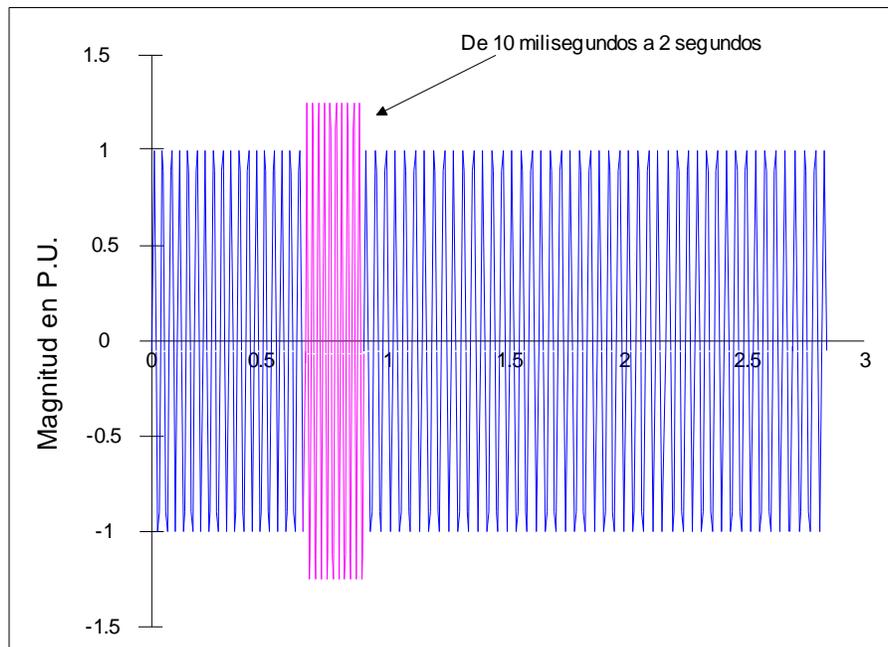


Fig. 1.6 Swell de voltaje

1.1.3.4. Desbalance de voltaje

Condición en la cual los voltajes de las tres fases difieren en amplitud o están desplazados a diferente ángulo de su defasamiento normal (120°).

El desbalance de voltaje está definido como la relación de la componente de secuencia negativa o cero a la componente de secuencia positiva. Los voltajes de secuencia negativa o cero en un sistema de potencia, generalmente resultan del desbalance de cargas que originan corrientes de secuencia negativa o cero.

El desbalance puede ser estimado como la desviación máxima del promedio de los voltajes o corrientes trifásicas, dividido por el promedio de los mismos, expresado en %.

1.1.3.5. Distorsión en la forma de onda

Distorsión. Es el término utilizado para describir la deformación que sufre la onda senoidal de voltaje y de corriente.

Distorsión en la forma de onda: Es una distorsión en estado estable de una onda senoidal ideal a la frecuencia fundamental, caracterizada principalmente por el contenido espectral de la distorsión.

Existen cinco tipos principales de distorsión en la forma de la onda:

Componente de CD

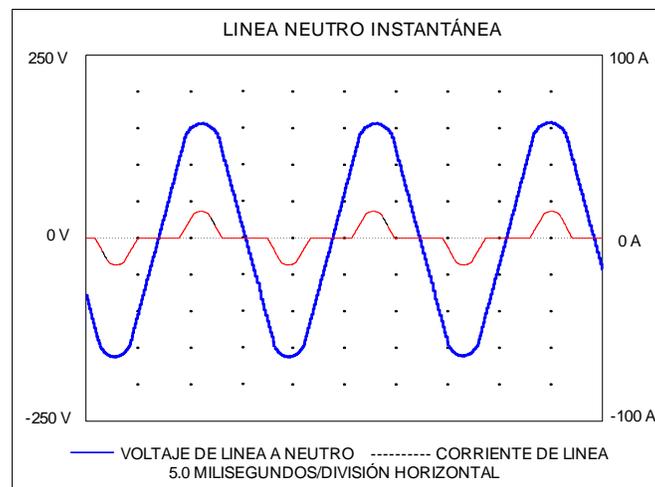
Es la presencia de corriente directa en un sistema de corriente alterna. Esto puede ocurrir por convertidores electrónicos conectados a la red de suministro o por dispositivos que contengan diodos.

En los núcleos de transformadores, la presencia de corriente directa tiene efectos perjudiciales, debido a que se incrementa la saturación en operación normal, el calentamiento y disminución en la vida útil del equipo.

Armónicas

Las armónicas son señales cuya frecuencia es un entero, múltiplo de la frecuencia principal o fundamental como se muestra en la figura 1.7.

Las armónicas son producidas por cargas no lineales, tales como equipos electrónicos, dispositivos de arco, núcleos de hierro de transformadores, etc.



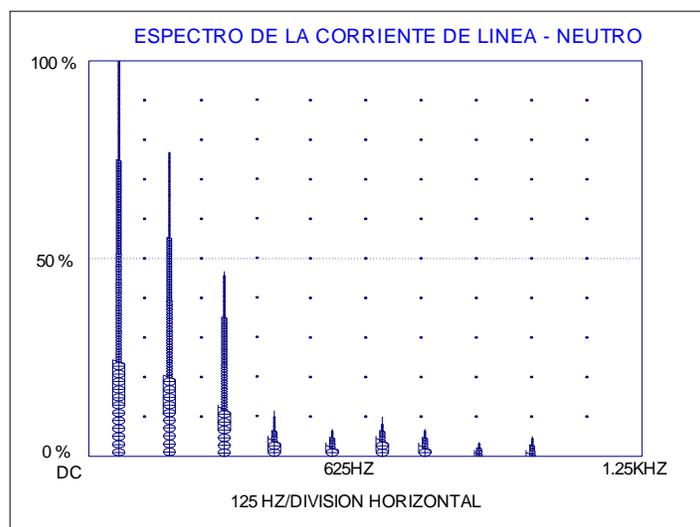


Fig. 1.7 Forma de onda de corriente y espectro de frecuencias armónicas

Interarmónicas

Las interarmónicas son voltajes o corrientes senoidales con componentes de frecuencia que no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.

La distorsión interarmónica puede ocurrir en redes de todos los niveles de voltaje. Las principales fuentes de ella son los convertidores estáticos de frecuencia, cicloconvertidores, hornos de inducción y dispositivos de arqueo.

Notching

Es un disturbio repetitivo en la forma de onda de voltaje como se aprecia en la figura 1.9, causado por el traslape en la conducción de los dispositivos de electrónica de potencia cuando la corriente es conmutada de una fase a otra como podemos ver en la figura 1.8.

El Notching es más pronunciado en sistemas débiles y no está confinado solo al bus donde el equipo no lineal está conectado.

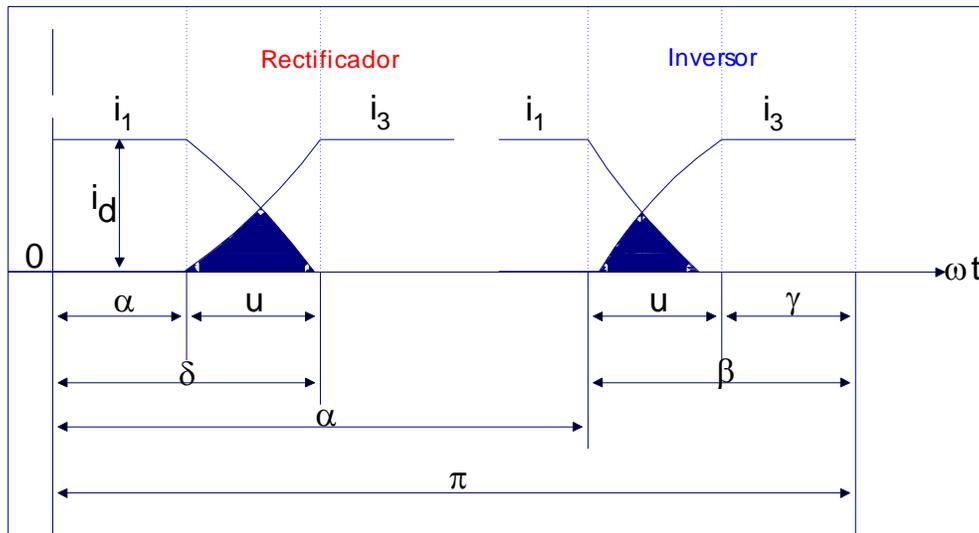


Fig. 1.8 Conducción de un dispositivo semiconductor

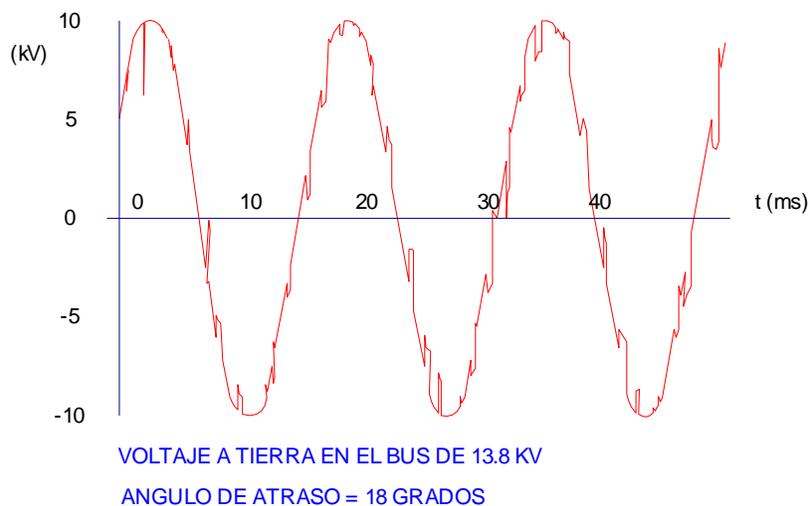


Fig. 1.9 Ejemplo de notching

Ruido

El ruido es una señal eléctrica indeseable con ancho de banda menor a 200 kHz superpuesta a la señal de corriente o voltaje del sistema.

El rango de la frecuencia y nivel de magnitud del ruido depende de la fuente que lo produce y la característica del sistema. Una magnitud típica de ruido medido en el voltaje es menor de 1% de la magnitud de voltaje RMS.

Generalmente, el ruido resulta de los dispositivos de electrónica de potencia, arqueos entre conductores o cargas con rectificadores de estado sólido.

Puede existir ruido en cualquiera de las dos siguientes formas:

- Modo normal del ruido. Para el caso donde los conductores de fase son contaminados con ruido.
- Modo de ruido común. Donde los conductores de fase y los conductores a tierra son contaminados con el ruido.

El modo de ruido común puede con frecuencia ser eliminado a través del uso de transformadores de aislamiento. El modo normal de ruido requiere filtros o líneas acondicionadoras de potencia.

El método apropiado para controlar el ruido depende de la susceptibilidad del equipo, método de acoplamiento y el rango de frecuencia del ruido.

1.1.3.6. Fluctuaciones de voltaje (Flicker)

Son una serie de cambios continuos en el voltaje, los cuales regularmente no exceden el rango de 0.9 a 1.0 pu.

Las variaciones de voltaje originadas por cargas no lineales que demandan corrientes altas y variables, se denominan flicker. Si las variaciones de voltaje se repiten a intervalos cortos de tiempo como se observa en la figura 1.10, se producirán fluctuaciones en la iluminación perceptibles para el ojo humano, principalmente de aquella emitida por lámparas incandescentes.

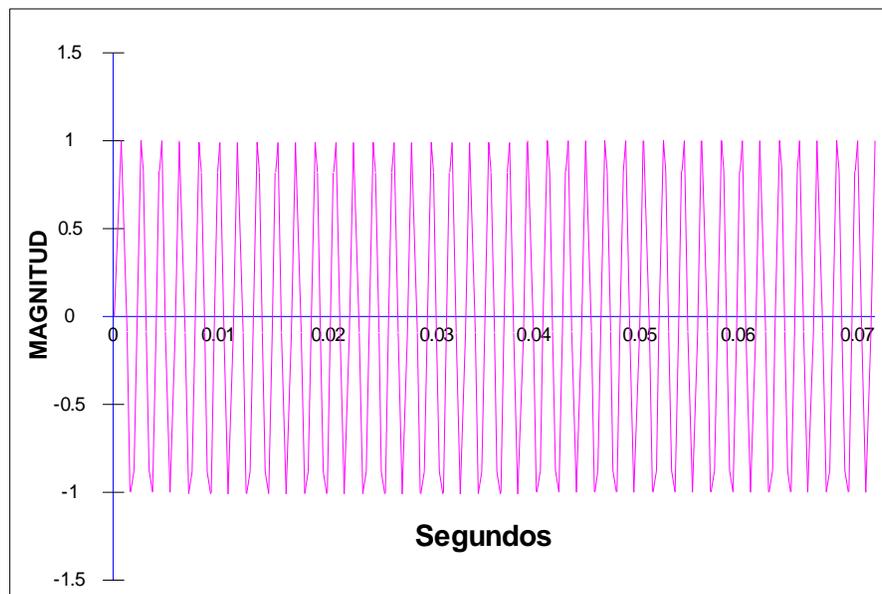


Fig. 1.10 Ejemplo de flicker en un horno de arco eléctrico

Las fluctuaciones de voltaje de este tipo afectan el funcionamiento de muy pocos equipos, sin embargo, es perceptible una variación en la luminosidad de las lámparas incandescentes, lo cual es una sensación visible molesta.

Los hornos de arco eléctrico así como las soldadoras, son la causa más común de las variaciones de voltaje en el sistema de transmisión y distribución. En instalaciones residenciales, el efecto de flicker es producido por el arranque automático de refrigeradores o al energizarse calefactores, planchas y estufas eléctricas.

En general, la forma de solucionar éste problema conduce a alimentar estas cargas a través de circuitos derivados exclusivos o dimensionar los cables o transformadores de alimentación considerando los efectos de las variaciones rápidas de voltaje.

1.1.3.7. Variaciones en la frecuencia

La frecuencia de un sistema eléctrico está definida por la relación entre la carga y la capacidad de generación; si éste balance cambia, se presentan ligeros cambios en la frecuencia. La magnitud de las variaciones y su duración dependen de las características de la carga y de la respuesta del sistema de generación.

Las variaciones en la frecuencia pueden ser causadas por fallas en el sistema de transmisión, desconexión de grandes cargas o paro de alguna fuente de generación.

1.1.3.8. Curva CBEMA

Conjunto de curvas que describen la tolerancia del equipo de cómputo en función de la magnitud y duración de las variaciones de voltaje en el sistema de potencia.

En la figura 1.11 los ejes representan la magnitud y duración del disturbio. Los puntos debajo de la envolvente son causados por fallas en el sistema de potencia. Los puntos arriba de la envolvente son causados por fallas de aislamiento, sobrevoltaje y sobreexcitación.

Relación de Disturbios y curva CBEMA

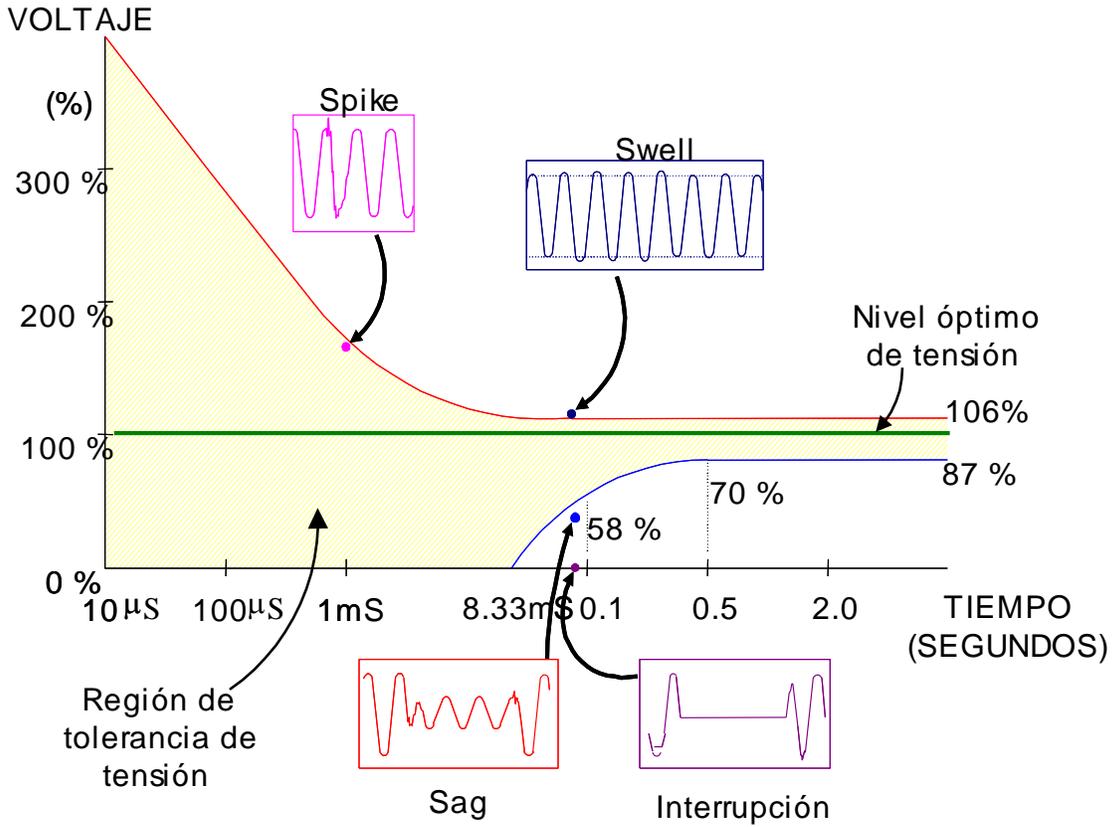


Fig. 1.11 Curva CBEMA

CAPITULO II

Análisis Armónico

2.1. Introducción a las armónicas

En la actualidad, el problema de las armónicas en los sistemas eléctricos se ha visto incrementado debido a las cargas no lineales conectadas a ellos. Algunas de las fuentes más comunes de armónicas son dispositivos de estado sólido usados en el control, hornos de arco eléctrico, controladores de velocidad en motores eléctricos y transformadores de potencia sobreexcitados.

Estas distorsiones de la forma de onda crean problemas en la red eléctrica tales como, el aumento de pérdidas de potencia activa, sobretensiones en los condensadores, mal funcionamiento de protecciones o daño en los aislamientos, que trae como consecuencia la disminución de la vida útil de los equipos.

La mayoría de las veces se presentan los problemas en el lado de las cargas (usuarios) y si no se controlan aquí, se transmiten a la red y de aquí a otros usuarios o cargas conectadas a la misma.

Debido a ello, el estudio de los problemas de armónicas no debe ser exclusivo de empresas suministradoras, debe incluir al sector industrial y desarrollar métodos efectivos para su mitigación.

2.2. Definición de armónica

Las armónicas son señales cuya frecuencia es un entero, múltiplo de la frecuencia principal o fundamental.

Las armónicas se expresan en términos de su orden, es decir, las armónicas de orden segunda, tercera y cuarta, tienen frecuencias de 120, 180 y 240 Hz respectivamente como lo ejemplifica la figura 2.1.

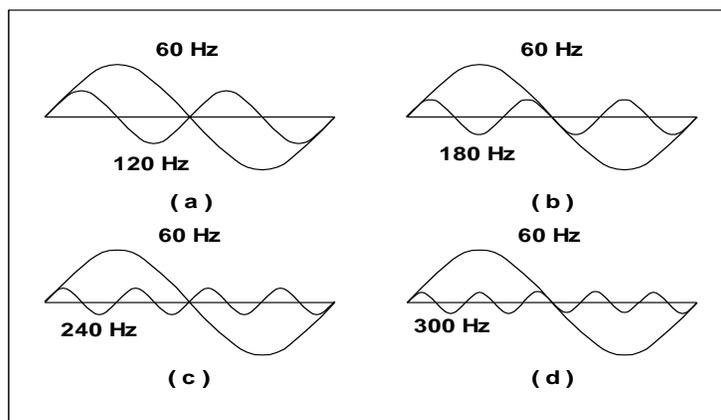


Fig. 2.1 Onda senoidal y sus armónicas

En sistemas de potencia de 60 Hz, una onda armónica es una senoide que tiene una frecuencia expresada por la ecuación 2.1:

$$F_h = h \times 60 \text{ [Hz]} \dots\dots\dots 2.1$$

donde h es un entero y representa el orden de la armónica.

La magnitud de la armónica, en por unidad, es igual a la ecuación 2.2 :

$$I_h = \frac{I_1}{h} \dots\dots\dots 2.2$$

Donde:

I_h – Magnitud de la corriente armónica (en pu)

I_1 – Magnitud de la corriente fundamental (en pu)

h – Orden de la armónica

En la medida en que se incrementa el orden de la armónica, su magnitud y frecuencia disminuyen; por ello, las armónicas de orden inferior tienen mayor repercusión en el sistema de potencia.

Generalmente, la medición de armónicas se realiza en las ondas de corriente en el lado de la carga o usuario y en la onda de voltaje en el lado de la red.

La onda distorsionada de corriente en el lado de la carga produce una caída de voltaje con la impedancia de la red de transmisión, de manera que se distorsiona la

onda de voltaje. Por lo tanto, el problema de las armónicas debe controlarse en el punto en donde se genera, de lo contrario se puede transmitir a otros usuarios conectados a la misma red. En la figura 2.2 se puede ver la red de transmisión que puede ser afectada por algún problema en la carga.

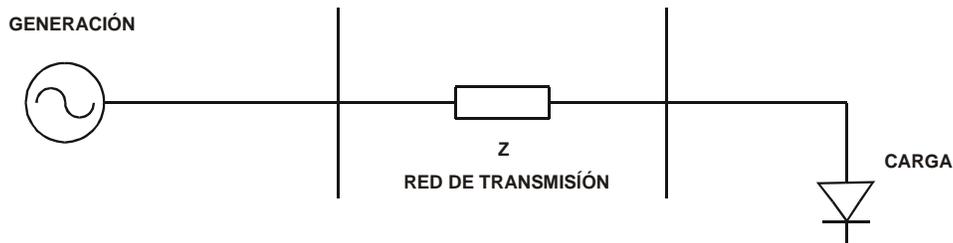


Fig. 2.2 Red de Transmisión

La presencia de armónicas en el sistema eléctrico se puede detectar a través de los efectos que producen, por ejemplo:

- Fusibles fundidos en los bancos de capacitores
- Transformadores y motores eléctricos que se sobrecalientan sin razón aparente
- Operación incorrecta de protecciones

2.3. Distorsión armónica

Cuando las armónicas se combinan con la frecuencia fundamental, ocurre la distorsión de la forma de onda. La distorsión armónica es causada por dispositivos no lineales conectados al sistema de potencia, en los cuales la corriente no es proporcional al voltaje aplicado. En la figura 2.3 se observa la onda distorsionada.

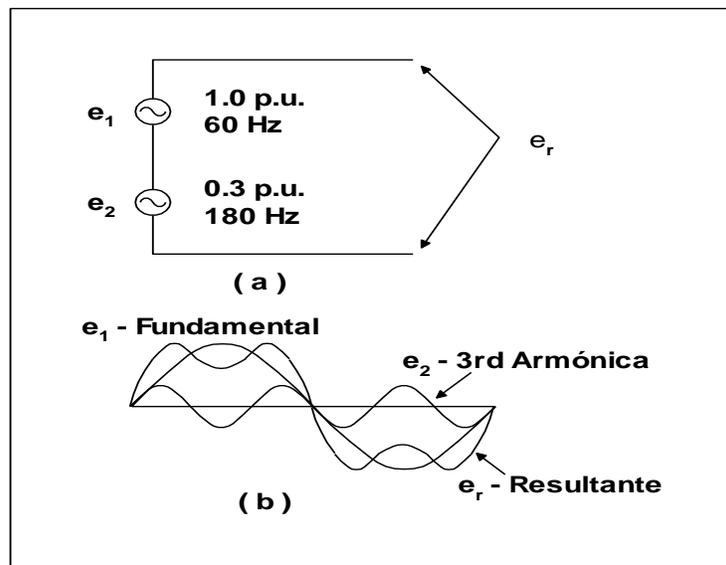


Fig. 2.3 (a) Circuito. (b) Onda distorsionada

2.3.1. Descomposición de una onda distorsionada en sus armónicas

Cuando la forma de onda es idéntica de un ciclo a otro (onda periódica), ésta puede ser representada como una suma de ondas senoidales puras en la cual la frecuencia de cada senoide es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la onda distorsionada como se aprecia en la figura 2.4. La descomposición una onda periódica en su fundamental y componentes armónicos se fundamenta en el análisis de Fourier.

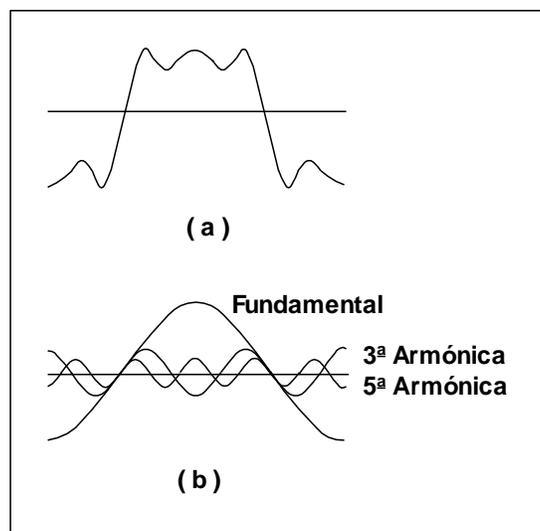


Fig. 2.4 (a) Onda distorsionada. (b) Fundamental y sus componentes armónicas

Ésta propiedad es de gran utilidad en el análisis de sistemas eléctricos, ya que se puede analizar por separado cada componente senoidal de la onda distorsionada, usando métodos de solución de circuitos y después aplicar superposición.

2.4. Componentes simétricas y secuencia armónica

Los sistemas trifásicos regularmente son analizados utilizando el método de componentes simétricas para simplificar su análisis. El sistema trifásico, representado por tres fasores, se sustituye por la suma de tres sistemas de fasores simétricos: un sistema de secuencia positiva, negativa y cero.

El sistema de secuencia positiva es un sistema trifásico equilibrado representado por tres fasores de igual módulo, con un ángulo de defasamiento de 120° entre ellos y con una secuencia de fase a-b-c ($0^\circ, -120^\circ, 120^\circ$). El sistema de secuencia negativa tiene las mismas características que el anterior pero con una fase de rotación inversa a-c-b ($0^\circ, 120^\circ, -120^\circ$). El sistema de secuencia cero se representa por tres fasores de igual módulo y en fase ($0^\circ, 0^\circ, 0^\circ$).

En un sistema trifásico balanceado, la componente de secuencia armónica puede determinarse multiplicando el orden de la armónica por la secuencia de fase positiva. Por ejemplo, para la tercera armónica, $h=3$, se tiene $3 \times (0^\circ, -120^\circ, 120^\circ)$, resultando una armónica de secuencia cero ($0^\circ, 0^\circ, 0^\circ$), conocida también como armónica triple.

Existe un patrón que relaciona las armónicas con su respectiva secuencia, donde únicamente se presentan armónicas impares, ya que en un sistema eléctrico no se generan armónicas de números pares. La tabla 2.1 muestra la secuencia dominante correspondiente a cada armónica.

Tabla 2.1 Secuencia dominante

Secuencia de fase	Positiva	Negativa	Cero
Orden	1	5	3
de la	7	11	9
Armónica	13	17	15

2.5. Distorsión Armónica Total

Este factor expresa la cantidad de distorsión armónica contenida en la onda distorsionada y es determinado por la ecuación 2.3

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\text{Suma de los cuadrados de todas las amplitudes armónicas}}}{\text{Amplitud de la fundamental}} \times 100 \quad \dots\dots\dots 2.3$$

El THD puede calcularse para voltaje o corriente y es utilizado para muchas aplicaciones.

Por ejemplo, considerando una forma de onda distorsionada de corriente de la figura 2.5 se obtiene una distorsión armónica total igual a 27 % la cual se obtuvo con ayuda de la ecuación 2.3.

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{(0.2)^2 + (0.143)^2 + (0.091)^2 + (0.077)^2}}{1.0} \times 100 = 27\%$$

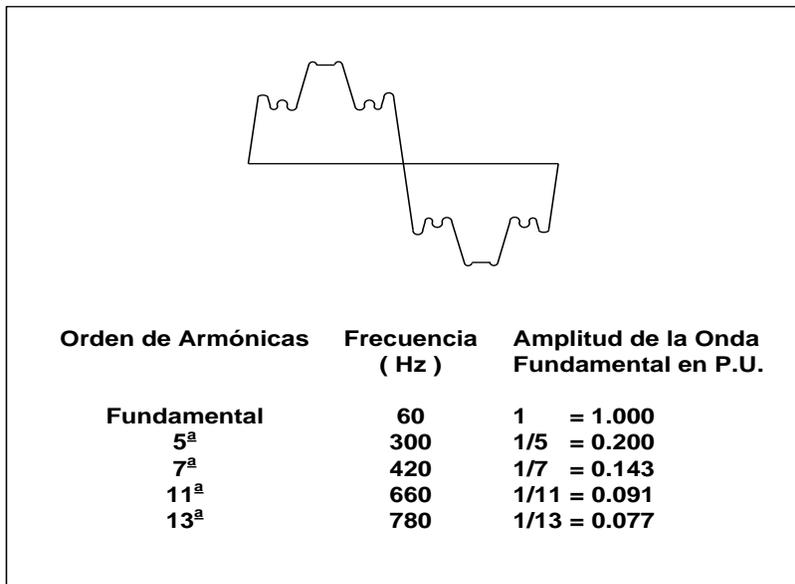


Fig. 2.5 Contenido armónico de una onda distorsionada

2.6. Fuentes de armónicas

2.6.1. Fuentes tradicionales de armónicas

Antes del incremento de los convertidores estáticos de potencia, el problema de las armónicas en los sistemas eléctricos de potencia se relacionaba con la operación de transformadores y máquinas rotatorias; incluso, la corriente de excitación requerida por los transformadores de potencia era la principal fuente generadora de armónicas.

En operación estable, estas máquinas no provocan una distorsión considerable en el sistema, sin embargo, cuando operan fuera del rango de especificaciones o hay fluctuaciones de voltaje, los niveles de distorsión son significativos. Otras fuentes de armónicas son la iluminación fluorescente y dispositivos de arco.

Transformadores

Cuando un voltaje senoidal es aplicado al devanado primario del transformador, una pequeña corriente fluirá si el transformador está en vacío. Ésta corriente, conocida como corriente de excitación, es necesaria para establecer el campo magnético en el núcleo del transformador y así, inducir un voltaje en el lado secundario, como se observa en la figura 2.6.

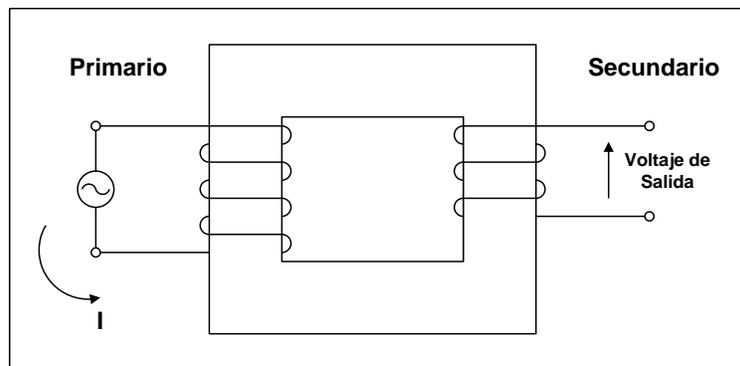


Fig. 2.6 Corriente de excitación en el devanado primario de un transformador

Las pérdidas por histéresis, provocan que la forma de onda de la corriente de excitación demandada por el transformador no sea senoidal. La distorsión de la onda se

debe principalmente a la tercera armónica, la cual alcanza el 50% de la corriente de frecuencia fundamental, el resto de las armónicas (5ª, 7ª y 9ª), repercuten en un grado menor como se aprecia en la figura 2.7.

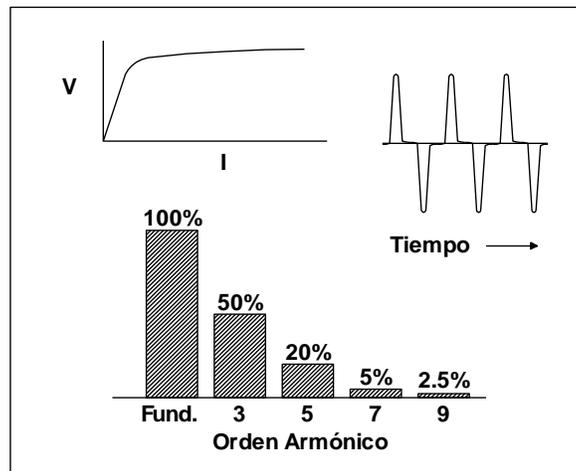


Fig. 2.7 Distorsión armónica en la corriente de excitación

Los transformadores son diseñados para operar con una corriente de excitación del 1 o 2% la corriente nominal a plena carga. Así, aunque los transformadores son numerosos en el sistema de potencia, su corriente de excitación generalmente no causa problemas armónicos.

Cuando el voltaje aplicado al transformador es mayor al nominal, el campo magnético se incrementa al punto donde el núcleo puede alcanzar la saturación. A un ligero incremento de voltaje, el núcleo saturado produce un gran incremento en la corriente de excitación incrementándose abruptamente el contenido armónico de la misma. En la figura 2.8 se puede observar la curva de saturación.

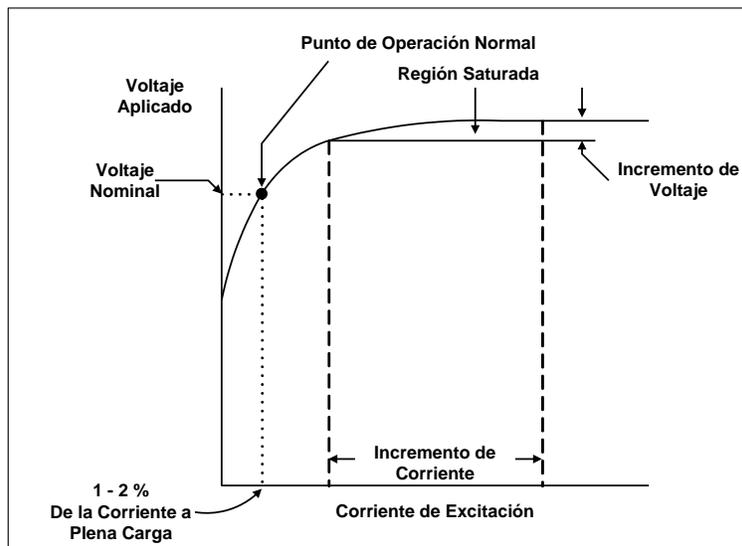


Fig. 2.8 Curva de saturación de un transformador

En una línea que termina en un transformador, energizada con el interruptor de carga abierto, se presenta un sobrevoltaje causado por un transitorio que dura algunos ciclos y un sobrevoltaje de tiempo largo a través de la inductancia de la línea, conocido como efecto Ferranti. Éste alto voltaje provoca la saturación del transformador generando altas corrientes armónicas hasta que el sobrevoltaje sostenido se reduce por el cierre del interruptor de carga.

- **Conexión de transformadores**

En sistemas de distribución se usan transformadores con conexión estrella-estrella para minimizar las fallas monofásicas, no obstante, la corriente de excitación de ésta conexión fluye al sistema de potencia y puede causar distorsión de voltaje significativo en el devanado secundario.

La conexión delta-estrella presenta una trayectoria de baja impedancia para la 3ª armónica de la corriente de excitación en el devanado delta, induciendo un voltaje secundario no distorsionado. Por ésta razón, en plantas industriales es común usar transformadores con conexión delta-estrella.

- **Corrientes de inrush**

La corriente de inrush es una corriente de energización del transformador, que puede ser de 8 o hasta 12 veces la corriente a plena carga hasta por un segundo. Después de ese corto tiempo, la corriente de excitación decae a su valor normal de 1 o 2% de la corriente a plena carga.

La corriente de inrush contiene armónicas pares e impares con la 2ª armónica dominante, pero como no es una corriente de excitación continua, no representa un problema severo de armónicas.

En transformadores de potencia con esquema de protección diferencial como el que está en la figura 2.9, el relevador tiende a operar innecesariamente cuando el transformador es energizado, debido a la corriente de inrush. En este caso, es necesario suministrar un filtro para restringir la 2ª armónica.

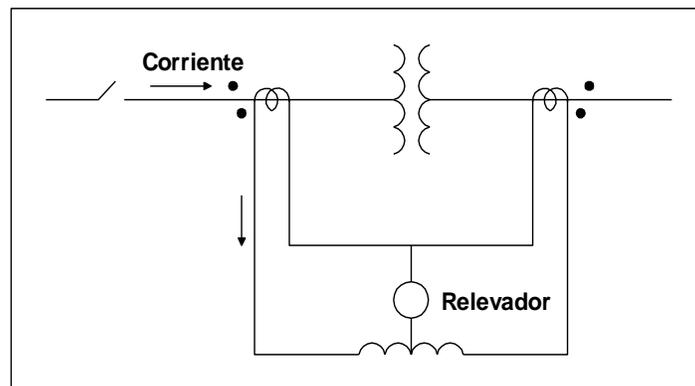


Fig. 2.9 Esquema de protección diferencial para transformadores

Motores y generadores

Como en el transformador, un motor requiere de corriente de excitación del sistema para establecer un campo magnético en su núcleo. No obstante, en el caso de un motor, la curva de saturación es más lineal que la de un transformador.

El tipo de devanado de un motor también influye en la generación de armónicas. Los devanados típicos del motor tienen 5 o 7 ranuras por polo, produciendo corrientes armónicas de orden 5ª y 7ª. Estas armónicas son minimizadas por ajuste de las ranuras.

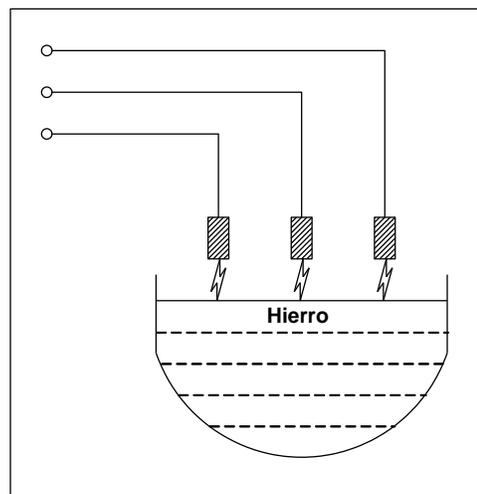
En un generador de corriente alterna, el voltaje inducido en el estator es ligeramente distorsionado y contiene una componente dominante de 3ª armónica. Esto causa que fluya corriente de 3ª armónica cuando el generador opera bajo carga.

Las armónicas causadas por motores y generadores no son significativas en comparación con la producción armónica total en el sistema eléctrico de potencia industrial y comercial.

Dispositivos de arco

Esta categoría incluye hornos de arco eléctrico, soldadoras de arco y lámparas de descarga (fluorescentes, vapor de sodio, vapor de mercurio) con balastro electrónico. Todos estos equipos tienen un comportamiento no lineal.

En un horno de arco eléctrico de CA, el acero y otros materiales metálicos son fundidos y refinados por medio de un arco de alta energía. El proceso inicia cuando tres electrodos de grafito, cada uno controlado individualmente, son acercados al horno, haciendo contacto con el acero. Los electrodos son levantados y bajados para regular la corriente de arco; la trayectoria de la corriente es de un electrodo a través del acero a otro electrodo. La corriente que pasa a través del carbón del electrodo al acero tiene una impedancia diferente en la dirección positiva que en la dirección negativa. En la figura 2.10 podemos apreciar la forma de funcionamiento de un horno de arco.



2.10 Fig. Horno de arco

Durante el proceso de fundición, el voltaje decae tanto como la corriente de arco incrementa, limitada únicamente por la impedancia del sistema de potencia, que se ve afectada por la reactancia de los cables del horno y algunas contribuciones del transformador que lo alimenta. El resultado de las variaciones del voltaje de arco produce todas las armónicas.

Cuando la chatarra está siendo fundida, la 2ª y 3ª armónicas son dominantes. En el proceso de refinación, la superficie del metal es relativamente uniforme y el arco es más estable, predominando todavía la 2ª y 3ª armónicas pero con magnitudes reducidas al 7 u 8% de la magnitud de corriente fundamental. En la figura 2.11 se muestra el comportamiento anteriormente descrito.

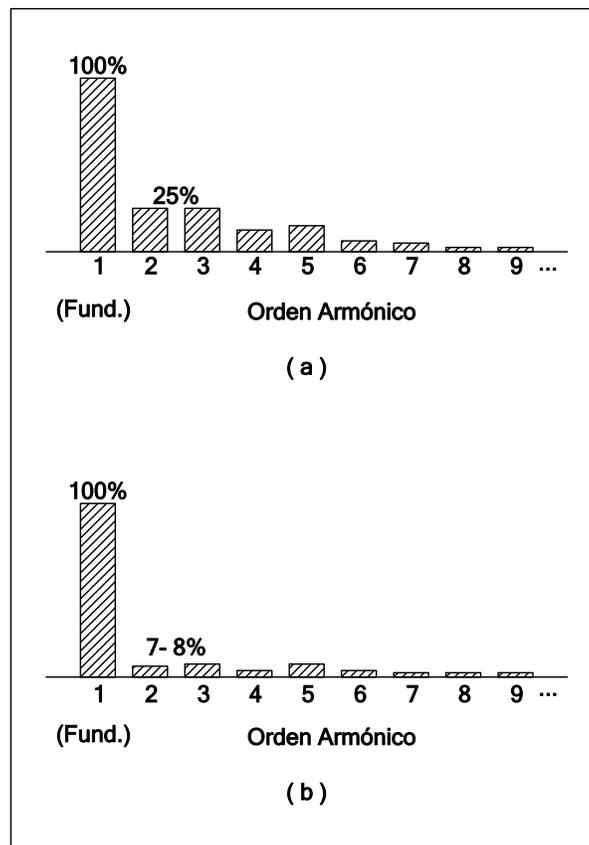


Fig. 2.11 Armónicas producidas durante la operación de un horno de arco
(a) Período inicial de fundición. (b) Período de refinación

Los dispositivos de arco con mayor producción de armónicas son, probablemente, cargas de alumbrado, las cuales tienen mayor presencia en el sistema de potencia. Sin embargo, los hornos de arco causan los problemas más severos porque representan una fuente armónica de gran capacidad, concentradas en un solo lugar.

Alumbrado fluorescente

Son lámparas de descarga que requieren un balastro para suministrar un alto voltaje e iniciar la descarga de la corriente entre los dos electrodos del tubo a través de vapor o gas. Una vez que la descarga es establecida, el voltaje disminuye y la corriente de arco se incrementa. El balastro reduce rápidamente la corriente hasta obtener la iluminación especificada. De esta forma, el balastro es también un limitador de corriente.

Las armónicas generadas incluyen una fuerte componente de 3ª armónica, porque el balastro es un dispositivo ferromagnético que requiere corriente de excitación la cual contiene armónicas de tercer orden, en la figura 2.12 se pueden ver la forma de onda en una lámpara fluorescente.

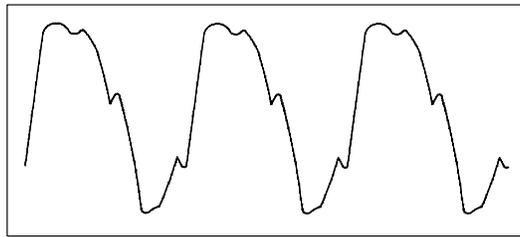


Fig 2.12 Corriente demandada por una lámpara fluorescente

La creciente demanda de sistemas eficientes de iluminación, debido a programas de ahorro de energía, ha incrementado el uso de éstas lámparas, provocando una fuerte inyección de armónicas a la red de distribución.

2.6.2. Nuevas fuentes de armónicas

Controladores de voltaje

Estos dispositivos generan armónicas por su mecanismo de control. Por ejemplo, los arrancadores a voltaje reducido tienen un switch de tiristores que limita la corriente de arranque demandada por el motor, disminuyendo el voltaje durante el arranque. El voltaje aplicado al motor es controlado por la variación en el ángulo de encendido de los tiristores del switch. En la figura 2.13 se muestra el esquema de un arrancador de voltaje reducido.

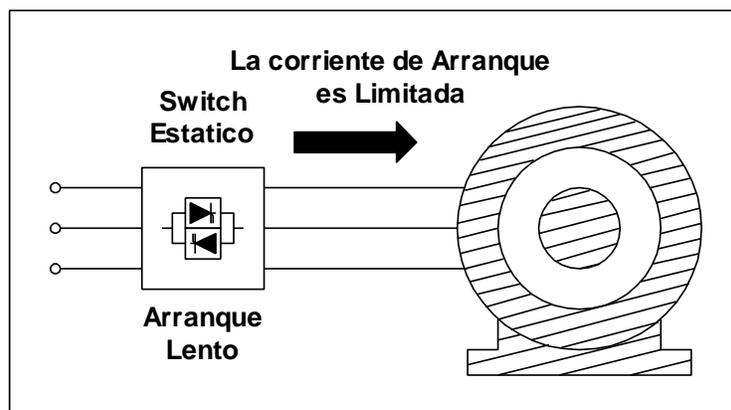


Fig. 2.13 Arrancador a voltaje reducido

Sólo operan por un corto tiempo (durante el arranque del motor), de tal manera que no causan grandes problemas de armónicas.

Compensadores estáticos de vars

El compensador estático de vars (SVC) controla el voltaje por el ajuste de la cantidad de potencia reactiva suministrada o absorbida del sistema. Utiliza reactores y capacitores controlados por tiristores. El SVC puede cambiar la magnitud y dirección del flujo de vars muy rápidamente en respuesta a las necesidades de carga. En la figura 2.14 podemos ver la configuración de un compensador estático de vars.

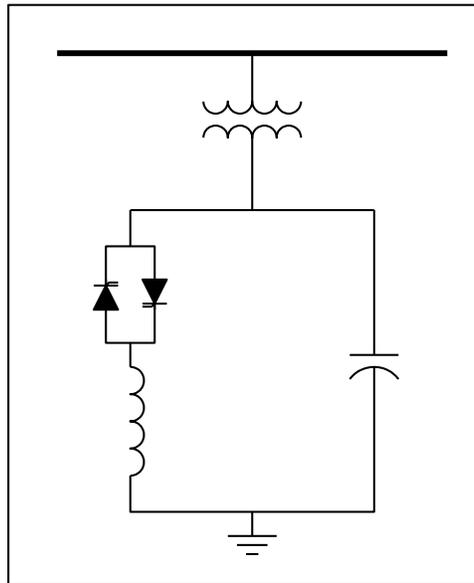


Fig. 2.14 Configuración típica de un compensador estático de vars

Un SVC es usado en cargas industriales que varían rápida y significativamente, tales como hornos de arco eléctrico, para suministrar potencia reactiva local a la carga. Ésto reduce el flicker e incrementa la eficiencia del horno.

En los sistemas de potencia, el SVC opera continuamente para regular el voltaje y mejorar la capacidad de transferencia de potencia a través del sistema de transmisión. El SVC podría también ser switchado inmediatamente después de una falla en el sistema para ayudar a mantener la estabilidad suministrando potencia reactiva y tener un mejor soporte de voltaje.

2.7. Características de la respuesta del sistema

2.7.1. Impedancia del sistema

Cuando un circuito es excitado por una fuente de voltaje que es una función senoidal del tiempo a una determinada frecuencia, circula una corriente cuya amplitud y ángulo de fase dependen del voltaje aplicado, de los elementos que lo constituyen y de la frecuencia.

La representación compleja de las funciones senoidales de corriente y voltaje permite relacionarlas mediante la impedancia del circuito. Ésta relación constituye la ley de Ohm en forma generalizada.

Para el caso de un circuito formado por una resistencia, inductancia y capacitancia, la impedancia se expresa con la ecuación 2.4.

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \dots\dots\dots 2.4$$

Los sistemas eléctricos de potencia, a la frecuencia fundamental, son considerados primeramente inductivos y la impedancia equivalente en algunas ocasiones es llamada reactancia de corto circuito; debido a que los efectos capacitivos son despreciados frecuentemente en los sistemas de distribución y en los sistemas eléctricos industriales.

Una de las cantidades más utilizadas en el análisis de armónicas en los sistemas eléctricos es la impedancia de corto circuito en el punto de la red donde un capacitor es localizado. Cuando no se tiene disponible en forma directa, se puede calcular a partir de los estudios de corto circuito, expresados en MVA o por medio de la corriente de corto circuito. Con ayuda de la ecuación 2.5 podemos localizar dicha impedancia.

$$Z_{cc} = R_{cc} + jX_{cc} = \frac{kV^2}{MVA_{cc}} = \frac{kV \times 100}{\sqrt{3}I_{cc}} \dots\dots\dots 2.5$$

Donde:

- Z_{cc} – Impedancia de corto circuito
- R_{cc} – Resistencia de corto circuito
- X_{cc} – Reactancia de corto circuito
- kV – Voltaje entre fases en kV
- MVA_{cc} – Potencia de corto circuito trifásico en MVA
- I_{cc} – Corriente de corto circuito en A

La impedancia de corto circuito es una cantidad fasorial que consiste tanto de resistencia como de reactancia. Si el valor de corto circuito no contiene información de ángulo de fase, puede asumirse que la impedancia es puramente reactiva.

Como la porción de reactancia inductiva de la impedancia cambia linealmente con la frecuencia, es necesario ajustar la reactancia al valor de la frecuencia; la reactancia de la h armónica es determinada a partir de la reactancia a la frecuencia fundamental X_1 , como se muestra en la ecuación 2.6.

$$X_h = hX_1 \dots\dots\dots 2.6$$

En la mayoría de los sistemas eléctricos puede asumirse que la resistencia no cambia significativamente cuando se estudian los efectos de las armónicas menores a las de noveno orden.

En los sistemas eléctricos de potencia industriales, la reactancia equivalente del sistema está regularmente dominada por la impedancia del transformador; lo cual permite aproximar la reactancia de corto circuito a la impedancia del transformador.

2.7.2. Impedancia capacitiva

Los capacitores por sí solos no generan armónicas, sin embargo, la amplificación de corrientes armónicas puede atribuirse a su presencia.

Los capacitores en derivación, conectados en el lado del usuario para suministrar potencia reactiva y corregir el factor de potencia, o bien, en la red de distribución para control de voltaje, alteran la impedancia del sistema con la variación de la frecuencia.

Mientras la reactancia inductiva incrementa proporcionalmente con la frecuencia, la reactancia capacitiva decrece como podemos ver en la ecuación 2.7

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \dots\dots\dots 2.7$$

Donde la capacitancia C está dada en farads; no obstante, los capacitores son especificados en términos de su potencia, por lo cual éste parámetro es calculado en base a ella y al voltaje aplicado. La reactancia capacitiva para un banco de capacitores puede determinarse con la ecuación 2.8.

$$X_C = \frac{kV^2}{MVAR} \dots\dots\dots 2.8$$

2.7.3. Resonancia paralelo

La resonancia paralelo ocurre cuando la reactancia inductiva X_L es igual a la reactancia capacitiva X_C ; la frecuencia a la cual ocurre éste fenómeno es llamada frecuencia de resonancia.

Cuando la reactancia inductiva y capacitiva del sistema entra en resonancia a alguna armónica generada por una carga no lineal, esa corriente armónica excitará al circuito generando una corriente amplificada que oscila entre la energía almacenada en la inductancia y el capacitor.

La característica de un circuito resonante paralelo es una alta impedancia al flujo de la corriente armónica a la frecuencia de resonancia.

En el análisis de los sistemas eléctricos, la frecuencia de resonancia puede ser calculada de la ecuación 2.9

$$f_r = f_1 \sqrt{\frac{X_C}{X_{CC}}} = f_1 \sqrt{\frac{MVA_{CC}}{MVAR_{cap}}} \dots\dots\dots 2.9$$

Donde:

- f_r – frecuencia de resonancia
- f_1 – frecuencia fundamental
- X_C – reactancia capacitiva
- X_L – reactancia inductiva
- MVA_{CC} – MVA de corto circuito del sistema
- MVA_{cap} – MVAR de los capacitores

Por ejemplo, en el circuito de la figura 2.15, la frecuencia de resonancia es cercana a 300 Hz (5ª armónica) y se generan armónicas de 5to orden en el convertidor estático de seis pulsos; la corriente armónica excita al circuito resonante presentándose una impedancia muy grande al flujo de la misma.

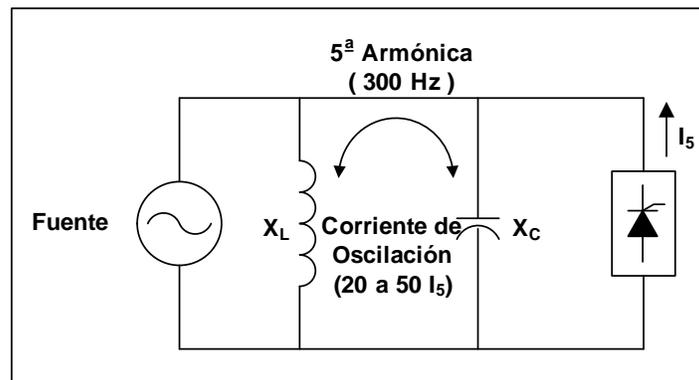


Fig. 2.15 Circuito típico de resonancia paralelo

La resonancia paralelo y la corriente de 5ª armónica producen un voltaje armónico grande en el bus y una corriente de oscilación que puede ser de 20 a 50 veces la magnitud de la corriente armónica que originalmente excita al circuito.

La corriente amplificada podría fundir fusibles del banco de capacitores. El voltaje distorsionado del bus podría causar el flujo de corrientes distorsionadas en los circuitos adyacentes y afectar a cargas remotas de la fuente armónica y del circuito. Además el voltaje distorsionado puede afectar la vida útil de buses, capacitores, apartarrayos,

transformadores de instrumentos, Etc. En la figura 2.16 se observa la propagación de una corriente armónica.

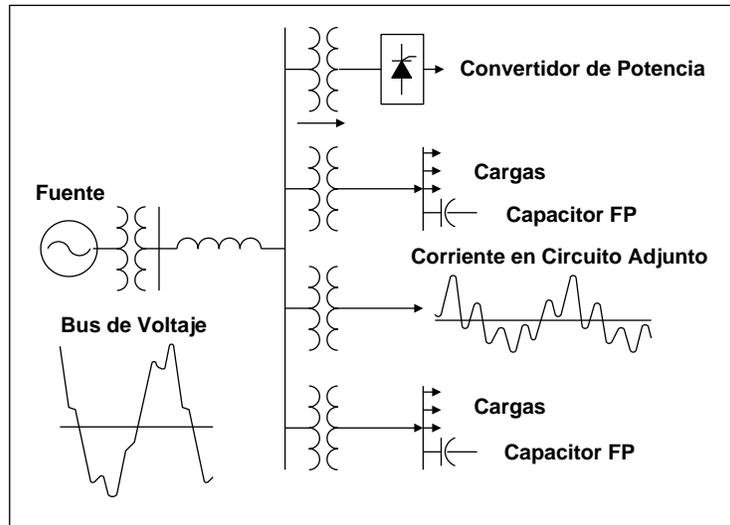


Fig. 2.16 Propagación de corriente armónica a través del sistema

2.7.4. Resonancia serie

La resonancia serie es el resultado de la conexión serie de un banco de capacitores y la inductancia del transformador o línea de distribución con una fuente de corrientes armónicas. Si la frecuencia de resonancia corresponde a la frecuencia característica de la armónica, el circuito LC atraerá una gran cantidad de la corriente armónica generada en el sistema de distribución.

Por lo tanto, el sistema ofrece una impedancia muy baja al flujo de corrientes armónicas de frecuencia igual a la de resonancia.

Bajo estas condiciones, la impedancia del circuito resonante serie puede ser utilizada para absorber corrientes armónicas deseadas.

En el diseño de filtros de corrientes armónicas se utiliza el concepto de resonancia serie para atenuar o desviar las corrientes armónicas.

2.8. Normatividad sobre el problema de armónicas

2.8.1. Norma IEEE Std. 519-1992

La norma es aplicable para límites de distorsión de corriente y voltaje. La filosofía de la norma implica dos puntos importantes:

- Los usuarios deben responsabilizarse para limitar la cantidad de corrientes armónicas inyectadas al sistema de potencia.
- Las compañías suministradoras deben limitar la distorsión de voltaje y suministrar un voltaje de calidad al usuario.

Los límites establecidos en las tablas son usados como valores de diseño del sistema en condiciones de operación normal, las cuales no son mayores de una hora. Para períodos cortos, por ejemplo, en condiciones de arranque de motores, los límites pueden ser excedidos en un 50%.

Límites de distorsión de corriente

La norma establece la máxima distorsión de corriente permisible para un usuario en base a la distorsión de la demanda total en corriente (THD I). En la tabla 2.2 vemos los límites máximos de distorsión de corrientes armónicas impares para sistemas de distribución.

Tabla 2.2 IEEE 519 Límites máximos (%) de distorsión de corrientes armónicas impares para sistemas de distribución (120 V hasta 69 000 V)

I_{sc} / I_L	$n < 11$	$11 \leq n < 17$ 7	$17 \leq n < 23$ 3	$23 \leq n < 35$	$35 \leq h$	THD
< 20 *	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Después en la tabla 2.3 se observan los límites máximos de distorsión de corrientes armónicas impares pero para sistemas de subtransmisión.

Tabla 2.3 IEEE 519 Límites máximos (%) de distorsión de corrientes armónicas impares para sistemas de subtransmisión (69 001 V hasta 161 000 V)

I_{sc} / I_L	$n < 11$	$11 \leq n < 17$ 7	$17 \leq n < 23$ 3	$23 \leq n < 35$	$35 \leq h$	THD
< 20 *	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20 < 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50 < 100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100 < 1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
> 1000	7,0	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0

En la tabla 2.4 vemos los límites máximos de distorsión de corrientes armónicas impares pero para sistemas de transmisión con generación dispersa y cogeneración.

Tabla 2.4 IEEE 519 Límites máximos (%) de distorsión de corrientes armónicas impares para sistemas de transmisión con generación dispersa y cogeneración (161 000 V y mayores)

I_{sc} / I_L	$n < 11$	$11 \leq n < 17$ 7	$17 \leq n < 23$ 3	$23 \leq n < 35$	$35 \leq h$	THD
< 50 *	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Límites de distorsión de voltaje

La máxima distorsión de voltaje permisible se basa en la distorsión de la demanda total en voltaje (THD_V). En la tabla 2.5 se pueden ver los límites de distorsión de voltaje.

Tabla 2.5 IEEE 519 Límites de distorsión de voltaje

Voltaje del bus en PCC	HDv (%)	THDv (%)
Inferiores a 69 KV	3.0	5.0
69.001 KV hasta 161 KV	1.5	2.5
Superiores a 161 KV	1.0	1.5

HDv - Distorsión armónica individual de voltaje

THDv - Distorsión armónica total de voltaje

2.8.2. Norma CFE L0000-45-1995

Esta norma se refiere a las desviaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente en el suministro y consumo de energía eléctrica.

Las siguientes tablas indican las desviaciones máximas permisibles indicadas en la especificación, aplicables tanto al suministrador como al consumidor que se encuentren conectados a la red eléctrica de CFE.

En la tabla 2.6 podemos analizar el desbalance máximo permitido en la tensión en el punto de acometida.

Tabla 2.6 Desbalance máximo permitido en la tensión en el punto de acometida

Tensión (kV)	Desbalance (%)
Menor de 1	3,0
Mayor de 1	2,0

En la tabla 2.7 presentamos los límites máximos de distorsión armónica total en tensión en el punto de acometida.

Tabla 2.7 Límites máximos de distorsión armónica total en tensión y de CAIMT en el punto de acometida

Tensión (kV)	Distorsión Armónica Individual de tensión en % (CAIMT)	Distorsión Armónica Total de Tensión en % (DAT)
Menor de 1	6,0	8,0
de 1 a 35	5,0	6,5
Mayor de 35	2,0	3,0

En la tabla 2.8 se muestran los límites máximos de distorsión armónica total de corriente para baja, media y alta tensión.

Tabla 2.8 Límites máximos de distorsión armónica total de corriente y de CAIMC para baja, media y alta tensión hasta 69 kV

Impedancia Relativa (I_{cc} / I_L)	para Armónicas Impares en % (CAIMC)					Distorsión Armónica Total de Corriente en % (DTC)
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$ 7	$17 \leq h < 23$ 3	$23 \leq h < 35$ 5	$h \geq 35$	
$(I_{cc} / I_L) < 20$	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
$20 \leq (I_{cc} / I_L) < 50$	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
$50 \leq (I_{cc} / I_L) < 100$	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
$100 \leq (I_{cc} / I_L) < 1000$	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
$(I_{cc} / I_L) \geq 1000$	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

En la tabla 2.9 vemos los límites máximos de distorsión armónica total de corriente para alta tensión para armónicas impares.

Tabla 2.9 Límites máximos de distorsión armónica total de corriente y de CAIMC para alta tensión (mayor de 69 kV y hasta 161 kV)

Impedancia Relativa (I_{cc} / I_L)	para Armónicas Impares en % (CAIMC)					Distorsión Armónica Total de Corriente en % (DTC)
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$ 7	$17 \leq h < 23$ 3	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$ 5	
$(I_{cc} / I_L) < 20$	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
$20 \leq (I_{cc} / I_L) < 50$	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
$50 \leq (I_{cc} / I_L) < 100$	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
$100 \leq (I_{cc} / I_L) < 1000$	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
$(I_{cc} / I_L) \geq 1000$	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0

A continuación en la tabla 2.10 podemos ver los límites máximos de distorsión armónica total de corriente para armónicas impares para alta tensión.

Tabla 2.10 Límites máximos de distorsión armónica total de corriente y de AIMC para alta tensión (mayor de 161 kV)

Impedancia Relativa (I_{cc} / I_L)	para Armónicas Impares en % (CAIMC)					Distorsión Armónica Total de Corriente en % (DTC)
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$ 7	$17 \leq h < 23$ 3	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$ 5	
$(I_{cc} / I_L) < 50$	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
$(I_{cc} / I_L) \geq 50$	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

NOTAS:

- 1) En el caso de armónicas pares los límites se reducen al 25% de los correspondientes a armónicas impares.
- 2) Los límites mostrados en la tabla 4, 5 y 6 deben ser utilizados como el caso más desfavorable de operación normal. Para arranque de hornos eléctricos de arco, que toman un tiempo máximo de un minuto, se permite exceder los límites de la tabla en 50%.
- 3) En ningún caso se permiten corrientes de carga con componentes de corriente directa.
- 4) I_{cc} = Corriente de Corto Circuito
- 5) I_L = Corriente de Carga

En la tabla 2.11 podemos apreciar los límites de variaciones de tensión.

Tabla 2.11 Límites de variaciones de tensión

Indicador	Límite
Pst	≤ 1
Plt	$\leq 0,65$
Dt	$\leq 3,3\%$ Durante el cambio de tensión para más de 500 ms
Dc	$\leq 3,3\%$
Dmax	4,0% Sin condiciones adicionales. $\leq 6,0\%$ Para equipo que es conmutado manualmente o con una frecuencia mayor a 2 veces por día y también con arranque retardado de más de 10 s, o arranque manual después de una interrupción en el suministro de energía. $\leq 7,0\%$ Para equipo que es conmutado hasta dos veces al día.

NOTAS:

- 1) Pst y Plt no aplica para cambios de tensión por conmutación manual que ocurre una vez cada día y los límites dt, dc y dmax deben aplicarse con las tensiones previas multiplicadas por el factor 1.33.
- 2) Los límites no aplican a conmutaciones por interrupciones de emergencia.

2.9. Efectos de las armónicas en los sistemas eléctricos

En el sistema de potencia, las corrientes armónicas son las culpables del sobrecalentamiento y disminución de la vida útil del equipo. El impacto es mayor cuando por resonancias en la red se amplifican las corrientes armónicas.

Las armónicas también pueden causar errores en el encendido de los tiristores en instalaciones de transmisión de corriente directa en alto voltaje (HVDC), compensadores estáticos de vars (SVC), errores en la medición y falsos disparos del equipo de protección.

2.9.1. Efectos en el sistema de potencia

Impedancia del sistema

Los sistemas de potencia son generalmente capaces de aguantar considerables corrientes armónicas sin que ocurran problemas importantes, porque el sistema de potencia es generalmente robusto en relación a la carga, por lo tanto la impedancia del sistema es pequeña comparada con la impedancia de la carga.

Con una impedancia pequeña del sistema, el flujo de la corriente distorsionada a la carga causará una distorsión de voltaje mínima en los buses. Con una distorsión de voltaje pequeña, no se verá afectada la operación de otras cargas y equipos.

Efectos en bancos de capacitores

Aunque los capacitores no generan armónicas, éstas con frecuencia aparecen en los bancos de capacitores; durante la resonancia, los capacitores experimentan grandes distorsiones de voltaje provocando una descarga parcial en el dieléctrico del capacitor. Esto podría eventualmente resultar en un corto circuito en las bobinas y falla del banco de capacitores.

No obstante, la mayoría de problemas en el equipo causadas por armónicas son debido a la distorsión de corriente. Altas corrientes armónicas también causan la fusión

de fusibles en los bancos de capacitores, dando como resultado una disminución en la potencia reactiva suministrada al sistema y en el caso de una planta industrial un decremento en el factor de potencia.

Efectos en los sistemas de control

Aunque la distorsión de voltaje es tomada en cuenta en el diseño de sistemas de control, la distorsión armónica puede alterar los parámetros de encendido, afectando considerablemente su operación.

Efectos en los equipos de medición

Un watthorímetro es esencialmente un pequeño motor acoplado a un disco metálico. La corriente en fase con el voltaje, demandados por la carga, fluyen a través de bobinas del medidor, produciendo un par en el disco que tiende a hacerlo girar. El consumo de energía es medido por la acumulación del número de vueltas del disco sobre un período de tiempo.

El par desarrollado en el disco es sensible a la frecuencia; a frecuencias más altas que la fundamental, el par disminuye, causando una lenta rotación del disco y en consecuencia una lectura errónea de la energía consumida.

Las componentes armónicas regularmente son bastante pequeñas comparadas con la componente de frecuencia fundamental, así éste error de medición es generalmente despreciable. Estudios recientes sobre el efecto de las corrientes armónicas en medidores y otros instrumentos muestran que un factor de distorsión de cuando menos el 20% es requerido para tener un error significativo.

2.9.2. Efectos en los circuitos de comunicaciones

El flujo de corrientes armónicas en los conductores de los sistemas de distribución induce voltajes que caen dentro del ancho de banda de los sistemas de telefonía. Las armónicas triples son particularmente problemáticas en sistemas de cuatro hilos; ya que tienen una secuencia cero, lo cual implica que están en fase con los conductores de las tres fases y que se agreguen directamente al neutro del circuito, el cual está más cercano al circuito de comunicación. En la figura 2.17 se muestra cómo se producen algunas armónicas en un circuito de telefonía.

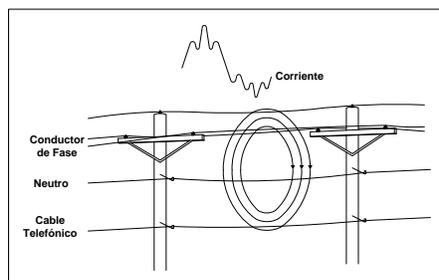


Fig. 2.17 Voltajes inducidos en los circuitos de telefonía

Las corrientes armónicas del sistema de eléctrico se acoplan a los circuitos de comunicación ya sea por inducción o por conducción directa. Éste fue un grave problema en tiempos pasados; hoy en día, predominan los cables de comunicaciones de par trenzado con apantallamiento que disminuyen significativamente dicho efecto.

CAPITULO III

Modelado de un Sistema de Potencia Industrial

3.1. Definición de un Sistema de Potencia y su Clasificación.

Todo el recorrido de la energía eléctrica desde su generación hasta su entrega final, se realiza en lo que se denomina el Sistema de Potencia. El Sistema de Potencia se encuentra dividido en 4 áreas fundamentales como lo son:

3.1.1. Generación

Es la conversión de cualquier forma de energía, a energía eléctrica. Los generadores se encargan de esto, se les entrega energía mecánica para transformarla en energía eléctrica.

3.1.2. Transmisión

Toda la electricidad producida en las Centrales Generadoras se debe transportar hacia los lugares poblados que la demandan, que por lo general se encuentran bastante alejados uno del otro. Para realizar esta labor de forma eficiente se eleva el voltaje, por medio de transformadores y se utilizan grandes torres metálicas para sujetar los cables que la transportan.

3.1.3. Sub-transmisión

Una vez que nos aproximamos a los centros poblados, es necesario reducir el voltaje a valores menores por medio de transformadores reductores. Para facilitar así el transporte de energía a los grandes centros industriales y residenciales.

3.1.4. Distribución

Finalmente y para poder llegar a cada uno de los hogares, centros comerciales e industrias, se vuelve a reducir el voltaje. De esta forma es mucho más sencillo, económico y seguro, transportar la energía eléctrica y llevarla a cada rincón del pueblo, urbanización o ciudad.

En esta etapa se reduce el voltaje a valores comerciales (120 V, 240 V, 440 V).

3.2. Modelado de un Sistema de Potencia con el Programa de DIGSILENT

3.2.1. Introducción al DIGSILENT

Para realizar el estudio de las áreas del Sistema de Potencia, principalmente indagar más profundamente en el estudio de los armónicos, los fenómenos que influyen en su comportamiento y los cálculos determinantes para el análisis y posibles soluciones de los armónicos en los Sistemas de Potencia, es necesario utilizar eficientes algoritmos computacionales. En efecto en las últimas décadas y aprovechando la gran disponibilidad de recursos computacionales, se ha perfeccionado cada vez más la simulación de los sistemas eléctricos.

El programa de cálculo DIGSILENT es una herramienta computarizada de asistencia a la ingeniería para el análisis de sistemas eléctricos de potencia comercial, industrial y a gran escala. Este paquete computacional ha sido diseñado como un avanzado, integrado e interactivo, dedicado a los sistemas de potencia para lograr los objetivos principales de planificación y operación.

A fin de cumplir con los requerimientos actuales en el análisis de sistemas de potencia, el paquete de cálculo de sistemas de potencia DIGSILENT, fue diseñado como una herramienta de ingeniería integrada la cual provee una paleta completa de técnicas de todas las funciones disponibles, en vez de ser una colección de diferentes módulos. A continuación presentaremos la forma en que se modela un Sistema de Potencia para así poder determinar, analizar y solucionar los problemas de corrientes y voltajes armónicos que se puedan presentar en cada una de sus Áreas de los Sistemas eléctricos de Potencia.

3.2.2. Modelado de un Sistema de Potencia con DIGSILENT

3.2.2.1. Descripción de la interfaz

Podemos comenzar presentando una pequeña descripción de la interfaz del usuario. La ventana principal del DIGSILENT posee las siguientes regiones que se muestran en la figura 3.1.

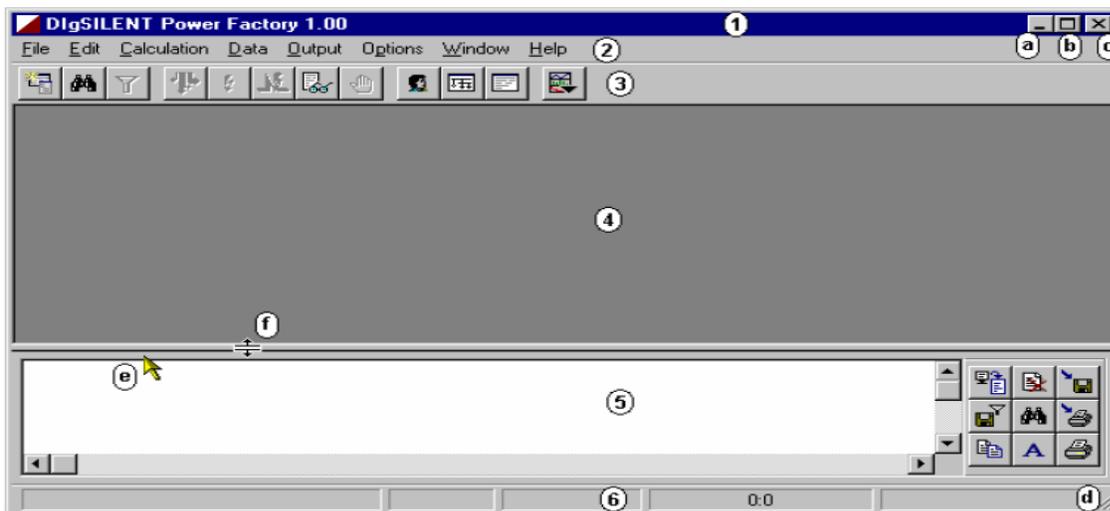


Fig. 3.1 Características de la ventana principal

- 1) Barra de Ventana Principal
- 2) Barra de Menú
- 3) Barra de Herramienta
- 4) Espacio de Trabajo
- 5) Ventana de Salida ("Workspace")
- 6) Barra de Estado

Barra de Menú

La barra de menú contiene los menús principales de DIGSILENT. Cada menú posee una lista de opciones de menú desplegable, cada una de las opciones efectúa una acción específica. Para abrir la lista desplegable, ya sea haciendo el clic en el menú con el botón izquierdo, o presione la tecla Alt. Junto con la letra subrayada en el menú.

Por ejemplo para abrir el botón "Help" presione la tecla Alt. Junto con la letra "h". Como se aprecia en la figura 3.2. Las opciones que aparecen en gris no están disponibles actualmente.

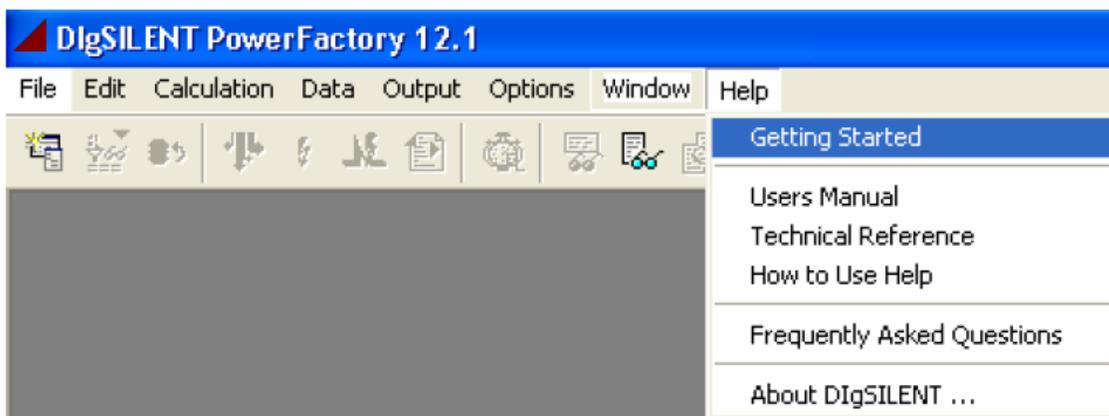


Fig. 3.2 Menú de ayuda en la barra de menú

Barra de Herramientas

La barra de herramientas muestra los botones de comando principal del DIGSILENT. Como se muestra en la figura 3.3. Recordar que los botones que aparecen en gris no están disponibles.



Fig. 3.3 Barra de Herramientas Principal

Todos los botones de comando están equipados con un balón de ayuda con texto el cual se despliega cuando el cursor es mantenido en el botón por un instante de tiempo sin que el botón sea presionado, como se aprecia en la figura 3.3.

Usar un botón de comando no puede ser más fácil: solo haga clic en este con el botón izquierdo del ratón. Estos botones que efectúan una tarea automáticamente regresan atrás una vez que la tarea ha finalizado. Algunos botones de comando swichean entre dos modos, por ejemplo uno en el cual reserva más espacio para la ventana de salida en el espacio de trabajo. Este botón permanecerá presionado para mostrar que se encuentra en modo activo. Esto se ve claramente en la figura 3.4.

El clic otra vez en el botón de comando switchea de regreso al modo de vista normal.

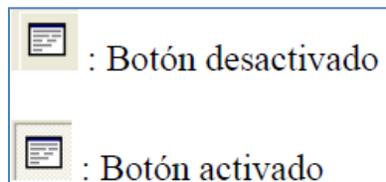


Fig. 3.4 Botón activado.

Cuando el DIGSILENT solo ha sido iniciado, la barra de herramientas solo muestra los botones de comando general. El botón de seleccionar barra de herramientas puede ser hecho un clic para mostrar los botones de comando adicional. Este botón se aprecia en la figura 3.5.



Fig. 3.5 Botón de seleccionar barra de herramientas Toolbar select

Ventana de Salida

La ventana de salida en el DIGSILENT es una parte integral de la ventana principal, debido a que el DIGSILENT siempre necesita un canal de comunicación con el usuario, la ventana de salida no puede ser cerrada, aunque puede ser minimizada. El estado normal de la ventana de salida es atracado, lo cual significa que este permanece fijo en la parte inferior de la pantalla.

El borde de la ventana de salida muestra una barra de división, la cual se usa para cambiar el tamaño de la ventana de salida.

 Este cursor de arrastrar aparecerá automáticamente cuando el cursor es colocado sobre la barra de división. El botón izquierdo del ratón puede ser presionado cuando el cursor de arrastrar está visible. Este cambiará la barra de división al color gris. La ventana de salida puede ser ahora redimensionada manteniendo presionado el botón y moviendo el ratón hacia arriba o hacia abajo.

El botón "Maximize Output Window" maximiza la ventana de salida en la barra de herramientas principal aumentará la ventana de salida, al tamaño de la pantalla. Un clic derecho sobre el botón nuevamente cambiará de nuevo al tamaño pequeño la ventana de salida.

El programa DIGSILENT dispone de un número de características para la ayuda del usuario:

- La versión comercial viene con una copia del manual de usuario y el manual de referencia técnica y un tutorial.
- Todas las versiones poseen una versión en línea del manual de usuario y el manual de referencia técnica y un tutorial, los cuales pueden ser abiertos desde la opción Help del menú principal, este botón se aprecia en la figura 3.6.

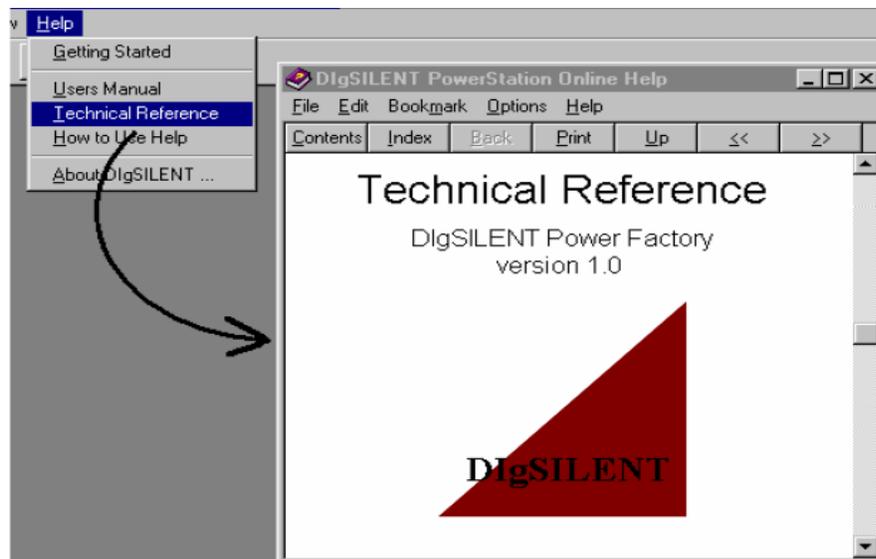


Fig. 3.6 Menú de ayuda y referencia técnica en línea

Todas las versiones poseen una ayuda sensitiva al contexto la cual directamente saltará a la página correcta del manual de usuario o del manual de referencia técnica cuando la tecla F1 es presionada. En la figura 3.7 se muestra la ayuda para el transformador de 2 devanados.

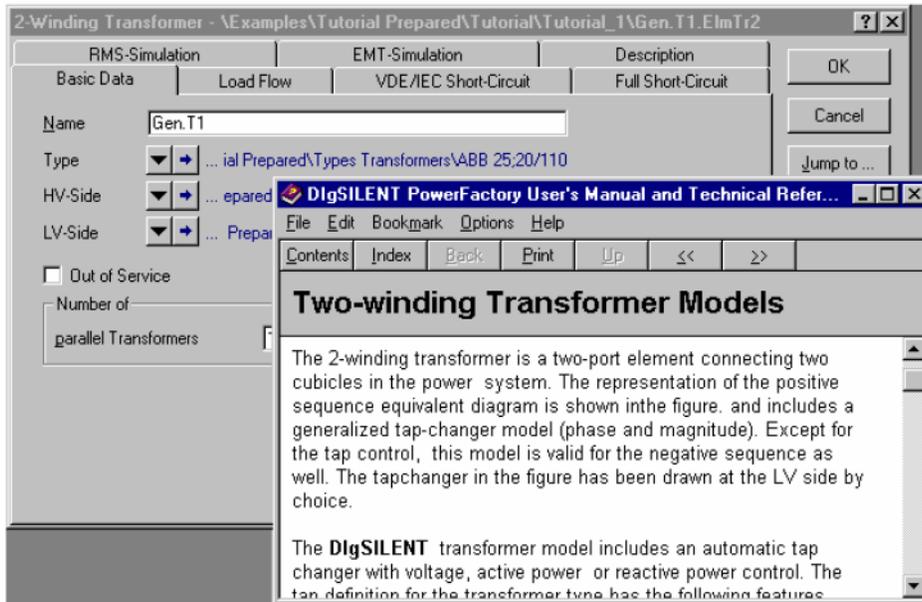


Fig. 3.7 Transformador de 2 Devanados y su ayuda sensitiva al contexto

- En la figura 3.8 podemos ver que todas las funciones poseen un balón de ayuda con texto la cual da el nombre de los botones de comando o los parámetros de entrada si el cursor está posicionado sobre esos ítems, y sostenidos sobre ellos por algo así como medio segundo. La siguiente figura muestra tres balones de ayuda en la parte del navegador del manejador de datos. 1 Para ayuda en botones, 2 Para ayuda en los iconos de clase y 3 Para ayuda en los campos de parámetro.

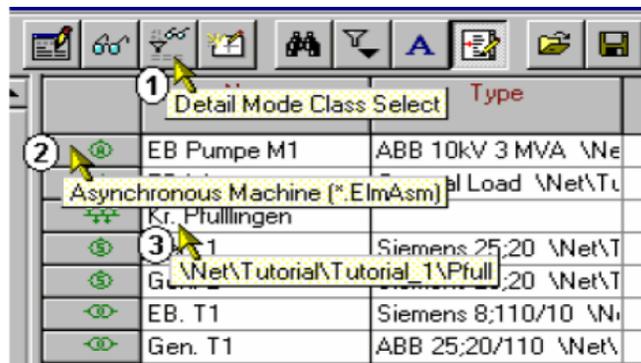


Fig. 3.8 Balones de ayuda en el manejador de datos

3.2.2.2. Algunos pasos para modelar un Sistema de Potencia en el DIGSILENT

El primer paso en el diseño de un nuevo Sistema de Potencia es crear un proyecto. Un proyecto ofrece la estructura básica en el cual se define y almacena las definiciones del

Sistema de Potencia, junto con sus etapas de diseño, y los diagramas unifilares, librerías de tipos, etapas de cálculo, comandos de cálculo, etc.

A continuación describiremos como crear un nuevo proyecto.

La ubicación donde el tutorial almacena los proyectos es llamada carpeta de usuario "User". Para una versión Demo este será almacenado en la carpeta "Demo". Para versiones con licencia, la carpeta de "User" será la carpeta creada para usted por el administrador.

La carpeta de usuario "User" activa es marcada por un pequeño icono azul en la pantalla como podemos ver en la figura 3.9.



Fig. 3.9 Ejemplo para una carpeta de usuario activa "Your user folder".

En la figura 3.10 vemos cómo podemos crear un proyecto en su carpeta de usuario:

- Abrir el menú File en la barra de menú principal
- Seleccione la opción New. Aparecerá el dialogo mostrado en la siguiente figura.

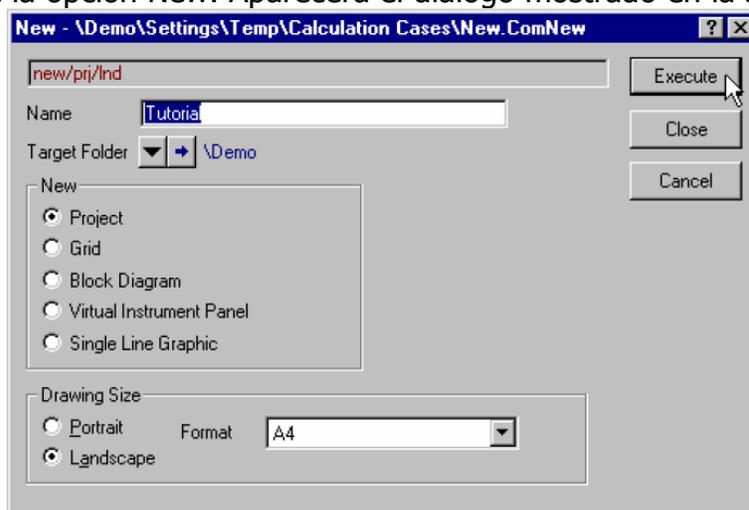


Fig. 3.10 Dialogo de comando ComNew

- Seleccione la opción Project por un clic del botón derecho sobre este. La línea de comando roja debería mostrar new/prj....

- Introduzca el nombre del proyecto. Este seguro que introduce ese nombre correctamente. Todos los nombres para proyectos, casos de estudio u otros proyectos han sido entrados exactamente como son dados.
- En el campo, carpeta de destino "Target Folder" se debe leer User. En caso de que mostrara otra cosa.
 - + Presione el siguiente botón ▼ para seleccionar el camino correcto. Esto abrirá un manejador de base de datos el cual muestra, en su ventana de panel izquierdo, una representación del árbol de la base de datos completa del DIGSILENT. Deberá seleccionar "User" y deberá hacer clic en el botón de "OK". El dialogo ComNew debe aparecer nuevamente, con el campo de destino correcto.
- Hacer clic en el botón de Excute.

La ejecución del comando ComNew causa que el proyecto actualmente activo sea desactivado y todas las ventanas gráficas relacionadas serán cerradas. Un proyecto necesita al menos de una carpeta de proyecto en el cual un sistema de potencia o subsistema es definido. De tal modo una carpeta de red es creada automáticamente y una ventana de dialogo para edición, como se ve en la figura 3.11.

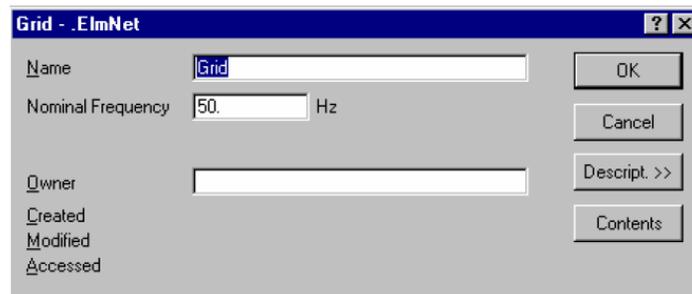


Fig. 3.11 Ventana de dialogo de Red

- Ajuste el nombre de la Red.
- Ajustar la frecuencia.
- Hacer clic derecho en el botón "OK".

El campo de propietario es opcional y normalmente usado para introducir un proyecto, compañía o algún otro nombre apropiado.

El proyecto creado recientemente y el caso de estudio son activados automáticamente, y el gráfico unifilar vacío será mostrado. El espacio de trabajo del DIGSILENT debe ahora lucir como en la figura 3.12.

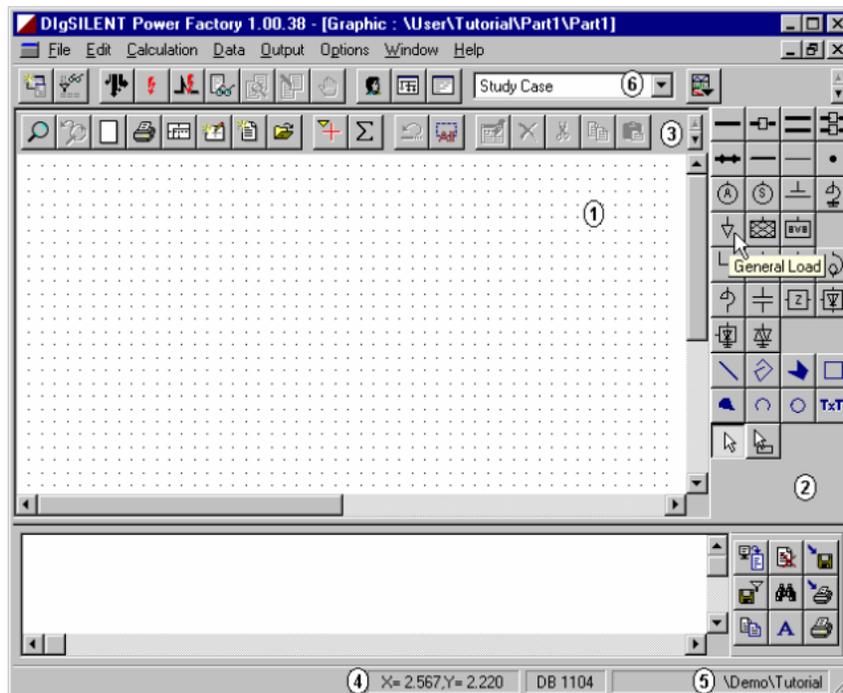


Fig. 3.12 Espacio de Trabajo luego de la creación de un Nuevo Proyecto

En esta figura, las siguientes partes de trabajo son visibles:

- 1) La ventana vacía de los gráficos unifilares con rejilla de dibujo.
- 2) La caja de herramientas gráficas la cual mostrará su estado fijo "docked", en el lado derecho de la ventana gráfica.
- 3) La barra de herramientas y sus botones en la ventana de los gráficos local, la cual es mostrada con sus botones de flechas arriba abajo, los cuales muestran más herramientas, estas flechas solo son visibles si no hay espacio suficiente para mostrar todos los botones.
- 4) La posición del cursor en la ventana de gráficos es mostrada en la barra de mensaje.
- 5) El nombre del proyecto actualmente activo es mostrada en la barra de mensajes.
- 6) La lista de caso de estudio en la barra de herramientas principal, la cual muestra el nombre del caso de estudio actualmente activo y la cual puede ser usada para cambiarse a otro caso de estudio.

3.2.2.3. Creando elementos del Sistema de Potencia

El programa DIGSILENT permite para la creación de un nuevo diseño de sistema de potencia o (parte de él) "by hand" a mano, esto es: creando todos los componentes en el ambiente textual de la base de datos y por la conexión manualmente de ellos, así definiendo la topología. El más conveniente método sin embargo, es el uso de gráficos unifilares interactivos.

Los gráficos unifilares son usados para crear los componentes del nuevo sistema de potencia y para insertar en ellos la topología de la red. En esta forma la base de datos del sistema y su gráfico unifilar son construidos juntos en una acción.

Editando los componentes del sistema de potencia, por ejemplo para ajustar el nivel de voltaje u otro parámetro eléctrico, puede ser hecho desde el gráfico unifilar con un doble clic en el símbolo gráfico. Este abrirá el correspondiente dialogo de datos del componente del sistema de potencia.

3.2.2.4. Creando componentes del Sistema de Potencia

Un diagrama unifilar en gris, visible y ahí es donde se colocaran los componentes del actual Sistema de Potencia.

3.2.2.5. Creando barras

- Hacer clic en el botón izquierdo del ratón en el botón de barra en la caja de herramientas gráficas. Use el balón de ayuda con texto para encontrar el botón correcto. El cursor mostrará un icono de barra sencilla luego que el botón ha sido presionado.
- Use el modelo de fondo para posicionar la primera barra con el clic izquierdo en la superficie de dibujo. Una barra será dibujada en negro y es dado un nombre por omisión como "B1".
- Si algo diferente a una barra simple aparece, presione el botón de "Undo" para deshacer su última acción, e intente de nuevo.

La barra puede ser movida y redimensionada para encajar en el modelo de fondo:

- Seleccione el cursor grafico (c).
- Seleccione la barra con un clic del botón izquierdo del ratón sobre ella, esto marcará la barra con una delgada línea gris y dos pequeños cuadrados. Si aparece una marca de cruces interrumpidas sin los cuadrados es, que el cursor fue usado erróneamente. Si usted ha hecho doble clic en la barra accidentalmente. El dialogo de edición se abrirá. Cierre ese dialogo con el botón "Cancel".
- Mueva la barra con el clic en la línea solida gris y arrastre la barra. Soltando el ratón se coloca en la nueva ubicación.
- Redimensionamiento es hecho por el clic izquierdo en uno de los pequeños cuadrados y arrastrando este a la izquierda o derecha como en la figura.

El cursor grafico es también usado para desplegar el balón de ayuda con texto cuando este se mantiene sobre el nombre de la barra como se aprecia en la figura 3.13. Esto evita tener que usar el show de aumento y de disminución para leer el texto.

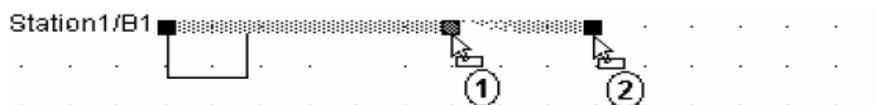


Fig. 3.13 Redimensionamiento de una barra

Crear otras dos barras en la misma forma:

- Seleccione el icono de barra en la caja de herramientas gráficas otra vez. Colocar la segunda y tercera barra.
- Mueva o redimensione la segunda barra y tercera barra para fijarlas.

El dibujo puede ser pequeño para posicionarlas adecuadamente. Para aumentar esas tres barras (zoom in).

- Hacer clic izquierdo en el botón de zoom (🔍).
- Dibuje un cuadrado alrededor de las tres barras haciendo un clic izquierdo en la primera esquina y mueva el ratón hacia abajo, y arrastrando el ratón hasta la otra esquina. El cuadrado seleccionado, será aumentado cuando la tecla del ratón sea liberada.

3.2.2.6. Creando elementos de rama

Las barras son para ser conectadas con transformadores:

- Hacer clic izquierdo en el botón de transformadores de dos devanados en la caja de herramientas gráficas.
- Para dibujar el primer transformador, hacer clic en la barra de más arriba en la posición sugerida para el modelo de fondo. El transformador es ahora conectado en la barra de esa posición.
- Hacer clic izquierdo en la barra del medio para hacer la segunda conexión.
- Use el mismo método para conectar un segundo transformador entre la barra del medio y la de más abajo.

El diagrama unifilar, sin el fondo, debe ahora lucir como la figura 3.14.

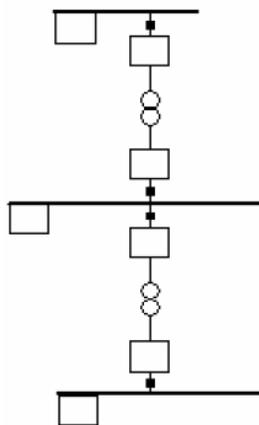


Fig. 3.14 Tres Barras y dos Transformadores

El transformador puede ser movido en la misma forma que una barra es redimensionada en tamaño.

3.2.2.7. Creando elementos de un solo puerto

Los elementos de un solo puerto son elementos del Sistema de Potencia los cuales son conectados a una barra: generadores, motores, cargas, redes externas etc.

Ejemplificaremos como colocar una máquina asíncrona.

- Presione el botón de máquina asíncrona en la caja de herramientas.
- Conéctela en la barra de más abajo, haciendo clic izquierdo en esa posición.

También es importante saber cómo colocar una red externa para cualquier proyecto, y la manera más sencilla de hacerlo es la siguiente:

- Presione el botón de red externa "External Grid" en la barra de herramientas.
- Hacer clic izquierdo en la barra de más arriba para conectar la red externa.

Si la red externa está conectada a la barra en la misma posición que el transformador el símbolo de la red externa es automáticamente posicionado en la parte de arriba de la barra, como podemos ver en la figura 3.15

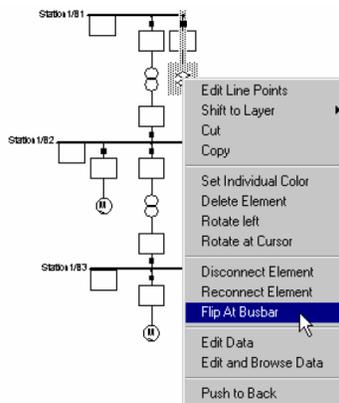


Fig. 3.15 Cambiando de posición un símbolo

Si el símbolo de la red externa es dibujado en la posición hacia abajo, este puede ser rotado hacia arriba.

- Seleccione el cursor gráfico ().
- Hacer un clic derecho en el símbolo de la red externa/máquina asíncrona según (sea el caso) El menú sensitivo al caso aparente (ver la figura anterior).
- Haciendo clic izquierdo en la opción "Flip At Busbar". El símbolo es rotado 180 grado alrededor de su barra de conexión. La rotación también es posible con conexiones no rectas.

Esto incluye la creación de sistema de potencia, y topología. Deverá verificar que todos los símbolos están posicionados correctamente.

Los elementos sin embargo no han sido editados todavía y están todos usando los parámetros por defecto y habrá que hacer el cambio de parámetros.

3.2.2.8. Editando los componentes del Sistema de Potencia

El programa DIGSILENT ofrece algunos métodos para editar los parámetros eléctricos de los elementos del sistema de potencia, desde de diálogos de revisión simples hasta ambientes flexibles parecidos a una hoja de cálculos donde más de un elemento es visible al mismo tiempo.

El más simple y directo método, sin embargo es, hacer doble clic en los elementos del gráfico unifilar, el cual abre su ventana de diálogo para edición.

Casi todos los elementos del sistema de potencia usan objetos "de tipo". Un grupo grande de transformadores, por ejemplo, pueden ser todos del mismo tipo. La mayor parte de los parámetros eléctricos así son definidos en un objeto "de tipo" de transformadores y cada transformador se referirá a ese tipo.

Normalmente, esto significa que una librería de tipos definidos por el usuario ha sido creada antes de definir los elementos del sistema de potencia.

3.2.2.9. Editando barras

Para editar como ejemplo la barra que construimos más arriba:

- Seleccionar el cursor gráfico () o de datos () en la caja de herramientas.
- Haga doble clic en la barra de más arriba. La ventana de dialogo para edición de la barra, como la mostrada en la figura 3.16.

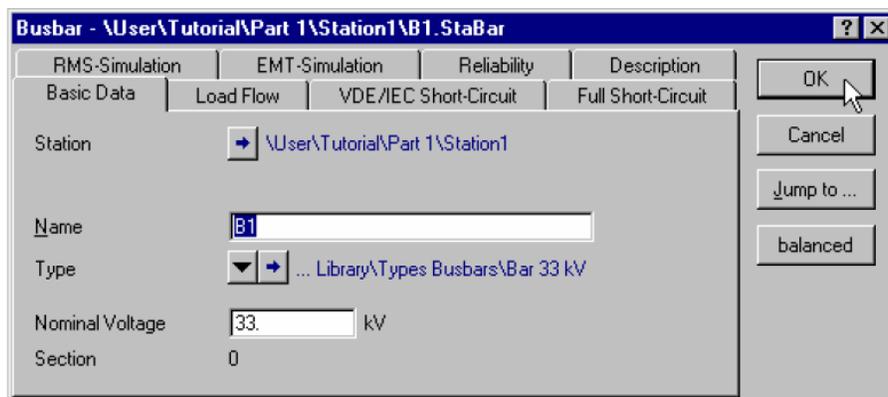


Fig. 3.16 Dialogo de Edición de Barra

Este dialogo muestra:

- Etiquetas de páginas que son usadas para entrar parámetros de cálculos específicos, (Basic Data, Load Flow" etc.).
- La estación ("station") a la cual esta barra pertenece, con un botón el cual abre la ventana para esa estación.
- El nombre de la barra.
- Su tipo, con un botón para seleccionar el tipo o uno para editar el tipo.
- Un voltaje nominal.
- Un número de secciones, el cual no puede ser editado.

Para editar la primera barra la que colocamos más arriba.

- Name="D1_Swab"
- Hacer clic en el botón de selección de tipo (▼) para seleccionar la opción de "Select Project Type". Este abre una librería de barras en el árbol de base de datos, y la lista de tipos de barras en la librería es mostrada. Ver la figura. Manteniendo el cursor del ratón. Esta librería de barras ha sido instalada por el administrador.
- Se selecciona el tipo de barra, como por ejemplo la barra de 33 KV. Haciendo clic izquierdo en el pequeño icono del objeto como se muestra en la siguiente figura. Manteniendo el cursor del ratón sobre el icono del objeto hará que aparezca el balón de ayuda con el texto.
- Presionar "OK" para seleccionar el tipo de barra. El dialogo de edición de barra estará activo nuevamente.
- Podemos ajustar por ejemplo el voltaje nominal a 33 kV el voltaje nominal de una barra puede ser diferente al de ese tipo. El tipo de barra seleccionada es diseñada para 33 kV, pero puede ser usada para otro nivel de voltaje más bajo.
- Presione "OK".

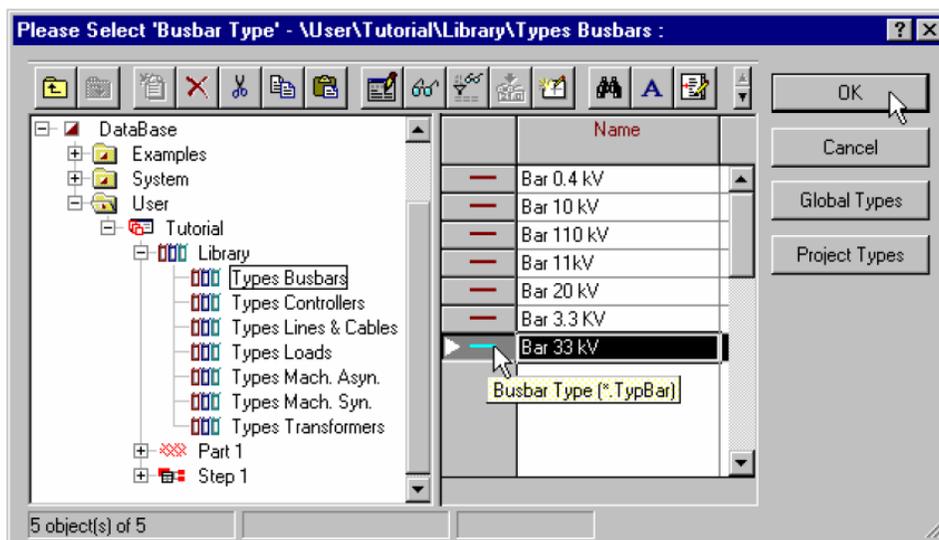


Fig. 3.17 Seleccionando el Tipo de Barra

Las demás barras que se utilicen serán editadas con el mismo procedimiento. En la figura 3.17 se puede ver con más detalle este procedimiento.

3.2.2.10. Editando elementos de rama

Para editar un transformador:

- Hacer doble clic en el transformador y se abrirá dialogo de edición.
- Name = "T1_33/11a"
- El dialogo muestra las ramas conectadas. Esos campos han sido ajustados cuando el transformador fue conectado en el diagrama unifilar. Los nombres de las barras son mostradas en rojo.
- Type = Project types: TR2 20;33/11:10%. Observe que la opción "Select Project Type" automáticamente abrirá la librería de tipos de transformadores.
- Abrir la página de flujo de potencia "Load Flow", haciendo clic en la etiqueta de página.
- Verificar que el cambiador automático de tomas " the automatic tap changer" está deshabilitado y que la posición de la toma está ajustada a cero.
- Presione "OK"

Un mensaje de error será mostrado si sus lados de bajo y alto voltaje (LV y HV respectivamente) son conectados erróneamente. En este caso:

- Presione el botón de "Flip Connections".
- Presione "OK" otra vez.

3.2.2.11. Editando elementos de un solo puerto

Para editar la Red Externa:

- Abrir el dialogo de edición. El elemento de red externa no posee tipo. Todos los datos eléctricos están almacenados en el mismo.
- Datos de Flujo de Potencia "Load Flow Data":
 - + Bus Type = "SL" (slack).
 - + Ángulo, Angle = 0.0 deg
 - + Ajuste de voltaje, Voltage Set Point=1.0 p.u.
- Corto circuito según la norma VDE/IEC, " VDE/IEC Short-Circuit":
 - + Name = "Transmisión Gris"
 - + Potencia de corto circuito, "Short Circuit Power SK=10000MVA
 - + Relación R/X, R/X ratio=0.1.
 - + Presione "OK"
- Para editar una máquina asíncrona de 11 KV:
 - +Abrir su dialogo.
 - +Name = "ASM1a"

+Type = Project types: "ASM 11 KV 5MVA"
+Página de flujo de potencia. "Load Flow": Potencia Activa, "Active Power"=4MW.
+Presione "OK".

- Para editar otra máquina asíncrona de 3.3 KV:
 - + Abrir su dialogo.
 - + Name = "AMS1b".
 - + Type = Project types: "ASM 3.3 KV 2MVA"
 - + Página de flujo de potencia. "Load Flow": Potencia Activa, "Active Power"=1MW.
 - + Presione "OK".

Esto concluye con la creación de lo que podríamos llamar el primer paso en la definición del sistema de potencia. Ahora se puede comenzar con los cálculos.

3.2.2.12. Efectuando cálculo de corto circuito

Un cálculo de corto circuito puede ser comenzado desde el menú principal, ("Calculation Short Circuit"), presionando el botón de corto circuito (⚡) en la barra de herramientas principal, o directamente desde el gráfico unifilar:

- Seleccione el cursor de datos.
- Hacer clic izquierdo en la barra, y seleccione la opción, ("Calculation Short Circuit"). Este abre el dialogo de comando de corto circuito, como se muestra en la figura 3.18.

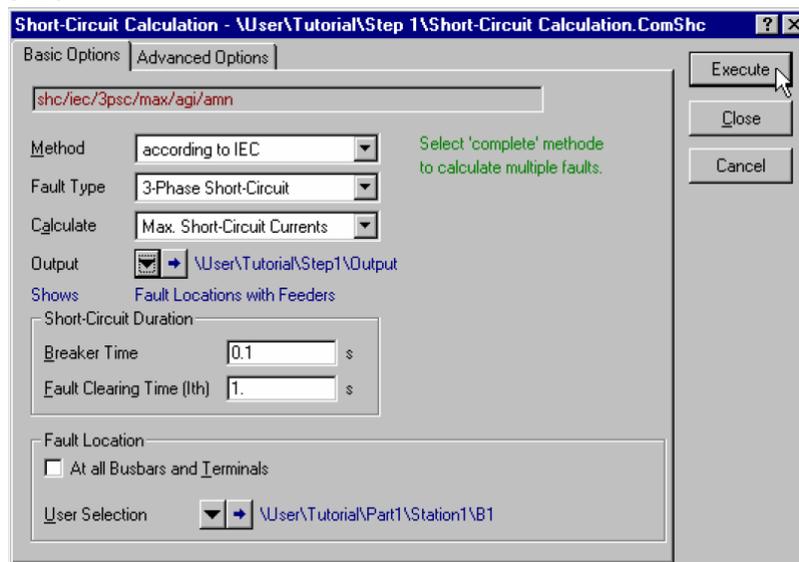


Fig. 3.18 Dialogo de comandos de Corto circuito

- Ajuste el método para el estandarizado IEC. Method = "Acording to IEC".
- Ajuste el tipo de corto circuito al trifásico. Fault Type = 3-phase Short-Circuit.

- Verificar que ha colocado la localización de galas a todas las barras "At All Busbars and Terminals" está deshabilitado.
- Presione el botón de "Excute"

Un cálculo de corto circuito es comenzado para un corto circuito en una sola barra seleccionada. Los resultados muestran la corriente en toda la red, excepto en los elementos de carga. La cual es despreciada. La ventana de salida debe mostrar el siguiente mensaje:

DIGSI/info - Short-circuit calculated at Busbar Station1\D1_11a

DIGSI/info - Short-circuit calculation ready !

Para calcular los cortos circuitos de todas las barras y terminales de una sola vez:

- Presione el botón de corto circuito en la barra principal de herramientas.
- Ajuste el tipo de corto circuito al trifásico. Fault Type = 3-phase Shot-Circuit.
- Habilitar la localización de fallas a todas las barras "At All Busbars and terminals"
- Presione el botón de "Excute".

3.2.2.13. Efectuando un flujo de potencia

El flujo de potencia puede ser comenzado desde el menú principal, o presionando el botón de flujo de potencia (⚡) en la barra de herramientas principal. Esto traerá el dialogo de comando de flujo de potencia al frente, como se ilustra en la figura 3.19.

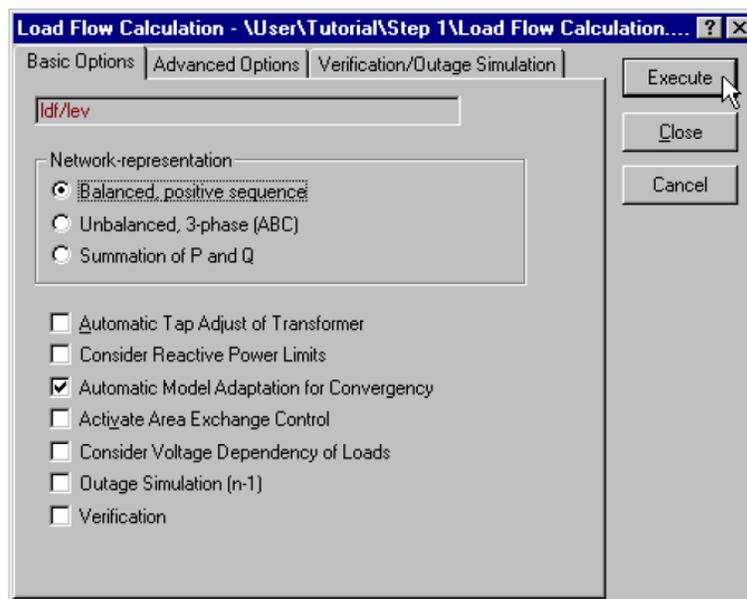


Fig. 3.19 Ventana de dialogo de comando de flujo de potencia.

Esta ventana de comando de dialogo ofrece algunas opciones para los cálculos de flujo de potencia:

Verificar que las siguientes opciones estén ajustadas:

- "NetWork Representation", representación de red: "Balanced, positive sequence", balanceado de secuencia positiva.
- Habilitar la adaptación automática del modelo de convergencia "Automatic Adaptation for Convergency" Si todos los elementos fueron entrados correctamente, esta opción no será necesaria. En caso de un error, sin embargo, asegura la convergencia en el flujo de potencia, haciendo más fácil localizar el error.
- Deshabilite todas las otras opciones. La línea de comando roja se debe leer "Idf/lev"
- Presione el botón "Excute"

Un cálculo de flujo de potencia es ahora comenzado, si el sistema de potencia es entrado correctamente el siguiente mensaje debe aparecer en la ventana de salida:

```
DIgSI/info - Element 'Transmission Grid.ElmXnet' is local reference
in separated area 'Station1\D1_Swab.StaBar'
DIgSI/info - Calculating loadflow
DIgSI/info - load flow iteration: 1
DIgSI/info - load flow iteration: 2
DIgSI/info -----
DIgSI/info - Loadflow converged with 2 iterations
```

Si un error fue encontrado, un mensaje de error como el siguiente debe aparecer:

```
DIgSI/err - '\User\Tutorial\Part 1\T1_11/3.3a.ElmTr2':
DIgSI/err - missing type !
```

Los cálculos de los flujos de potencia pueden sin embargo seguir. En este caso el transformador no posee ningún tipo de ajuste. El comando de flujo de potencia es tan inteligente para desconectar el transformador y para calcular el flujo de potencia para las dos áreas remanentes. Aunque esto no será el flujo de potencia que fue después, los resultados de los cálculos son frecuentemente útiles para localizar el problema.

Para resolver el error primero, debería encontrar el elemento por el cual el error fue reportado, con la ventana interactiva del DIGSILENT, esto es fácil solo haga doble clic, en la línea con el nombre del elemento, esto abrirá la ventana de dialogo del elemento. Corregir el error y tratar nuevamente con el flujo de potencia.

El gráfico unifilar muestra los resultados del flujo de potencia, en las cajas de resultado, como es representado en la figura 3.20.

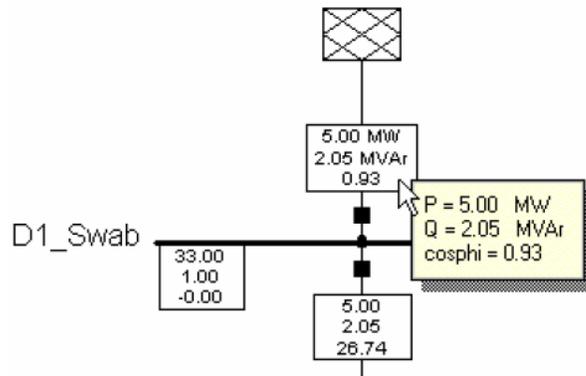


Fig. 3.20 Resultados de los cálculos de Flujo de Potencia.

En esta figura el balón de ayuda con texto el cual aparece si el cursor es mantenido sobre la caja de resultados es mostrado también.

Las cajas de resultados no son fijadas a los parámetros de resultados actualmente visibles, pero libremente pueden ser corregidas, DIGSILENT ofrece herramientas altamente flexibles para las cajas de resultados con lo cual sobre cualquier formato de caja de resultado posible puede ser definido. Una caja de resultados es realmente un pequeño informe de cálculos.

3.2.2.14. Realizar cálculo de Armónicos:

Acceso a la ventana flotante del módulo de Armónicos, con funciones como por ejemplo: Distribución de voltaje y corrientes en donde se realiza el cálculo de THD bajo las normas IEEE o DIN y características de Impedancia – Frecuencia. Como se describe en la figura 3.21.

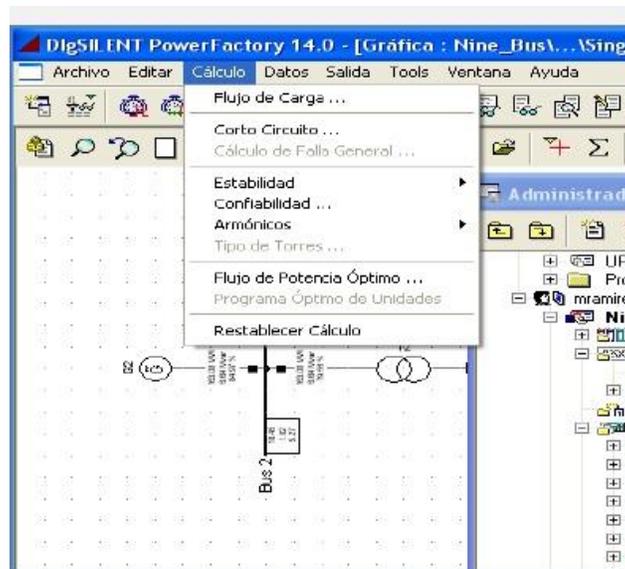


Fig. 3.21 Cálculo de Armónicos

Para realizar el cálculo de Armónicos primero se definen los datos necesarios para el estudio de análisis Armónico. Como se observa en la figura 3.22.

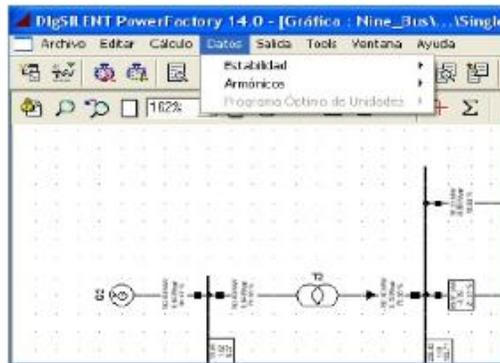


Fig. 3.22 Datos necesarios para el cálculo de armónicos

Instrumentos Virtuales (VI)

Un instrumento virtual es fundamentalmente una herramienta para presentar los resultados calculados. El uso más habitual de un VI es mostrar los resultados de una simulación que varía con el tiempo como por ejemplo una simulación EMT o RMS. Todas las señales, parámetros, variables o magnitudes se podrán mostrar en un instrumento virtual.

Dentro de los Instrumentos Virtuales se diferencia dos elementos principales:

- El *Panel de Instrumentos Virtuales*, es la página donde se va a mostrar los diagramas o gráficos. También se almacena toda la información básica sobre los instrumentos virtuales usados en dicha página. Se podrán insertar nuevas páginas según la necesidad del usuario, eliminar, renombrar o mover. Cada página podrá contener uno o más gráficos. En la figura 4, se muestra un panel activo, generadores y otros sin activar, señalados dentro del recuadro.
- Los *Instrumentos Virtuales*, son propiamente dicho los gráficos que van a mostrar los resultados de los cálculos en los paneles o páginas. Por ejemplo, en la figura 4, se ven cuatro instrumentos virtuales. En la figura 3.23 se pueden apreciar estos instrumentos virtuales.

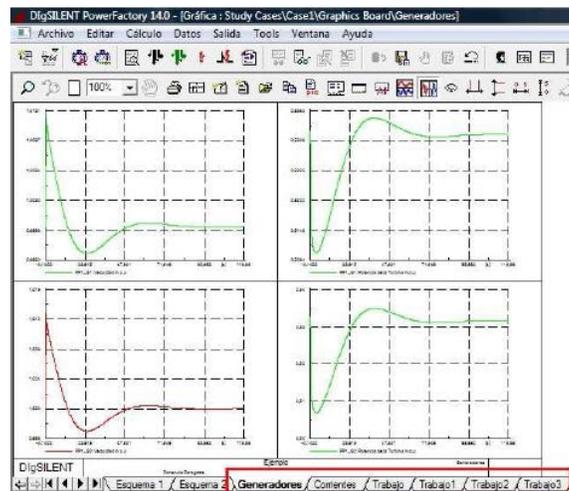


Fig. 3.23 Panel de Instrumentos Virtuales, Generadores, activo.

Para crear un nuevo Panel de Instrumentos Virtuales hay tres formas de hacerlo:

1. Pulsando con el botón derecho del ratón sobre el nombre de otro panel, elegir insertar página, crear nueva página.
2. Pulsando en Archivo, Nuevo, Virtual Instrument Panel.
3. Pulsando en el icono de Insertar Nueva Gráfica, en la segunda fila de iconos del programa. En la figura 3.24 se ilustran estas 3 formas de crear un nuevo Panel.

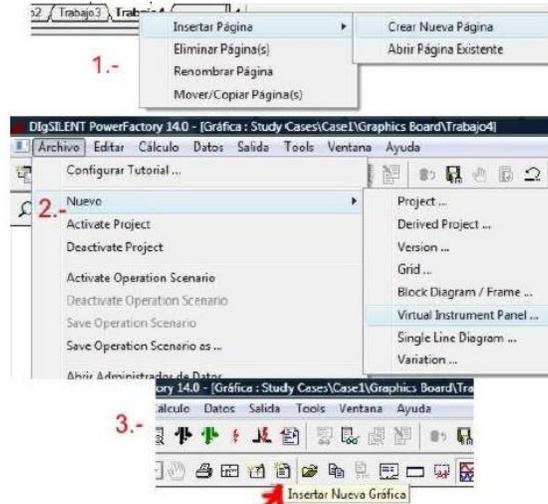


Fig. 3.24 Creación de nuevo Panel de Instrumentos Virtuales

Administrador de Datos

Para ver y usar la base de datos, se necesita abrir un manejador de base de datos.

- Presione el botón de nuevo manejador de base de datos "new database manager" () en la barra de herramientas principal, una ventana de manejador de base de datos, como la mostrada en la figura 3.25 se abrirá.

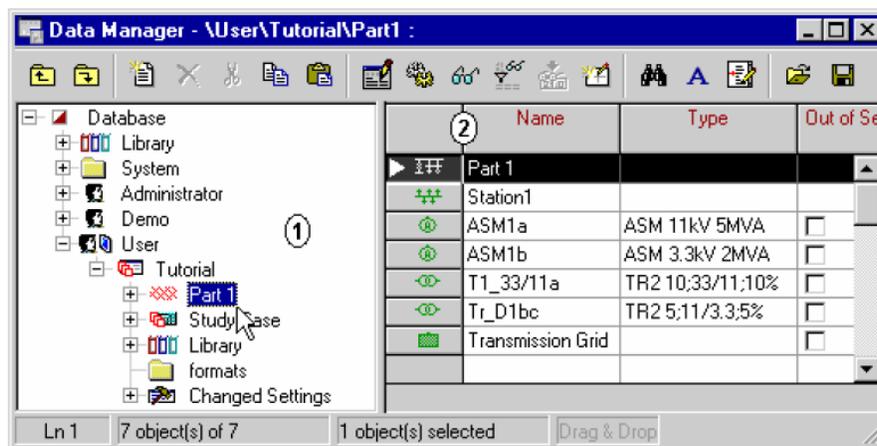


Fig. 3.25 Manejador de Base de Datos

El manejador de base de datos posee dos ventanas.

La ventana de árbol de la base de datos (panel izquierdo en "1") la cual muestra una representación en árbol de la base de datos completa.

La ventana de navegador de la base de datos (panel izquierdo "2") el cual muestra el contenido de la carpeta seleccionada en la base de datos.

Con lo explicado anteriormente desarrollamos un sistema de potencia industrial con diversas cargas a las cuales finalmente se les colocó una carga a la que le definimos su espectro armónico, para después observar con ayuda del panel de instrumentos virtuales la armónica que deseemos.

1.- Le colocamos una carga a la que le definiremos el "espectro armónico".

2.- Vamos a datos básicos donde definiremos su nombre.

3.- Vamos a tipo, donde seleccionamos tipo del proyecto. Tipo de carga general (Typlod), tipo de carga general.

4.- Vamos a flujo de carga, seleccionamos en modo de entrada: phi, cos (phi), en potencia activa le ponemos 10 MW, factor de potencia 0.8 y le damos OK.

5.- Luego vamos a la ventana de armónicos, tipo y escogemos en insertar filas Espectro Armónico, cuantas n armónicas veremos.

6.- Regresamos al Diagrama unifilar, damos click derecho en la barra. Y definimos el conjunto de variables armónicas, después en flujo de carga seleccionamos las variables en corrientes tensiones y potencias.

7.- Nos vamos a Flujos, en Calcular Flujo de Carga Armónico

ORDEN DEL ARMÓNICO 60X13 = 780. Y ahí observamos en donde aparece la variable de resultados.

Para ver la gráfica se hace lo siguiente:

8.- Le damos clic en Insertar Nueva Gráfica, luego seleccionamos *Panel de instrumentos Virtuales (VI). Ejecutar.

Desplegará una página en Blanco. Le damos click derecho, luego en Crear VI y finalmente Waver form Plot.

9.- Desplegará una hoja con cuadrícula punteada, le damos doble clic con el botón izquierdo, y aparecerá una barra con una parte sombreada, en esa parte sombreada se

le da click, y se va a studi cases. Y se le da el nombre del elemento, de la magnitud y del ángulo. Lo que nos resulta lo podemos ver en la figura 3.26.

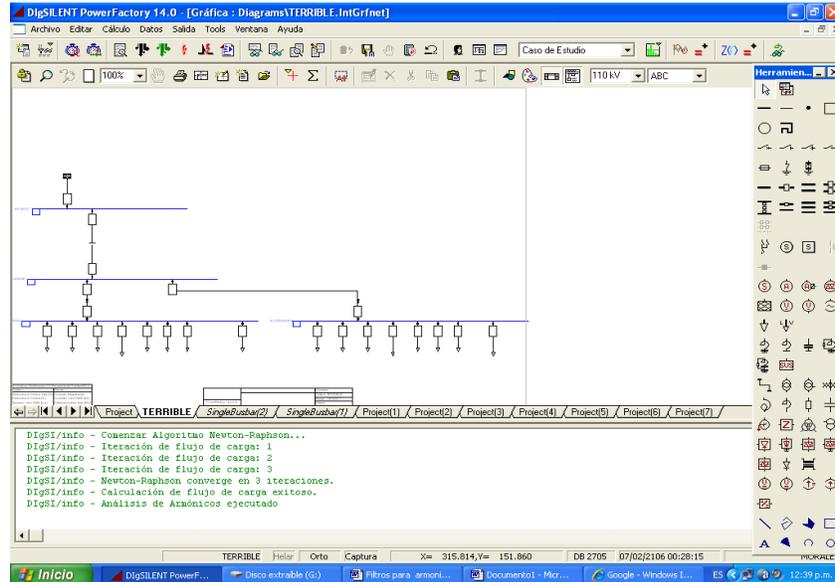


Fig. 3.26 Modelo de un Sistema de Potencia

Y podemos apreciar una armónica como se puede apreciar en la figura 3.27.

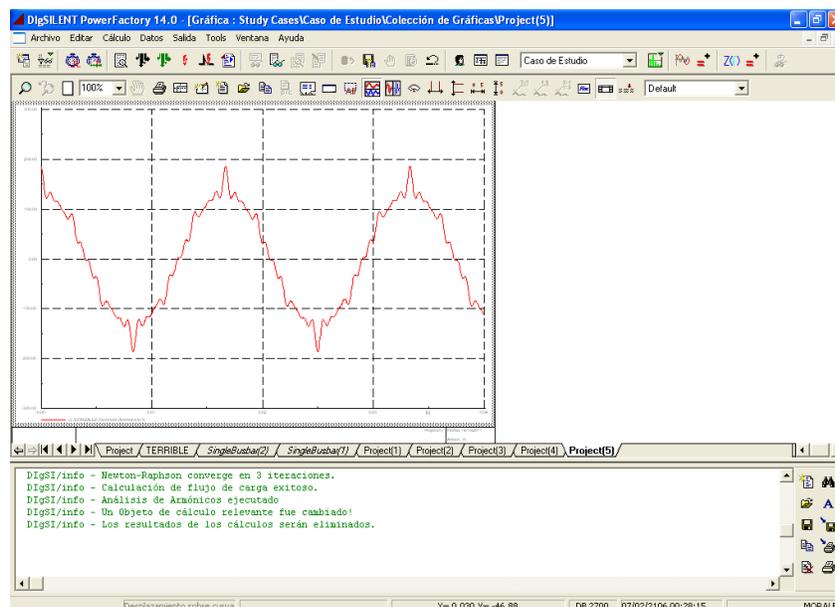


Fig. 3.27 Espectro Armónico de la 5ta Armónica

A continuación con la ayuda del DigSILENT PowerFactory mediremos los valores de THD y de HD. Esto se hace colocando el cursor en la barra donde se desea medir dichos valores, después con el clic izquierdo en las cajitas que aparecen en el diagrama,

localizar donde diga THD y HD. Se escogen estas dos variables y a continuación se procede a realizar el análisis de flujos y aparecerán los valores resultantes como se muestra en la figura 3.28.

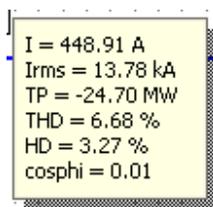
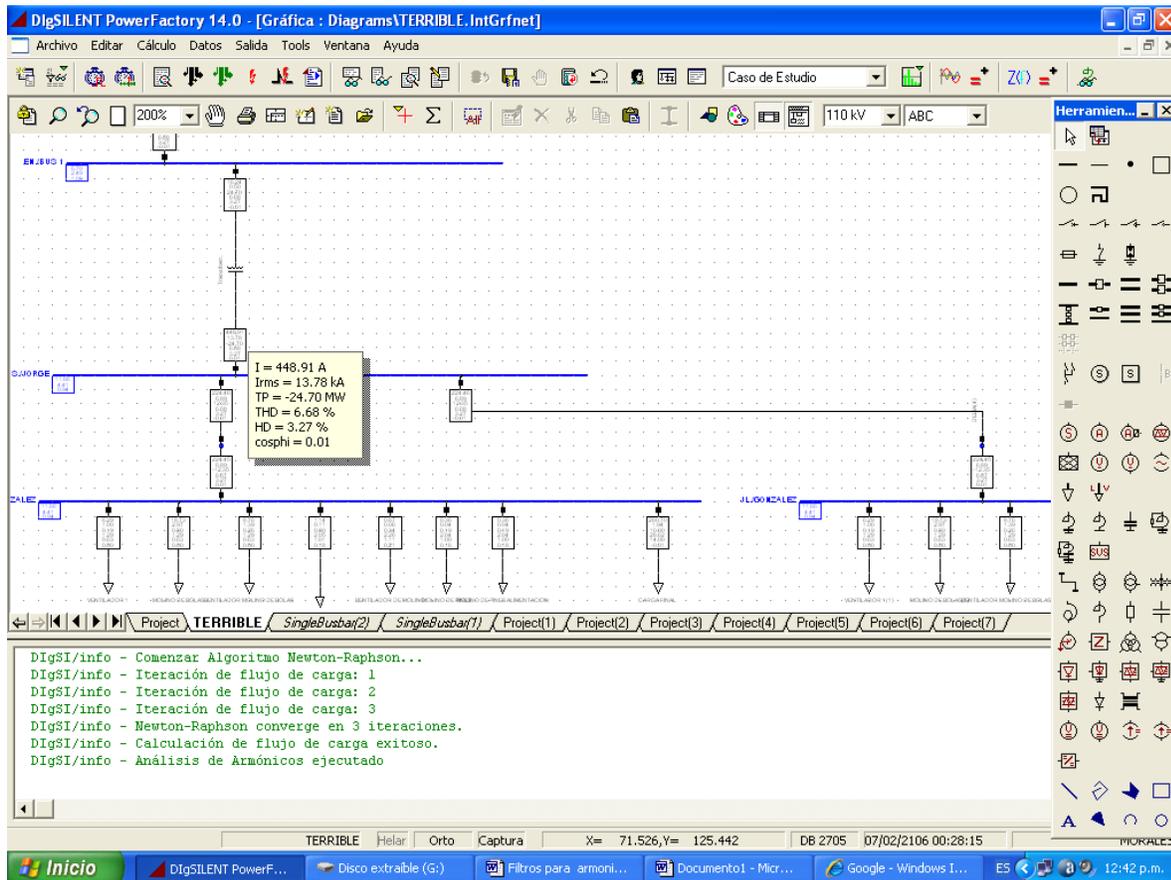


Fig. 3.28 Obtención de THD Y HD

CAPITULO IV

SOLUCIÓN A PROBLEMAS DE ARMÓNICOS

El filtrado es una técnica de mitigación de armónicas usado en los sistemas industriales, comerciales y de empresas suministradoras. *El objetivo es desviar el flujo de corriente armónico del sistema de potencia o porciones específicas de un sistema de potencia, en otras palabras, controlar el flujo de corrientes armónicas.* A menudo, las corrientes armónicas fluyen libremente sin restricción en las redes eléctricas, provocando problemas tales como fusión de fusibles que protegen a capacitores, interferencia telefónica, mala operación de equipo sensible, etc. *La aplicación de filtros en sistemas de transmisión de corriente directa (HVDC), limita que las corrientes armónicas generadas por los convertidores fluyan por el sistema de potencia.* En situaciones donde corrientes armónicas viajan grandes distancias por las redes de alto voltaje (EHV), pueden afectar líneas telefónicas cercanas. El grado al que una línea telefónica en particular es afectada depende de muchas variables tales como: tipo de alambre, distancia al circuito de EHV, la configuración de conductores, la resistividad del terreno y ángulo entre las líneas. Analizar una matriz de información de tales magnitudes es muy difícil, caro y generalmente infructuoso, a menudo también por no contar con datos fidedignos.

Esta sección puntualiza la aplicación y diseño de filtros para mitigar los efectos dañinos de las corrientes y voltajes armónicos.

Los dos tipos principales de filtros armónicos normalmente empleados son: el derivación y el serie. El filtro en derivación tiene una baja impedancia a su frecuencia de sintonía, además puede sintonizarse a una o más frecuencias discretas o sobre un ancho de banda de frecuencias. El filtro serie es de bloqueo y tiene una alta impedancia a su frecuencia de sintonía. La figura 4.1 muestra la composición de estos dos tipos.

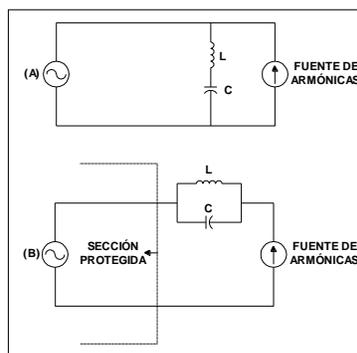


Fig. 4.1 TIPOS DE FILTROS MÁS COMUNES: (A) FILTRO EN DERIVACIÓN; (B) FILTRO DE BLOQUEO Ó SERIE.

4.1. Dimensionamiento y especificación del filtro de corriente armónica de 5º orden.

4.1.1. Dimensionamiento del filtro de 5ª armónica de 1.5 [MVAR] en 4.16 [kV], 45 MVAcc, 6.245 KAcc.

Con base al requerimiento de un filtro de 5ª armónica de 1.5 [MVAR] en el bus 9, a una tensión de 4.16 KV, determinado por los estudios de flujos de potencia y análisis armónico del sistema eléctrico, se dimensionan y especifican los componentes de dicho filtro como se indica a continuación.

4.1.1.1. Componentes del filtro

Filtro formado por banco de capacitores trifásico conectado en estrella flotante, formada cada fase por un grupo serie con 5 unidades capacitoras (UC) en paralelo de 146.6 KVAR en 2970 V en serie con un reactor de filtro de 1.29 mH.

El banco de capacitores al incluirle un reactor en serie se le aplica un voltaje mayor al del sistema de potencia, así que debe sobredimensionarse en voltaje y potencia ya que en éste caso, la tensión aumenta hasta en un 5 % con respecto al bus al que está conectado.

Las Unidades Capacitoras (U.C.) que forman el Banco de Capacitores de 1.5 [MVAR], en 4.16 [kV] de la Industria. En la figura 4.2 podemos ver un ejemplo de un filtro de quinta armónica.

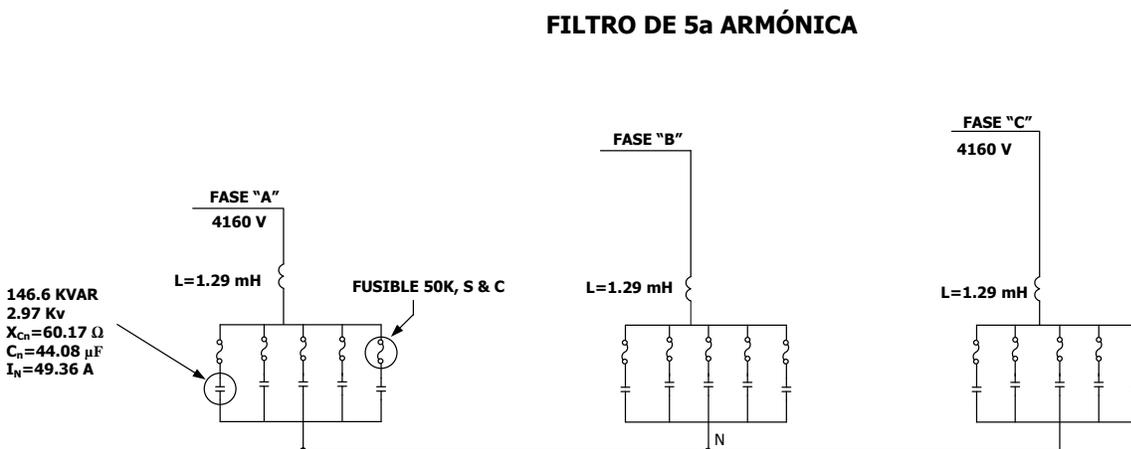


Fig. 4.2 Filtro

Por medio de una serie de iteraciones podemos, deducir la tensión nominal de las unidades capacitoras por lo que consideramos un valor mayor a la tensión del bus donde se encuentra conectado.

El filtro está conectado en estrella flotante y la tensión de la frecuencia fundamental del banco de capacitores se calcula de la siguiente manera:

La tensión de frecuencia fundamental del banco de capacitores (ecuación 4.1) considerando el reactor de filtro.

$$U_{c(1)} = (U_2 / \sqrt{3}) \cdot n^2 / (n^2 - 1) \dots\dots\dots 4.1$$

Donde 'n' es la frecuencia de sintonía del filtro en PU, es decir., $n = f_0 / f_{(1)} = 4.9 f_0$, siendo la frecuencia de sintonía (294 Hz) y $f_{(1)}$ la frecuencia fundamental (60 Hz).

La máxima tensión de frecuencia fundamental de los capacitores incluyendo el voltaje máximo de operación del sistema y el reactor del filtro es el siguiente:

$$U_{c(1),max} = 1.06 \left(\frac{4.16}{\sqrt{3}} \right) \left(\frac{4.9^2}{4.9^2 - 1} \right) = 2.656 \text{ kV}$$

La tensión por corrientes armónicas generadas por los controladores de velocidad de los motores es $I_5 = 100 \text{ A}$ e $I_7 = 50 \text{ A}$ se obtendrá como se observa en la ecuación 4.2

$$\sum_{n=2}^{33} U_{c(n)} = 314 \text{ V} \dots\dots\dots 4.2$$

La tensión nominal del capacitor será calculada por la ecuación 4.3.

$$\sum_{n=2}^{33} U_{c(1),max} + \sum_{n=2}^{33} U_{c(n)} = 2970 \text{ V} \dots\dots\dots 4.3$$

Esto da como resultado la siguiente potencia reactiva nominal para el banco de capacitores trifásico (se considera una tolerancia de fabricación de unidades capacitoras de +3%) como se puede ver en la ecuación 4.4.

$$Q = 3 \cdot U_{C, rated}^2 \cdot \omega_{(1)} \cdot C = 2.265 \text{ MVAR}; \dots\dots\dots 4.4 \quad \text{donde: } C = 226.9 \text{ microfarad}$$

Cálculo (teórico) de los parámetros de los componentes del filtro de 5ª armónica, sintonizado a 4.9 PU. Como se muestra en las ecuaciones

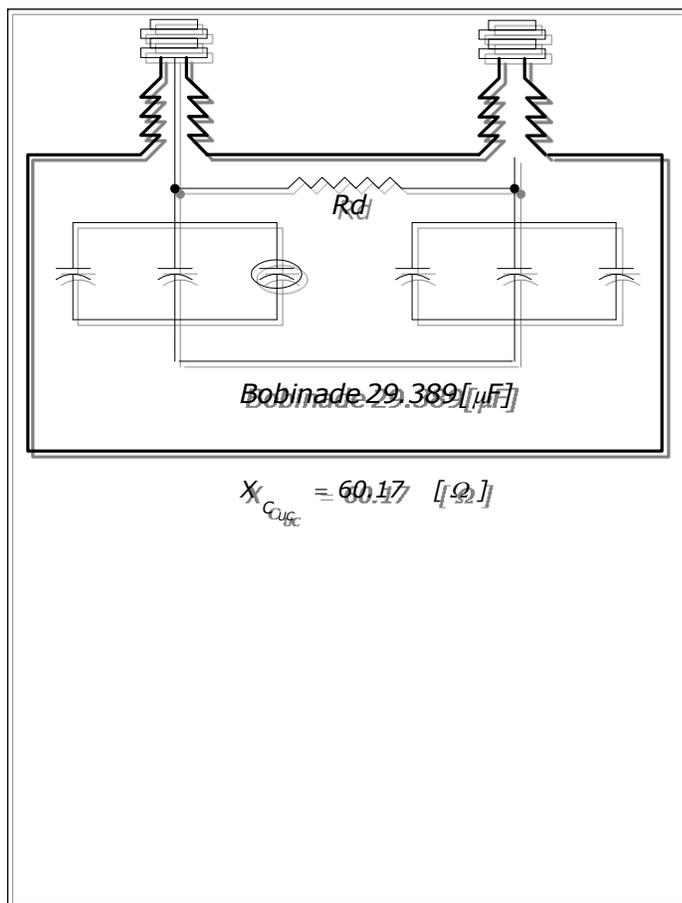
$$X_{eff} = \frac{4.16^2}{1.5} = 11.537 \Omega \quad ; \quad X_C = \frac{4.9^2}{4.9^2 - 1} 11.537 = 12.0384 \Omega$$

$$C = (220.338 \mu\text{F}) (1.03) = 226.9 \mu\text{F}$$

Esta capacitancia se considera debido a que el fabricante considera una tolerancia de 3 %

4.1.1.2. Especificación de la unidad capacitadora utilizando el concepto de gradiente de potencial

La figura 4.3 presenta una Unidad Capacitora de 95.729 [kVAR] y 2.4 [kV] nominales formada por 2 grupos serie con 3 bobinas en paralelo por grupo serie, con 2 películas de polipropileno, de 10 [μm] de espesor, entre bobinas como dieléctrico.



Tensión por bobina

$$V_B = \frac{2401}{2} = 1200[V]$$

Gradiente de potencial a tensión nominal de la Unidad Capacitora

$$G = \frac{1200}{2(10)} = 60[V/\mu\text{m}]$$

Capacitancia Unidad Capacitora (UC). Donde CN se obtiene con la ecuación 4.5

$$C_N = \frac{0.095729}{(2.4)^2 (377)} = 44.08[\mu\text{F}]$$

$$CN = \frac{C_B B_P}{B_S} \dots\dots 4.5$$

Capacitancia por bobina

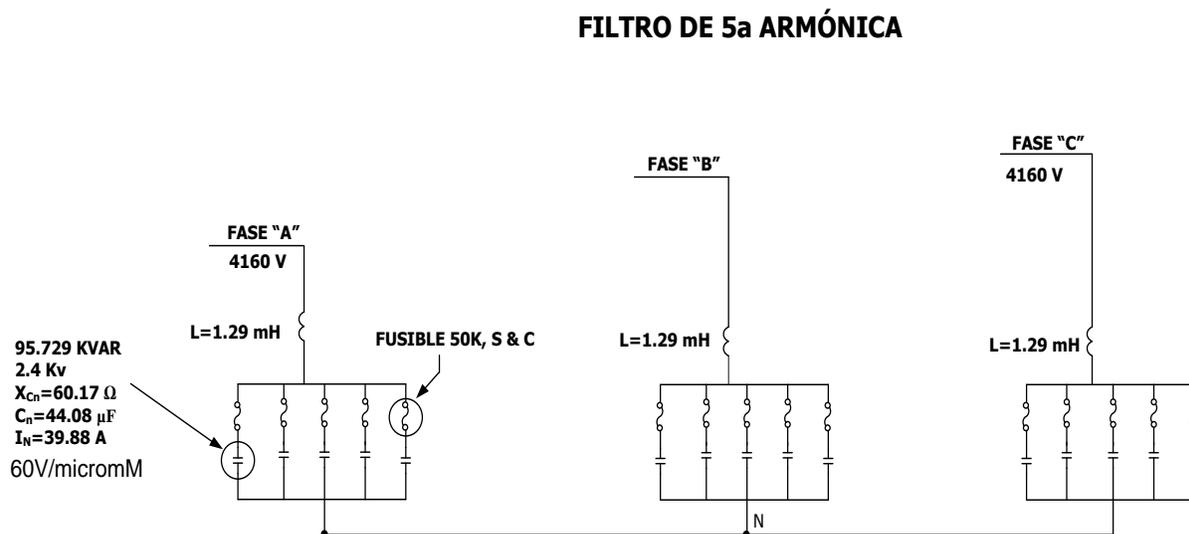
$$C_B = 44.08 \left(\frac{2}{3} \right) = 29.389[\mu\text{F}]$$

Fig. 4.3 Unidad Capacitora

La Unidad Capacitora de 95.729 [kVAR], 2.4 [kV] con gradiente de potencial a tensión nominal de la unidad capacitadora de 60 [V/μm] es equivalente a una de 146.6 [kVAR] y 2.97 [kV] nominales según la Norma IEC 60871-1,2.

El gradiente de operación máximo de la unidad capacitadora (UC) es de 75 V/μm, si a la UC de 95.729 KVAR-2.4 KV se le aplica una tensión de 1.2375 PU (voltaje de frecuencia fundamental mas armónicos) es decir de $1.2375 (2.4) = 2.97$ KV se le aplicaría un gradiente de potencial de $1.2375 (60) = 74.25$ V/μm que es menor a 75 V/μm (de aguante) y suministraría una potencia reactiva de $1.2375^2 (95.729) = 146.6$ KVAR, por tanto, se demuestra la equivalencia entre especificar unidades capacitadoras sobredimensionadas en potencia y voltaje o UC para la potencia y voltaje nominales con su gradiente de potencial de operación a voltaje nominal y su gradiente de operación máximo de aguante.

En la figura 4.4 se muestra un filtro para el dimensionamiento del filtro de 5ª armónica de 1.5 MVAR-4.16 KV formado con unidades capacitadoras con gradiente de potencial de operación de 60 V/ μm.



4.1.1.3. Reactor del filtro para la 5ª armónica

El reactor de filtro se determina a partir de la potencia reactiva requerida:

El banco de capacitores trifásico debe ser de 2265 KVAR para 2970 V, al ser sobredimensionados para poder considerando un voltaje máximo en el bus de 1.06 pu. Mientras que la capacidad del filtro se sobredimensiona con el voltaje máximo posible

en dicho bus debido a las armónicas, mientras que tomamos en cuenta la tolerancia del fabricante que aumenta en un 3 % la capacitancia del banco por lo que de esta manera se dimensiona considerando que cada fase se encuentra formado por un grupo serie de 5 unidades capacitoras de:

$$\frac{2265}{(1.03)15} = 146.6 \text{ KVAR}$$

Parámetros eléctricos de unidades capacitoras de 146.6 KVAR-2.97 KV,
 $X_{cn} = \frac{2.97^2}{0.1466} = 60.17 \Omega$; $C_n = 44.08 \mu\text{F}$; $I_n = 49.36 \text{ A}$, $X_{c_{real}} = \frac{60.17}{1.03} = 58.4 \Omega$, $C_{real} = 45.4 \mu\text{F}$; $Q_{real} = 151 \text{ KVAR}$.

Parámetros eléctricos del banco de capacitores por fase: 755 KVAR-2.97 KV, $X_{c\phi_{real}} = \frac{58.4}{5} = 11.68 \Omega$, $C_{\phi_{real}} = 227 \mu\text{F}$ (se considera una tolerancia de fabricación de +3%).

Inductancia del reactor del filtro de 5ª armónica para una sintonía a 4.9 PU:

$$L = \frac{1}{377^2(4.9^2)(227E-6)} = 1.290 \text{ mH} \leftrightarrow 0.486 \Omega.$$

Corriente fundamental del filtro al voltaje nominal y máximo de operación:

$$I_{F1} = \frac{\frac{4160}{\sqrt{3}}}{(11.68-0.486)} = 214 \text{ A} \qquad I_{F1\text{máx}} = \frac{\frac{(1.06)4160}{\sqrt{3}}}{(11.68-0.486)} = 227 \text{ A}$$

Corriente RMS del filtro considerando la fundamental máxima y armónicas $I_5 = 100 \text{ A}$, $I_7 = 50 \text{ A}$:

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{227^2 + 100^2 + 50^2} = 253 \text{ A}$$

Voltaje máximo aplicado al banco de capacitores:

$V_c = (11.68) (253) = 2955 \text{ V}$ que es menor a 2970 V siendo correcta la selección de unidades capacitoras.

Potencia reactiva trifásica suministrada por el filtro de 5ª armónica al voltaje nominal:

$$Q_{3\phi} = 3 (11.68-0.486) 214^2 = 1\,537\,921 \text{ VAR} = 1.53 \text{ MVAR}$$

En la tabla 4.1 mostraremos las especificaciones de reactores de filtro.

Tabla 4.1 Especificaciones de reactores de filtro

Especificación Técnica	
No. de Reactores por Fase:	1
Reactancia Inductiva:	0.486 Ω
Inductancia Nominal:	1.29 mH
Corriente Nominal 60 HZ:	227 A
Corriente RMS: $\sqrt{I_{60\text{HZ}}^2 + \sum I_{\text{ARM}}^2}$	253 A
Corriente Térmica:	3.88 KA, 1 Seg.
Pico Mecánico:	9.9 KA
Altitud:	1800 msnm
Norma:	IEC 289-1988
Uso exterior:	
Enfriamiento:	Aire Natural
Elevación de Temperatura:	80°C
Clase de Aislamiento:	B
Tensión de Impulso:	70 kV
Voltaje de Sistema:	4.16 kV
Voltaje de Diseño:	5 kV
Potencia Reactiva Nominal:	31.1 KVAR
Caída de Voltaje:	123 Volts

Nota: Se requieren 3 reactores monofásicos por banco de capacitores.

4.1.1.4. Calidad del filtro:

El rango de la calidad de filtros industriales oscila entre $20 \leq Q \leq 50$

Para éste caso, $Q=30$. La calidad del filtro está definida con la ecuación 4.6.

$$Q = \frac{X}{R} \dots\dots\dots 4.6$$

De donde R se obtiene con la ecuación 4.7.

$$R = \frac{X_{L4.9}}{Q} \dots\dots\dots 4.7$$

$$X_{L4.9} = 4.9 X_{L1} = 4.9 (0.486) = 2.3814 \Omega.$$

$$R = \frac{2.3814}{30} = 0.08 \Omega.$$

4.1.1.5. Protecciones del filtro:

Protección contra sobretensiones (59):

Voltaje de operación del banco de capacitores.

$$V_s = 1.1(4160) = 4.576[kV]$$

$$V_c = \frac{(4.9)^2}{(4.9)^2 - 1} \left(\frac{4576}{\sqrt{3}} \right)$$

$$V_c = 2.756[kV]$$

$$V_{uc} = 2.756[KV]$$

Las unidades capacitoras son de 146.6 KVAR- 2970 V, así que se ajusta el 59 a:

$$RTP = \frac{5400 V}{\sqrt{3}} : \frac{120V}{\sqrt{3}} = 45: 1 V \quad V_{sec} = \frac{(2970 V)}{45} = 63 V$$

Tiempo de retardo = 2 Seg.

Protección contra baja tensión (27): En la figura 4.5 podemos ver el esquema de protección del filtro para de quita armónica.

$$V_{sec} = \frac{0.8(2401)}{45} = 43 V$$

Tiempo de retardo = 2 Seg.

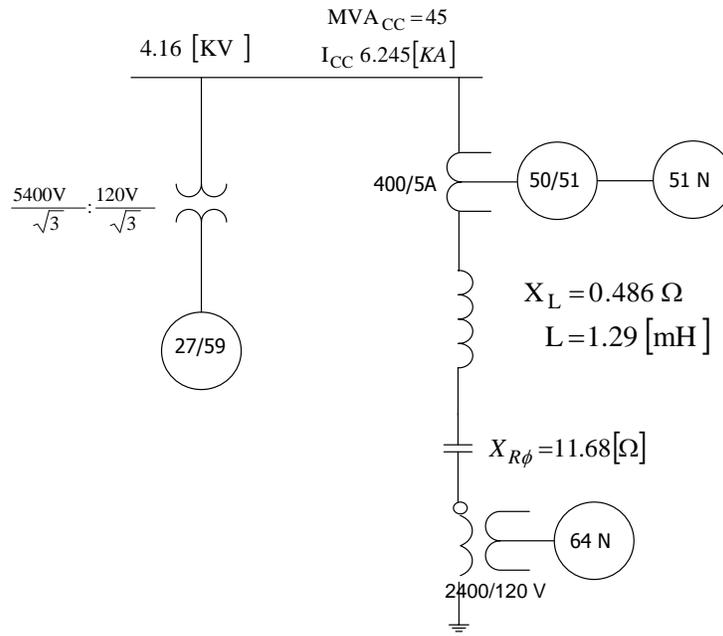


Fig. 4.5 Esquema de protección del filtro de 5ª armónica

Ajuste del relevador de sobrecorriente de tiempo inverso (51):

La corriente RMS Máxima es de 253 A (considerando el voltaje máximo del sistema y corrientes armónicas). RTC = 400/ 5 A

$$I_{pickup} = 1.2 (214) = 256 A$$

$$Tap = \frac{256}{80} = 3.2 A; \quad Dial = 0.1, \text{ Característica de tiempo muy inverso}$$

Ajuste del relevador de sobrecorriente instantánea (50) = (50 N)

Capacidad de corto-circuito en las terminales del capacitor:

Conociendo la reactancia inductiva del reactor podemos conocer la capacidad de corto circuito en el banco de capacitores.

La capacidad de corto circuito en el bus 9 de la industrial Mittal es de 45 MVAcc. y en las terminales del banco de capacitores es:

$$\frac{1}{MVAcc} = \frac{1}{45} + \frac{1}{\frac{4.16^2}{0.486}}$$

$$MV_{Acc} = 19.9$$

$$I_{CC} = \frac{19900}{\sqrt{3}(4.16)} = 2760 \text{ A}$$

$$I_{inrush} = \sqrt{2} \sqrt{2760 (214) (.9)} = 978 \text{ A}$$

$$I_{ajuste \ sec} = \frac{1.3(978)}{80} = 16 \text{ A} ; \text{Sin retardo intencional}$$

Ajuste del relevador 51-N. En donde I_{pickup} debe cumplir con la ecuación 4.8.

$$10\%I_{op} \leq I_{pickup} \leq 20\%I_{op} \dots\dots\dots 4.8$$

En nuestro caso, tomamos el 15% de la corriente de operación del filtro.

$$I_{pickup} = 0.15 (214) = 32 \text{ A}$$

$$TAP = \frac{32}{80} = 0.4 \text{ A} \quad Dial = 0.1, \text{ Característica de tiempo inverso}$$

Ajuste del relevador 64-N

➤ Alarma

Voltaje en unidades restantes de un grupo serie cuando sale de operación una unidad capacitadora se determina con la ecuación 4.9

$$V_{c1} = \frac{3(V_{LG})P}{[3S(P-F)] + 2F} = 2684V \dots\dots\dots 4.9$$

2684 V menor a 2970 V, así que puede seguir operando el filtro hasta que se den las condiciones para sacarlo de operación, verificar la unidad capacitadora y reponer el fusible.

Cuando falla una o más Unidades Capacitadoras de un grupo serie del banco de capacitores, se tiene una tensión en el neutro como lo indica la ecuación 4.10.

$$V_{NG} = \frac{V_{LG}F}{[3S(P-F)] + 2F} \dots\dots\dots 4.10$$

Donde:

- V_{NG1} – Tensión de neutro a tierra
- V_{LG} – Tensión entre fases
- P – Número de Unidades Capacitoras en paralelo
- F – Número de Unidades Capacitoras falladas
- S – Número de grupos serie

Para una Unidad Capacitora fallada se tiene:

$$V_{NG_1} = \frac{\left(\frac{4160}{\sqrt{3}}\right)(1)}{[3(1)(5-1)] + 2(1)}$$

$$V_{NG_1} = \frac{2401.8}{14} [V] = 172 V$$

➤ Disparo

Cuando fallen dos Unidades Capacitoras de un grupo serie del banco de capacitores, las unidades capacitoras restantes (3) tendrán un voltaje aplicado de 2891 V que es mayor a 2970 por tanto, el filtro debe salir de operación después de un cierto tiempo (5 Seg) :

Cuando fallen dos Unidades Capacitoras de un grupo serie del banco de capacitores, se tendrá una tensión en el neutro igual a:

$$V_{NG_2} = \frac{\left(\frac{4160}{\sqrt{3}}\right)(2)}{[3(1)(5-2)] + 2(2)}$$

$$V_{NG_2} = \frac{4803.55}{13} [V] = 370 V$$

➤ Desbalance severo

Tensión en el neutro cuando se está corto circuitando una Unidad Capacitora del banco de capacitores.

$$V_n = 2400 \text{ V}$$

Para los siguientes valores de relación de transformación:

$$RTP = 2400/120[V]$$

$$RTP = 20/1[V]$$

Y ajustando al 80% de tensión en el neutro se tiene:

- Voltaje primario:

$$V_{\text{alarma}} = 0.8(172) = 138[V]$$

$$V_{\text{disparo}} = 0.8(370) = 236[V]$$

$$V_{\text{severo}} = 0.5(2400) = 1200[V] \text{ (50\% del voltaje de neutro)}$$

$$V_{\text{severo}} = 0.5 (2400 \text{ V}) = 1200 \text{ V}$$

- Voltaje secundario:

$$V_{\text{alarma}} = \frac{138}{20} = 6.9[V]$$

$$V_{\text{disparo}} = \frac{236}{20} = 11.8[V]$$

$$V_{\text{severo}} = \frac{1200}{20} = 60[V]$$

En la tabla 4.2 se observarán los ajustes de un relevador 64-n

Tabla 4.2 Ajustes de un relevador

AJUSTES DEL RELEVADOR 64-N	V_{PRIMARIO} [V]	V_{SECUNDARIO} [V]	TIMER [S]
Alarma	138	6.9	5
Disparo	236	11.8	5
Desbalance severo	1200	60	0.2

4.1.1.6. Análisis armónico para la corriente de 5º orden

Con filtro de 5ª armónica: En la figura 4.6 podemos ver el análisis para la corriente de quinto orden.

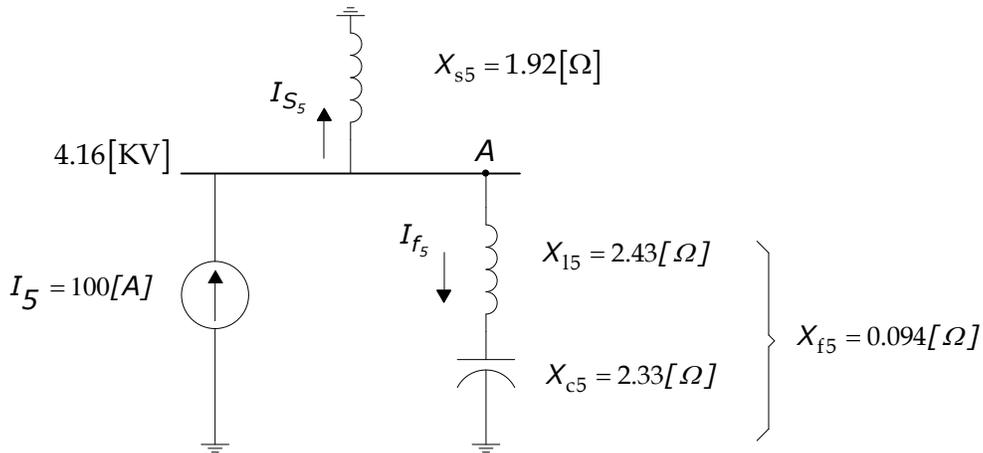


Fig. 4.6 Diagrama de Análisis

Reactancia del sistema a la frecuencia fundamental como lo indica la ecuación 4.11

$$X_{s_1} = \frac{kV^2}{MVA_{CC}} = \frac{4.16^2}{45} \dots\dots\dots 4.11$$

$$X_{S_1} = 0.38[\Omega]$$

Reactancia del sistema debida a la 5ª armónica como se observa en la ecuación 4.12.

$$X_{S_5} = 5X_{S_1} = 5(0.38) \dots\dots\dots 4.12$$

$$X_{S_5} = 1.92(\Omega)$$

Reactancia del reactor debida a la 5ª armónica como lo indica la ecuación 4.13

$$X_{L_5} = 5X_{L_1} = 5(0.486) \dots\dots\dots 4.13$$

$$X_{L_5} = 2.43[\Omega]$$

Reactancia del banco de capacitores debida a la 5ª armónica como lo demuestra la ecuación 4.14

$$X_{C_5} = \frac{X_{C_1}}{5} = \frac{11.68}{5} \dots\dots\dots 4.14$$

$$X_{C_5} = 2.33[\Omega]$$

Reactancia del filtro debida a la 5ª armónica como se observa en la ecuación 4.15

$$X_{f_5} = X_{L_5} - X_{C_5} = 2.43 - 2.336 \dots\dots\dots 4.15$$

$$X_{f_5} = 0.094[\Omega]$$

Corriente en el filtro como lo describe la ecuación 4.16

$$I_{f_5} = \frac{X_{S_5} I_5}{X_{S_5} + X_{f_5}} = \frac{(1.92)(100)}{1.92 + 0.094} \dots\dots\dots 4.16$$

$$I_{f_5} = 95.33[A]$$

Corriente de 5ª hacia el sistema como se puede apreciar en la ecuación 4.17

$$I_{S_5} = I_5 - I_{f_5} = 100 - 95.33 \dots\dots\dots 4.17$$

$$I_{S_5} = 4.67[A]$$

Tensión de 5ª armónica en el punto A como a continuación se muestra en la ecuación 4.18

$$V_5 = I_{S_5} X_{S_5} = (4.67)(1.92) \dots\dots\dots 4.18$$

$$V_5 = 8.966[V]$$

Distorsión individual de tensión de 5ª armónica como se ve en la ecuación 4.19

$$D_{HV_5} = \frac{V_5}{V_N} \times 100 = \frac{8.966}{\frac{4160}{\sqrt{3}}} \times 100 \dots\dots\dots 4.19$$

$$D_{HV_5} = 0.373\%$$

Con banco de capacitores de 1.5 MVAR de 4.16 KV en lugar de filtro de 5ª armónica. En la figura 4.7 vemos el análisis del circuito con banco de capacitores de 1.5 MVAR de 4.16 KV en lugar de poner un filtro de quinta armónica.

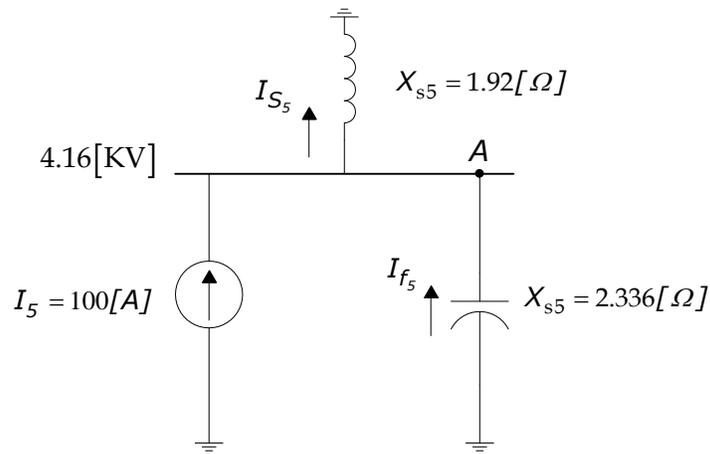


Fig. 4.7 Diagrama con banco de capacitores

Corriente en el capacitor es como lo muestra la ecuación 4.20

$$I_{C_5} = \frac{X_{S_5} I_5}{X_{S_5} + X_{C_5}} = \frac{(1.92)(100)}{1.92 - 2.33} \dots\dots\dots 4.20$$

$$I_{C_5} = -461.53 \text{ [A]}$$

Corriente de 5ª hacia el sistema como lo vemos en la ecuación 4.21.

$$I_{S_5} = I_5 - I_{C_5} = 100 - (-461.53) \dots\dots\dots 4.21$$

$$I_{S_5} = 561.53 \text{ [A]}$$

Tensión de 5ª armónica en el punto A, ecuación 4.22.

$$V_5 = I_{S_5} X_{S_5} = (561.53)(1.92) \dots\dots\dots 4.22$$

$$V_5 = 1078.15 \text{ [V]}$$

Distorsión individual de tensión de 5ª armónica, ecuación 4.23.

$$DHV_5 = \frac{V_5}{V_N} \times 100 = \frac{1078.15}{\frac{4160}{\sqrt{3}}} \times 100 \dots\dots\dots 4.23$$

$$DHV_5 = 45\%$$

4.1.1.7. Resonancia serie-paralelo del filtro con el Sistema de Potencia

Frecuencia de resonancia serie, ecuación 4.24

$$f_{rs} = \sqrt{\frac{X_{C_1}}{X_{L_1}}} = \sqrt{\frac{11.68}{0.486}} \dots\dots\dots 4.24$$

$$f_{rs} = 4.9[PU]$$

Frecuencia de resonancia paralelo, ecuación 4.25.

$$f_{rp} = \sqrt{\frac{X_{C_1}}{X_{S_1} + X_{L_1}}} = \sqrt{\frac{11.68}{0.384 + 0.486}} \dots\dots\dots 4.25$$

$$f_{rp} = 3.7[PU]$$

En la figura 4.8 se observa la frecuencia de resonancia en paralelo la cual se calculó anteriormente.

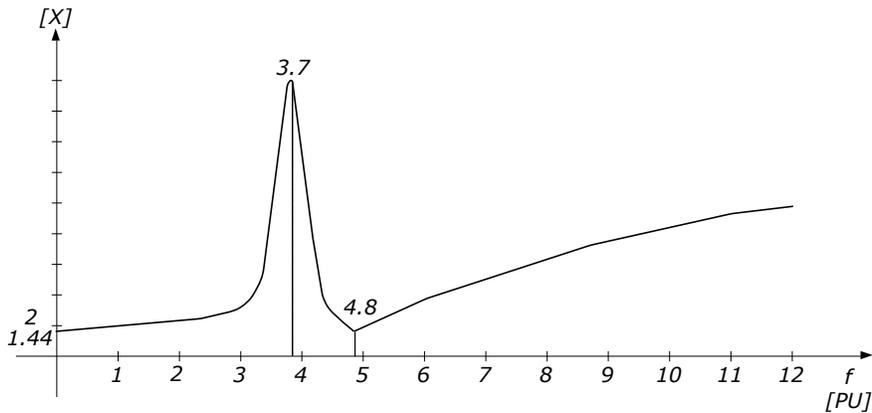


Fig. 4.8 Gráfica de magnitud de reactancia contra frecuencia

4.1.1.8. Aplicación de la especificación CFE L0000-45-2005

Con base en la norma "Desviaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente en el suministro y consumo de energía eléctrica" de CFE, tenemos que:

- ✓ Para un nivel de tensión de 4.16 [kV], se tiene que el límite de distorsión armónica individual de tensión, HDv=6.5%. (Ver anexo A)

El filtro de 5ª armónica diseñado tiene un HDv=0.91%, lo cual nos ubica dentro de los rangos permisibles de distorsión armónica.

A diferencia del filtro, el banco de capacitores, utilizado únicamente para compensación reactiva, presenta un HDv=30 %. Dicho valor está totalmente fuera de rango, lo cual nos indica que a pesar de la compensación de potencia que pueda tenerse, habrá altas corrientes armónicas de 5º orden fluyendo en el banco de capacitores y sistema de potencia.

4.1.1.9. Diagrama unifilar de la Industria. En la figura 4.9 se muestra un diagrama unifilar como el que se puede ver normalmente en la industria con diversas cargas las cuales pueden generar armónicos.

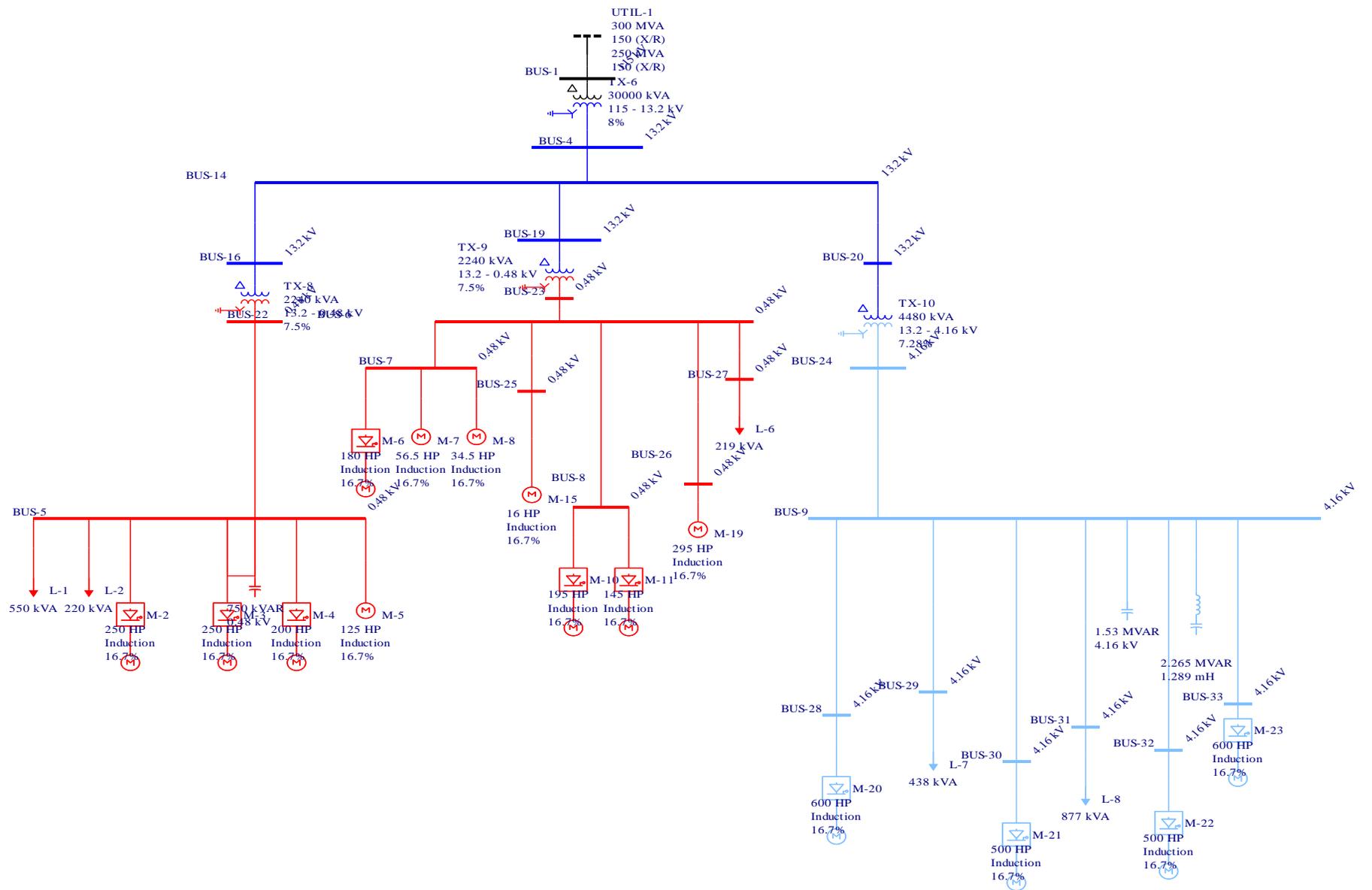


Fig. 4.9 Diagrama Unifilar de un Sistema De Potencia

En la figura 4.10 podemos ver a detalle el bus 9.

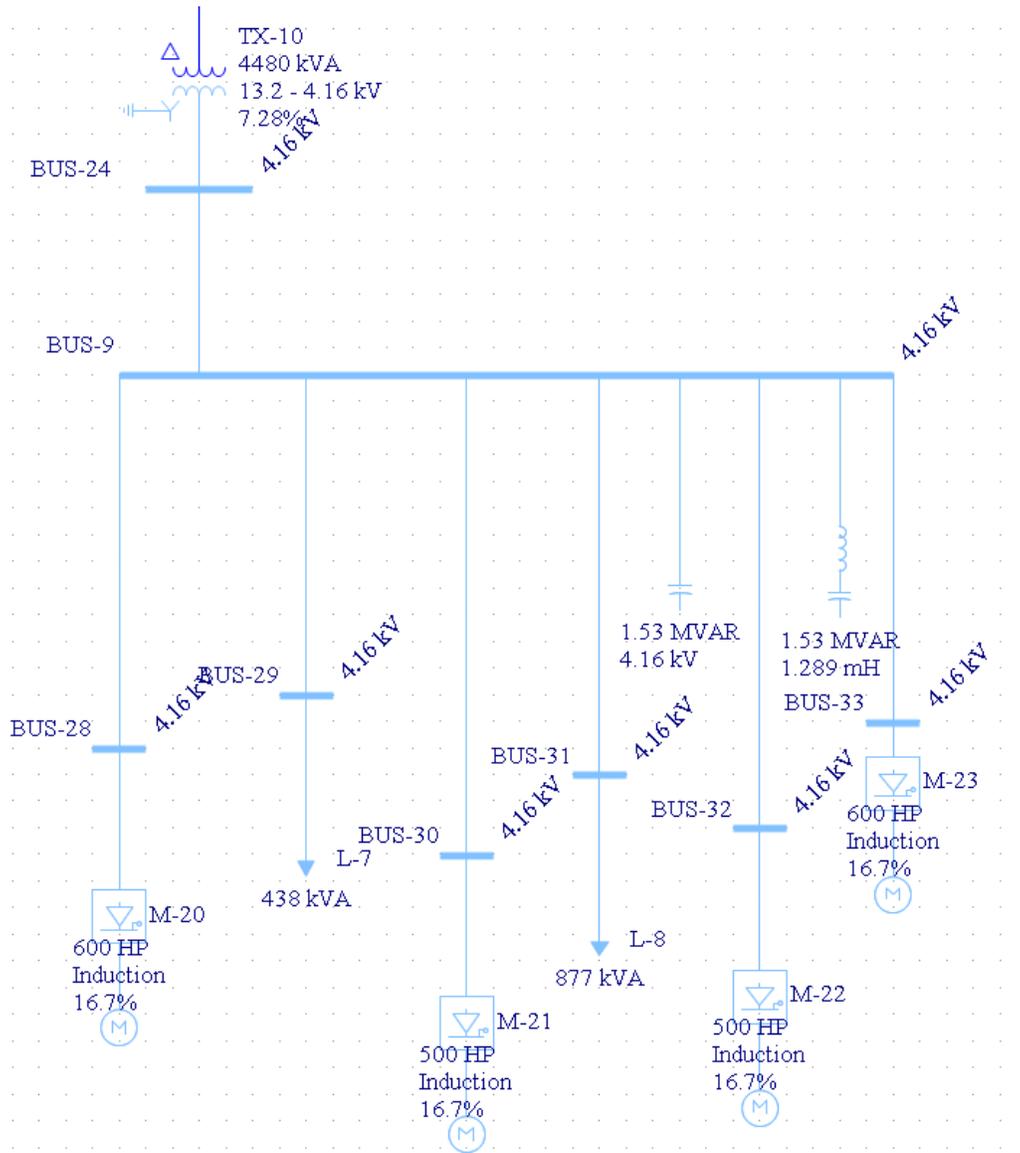


Fig. 4.10 Diagrama Unifilar Bus 9 A

Este estudio de comportamiento armónico se centra en el bus 9, figura 4.10, ya que al igual que los buses que tengan conectados motores con controladores de velocidad se verán afectados de la misma forma por lo que el dimensionamiento de los filtros se realiza con la misma lógica que este bus.

Flujos de Potencia en el Bus 9 con los siguientes casos:

- sin compensación de potencia reactiva,
- con compensación de potencia reactiva (banco de Capacitores de 1500 KVAR)
- y con compensación de potencia reactiva (Filtro de quinta armónica).

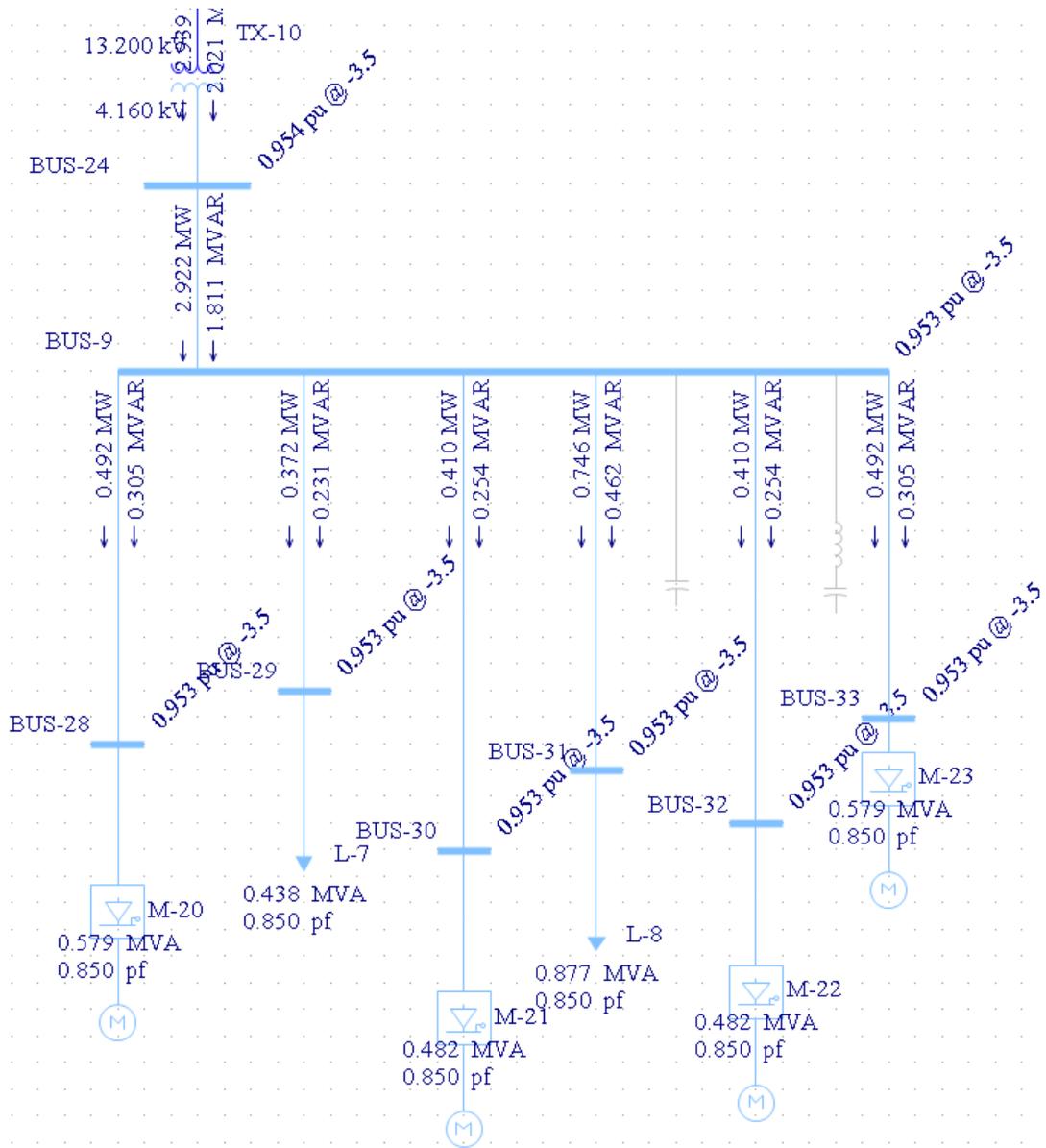


Fig. 4.11 Diagrama Unifilar Bus 9 B

En la figura 4.11 podemos ver más a detalle el comportamiento del bus 9. Y al realizar el estudio de flujos de potencia del sistema, se observa que hay bajos voltajes en los

buses y es necesaria la compensación de potencia reactiva y corregir el F.P. con ayuda de la ecuación 4.26.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(2.922)^2 + (1.811)^2} = 3.43[MVA]$$

$$F.P. = \frac{P}{S} = \frac{2.922}{3.43} = 0.84$$

.....4.26

Sin embargo podemos observar que la caída de tensión en el bus esta dentro de los límites permitidos de la norma, sin embargo se tienen mayores pérdidas en el sistema industrial.

En la figura 4.12 muestra la Impedancia vs Frecuencia."vista" en el bus 9, sin considerar la compensación de potencia reactiva.

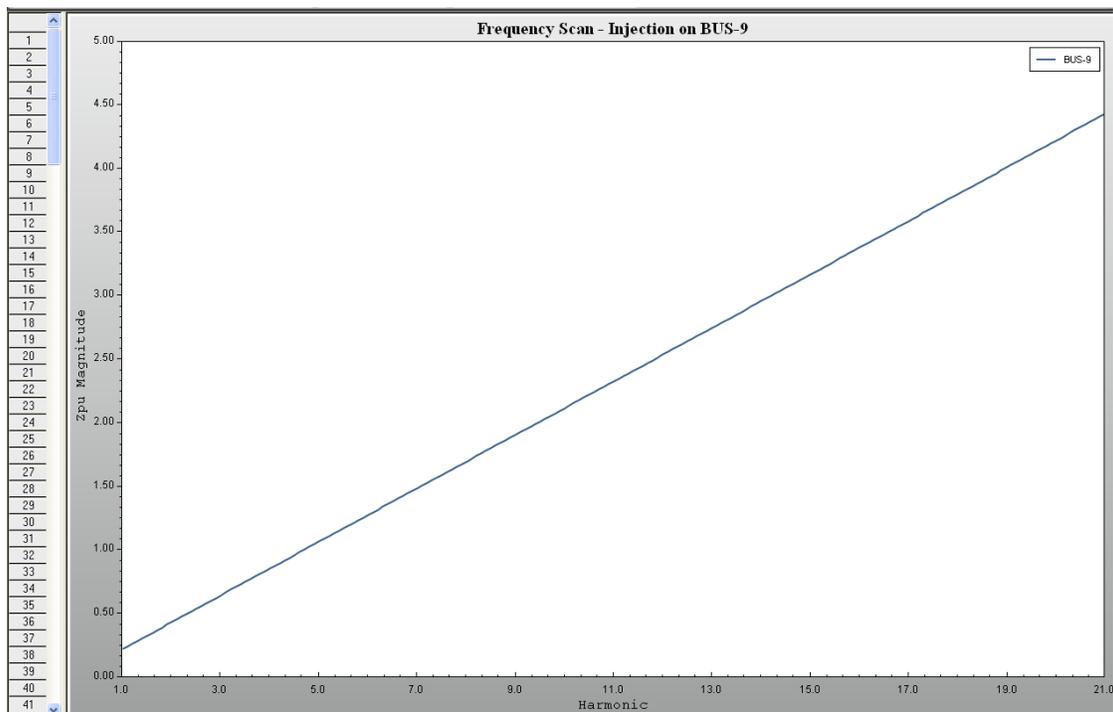


Fig. 4.12 Impedancia vs Frecuencia

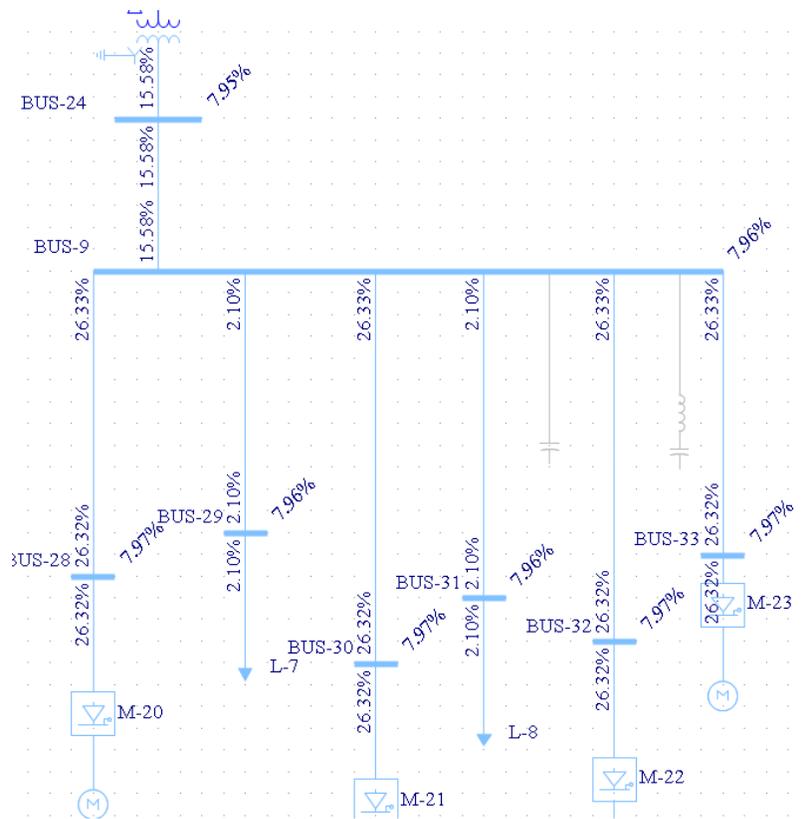


Fig. 4.13 Diagrama Unifilar Bus 9 C

En la figura 4.13 se observa el comportamiento de Impedancia vs Frecuencia del bus 9, donde se puede observar que al no estar conectado en paralelo con algún elemento compensador, este se ve afectado solo por la reactancia inductiva del sistema de potencia por lo que al ir aumentando la frecuencia su impedancia crece de manera proporcional.

Sin embargo las cargas no lineales instaladas en dicho bus provocan un aumento en la distorsión armónica del voltaje siendo el THD un 7.96 % , esto representa un problema a las demás cargas instaladas ya que son alimentadas con voltajes armónicos indeseables. El THD se obtiene con la siguiente ecuación 4.27.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \dots\dots\dots 4.27$$

En la figura 4.14 se aprecian los flujos de Potencia con compensación de Potencia Reactiva por medio de un Banco de Capacitores de 1500 KVAR.

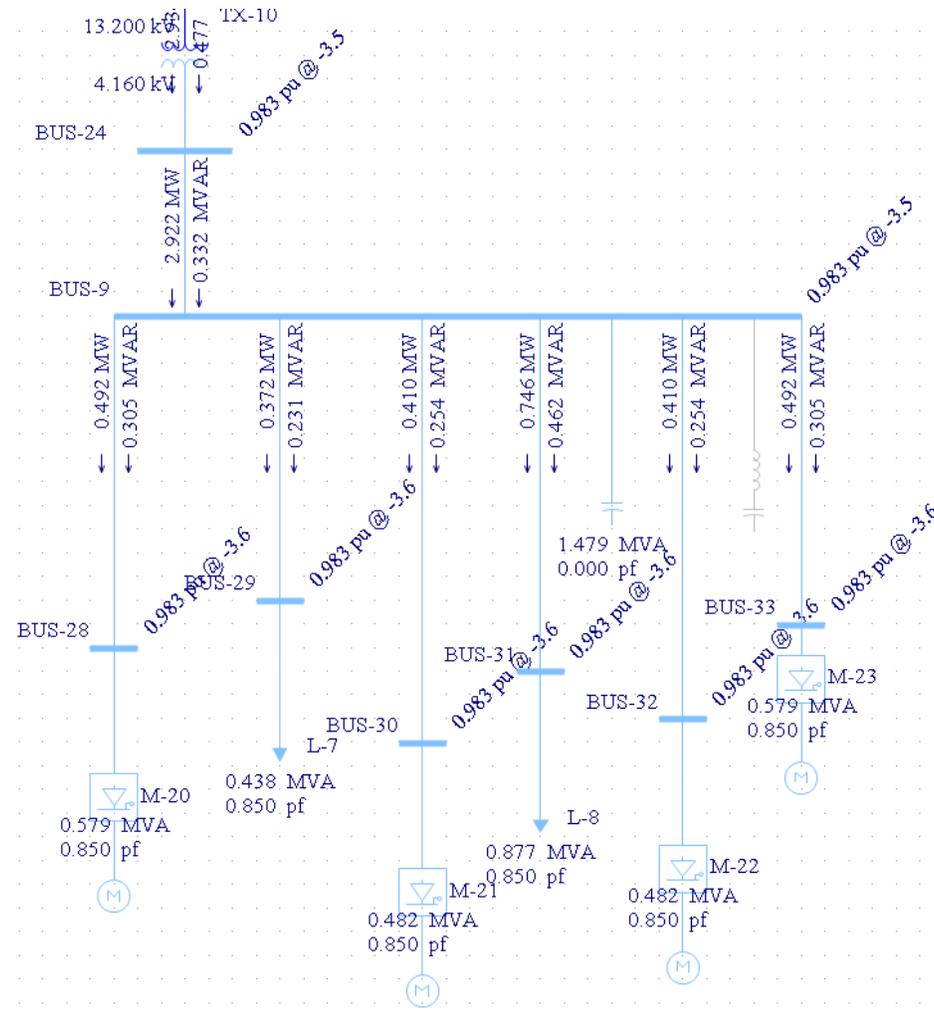


Fig. 4.14 Diagrama Unifilar Bus 9 D

Por medio de la compensación de Potencia Reactiva a través de los bancos de capacitores evitamos que dicha potencia reactiva sea alimentada por el sistema así que se corrige el F.P. y a su vez tener una tensión estable en los buses, en este caso de 0.98 PU. Lo cual se obtiene con ayuda de la ecuación 4.28.

$$S = \sqrt{2.922^2 + 0.332^2} = 2.94 [MVA]$$

$$F.P. = \frac{P}{S} = \frac{2.922}{2.94} = 0.99 \quad \dots\dots\dots 4.28$$

En la figura 4.15 podemos observar que el banco de capacitores influye directamente en la potencia reactiva necesaria del bus 9 mas no en la potencia activa del bus.

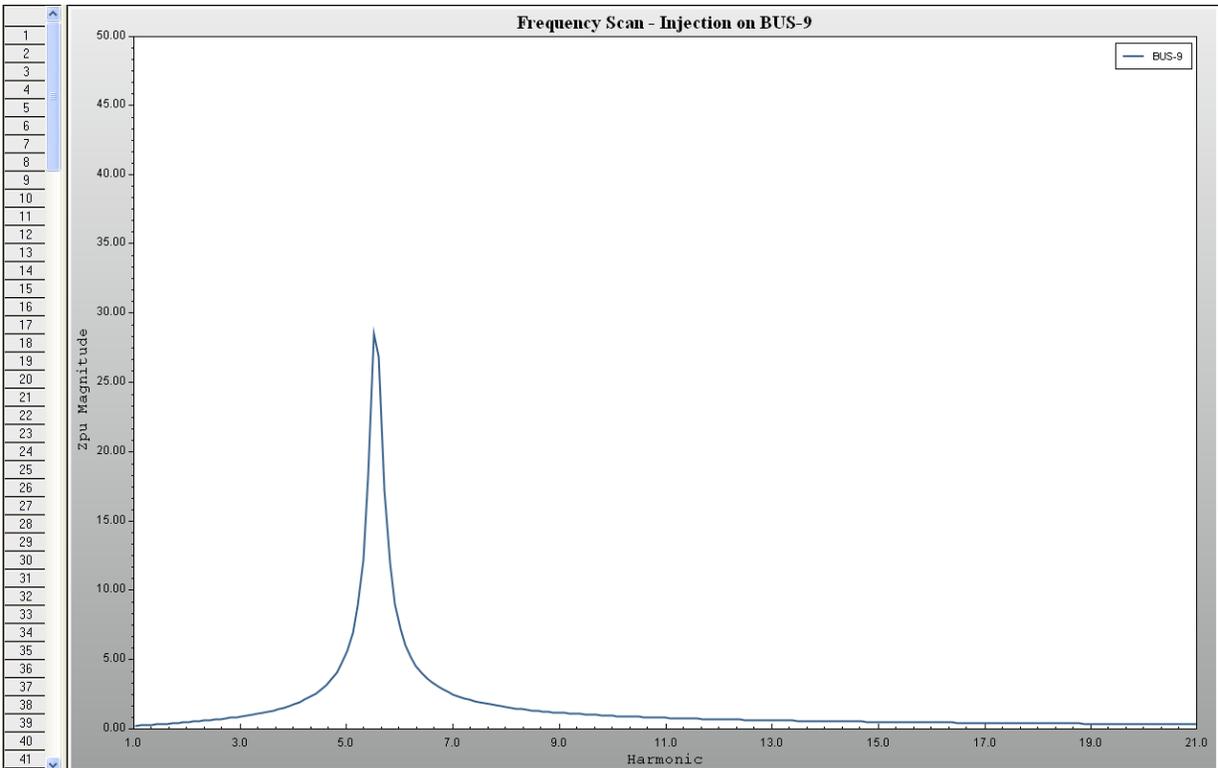


Fig. 4.15 Impedancia vs Frecuencia. "vista" en el bus 9, considerando la compensación de potencia reactiva (banco de capacitores de 1500 KVAR).

En la figura 4.17 se aprecia la compensación de Potencia Reactiva en el Bus 9 por medio de un filtro de quinta armónica de 1500 KVAR-4.16 KV.

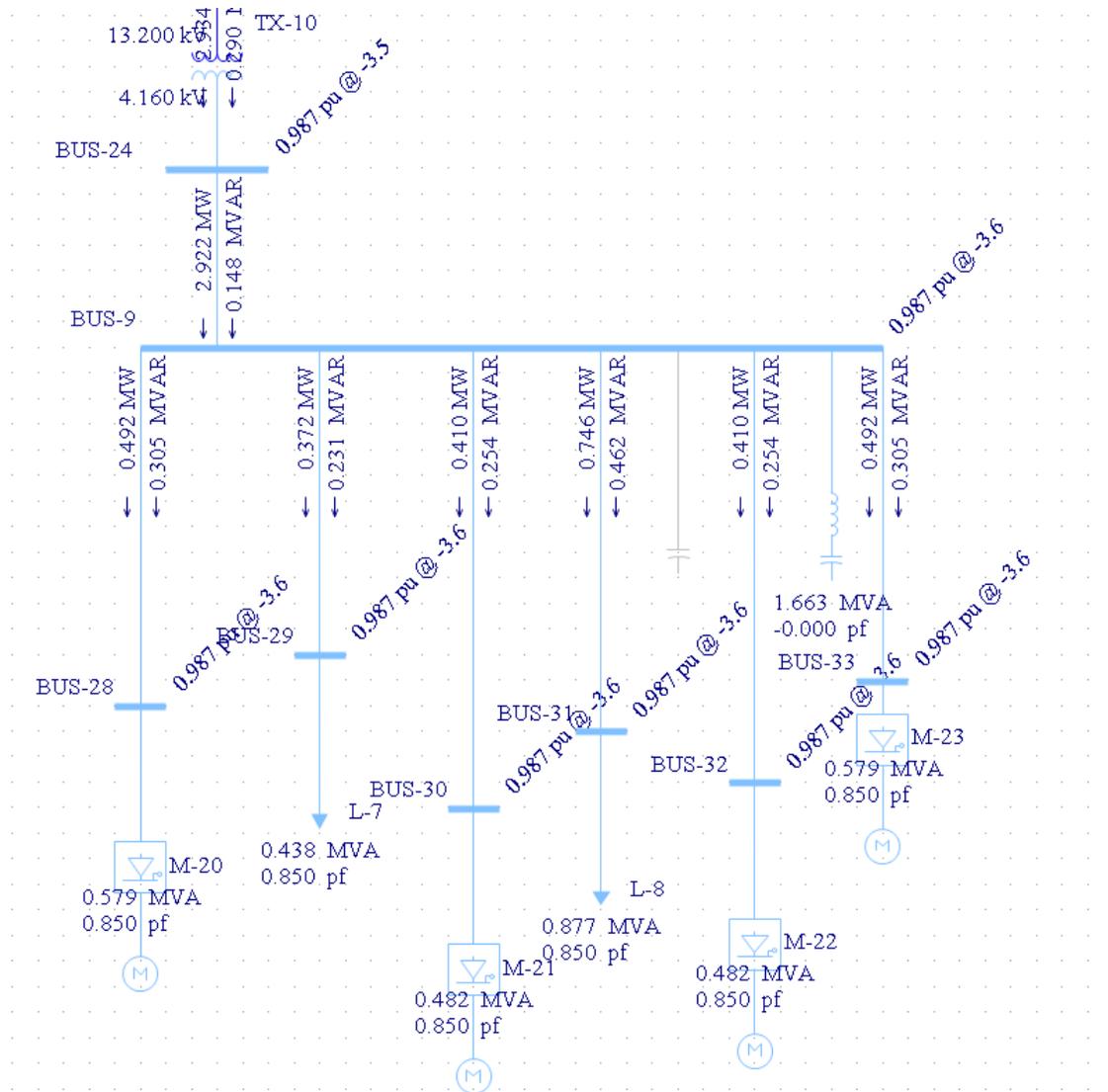


Fig. 4.17 Diagrama Unifilar Bus 9 F

La compensación de potencia reactiva es capaz de mantener el F.P. del sistema en un nivel aceptable al igual que hay una mejora en la tensión nominal del bus. Como lo podemos ver en la ecuación 4.29.

$$S = \sqrt{2.922^2 + .148^2} = 2.925$$

$$F.P. = \frac{P}{S} = \frac{2.922}{2.925} = 0.99 \quad \dots\dots\dots 4.29$$

Por lo que en cuanto a los flujos de Potencia no representa diferencia alguna entre un banco de capacitores sin embargo tiene la capacidad de atenuar las corrientes armónicas al sistema, representando un camino de baja impedancia para las mismas. En la figura 4.18 vemos el comportamiento del bus 9 utilizando un filtro para la quinta armónica.

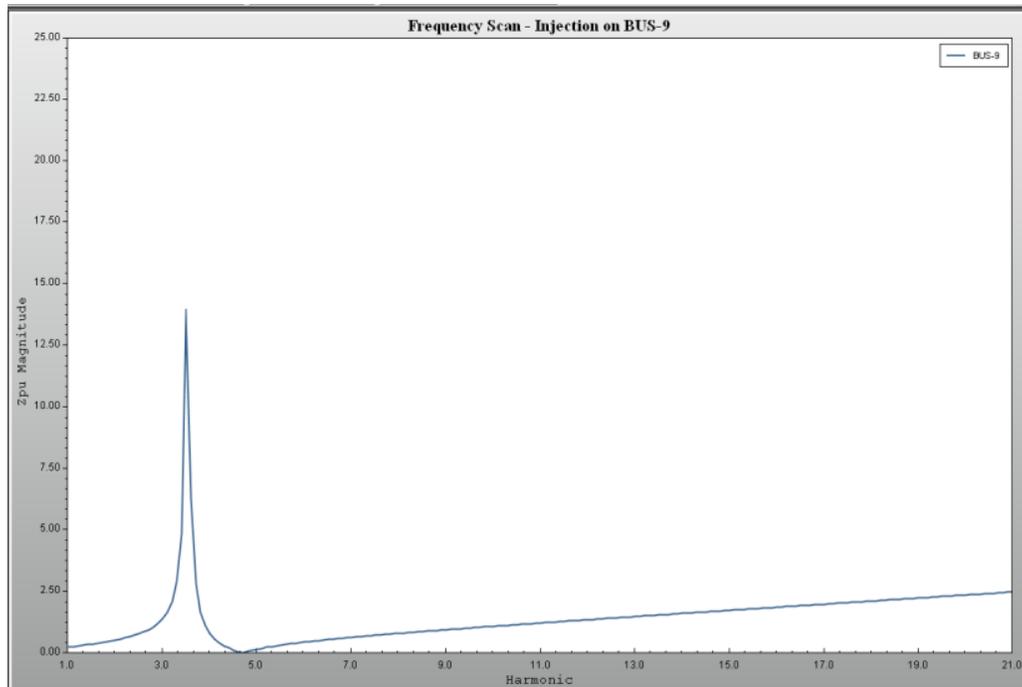


Fig. 4.18 Comportamiento del Bus 9 por medio de la compensación de Potencia Reactiva por medio de un filtro de quinta armónica.

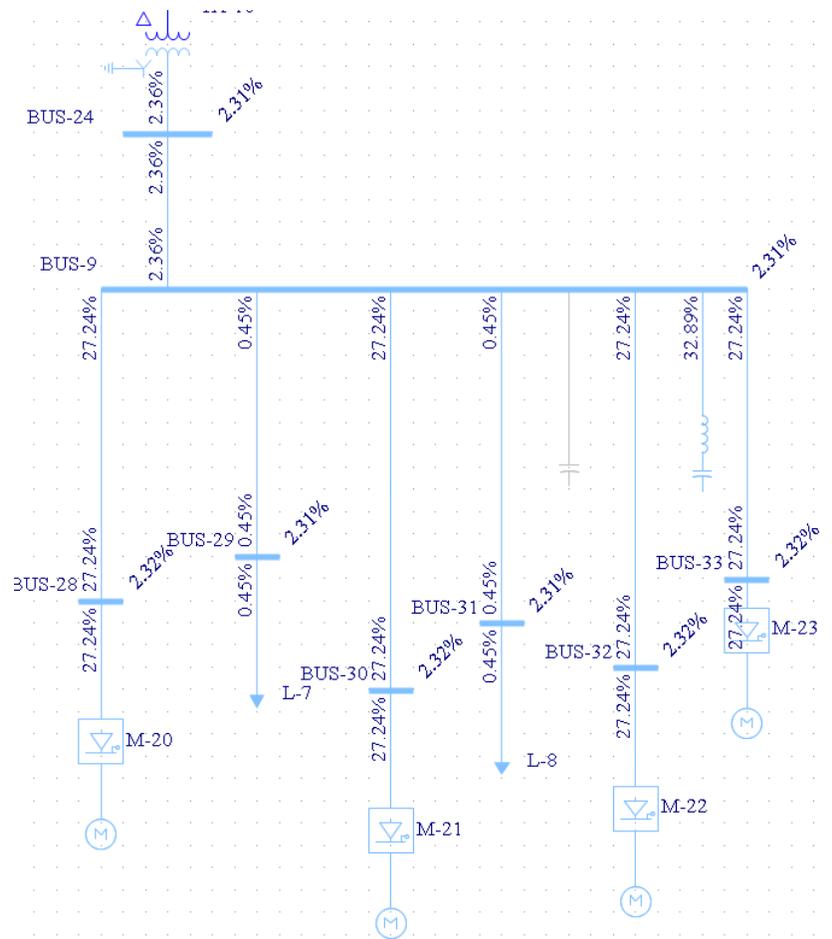


Fig. 4.19 Diagrama Unifilar Bus 9 G

La figura 4.19 presenta el diagrama unifilar con un filtro sintonizado, podemos ver que al instalar un filtro sintonizado a la quinta armónica se representa un camino de baja impedancia a las corrientes armónicas suministradas por las cargas no lineales en este caso los controladores de velocidad de los motores de dicha empresa por lo que podemos comprender la importancia que tienen los filtros en las industrias que tienen cargas no lineales.

La distorsión armónica total de voltaje en el bus es de 2.31 % que es menor al límite recomendado por la Norma CFE L0000 45-2005 (6.5%), así que es correcta la instalación del filtro.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Por todo lo anterior podemos concluir que a pesar de que una compañía suministradora de electricidad, proporcione un voltaje puramente senoidal (sin distorsión alguna), vemos que la alimentación de sistemas que contienen cargas no lineales o inyectan corrientes no senoidales, produce una propagación de las armónicas hacia toda la red del sistema si no se mitigan dentro del sistema que los genera.

Estos armónicos perturban cada vez más todo tipo de actividades: fabricación de componentes, estaciones de bombeo, sistemas informáticos, estaciones de telecomunicaciones, estudios de televisión... ya que estas representan una parte significativa de la corriente consumida. Podemos señalar 3 tipos de consecuencias para el usuario:

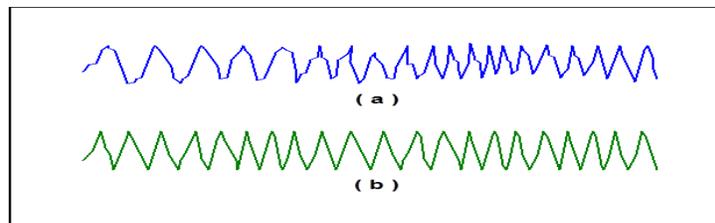
- Impacto sobre las instalaciones eléctricas con calentamientos importantes engendrados en los alternadores, transformadores, condensadores, cables... Los costes debidos al envejecimiento acelerado de estos equipos pueden ser muy elevados.
- Impacto sobre el funcionamiento de las aplicaciones como por ejemplo, el disparo intempestivo de disyuntores o la imposibilidad de alimentar receptores muy sensibles a la calidad de la energía. Los costes económicos que siguen a tales disfunciones son a menudo inaceptables para una empresa.
- Impacto sobre la potencia eléctrica disponible ya que los armónicos consumen en puras pérdidas una parte de la corriente (sobreconsumo hasta del 30%). El usuario paga entonces más caro, una potencia disponible reducida.

En la mayor parte de países del mundo, no existe actualmente ningún concepto en la tarifa para penalizar el consumo de armónicos de corriente.

No obstante, dada la magnitud del problema, son muchos los países que están en vías de estudio de algún tipo de recargo en caso de que se sobrepasen los límites de la norma.

A las compañías de distribución, la existencia de armónicos de corriente les supone un coste significativo en pérdidas y en pérdida de aprovechamiento de sus instalaciones, por lo que este tema merece una especial atención y debe entrar en consideración a la hora de hacer estudios referentes a las protecciones a ser implementadas en los diseños de las instalaciones.

Otro punto importante al que llegamos como conclusión es que a pesar de que los problemas de distorsión fueron observados por el personal de operación de empresas suministradoras hace bastante tiempo y dichas distorsiones fueron causadas principalmente por cargas no-lineales conectadas a los sistemas de distribución de las empresas suministradoras. Como por ejemplo, un horno de arco eléctrico que como vimos es una carga no lineal que demanda corrientes no senoidales (ricas en armónicas) cuando un voltaje senoidal es aplicado, como se muestra en la curva (a) de la figura. La corriente de carga distorsionada causa distorsión en el voltaje del bus como se muestra en la curva (b). En el pasado, tales fuentes armónicas no fueron ampliamente utilizadas y las armónicas a menudo fueron efectivamente mitigadas con el uso de los transformadores con conexión delta-estrella aterrizada. En la figura 5.1 se puede ver la corriente demandada por un horno de arco eléctrico.



**Figura 5.1 (a) Corriente demandada por un horno de arco eléctrico;
(b) Voltaje en el bus.**

Pero ahora es necesario contar con métodos adicionales para resolver problemas de armónicas por tres razones principales:

- 1) El uso de *convertidores estáticos de potencia (cep)* han proliferado recientemente.
- 2) Las resonancias de red se han incrementado.
- 3) El equipo de sistemas eléctricos de potencia y cargas son más sensibles a las armónicas.

5.2. Recomendaciones

Usualmente la solución al problema de armónicos es eliminar los síntomas y no el origen, los aparatos que crean los armónicos generalmente constituyen una pequeña parte de la carga, eliminar su uso no es posible, modificar esos equipos para que no causen armónicos tampoco es factible. Lo que nos queda es reducir los síntomas ya sea incrementando la tolerancia del equipo y del sistema a los armónicos o modificar los circuitos y los sistemas para reducir su impacto, atrapar, o bloquear los armónicos con

filtros. Por supuesto hay excepciones. En casos de sobrecarga, daño de equipo o diseño inapropiado, estas causas que generan armónicos pueden ser corregidas, similarmente un aparato o equipo particular que produce un alto nivel de armónicos debe ser modificado o reemplazado.

Un aspecto que con frecuencia es mal evaluado, es que los armónicos han sido un problema reciente debido al efecto de adición y multiplicación de los mismos, la presencia de estos efectos es lo que causa problemas, individualmente ninguno es problemático por sí mismo. Por ejemplo, la distorsión armónica causada por un motor de inducción, que se usa para hacer circular aire para uso agrícola, puede haber sido tolerado por muchos años, pero inesperadamente causa problemas de flicker porque el conductor neutro se abrió. Es común en el caso de severos problemas de armónicas, que se ligen dos o más factores que contribuyan a agravar el problema, particularmente cuando se adiciona equipo nuevo o que existen cambios de equipo, siendo la sospecha del problema los nuevos equipos. Cuando se presentan causas simultáneas que generan altos niveles de armónicas, usualmente sólo una es la mayor causa del problema, contribuyendo las otras causas a crear resonancia o a ayudar en su propagación.

El primer paso que se recomienda en cualquier investigación sobre el problema de armónicas es inspeccionar el equipo y el circuito eléctrico. Estos problemas son causados o empeorados por cargas desbalanceadas, mala conexión a tierra, problemas con el conductor neutro, por problemas con equipo o por uso inapropiado. Esto puede ser identificado con una inspección cuidadosa con equipo apropiado.

Desde el punto de vista de sobretensiones transitorias y armónicas, disminuyendo la impedancia a tierra e incrementando la capacidad del neutro con frecuencia se resuelven problemas de calidad de la potencia (incluyendo armónicas). Los problemas de puesta a tierra contribuyen de un 33 a un 40% de los problemas relacionados con la calidad de energía.

5.2.1. Recomendaciones hacia los filtros

Los filtros 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 las dos soluciones más usadas para el problema de las armónicas.

Los filtros son elementos cuya impedancia varía con la frecuencia. También tienen el potencial de crear y amplificar el problema de las armónicas, a menos que cuidadosamente sean localizados y diseñados, en algunos casos un diagnóstico y diseño pobres, origina que el remedio sea peor que la enfermedad.

Los filtros pasivos son los más simples, más económicos, pero menos flexibles y efectivos para filtrar armónicas. Son elementos puramente pasivos, usados por las empresas como circuitos en paralelo en la entrada de los servicios con problemas de generación de armónicas, evitando de esta manera que entren al sistema de distribución. También los filtros pueden instalarse directamente en un equipo particular donde existe un grave problema de generación de armónicas, evitando de esta manera que circulen en la propia instalación eléctrica del usuario.

El comportamiento de los filtros pasivos es ser sensitivos a la impedancia del sistema para los cuales ellos fueron ajustados. La impedancia del sistema puede cambiar a lo largo del tiempo, como el equipo altera su comportamiento de volts/var, siendo difícil estimar su exactitud si no se tienen mediciones. Los filtros pasivos con frecuencia no proporcionan un comportamiento satisfactorio, bajo ciertas circunstancias pueden causar problemas de resonancia sobre el sistema donde están conectados.

Filtros activos.- Son elementos de potencia, los cuales trabajan usando un convertidor de potencia conectado en paralelo para producir corrientes armónicas iguales a las que se encuentran en la corriente de carga, asegurando que su trayectoria sea la de sacar las corrientes armónicas fuera de la trayectoria del sistema de distribución (figura 5.2). La reducción de las armónicas depende sólo de la medición armónica correcta que se está generando en la carga y no es función de la impedancia del sistema. Estos filtros han tenido una mayor aplicación, teniendo la desventaja de ser más caros y de que consumen potencia en cantidades significativas, creando además niveles altos de interferencia electromagnética.

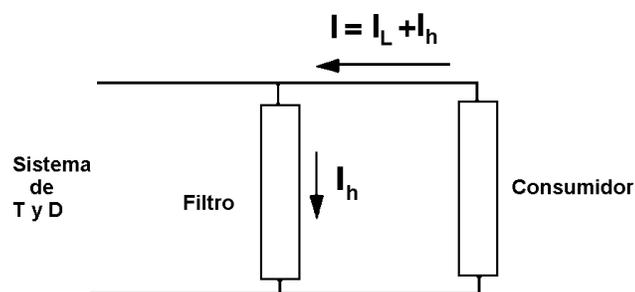


Figura 5.2 Filtro Activo

Los filtros son usualmente aplicados como un camino en paralelo con el usuario o con el equipo que crea armónicas, como se indica en la figura. Ambos filtros el activo y el pasivo desvían las corrientes armónicas I_h por una trayectoria para desviarles del sistema, con esto se deja que solo la corriente de carga fluya al sistema: los filtros pasivos proporcionan una impedancia muy baja en la trayectoria en paralelo, los filtros

activos originan que la corriente armónica fluya con una corriente que ellos mismos generan, esencialmente forzándola por su trayectoria.

Los filtros híbridos que usan filtros activos y pasivos son colocados en serie y en paralelo en la carga de los usuarios, se combina en este caso un comportamiento mejor con un menor costo y menor consumo de potencia.

5.2.2. Recomendaciones hacia los Transformadores

El Código Nacional Eléctrico Americano (NEC) de 1993 y "Underwriting's Laboratory" (UL), demandan que sean especificados transformadores de factor k para la alimentación de cargas no lineales.

Los transformadores de factor k son probados, etiquetados y listados por UL para la operación en ambiente no sinusoidal. Especificados e instalados para servir cargas no lineales de acuerdo a los requerimientos de listado y etiquetado, los transformadores de factor k satisfacen los requerimientos de seguridad del NEC. Los transformadores k son diseñados para operar con menores pérdidas a las frecuencias armónicas. Las modificaciones de diseño de factor k incluyen el alargamiento del devanado primario para soportar la inherente circulación de corrientes de armónicos triples; el duplicado del conductor neutro secundario para llevar corrientes de armónicos triples; el diseño del núcleo magnético con una menor densidad normal de flujo mediante el empleo de grados de aceros más altos; y el empleo de conductores secundarios aislados más pequeños, enrollados en paralelo y transpuestos para reducir el calentamiento del efecto pelicular de la resistencia asociada.

Especificar los transformadores de factor k requiere de un método para calcular el valor nominal k de la corriente de carga, lo mismo desde un análisis armónico de carga real, o desde estimaciones del contenido de corrientes de armónicos. La ecuación 5.1 sirve para el cálculo del factor k recomendada.

$$k = \sum_{h=1}^{\infty} (Ih(pu))^2 \cdot h \dots\dots\dots 5.1$$

Donde $Ih(pu)$ es la corriente armónica esperada en por unidad, y h es el número del armónico.

Debido a la característica inherente de que las corrientes armónicas de secuencia positiva y negativa balanceadas se cancelan en cualquier punto común de conexión, estos cálculos necesitan solamente considerar las corrientes armónicas triples de secuencia cero con la magnitud de la corriente fundamental como el peor caso de factor

de calentamiento no sinusoidal dentro del transformador. Cualquier magnitud de secuencia positiva y negativa resultante de los devanados de fase será recortada por la impedancia del transformador, y viajará a través del transformador sobre los conductores de fase hacia la fuente. Esta estimación aproximada del factor k basada en el entendimiento de la relación entre las componentes simétricas y las corrientes armónicas resultan en un valor nominal k del transformador más realístico.

La determinación de un valor k realístico es importante porque la especificación de un factor k más grande que el que es necesario introduce problemas de armónicos similares a la práctica del sobredimensionamiento de transformadores.

Similarmente a los transformadores sobredimensionados, transformadores de factor k mayores que lo necesario para la carga tienen menores impedancias, incrementando esto la corriente de neutro a tierra e incrementando la caída de voltaje de neutro a tierra en la carga.

Además, una menor impedancia del transformador resulta en una mayor permisibilidad de paso de corriente de falla a medida que una mayor corriente de la fuente de cortocircuito está en capacidad de viajar a través del transformador hacia el equipamiento de utilización.

Para proteger el equipamiento corriente abajo, deben ser realizador cálculos de cortocircuito para las corrientes de falla disponibles de transformadores de valor nominal k , y los valores nominales de interrupción de las protecciones deben ser dimensionados acordeamente.

Otras consideraciones de los transformadores de factor k incluyen la especificación de la clase de aislamiento de 220 °C con la restricción de rampas de temperatura de 80 °C a 115 °C. La menor rampa de temperatura provee de numerosos beneficios incluyendo capacidad adicional para emergencia o sobrecargas de corrientes armónicas, consumo de energía reducido con menores costos de operación y una expectativa de vida del transformador mayor, independientemente de la carga.

5.3. Ahorro

La Eficiencia Energética es el modo más rápido, económico y limpio de reducir nuestro consumo energético y reducir así las emisiones de gases de efecto invernadero. Ahora ya son viables las ambiciosas acciones de Eficiencia Energética. en la mayoría de las instalaciones existentes, podemos lograr hasta un 30% de ahorro energético utilizando las soluciones y tecnologías disponibles en la actualidad. Además por cada unidad energética que se ahorra en el consumo, se ahorran tres de producción. Por ello, sus

distribuidores se comprometen a ayudar las organizaciones a maximizar el rendimiento de la energía.

5.3.1. Necesidades en Industria

- Reducción de los gastos energéticos directos: Muchas inversiones en ahorro de energía.
- Menos riesgos asociados a la energía: La disponibilidad y las variaciones del precio de la energía son problemas importante para una rentabilidad sostenida de las operaciones.
- Mejora del perfil corporativo: El desarrollo sostenible es tan importante como la calidad y las marcas para la valoración de la corporación por parte de clientes y accionistas.
- Incentivos y limitaciones legales: Los países han desarrollado completos conjuntos de normativas, incentivos (impuestos, exenciones fiscales, emisiones y mercados comerciales de ahorro energético).
- Calidad, fiabilidad y disponibilidad de la energía para garantizar la producción.

La recomendación para conseguir sus objetivos de ahorro energético.

- Mejore su rentabilidad y su imagen: Reduzca el consumo energético sin poner en peligro la seguridad y la calidad de sus productos.
- Supervise y gestione el uso de energía eléctrica para una mayor eficiencia de la energía.
- Mejore la eficacia de sus procesos con soluciones avanzadas de automatización.

Aplicaciones clave de Eficiencia Energética en Industria

Análisis del uso de la energía

El diagnóstico del consumo de energía y la asignación de costos es un primer paso importante para conseguir su reducción.

Las soluciones de análisis del uso de la energía ofrecen un medio para entender el consumo energético de todas las instalaciones correspondientes (agua, aire, gas, electricidad, vapor). Los informes de facturación secundaria y asignación de costes permiten que los propietarios de las fábricas o edificios responsabilicen más a los inquilinos y los centros de costes sobre el gasto energético. Las acciones posteriores pueden reducir el uso general de energía entre un 8 y un 10%.

¿Cómo puede el cliente gestionar la energía con mayor eficiencia?

Las estrategias y acciones para el análisis del uso de la energía van desde la más simple a la más sofisticada.

- La medida básica de la energía (agua, aire, gas, electricidad, vapor, emisiones) permite identificar las principales áreas de consumo y optimizar su uso energético, así como verificar el impacto de las medidas energéticas adoptadas.
- El uso de un software de análisis para realizar cálculos y mostrar tendencias permite identificar las áreas con potencial de ahorro y posteriormente evaluar el resultado de las acciones adoptadas.
- La asignación de costes de energía a los distintos centros y niveles de una organización motiva a sus usuarios a realizar un uso más racional, esto que se traduce en una reducción global de consumo de energía
- El sub-contaje permite al propietario de un edificio o instalación imputar los costes de consumo de energía a sus usuarios internos, motivándolos a un uso óptimo de la energía. Haciendo responsable a cada usuario de su consumo energético es posible alcanzar reducciones globales comprendidas entre el 8 y el 10%.

Optimización de tarifas energéticas

Las soluciones para la optimización de tarifas energéticas pueden tener un impacto significativo en los gastos generales de la instalación. Las empresas pueden optimizar el coste de su energía si poseen los conocimientos y experiencia necesarios para negociar acuerdos de suministro ventajosos. Se pueden obtener importantes beneficios con estrategias que contemplen los distintos periodos tarifarios.

Reducir al mínimo el riesgo y elevar al máximo el valor a través de contratos de electricidad seguros y estables es una de las primeras prioridades para los gestores energéticos.

¿Cómo puede el cliente gestionar la energía con mayor eficiencia?

- A través del análisis de los parámetros eléctricos, la recolección de los datos de consumo, análisis de oportunidades, y analizando diferentes posibilidades energéticas los gestores energéticos pueden reducir el valor global del contrato con los suministradores. El conocimiento del modo en que se utiliza la energía comprada a la compañía, proporciona una gran ventaja para el comprador a la hora de negociar los contratos. Los gestores energéticos pueden basarse en un análisis de proveedores y consolidar un grupo de empresas suministradoras energéticas con el fin de reducir el impacto financiero de la energía eléctrica para toda la empresa.
- Dependiendo de las tarifas ofrecidas por los suministradores y de las cargas del cliente, los usuarios pueden reducir el coste energético de varias formas.

- Las puntas de carga pueden reducirse si se detectan y se cambian de periodo otras cargas no esenciales. Con el deslastre de cargas se puede utilizar la generación propia para alimentar cargas evitando consumir puntas de potencia de suministro.
- Los clientes pueden también aprovecharse de las tarifas ofrecidas por las distribuidoras con una carencia de capacidad o un coste marginal de producción alto, por ejemplo durante los meses de verano. Un acuerdo de interrumpibilidad permite al cliente beneficiarse de mejores precios. Como contraprestación, cuando la suministradora lo requiere, el usuario deberá reducir su consumo temporalmente.
- Las tarifas horarias son otra vía de incentivar a los clientes que pueden distribuir sus consumos hacia periodos del día donde el precio de la energía es más barato.
- Evitar los recargos por energía reactiva es otra opción para optimizar la factura. Las cargas inductivas, como los transformadores y los motores utilizan una parte de energía reactiva. Este tipo de cargas absorbe energía durante una parte del ciclo y la almacena en el núcleo magnético o campo eléctrico. La energía se devuelve posteriormente a la red durante el resto del ciclo. Si la tarifa eléctrica del cliente incluye recargos por energía reactiva, la corrección del factor de potencia es la solución para eliminar este cargo de la factura.

Fiabilidad energética para continuidad en aplicaciones

- Las interrupciones no previstas debidas a fallos en los sistemas eléctricos o cortes de alimentación pueden generar grandes pérdidas para las empresas con operaciones críticas: pérdida de producción, pérdida de servicios, interrupciones peligrosas, numerosos reinicios costosos de energía y pérdidas totales de beneficios. Desafortunadamente, la electricidad suministrada a la instalación no tiene el nivel de calidad ni de disponibilidad requeridos por numerosas aplicaciones del cliente.
- Las soluciones para la continuidad en las aplicaciones críticas reducen las consecuencias de los cortes de alimentación y evitan el tiempo de inactividad basándose en la fiabilidad y las necesidades de disponibilidad de una operación crítica. La optimización de la fiabilidad y la disponibilidad de la energía está diseñada en la instalación basada en las necesidades del ciclo de vida, a continuación se implementa utilizando el equipo adecuado y se completa con los servicios necesarios para lograr los objetivos de los clientes.

¿Cómo puede el cliente gestionar la energía con mayor eficiencia?

Gestión de activos

El mantenimiento regular y la modernización de la red eléctrica a lo largo de su ciclo de vida es necesario para lograr eficiencia y fiabilidad en el uso de la energía. La gestión de activos eléctricos se refiere a todo el conjunto de actividades necesarias para lograr estos objetivos al mejor coste, comprendidas en 4 planes de mejora:

- Mantenimiento (preventiva y curativa),
 - Modernización (nuevo estudio de diseño y readaptación),
 - Monitorización (mantenimiento predictivo, medición de armónicos, seguimiento del consumo),
 - Management (sistema de información).
-
- Monitorización
 - La rápida localización de perturbaciones y el aislamiento de la fuente del problema para evitar su propagación es un factor clave. La monitorización, alarmas, registro de eventos y análisis de calidad de energía son necesarios para proporcionar alertas al personal para impedir posibles problemas de disponibilidad. Frente a un imprevisto, la solución permite a los usuarios una rápida administración del problema y por lo tanto un rápido retorno a su correcto funcionamiento.
 - ¿Como optimizar el uso de las instalaciones? La generación automática de perfiles de carga puede revelar potenciales ocultos de un edificio, planta, zona o equipo.

Arquitecturas y equipos

Ya sea durante la fase de diseño o durante la de operación, a menudo es necesario instalar equipos para mitigar los efectos de las perturbaciones (internas o externas, constantes u ocasionales):

- Algunos equipos, como por ejemplo motores, inversores, sistemas de alimentación ininterrumpida, hornos de arco, transformadores, filtros y lámparas de descarga..., generan distorsiones armónicas. El filtrado de armónicos reduce y elimina los armónicos que contaminan la red eléctrica, los cuales causan cortes de luz y reducen la fiabilidad y la vida de los dispositivos.
- Para la continuidad en aplicaciones críticas, se debe reducir el impacto de los cortes de energía, prevenir y evitar el tiempo de inactividad. Por lo tanto, se utilizan estrategias que impliquen un mantenimiento y garanticen la continuidad energética a las cargas críticas. Las arquitecturas para la continuidad de funcionamiento son diseñadas basándose en las cargas críticas de la instalación.

Definiciones:

- *Fiabilidad: probabilidad de que el dispositivo desarrolle una determinada función, bajo ciertas condiciones y durante un período de tiempo determinado*
- *Disponibilidad: suministro ininterrumpido de energía o dentro de niveles aceptables de interrupciones*

Control de aplicaciones industriales

Las aplicaciones industriales más comunes son:

- Aire comprimido
- Control de hornos
- Control de presión de la inyección

¿Cómo puede el cliente gestionar la energía con mayor eficiencia?

Se pueden usar varias estrategias para la reducción del consumo de energía de estas aplicaciones industriales típicas:

- Mejorando la forma en que las aplicaciones están controladas.
- Recuperando y reutilizando el calor desaprovechado.
- Mejorando el programa de mantenimiento para asegurarse un funcionamiento eficiente de las instalaciones críticas.
- Mejorando la presencia de armónicos en sus instalaciones puede conseguir un aumento de la vida útil de los equipos hasta un 32% para las máquinas monofásicas, 18% máquinas trifásicas y 5% para transformadores

Reducir los efectos negativos que tienen los armónicos sobre la instalación le permitirán disminuir los costes de operación y los consumos energéticos. Los estudios de armónicos le permiten conocer exactamente cuánto, cómo y cuándo conseguirlo

5.3.2. Necesidades del cliente

Dirigido a consumidores de energía con cargas que generan **armónicos** como cargas productoras de arco eléctrico, dispositivos eléctricos de carga variable, convertidores estáticos (frecuencia directos e indirectos) y onduladores, tales como:

- Industria
- Infraestructuras

Los **armónicos** suelen ocasionar:

- Disparos intempestivos
- Sobrecargas en equipos (trafos, condensadores, etc.)
- Calentamiento en cables
- Fallos en relés, autómatas y equipos eléctricos en general.

5.3.3. Beneficios para el cliente

Reducir los efectos negativos que tienen los **armónicos** sobre la instalación le permitirán **disminuir los costes** de operación y los consumos energéticos.

Los estudios de **armónicos** le permiten conocer exactamente cuánto, cómo y cuándo conseguirlo.

- Incremento vida útil de los equipos.
- Reducción de pérdidas por sobrecargas y calentamientos de cables.
- Atenuación de las fuentes de distorsión del sistema.
- Estabilidad a las cargas del sistema e Incremento de la fiabilidad de la red.

5.3.4. Etapas estudio de armónicos

- Análisis de armónicos y las causas que producen su existencia.
- Estudio de su efecto en la instalación y los equipos.
- Evaluación de las posibles soluciones de atenuación

Con las **soluciones** propuestas para mejorar la presencia de **armónicos** en sus instalaciones puede conseguir un **aumento vida útil de los equipos hasta un 32%** para las máquinas monofásicas, **18%** máquinas trifásicas y **5%** para transformadores

BIBLIOGRAFÍA

1. Standard 519-1981: "IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation"
2. IEEE Std. 519-1992: Recommended Practices and Requirements of Harmonic Control in Electric Power Systems.
3. IEC 61000-3-2 (2001-10): Electromagnetic compatibility (EMC).
4. Joint WG CIGRE C4.07/CIRED, Power quality indices and objectives, final WG Report, January 2004, Rev. March 2004.
5. Fuchs, E.F., Roesler, D.J., and Masoum, M.A.S., Are harmonic recommendations according to IEEE and to IEC too restrictive? IEEE Trans. Power Delivery, 19(4), Oct. 2004.
6. Halpin, M., Harmonic modeling and simulation requirements for the revised IEEE Standard 519-1992, 2003 IEEE Power Eng. Soc. General Meet. Conf. Proc., July 13-17, 2003, Toronto, Ontario, Canada.
7. Ward, J. and Ward, D., Single phase harmonics, PSER EMI, Power Quality, and Safety Workshop, April 18-19, 2002.