

UNIVERSIDAD LAICA
“ELOY ALFARO” DE MANABÍ
FACULTAD DE INGENIERIA



Tesis de Grado
Previa a la obtención del Título de:
INGENIERO ELÉCTRICO

TEMA:

**“BANCO DE PRUEBAS PARA EL ESTUDIO DE CALIDAD DE ENERGÍA
ELECTRICA CON UN ANALIZADOR TRIFÁSICO Y UN SIMULADOR DE
CARGAS NO LINEALES”**

AUTORES:

ITALO JAVIER CARRILLO TORO
VÍCTOR RODOLFO PILLASAGUA SUÁREZ

Director de Tesis:

ING. ENRIQUE FIGUEROA

MANTA – MANABI - ECUADOR
2013

AGRADECIMIENTO

A Dios, por permitirme estar aquí alcanzando mis sueños y por darme la bendición de tener a mis padres junto a mí.

A mis padres Eulalia y Javier por haber depositado su confianza y por el apoyo absoluto que me han brindado.

A la Universidad y la Facultad de Ingeniería en especial a los catedráticos de la Escuela de Ingeniería Eléctrica cuya guía a lo largo de la carrera nos brindaron la oportunidad de ser profesionales.

VÍCTOR RODOLFO PILLASAGUA SUÁREZ

AGRADECIMIENTO

A Dios, por permitirme estar aquí alcanzando mis sueños y por darme la bendición de tener a mis padres junto a mí.

A mis padres Italo y Matilde por haber depositado su confianza y por el apoyo absoluto que me han brindado.

A la Universidad y la Facultad de Ingeniería en especial a los catedráticos de la Escuela de Ingeniería Eléctrica cuya guía a lo largo de la carrera nos brindaron la oportunidad de ser profesionales.

ITALO JAVIER CARRILLO TORO

DEDICATORIA

A Dios.

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mi madre Matilde.

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

A mi padre Italo.

Por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.

ITALO JAVIER CARRILLO TORO

DEDICATORIA

A Dios.

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mi madre Eulalia.

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

A mi padre Javier.

Por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.

VÍCTOR RODOLFO PILLASAGUA SUÁREZ

Manta, julio 2013

SR. ING.

Freddy Machuca

DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERIA

SEÑORES MIEMBROS DEL HONORABLE CONSEJO

Ciudad.-

A través del presente, pongo a vuestro conocimiento, adjunto el trabajo de titulación previo a la investidura de ingenieros eléctricos de los señores egresados: *Carrillo Toro Ítalo Javier y Pillasagua Suarez Víctor Rodolfo*.

La misma que ha cumplido con todos los lineamientos precisado en el proyecto de Tesis, el Diseño de Investigación, el Reglamento de Titulación de la escuela y el Instituto de la ULEAM, cuyo tema es:

“BANCO DE PRUEBAS PARA EL ESTUDIO DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON UN ANALIZADOR TRIFÁSICO Y UN SIMULADOR DE CARGAS NO LINEALES”

El mismo que está acto para que sea sometido al Tribunal que bien amerite. Sin otro particular, y con la seguridad de una respuesta adecuada y oportuna, de otra parte es grato suscribirnos a ustedes.

Atentamente,

ING. ENRIQUE FIGUEROA

DIRECTOR DE TESIS

DECLARATORIA

La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestas en esta Tesis son exclusivamente de los Autores, y el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado corresponderá a la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.

Pillasagua Suarez Víctor R.

Carrillo Toro Ítalo Javier.

Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí

FACULTAD DE INGENIERIA

TEMA:

**“BANCO DE PRUEBAS PARA EL ESTUDIO DE CALIDAD DE ENERGÍA
ELECTRÍCA CON UN ANALIZADOR TRIFÁSICO Y UN SIMULADOR DE
CARGAS NO LINEALES”**

TESIS DE GRADO

**Sometido a consideración de LA UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO
DE MANABÍ con el aval del tribunal como requerimiento a la obtención
del título de licenciada en la carrera de INGENIERIA ELECTRICA y
aprobado por el tribunal, se hizo acreedora a la siguiente calificación:**

FIRMAS

NOTAS

RESUMEN

Las armónicas son corrientes y/o voltajes presentes en un sistema eléctrico, con una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental. El Impacto económico de las perturbaciones producidas por Los armónicos tiene importantes consecuencias económicas, entre estas, el envejecimiento prematuro de equipos. Se realizó una investigación en dos empresa para determinar las formas de onda de armónicos mediante el FLUKE. **ScopeMeter 190-204** en modo de osciloscopio y de multímetro, para identificar las distorsiones armónicas y entregar medidas preventivas y correctivas que ayuden a los equipos industriales y comerciales. Los resultados fueron: Resumiendo para la empresa N.1 en los 5 días de observación se determinó que los valores máximos para armónicos de TERCERA, encontrados fluctuaron entre 47,06 y -21,12, para armónicos de QUINTA entre 44,88 y -15,16 y para armónicos de SÉPTIMA entre 25,49 y -7,90, además se obtuvo la carga % de aporte del armónicos de 3, en este caso fue 36,36%, para armónico de 5ta, 40,34% y para armónico de 7ma, 23,29%. Para la empresa N.2 Resumiendo en los 5 días de observación se determinó que los valores máximos para armónicos de TERCERA, encontrados fluctuaron entre 6,99 y -5,89, para armónicos de QUINTA entre 21,77 y -15,98 y para armónicos de SÉPTIMA entre 24,78 y -7,22., siendo además que se obtuvo la carga % de aporte del armónicos de 3, en este caso fue 19,05%, para armónico de 5ta, 34,10% y para armónico de 7ma, 46,85%

PALABRAS CLAVES: ARMÓNICOS 3, 5 Y 7; ARMÓNICOS ELECTRICOS, DISTORSION DE ARMONICOS

ABSTRACT

Harmonics are currents and / or voltages present in an electrical system, with a frequency multiple of the fundamental frequency. The economic impact of interference caused by harmonics has important economic consequences, among these, the premature aging of equipment. An investigation into two companies to determine the harmonic waveforms by FLUKE. ScopeMeter 190 Series II mode oscilloscope and multimeter, harmonic distortions to identify and deliver preventive and corrective measures that help industrial and commercial equipment. The results were: N.1 sum for the company within 5 days of observation was determined that the maximum values for third-harmonic, found ranged between 47.06 and -21.12 for FIFTH harmonics between 44.88 and - 15.16 and seventh harmonics between 25.49 and -7.90, besides% load was obtained contribution of harmonics of 3 in this case was 36.36% for the 5th harmonic, and 40.34% for the 7th harmonic, 23.29%. To summarize N.2 Company within 5 days of observation was determined that the maximum values for third-harmonic, found ranged between 6.99 and - 5.89, for harmonic FIFTH between 21.77 and -15.98 and SEVENTH for harmonics between 24.78 and -7.22. being obtained in addition to the load% of contribution of harmonics of 3 in this case was 19.05% for the 5th harmonic, and 34.10% for the 7th harmonic, 46.85%

KEYWORDS: harmonics 3, 5 and 7; HARMONICS ELECTRIC, harmonic distortion

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO I

ARMÓNICOS.

1.1	INTRODUCCIÓN.	22
1.2	QUE SON LOS ARMÓNICOS.....	23
1.3	TEORÍA DE LOS ARMÓNICOS.....	24
1.4	ORIGEN DE LOS ARMÓNICOS.....	25
1.5	CONTENIDO NORMAL DE LOS ARMÓNICOS.....	26
1.6	EQUIPOS QUE PRODUCEN LOS ARMÓNICOS.	30
1.7	INFLUENCIA DE LOS ARMÓNICOS EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA.....	32

CAPITULO II

SIMULADOR DE CARGAS NO LINEALES.

2.1	INTRODUCCIÓN.	48
2.2	SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS CARGAS NO LINEALES.....	48
2.3	ARMÓNICOS MEDIDOS EN CARGAS COMERCIALES.	54
2.4	MODELO DE CARGAS NO LINEALES DE BAJA POTENCIA.	64
2.5	CONCLUSIONES.	74

CAPITULO III

CONTROL DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA.

3.1	CONSTRUCCIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS.....	76
3.2	TÉCNICAS DE CANCELACIÓN DE ARMÓNICOS.	79
3.3	FILTROS ARMÓNICOS.	81
3.4	CONVERTIDORES.....	92

CAPITULO IV

ANALIZADOR TRIFASICO DE CALIDAD DE ENERGIA ELECTRICA. (FLUKE 190-204)

4.1	INTRODUCCION.	98
4.2	ENTRADAS: CONEXIONES DE ENTRADA.	99
4.3	VOLTAGE/AMPERIOS: MEDICIÓN DE VOLTAJES.	101
4.4	REGISTRO.	105
4.4.1	Trend Plot: Trazado de mediciones en un intervalo de tiempo (TrendPlot™).	106
4.4.2	SCOPE RECORD: Registro de formas de onda osciloscópicas en la memoria profunda (Scope Record).	107
4.5	MEMORIAS.	110
4.6	SOFTWARE DEL FLUKE 190 – 204: UTILIZACIÓN DE FLUKEVIEW.....	113

CAPÍTULO V

PRÁCTICAS

5.1	USUARIO DE MEDIA TENSIÓN (NIVELES DE VOLTAJE, ARMÓNICOS) EN LAS ÁREAS INDUSTRIALES.....	121
5.2	TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN (NIVELES DE VOLTAJE, ARMÓNICOS) EN REDES DE DISTRIBUCIÓN.....	121

CAPITULO VI.

6.1	CONCLUSIONES.....	141
6.2	RECOMENDACIONES.....	142

BIBLIOGRAFIA.....	145
--------------------------	------------

ANEXOS.	146
---------------------	------------

INTRODUCCIÓN.

Las armónicas son corrientes y/o voltajes presentes en un sistema eléctrico, con una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental. Con el creciente aumento en el uso de cargas no lineales (procedentes de la electrónica de potencia), se han empezado a tener algunos problemas en las instalaciones eléctricas debido a los efectos de las componentes armónicas de corrientes y voltajes en el sistema eléctrico, que no se contemplaban anteriormente.

Entre estos están el sobrecalentamiento de cables, transformadores y motores, corrientes excesivas en el neutro, fenómenos de resonancia entre los elementos del circuito y en general la calidad en el suministro de energía eléctrica se ha ido deteriorando por la distorsión presente en los voltajes y corrientes.

Esta situación puede llegar a causar un funcionamiento incorrecto de muchos equipos (especialmente los menos robustos) que han sido diseñados para operar bajo condiciones normales (poca distorsión armónica). Además, se presenta un incremento en los costos de operación como resultado de algunos factores ligados a la generación de armónicas.

Se presentará un análisis de los efectos más comunes provocados por las armónicas en los sistemas eléctricos. Los efectos producidos por las armónicas en los componentes de los sistemas eléctricos han sido analizados tanto para circuitos particulares como para toda una red interconectada, no obstante en algunos casos es muy difícil cuantificarlos en forma específica puesto que dependen de muchos factores.

Para medir los armónicos se utilizará un equipo **ScopeMeter 190 Series II** Fluke 190-062, -102, -104, -202, -204, -502, el que servirá para medir La corriente puede medirse tanto en modo de osciloscopio como de multímetro, el modo de osciloscopio tiene la ventaja de que aparecen dos formas de onda mientras se realizan las mediciones. FLUKE garantiza las

características expresadas en valores numéricos con la tolerancia establecida. Los valores numéricos especificados sin tolerancia indican los valores que se podrían esperar nominalmente del término medio de un conjunto de instrumentos de medida ScopeMeter idénticos.

El estudio se efectuará mediante una medición de armónicos en dos Empresas de Manabí, la primera dedicada al sector pesquero y la segunda al sector de servicios de salud (Hospital de SOLCA Manabí).

Se espera que con los datos obtenidos se tomen las medidas preventivas y correctivas para que los equipos eléctricos alcancen una vida media útil sin tener tantos inconvenientes de daños y reparaciones que a la larga encarecen el costo de los servicios.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El Impacto económico de las perturbaciones producidas por Los armónicos tiene importantes consecuencias económicas, entre estas, el envejecimiento prematuro de equipos, lo cual hace que se tenga que sustituir con más frecuencia a los mismos, a menos que se tenga las medidas preventivas y correctivas desde el principio.

Además las sobrecargas en la red de distribución pueden necesitar niveles de contratación de potencia superiores y aumentar las pérdidas. La distorsión de las ondas de corriente produce disparos intempestivos que pueden detener la producción de cualquier fábrica o empresa.

Aún más tenemos consecuencias cada vez más graves, sólo hace diez años, los armónicos no se consideraban un problema porque sus efectos en las redes de distribución eran por lo general poco importantes.

Sin embargo, la introducción masiva de la electrónica de potencia en los equipos ha hecho que este fenómeno sea más grave en todos los sectores de la actividad económica. Considerando que, el equipo que produce los armónicos a menudo es vital para la empresa o industria.

ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.

Una serie de estudios internacionales han recopilado datos que han dado como resultado una estimación del contenido de armónicos típico que se encuentra con frecuencia en las redes de distribución eléctrica.

La presencia de armónicos indica una onda de tensión o una intensidad distorsionada. La distorsión de la corriente o de la onda de tensión significa que la distribución de la energía eléctrica sufre perturbaciones y que la calidad de la alimentación no es óptima.

Las corrientes de armónicos se producen por cargas no lineales conectadas a la red de distribución. El flujo de intensidades armónicas produce tensiones de armónicos a través de las impedancias de la red de distribución y por consiguiente, la distorsión de la tensión de alimentación.

De acuerdo a lo referido en esta problemática nuestra investigación podrá tener una justificación, demostrando su aporte y su beneficio a:

La Ciudadanía: en especial a los clientes industriales, comerciales, ya que al determinar de manera correcta los armónicos producidos tomarán medidas preventivas y correctivas en sus lugares de trabajo, lo que contribuirá a la disminución de gastos en equipos.

Para SOLCA y la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, constituirá un avance significativo en materia de control eléctrico de empresa, industrias y áreas afines en general por cuanto se evidenciará la necesidad de contar con un departamento de prevención de distorsiones eléctricas altamente calificado que sirva de valor agregado al desarrollo industrial y comercial.

De acuerdo con su importancia: este proyecto entregará las bases del diagnóstico situacional de áreas relevantes para el desarrollo de la economía de Manabí.

En lo Personal.- gratificará la tarea de encontrar nuevos datos que servirán para futuras investigaciones en materia de detección de armónicos en las líneas eléctricas que se distribuyen en la provincia.

OBJETIVOS.

OBJETIVO GENERAL:

Determinar las formas de onda de armónicos mediante el FLUKE. *ScopeMeter 190 Series II* en modo de osciloscopio y de multímetro, para identificar las distorsiones armónicas y entregar medidas preventivas y correctivas que ayuden a los equipos industriales y comerciales.

OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Identificar las características de armónicos hasta el rango 7º en las dos empresas del estudio.
- Evaluar las instalaciones eléctricas identificando los armónicos de rangos 3º, 5º, 7º
- Desarrollar medidas preventivas y correctivas hasta los armónicos de rango 7º

HIPÓTESIS.

La mayor frecuencia de armónicos en un campo eléctrico se va a encontrar en 3^o, con más del 20% de la presencia de éstos sobre el total

VARIABLES.

Variable independiente: campos eléctricos

Variable dependiente: armónicos de 3^o en más del 20%

DISEÑO METODOLOGICO.

TIPO DE ESTUDIO.

El tipo de estudio es experimental, la investigación se realizará en dos fases:

INVESTIGACION DE CAMPO: La investigación de campo, por que se realizará en el lugar de los hechos para obtener información con la respectiva medición de los campos eléctricos en las empresas anotadas.

INVESTIGACION DOCUMENTAL: La presente investigación será documental bibliográficos, porque hemos empleado diferentes enfoques teóricos, conceptualizaciones y criterios de distinto autores en libros sobre armónicos.

POBLACION.

El objeto del estudio de la investigación se lo ejecutará en dos empresas de la provincia de Manabí; SOLCA (Sociedad de Lucha contra el Cáncer) en la ciudad de Portoviejo en el Hospital Oncológico y Empresa de Atún de la ciudad de Manta.

PROCESAMIENTO Y PLAN DE ANALISIS.

La tabulación de las mediciones y expedientes se llevará a cabo en una hoja electrónica de Excel, donde se procesarán tablas simples de cada una de estas categorías y tablas de contingencia que brindan una mayor explicación de los sucesos encontrados.

Se diseñará las tablas y aquellos aspectos que resultan relevantes para la investigación y se expondrán los datos en porcentajes.

TECNICAS.

Las técnicas a usarse serán primordialmente técnicas de campo tales como:

- Observación.
- Medición de campo

RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.

La recolección de información se dará por el uso por técnicas de campo tales como:

Técnicas de Observación.- Se recurre principalmente a un registro manual por medio de apuntes de datos importantes y el registro fotomecánico, para almacenar las imágenes características del desenvolvimiento de cada uno de las mediciones en las empresas.

Técnicas de Medición.- se utiliza el equipo. **ScopeMeter 190 Series II** en modo de osciloscopio y de multímetro.

INSTRUMENTOS.

Para el presente estudio se utiliza el . **ScopeMeter 190 Series II** en modo de osciloscopio y de multímetro.

Introducción.

Características de funcionamiento.

FLUKE garantiza las características expresadas en valores numéricos con la tolerancia establecida. Los valores numéricos especificados sin tolerancia indican los valores que se podrían esperar nominalmente del término medio de un conjunto de instrumentos de medida ScopeMeter idénticos.

El instrumento de medida cumple con la precisión especificada de 30 minutos y con dos adquisiciones completas tras el encendido. Las especificaciones se basan en un ciclo de calibración anual.

Datos ambientales.

Los datos ambientales mencionados en este manual están basados en los resultados de los procedimientos de verificación del fabricante.

Características de seguridad.

El instrumento de medida ha sido diseñado y sometido a pruebas según lo estipulado por las normas EN/IEC 61010-1:-2001, EN/IEC 61010-031:2002+A1:2008 grado de contaminación 2 (conforme a la marca CE), ANSI/ISA-61010-1 (82.02.01):2004, CAN/CSA C22.2 No. 61010-1-04 (incluyendo homologación), Requisitos de seguridad de equipos eléctricos de medida, control y uso en laboratorio.

Este manual contiene información y avisos que deben ser seguidos por el usuario para garantizar un manejo seguro y mantener el instrumento en condiciones de seguridad.

La utilización de este equipo de un modo distinto al especificado por el fabricante puede reducir la protección proporcionada por el equipo.

Osciloscopio de cuatro entradas.

Número de canales

FLUKE 190-xx4.....4 (A, B, C, D)

Entradas aisladas A, B, C y D (verticales)

Anchura de banda, acoplada en continua

FLUKE 190-2xx.....200 MHz (-3 dB)

FLUKE 190-1xx.....100 MHz (-3 dB)

Tiempo de subida

FLUKE 190-2xx..... 1,7 ns

FLUKE 190-1xx..... 3,5 ns

Limitadores de anchura de banda analógicos

*20 MHz y 20 kHz

Acoplamiento de entrada.....CA, CC

Polaridad Normal, inversa

Rangos de sensibilidad

con sonda 10:120 mV a 1.000 V/div

directa (1:1).....2 mV a 100 V/div

Rango dinámico > ± 8 div (< 10 MHz)

..... > ± 4 div (> 10 MHz)

Rango de posicionado de traza..... ± 4 divisiones

Impedancia de entrada en BNC

Acoplada en continua.....1 M Ω ($\pm 1\%$)/14 pF (± 2 pF)

Tensión máxima de entrada

Precisión vertical $\pm(2,1\% + 0,04$ rango/div)

2 mV/div: $\pm(2,9\% + 0,08$ rango/div)

Para mediciones de tensión con sonda 10:1, sume la precisión de sonda;

Resolución del digitalizador. 8 bits, digitalizador separado para cada entrada

Horizontal

Velocidad mínima de base de tiempos (modo de registro

del osciloscopio)..... 2 min/div

Velocidad de muestreo en tiempo real FLUKE 190-502:

2 ns a 4 μ s/div (2 canales) hasta 2,5 GS/s

2 ns a 4 μ s/div (1 canal) hasta 5 GS/s

10 μ s a 120 s/div125 MS/s

FLUKE 190-202, -204:

RECURSOS

MATERIALES

- ***ScopeMeter 190 Series II***
- ***Sonda***

TALENTO HUMANO

- Director de tesis
- Pregradistas de ingeniería
- Universo de la población dos empresas de Manabí
- Ingenieros asesores

TECNOLOGICOS

- Computadoras e impresoras
- Proyector visual y audio
- Internet

CAPITULO I

ARMÓNICOS.

1.1 INTRODUCCIÓN.

Los niveles de distorsión armónica presentes en la red eléctrica se han incrementado en los últimos años debido al gran desarrollo y uso de la electrónica de potencia. La distorsión armónica es actualmente, un problema habitual en plantas industriales.

Las armónicas son corrientes y/o voltajes presentes en un sistema eléctrico, con una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental. Así, en sistemas con frecuencia de 60 Hz y cargas monofásicas, las armónicas características son la tercera (180 Hz), quinta (300 Hz), y séptima (420 Hz) por ejemplo.

Con el creciente aumento en el uso de cargas no lineales (procedentes de la electrónica de potencia), se han empezado a tener algunos problemas en las instalaciones eléctricas debido a los efectos de las componentes armónicas de corrientes y voltajes en el sistema eléctrico, que no se contemplaban anteriormente.

Entre estos están el sobrecalentamiento de cables, transformadores y motores, corrientes excesivas en el neutro, fenómenos de resonancia entre los elementos del circuito (si se cuentan con bancos de capacitores para corrección del factor de potencia) y en general la calidad en el suministro de energía eléctrica se ha ido deteriorando por la distorsión presente en los voltajes y corrientes.¹

La distorsión armónica puede causar un sobrecalentamiento de cables y transformadores, el disparo de interruptores automáticos y el mal funcionamiento de ordenadores, máquinas de control numérico y equipos de comunicación.

¹ **ALEXIS TEJADA PERALTA** 2002. Efectos de las armónicas en los sistemas eléctricos.ingeniería Eléctrica del Programa de Graduados en Ingeniería del ITESM Campus Monterrey pág.1

1.2 QUE SON LOS ARMÓNICOS.

Para definir este concepto es importante definir primero la calidad de la onda de tensión la cual debe tener amplitud y frecuencia constantes al igual que una forma sinusoidal. La Figura 1 representa la forma de la onda sin contenido de armónicos, con una frecuencia constante de 60Hz y una amplitud constante de 1pu.

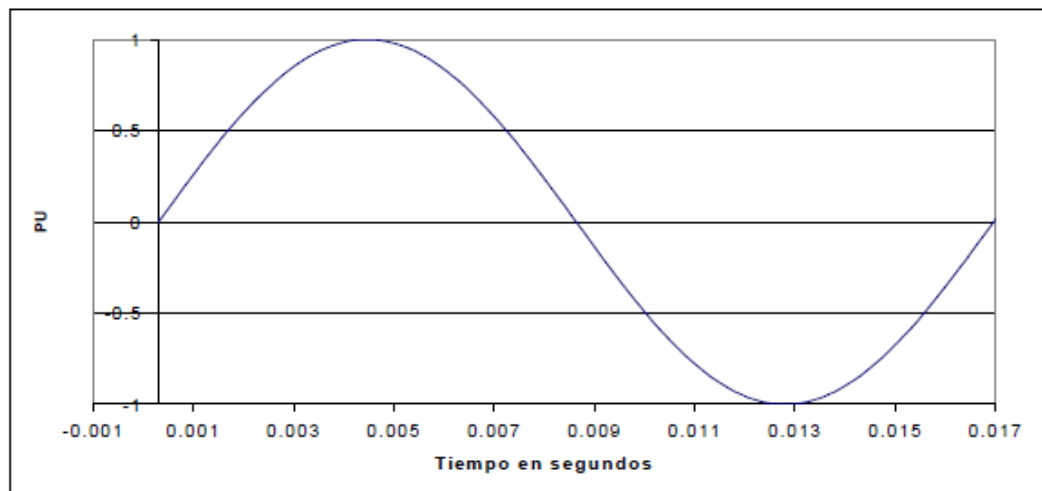


FIG. 1 Onda sin contenido armónico.

Cuando una onda periódica no tiene esta forma sinusoidal se dice que tiene contenido armónico, lo cual puede alterar su valor pico y/o valor RMS causando alteraciones en el funcionamiento normal de los equipos que estén sometido a esta tensión.

La frecuencia de la onda periódica se denomina frecuencia fundamental y los armónicos son señales cuya frecuencia es un múltiplo entero de esta frecuencia. La Figura 2 muestra una onda de tensión con un contenido del 30% del 5º armónico.

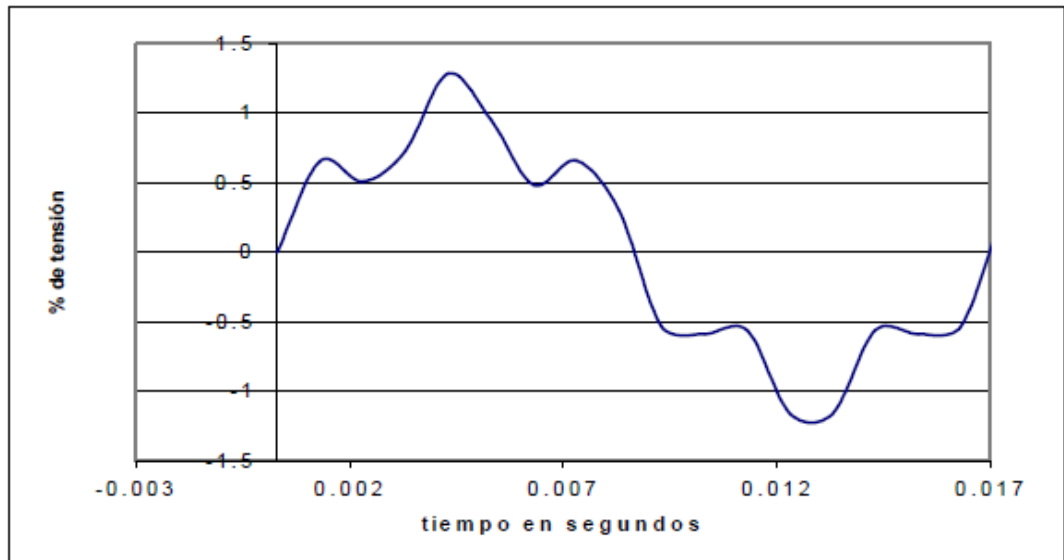


FIG. 2 Onda con contenido armónico.

Como puede observarse, el contenido armónico de esta onda ha aumentado en un 30% su valor pico.

1.3 TEORÍA DE LOS ARMÓNICOS.

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

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

Dónde:

V_0 = Valor medio de $v(t)$ (Onda en estudio).

V_1 = Amplitud de la fundamental de $v(t)$.

V_k = Amplitud del armónico de orden k de $v(t)$.

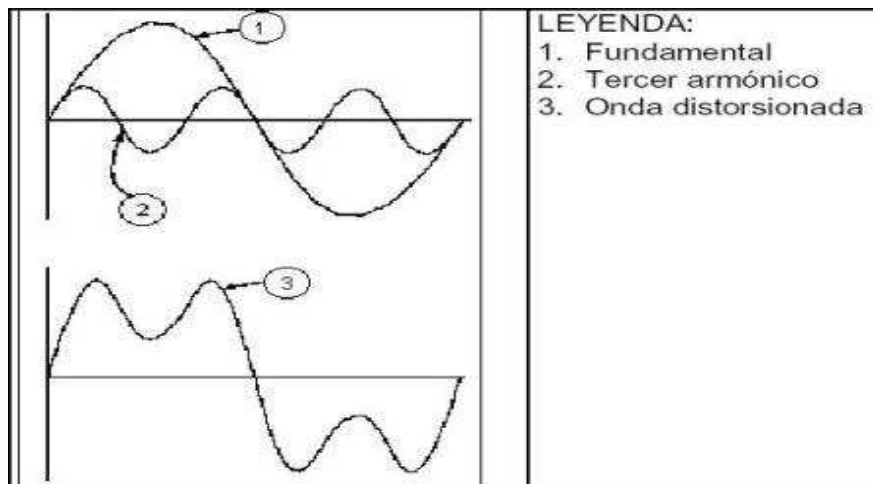


FIG. 3 Onda sinusoidal.

1.4 ORIGEN DE LOS ARMÓNICOS.

En general, los armónicos son producidos por cargas no lineales, lo cual significa que su impedancia no es constante (Está en función de la tensión). Estas cargas no lineales a pesar de ser alimentadas con una tensión sinusoidal absorben una intensidad no sinusoidal, pudiendo estar la corriente desfasada un ángulo respecto a la tensión. Existen dos categorías generadoras de armónicos:

La primera es simplemente las cargas no lineales en las que la corriente que fluye por ellas no es proporcional a la tensión. Como resultado de esto, cuando se aplica una onda sinusoidal de una sola frecuencia, la corriente resultante no es de una sola frecuencia. El origen del problema de armónicos son los receptores que consumen corrientes distorsionadas (no senoidales)²

Transformadores, reguladores y otros equipos conectados al sistema pueden presentar un comportamiento de carga no lineal y ciertos tipos de bancos de transformadores multifase conectados en estrella-estrella (Y-Y) con cargas desbalanceadas o con problemas en su puesta a tierra.

² ESTIGARRIBIA H. 2005. Armónicos en Líneas de baja tensión. Adesa –España. Pág. 4

Diodos, elementos semiconductores y transformadores que saturan son ejemplos de equipos generadores de armónicos, estos elementos se encuentran en muchos aparatos eléctricos modernos, invariablemente esta categoría de elementos generadores armónicos como lo harán siempre que estén energizados con una tensión alterna. Estas son las fuentes originales de armónicos que se generan sobre el sistema de potencia.

El segundo tipo que pueden generar armónicos son aquellos que tienen una impedancia dependiente de la frecuencia.

1.5 CONTENIDO NORMAL DE LOS ARMÓNICOS.

Los armónicos crean problemas solo cuando interfieren en la operación propia del equipo, incrementando los niveles de corriente a un valor de saturación o sobrecalentamiento del equipo o cuando causan otros problemas similares. También incrementan las pérdidas eléctricas y los esfuerzos térmicos y eléctricos sobre los equipos.

Los armónicos lo que generalmente originan son daños al equipo por sobrecalentamiento de devanados y en los circuitos eléctricos, esta es una acción que destruye los equipos por una pérdida de vida acelerada, los daños se pueden presentar pero no son reconocidos que fueron originados por armónicos.

El nivel de armónicos presente puede estar justamente abajo del nivel que pueden causar problemas, incrementar este valor límite puede presentarse en cualquier momento y pasar a un valor donde no se puede tolerar.

IEEE 519-1992 ((**Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos**)) proporciona recomendaciones para la cantidad de armónicos que pueden ser producidos y de las cantidades que pueden fluir por el sistema de potencia. Especifica límites recomendados de cuantos armónicos pueden ser inyectados al sistema por los usuarios, la tabla 4 especifica estos límites como una función de la razón de la corriente de corto circuito a la corriente de carga normal en por ciento.

Tabla 1. Límites de Distorsión de Corriente Armónica para Sistemas de Distribución (120 V hasta 69 Kv).

Máxima distorsión de corriente en por ciento de la carga (IL)						
Orden de los armónicos (armónicos impares)						
ISC/IL	2-11	11-16	17-22	23-34	Mayor de 34	Demanda Total de distorsión
< 20*	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20 < 50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50<100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100<1000	12	5.5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2.5	1.4	20
Los armónicos pares se limitan al 25 % del límite del armónico impar superior						
* Todos los equipos de generación están limitados a estos valores de distorsión independientemente de la razón Isc / IL						
Dónde: Isc: máxima corriente de cortocircuito en PCC, A IL: máxima corriente de carga (componente fundamental) en PCC, A						

Se recomienda que la corriente de carga sea calculada como la corriente promedio de la demanda máxima para los doce meses precedentes.

Esta norma establece también el límite de distorsión de tensión en el punto de conexión común –PCC-, es decir, el punto de unión entre la red del usuario y la Empresa Eléctrica.

Tensión en el punto de	Distorsión de tensión	Distorsión Total de
------------------------	-----------------------	---------------------

conexión común (PCC)	individual (%)	Tensión, THD (%)
< 69 kV	3.0	5.0

Como puede verse en la tabla anterior la estándar de IEEE 519-1992 también fija límites del total de distorsión armónica que puede existir en cualquier parte de un sistema de potencia y de cualquiera de los armónicos que puedan estar presentes. Se recomienda no más del 5 % del total de distorsión armónica en el nivel de distribución (todas las tensiones entre 2.3 y 69 kV), con no más del 3 % de distorsión atribuible a cualquier armónica.

El nivel recomendado de THD es menor para mayores tensiones, 2.5 % de 69 a 13.8 kV con ninguna contribución individual mayor de 1.5 %, para mayores tensiones el límite es 1.5 % de THD total con no más del 1 % de cualquier armónica. En general los niveles de THD en un sistema de potencia son menores a mayores tensiones, esto se debe a que es menos posible que se disipe la energía de los armónicos y por tanto se propaga a través del sistema.

ANÁLISIS DE FOURIER.

El teorema de Fourier dice que toda onda periódica no sinusoidal puede ser descompuesta como la suma de ondas sinusoidales, mediante la aplicación de la serie de Fourier, siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- Que la integral a lo largo de un periodo de la función sea un valor finito.
- Que la función posea un número finito de discontinuidades en un periodo.
- Que la función posea un número finito de máximos y mínimos en un periodo.

Cualquier función $F(x)$ con periodo $2p$ tiene su representación en series de Fourier de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Y = F(x) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \operatorname{sen}(nx) + B_n \cos(nx)]$$

En donde:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F(x) dx$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(x) \operatorname{sen}(nx) dx$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(x) \cos(nx) dx$$

$$[A_n \operatorname{sen}(nx) + B_n \cos(nx)] = R_n \operatorname{sen}(nx + \Phi_n)$$

$$R_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \qquad \Phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{B_n}{A_n} \right)$$

Con $n=1,2,3,4\dots$

Con el uso de las ecuaciones anteriores se pueden encontrar los armónicos de las ondas más comunes en los sistemas de potencia, de distribución o industriales que se presentan en la Tabla 2.

TABLA N. 2 Armónicos de las ondas más comunes

CLASE DE ONDA	DESCOMPOSICIÓN ARMÓNICA
Onda seno	$Y = a \sin \theta$
Rectificación de media onda	$Y = a/\pi + 0.5 \sin \theta - (2/1.3) \cos 2\theta - (2/3.5\pi) \cos 4\theta \dots$
Rectificación de onda completa	$Y = 2a/\pi + (2/1.3) \cos 2\theta - (2/3.5\pi) \cos 4\theta - (2/5.7) \cos 6\theta \dots$
Rectificación de M fases	$Y = (am/\pi) \sin \pi\theta/m + (2/(m^2-1)) \cos m\theta - (2/(4m^2-1)) \cos 2\theta + (2/(9m^2-1)) \cos 3m\theta \dots$
Onda triangular	$Y = 8a/\pi^2 [\sin \theta - (1/9) \sin 3\theta + (1/25) \sin 5\theta + (1/49) \sin 7\theta \dots$
Onda rectangular	$Y = 4a/\pi [\sin \theta - (1/3) \sin 3\theta + (1/5) \sin 5\theta + (1/7) \sin 7\theta \dots$
Onda de tres niveles	$Y = 3.4641a/\pi [\cos \theta - (1/5) \cos 5\theta + (1/7) \cos 7\theta + (1/11) \sin 11\theta \dots$

1.6 EQUIPOS QUE PRODUCEN LOS ARMÓNICOS.

Los armónicos son el resultado de cargas no lineales, las cuales ante una señal de tipo sinusoidal presentan una respuesta no sinusoidal. Las principales fuentes de armónicos son:

- Hornos de arco y otros elementos de descarga de arco, tales como lámparas fluorescentes.

Los hornos de arco se consideran más como generadores de armónicos de voltaje que de corriente, apareciendo típicamente todos los armónicos (2º, 3º, 4º, 5º, ...) pero predominando los impares con valores típicos con respecto a la fundamental de:

- 20% del 3er armónico
- 10% del 5º
- 6% del 7º
- 3% del 9º

Núcleos magnéticos en transformadores y máquinas rotativas que requieren corriente de tercer armónico para excitar el hierro.

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

La Figura 4 muestra el circuito correspondiente a un rectificador de 6 pulsos, el cual es prácticamente la carga generadora de armónicos más utilizada en la industria.

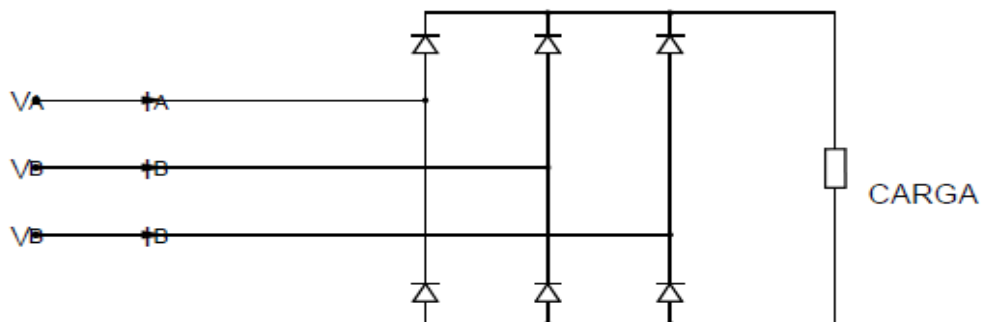


FIG. 4 Rectificador de 3 pulsos

En la Figura 5 se muestra la corriente que absorbe el rectificador de 6 pulsos para el caso en el cual su carga es resistiva y la tensión de la red es sinusoidal.

Convertidores electrónicos de potencia:

Equipos de computación, control de luminarias, ups, variadores estáticos de velocidad, plc's, control de motores, televisores, microondas, fax, fotocopadoras, impresoras, etc.

Equipos con arqueo de Electricidad:

Hornos de fundición, balastos electrónicos, equipos de soldadura eléctrica, sistema de tracción eléctrica.

Equipos ferromagnéticos:

Transformadores operando cerca del nivel de saturación, Balastos Magnéticos.

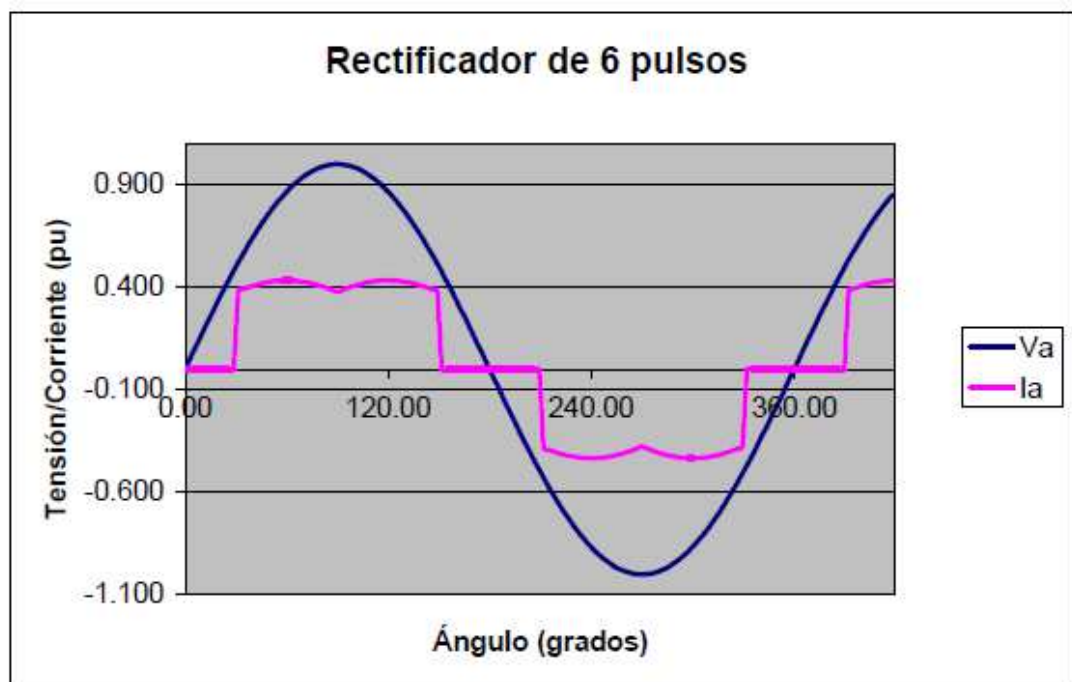


FIG. 5 Corriente de un rectificador de 6 pulsos

1.7 INFLUENCIA DE LOS ARMÓNICOS EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA.

Para los sistemas trifásicos balanceados en condiciones normales, las ondas de corriente o tensión tienen un desfase entre sí de 120° , y su secuencia de fases es positiva (A, B, C). Los armónicos de cada una de las fases, dado que su frecuencia es un múltiplo de la frecuencia fundamental, presentan unos ángulos de desfase diferentes a las formas de onda fundamentales, por lo cual estos pueden presentar diferentes secuencias de fase.

Dado un sistema trifásico en el cual las ondas fundamentales forman un sistema balanceado y las tres fases tienen la misma forma de onda podemos realizar el siguiente análisis.

Si tomamos como referencia la componente fundamental de la fase A, tenemos que las componentes fundamentales están dadas por:

$$V_A = A \angle 0^\circ \quad V_B = A \angle -120^\circ \quad V_C = A \angle 120^\circ$$

A: Amplitud de la componente fundamental.

Para el armónico de orden k su desfase j_k respecto a la fundamental es igual para las tres fases, esto es indispensable para que las formas de onda sean iguales. Por lo tanto las componentes armónicas de orden k están dadas por:

$$V_{Ak} = A_k \angle \varphi_k \quad V_{Bk} = A_k \angle (\varphi_k + \varphi_{AB}) \quad V_{Ck} = A_k \angle (\varphi_k + \varphi_{AC})$$

A_k : Amplitud del armónico k.

φ_{AB} : Ángulo de desfase entre las componentes fundamentales de las fases A y B expresado en grados del armónico k.

φ_{AC} : Ángulo de desfase entre las componentes fundamentales de las fases A y C expresado en grados del armónico k.

Un periodo de la componente fundamental es igual a k periodos del armónico de orden k, lo cual permite expresar en grados del armónico k los desfases dados en grados de la componente fundamental utilizando la ecuación:

$$\varphi_k = k\phi$$

φ_k : Ángulo de desfase dado en grados del armónico k

ϕ : Ángulo de desfase dado en grados de la componente fundamental

De donde se tiene que las componentes armónicas de orden k están dadas por:

$$V_{Ak} = A_k \angle \varphi_k \quad V_{Bk} = A_k \angle (\varphi_k + k(-120^\circ)) \quad V_{Ck} = A_k \angle (\varphi_k + k(120^\circ))$$

Para los armónicos de orden 3n (con n entero) las componentes armónicas están dadas por:

$$\begin{aligned} V_{A(3n)} &= A_{(3n)} \angle \varphi_{(3n)} \\ V_{B(3n)} &= A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)} + (3n)^* (-120^\circ)) = A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)} + n^* (-360^\circ)) = A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)}) \\ V_{C(3n)} &= A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)} + (3n)^* (120^\circ)) = A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)} + n^* (360^\circ)) = A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)}) \end{aligned}$$

Lo anterior muestra que las componentes armónicas de las tres fases se encuentran en fase entre sí, y por consiguiente, los armónicos de orden 3n son de secuencia cero.

Para los armónicos de orden (3n + 1) (con n entero) las componentes armónicas están dadas por:

$$\begin{aligned} V_{A(3n+1)} &= A_{(3n+1)} \angle \varphi_{(3n+1)} \\ V_{B(3n+1)} &= A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} + (3n+1)^* (-120^\circ)) = A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} + n^* (-360^\circ) - 120^\circ) = \\ &\quad A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} - 120^\circ) \\ V_{C(3n+1)} &= A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} + (3n+1)^* (120^\circ)) = A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} + n^* (360^\circ) + 120^\circ) = \\ &\quad A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} + 120^\circ) \end{aligned}$$

Lo anterior muestra que las componentes armónicas de las tres fases presentan desfases entre sí de 120° con la misma secuencia seguida por las componentes fundamentales, es decir, que los armónicos de orden (3n + 1) son de secuencia positiva.

Para los armónicos de orden $(3n - 1)$ (con n entero) las componentes armónicas están dadas por:

$$\begin{aligned}
 V_{A(3n-1)} &= A_{(3n-1)} \angle \varphi_{(3n-1)} \\
 V_{B(3n-1)} &= A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} + (3n-1) * (-120^\circ)) = A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} + n * (-360^\circ) + 120^\circ) = \\
 &\quad A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} + 120^\circ) \\
 V_{C(3n-1)} &= A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} + (3n-1) * (120^\circ)) = A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} + n * (360^\circ) - 120^\circ) = \\
 &\quad A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} - 120^\circ)
 \end{aligned}$$

Lo anterior muestra que las componentes armónicas de las tres fases presentan desfases entre sí de 120° con una secuencia contraria a la seguida por las componentes fundamentales, es decir, que los armónicos de orden $(3n - 1)$ son de secuencia negativa.

La Tabla 3 muestra la regla que sigue la secuencia de fases de los diferentes armónicos.

TABLA N. 3 Secuencia de los armónicos

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

La secuencia seguida por los armónicos es importante para analizar sus efectos, obteniéndose las siguientes conclusiones:

- En sistemas trifásicos, los armónicos de orden $3n$ de corriente solo se pueden propagar cuando es posible un retorno por neutro.
- Los armónicos de orden $(3n + 1)$ en tensión generan en los motores un campo giratorio en el mismo sentido de la componente fundamental.
- Los armónicos de orden $(3n - 1)$ en tensión generan en los motores un campo giratorio en sentido contrario al generado por la componente fundamental.

Debe tenerse en cuenta que las conclusiones sobre secuencia de los armónicos solo son válidas cuando el sistema trifásico está balanceado y las formas de onda de las tres fases son idénticas.

En la práctica, pueden encontrarse diferencias entre las tres fases del sistema, tal como se muestra en la Figura 6. Lo anterior conduce a que los armónicos puedan tener componentes de diferentes secuencias a las obtenidas en el caso ideal planteado.

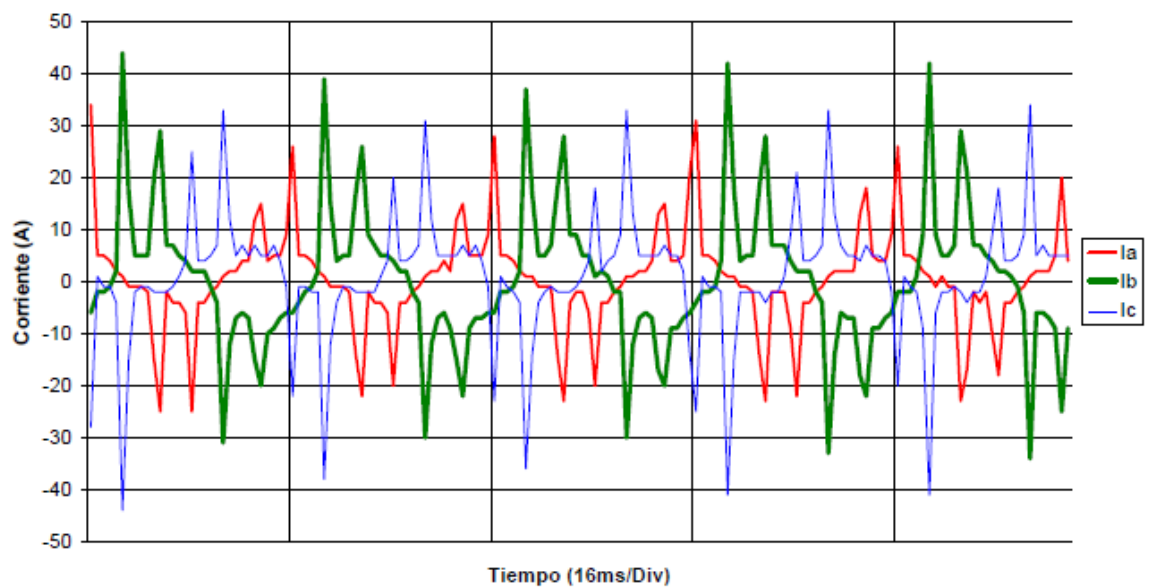


FIG. 6 Sistema trifásico con diferentes formas de onda

Efectos de los armónicos.

Los efectos producidos por las armónicas en los componentes de los sistemas eléctricos han sido analizados tanto para circuitos particulares como para toda una red interconectada, no obstante en algunos casos es muy difícil cuantificarlos en forma específica puesto que dependen de muchos factores. A continuación se presentará un compendio de los mismos, citando las referencias correspondientes.

Efecto en cables y conductores: al circular corriente directa a través de un conductor se produce calentamiento como resultado de las pérdidas por efecto Joule, I^2R , donde R es la resistencia a corriente directa del cable y la

corriente está dada por el producto de la densidad de corriente por el área transversal del conductor. A medida que aumenta la frecuencia de la corriente que transporta el cable (manteniendo su valor rms igual al valor de corriente directa) disminuye el área efectiva por donde ésta circula puesto que la densidad de corriente crece en la periferia exterior (Figura 7), lo cual se refleja como un aumento en la resistencia efectiva del conductor.



FIG. 7 Densidades de corriente en un mismo conductor (a) corriente directa (b) corriente de alta frecuencia.

Por lo tanto, la resistencia a corriente alterna de un conductor es mayor que su valor a corriente directa y aumenta con la frecuencia, por ende también aumentan las pérdidas por calentamiento.

A frecuencia de 60 Hz, este efecto se puede despreciar, no por que no exista, sino porque este factor se considera en la manufactura de los conductores³.

Sin embargo con corrientes distorsionadas, las pérdidas por efecto Joule son mayores por la frecuencia de las componentes armónicas de la corriente. La Tabla 4 muestra la razón entre la resistencia de alterna y la de directa producida por el efecto piel en conductores redondos, a frecuencias de 60 y 300 Hz.

TABLA N. 4 Ejemplo de efecto piel en conductores

³ J. R. LINDERS, 2001 "Electric Wave Distortions: Their Hidden Costs and Containment," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-15, NO. 5, pp. 458-471, Sept./Oct.,

Tamaño del conductor	Resistencia AC / Resistencia DC	
	60 Hz	300 Hz
300 MCM	1.01	1.21
450 MCM	1.02	1.35
600 MCM	1.03	1.50
750 MCM	1.04	1.60

Efecto en transformadores: la mayoría de los transformadores están diseñados para operar con corriente alterna a una frecuencia fundamental (50 ó 60 Hz), lo que implica que operando en condiciones de carga nominal y con una temperatura no mayor a la temperatura ambiente especificada, el transformador debe ser capaz de disipar el calor producido por sus pérdidas sin sobrecalentarse ni deteriorar su vida útil. Las pérdidas en los transformadores consisten en pérdidas sin carga o de núcleo y pérdidas con carga, que incluyen las pérdidas I^2R , pérdidas por corrientes de eddy y pérdidas adicionales en el tanque, sujetadores, u otras partes de hierro. De manera individual, el efecto de las armónicas en estas pérdidas se explica a continuación:

Pérdidas sin carga o de núcleo: producidas por el voltaje de excitación en el núcleo. La forma de onda de voltaje en el primario es considerada senoidal independientemente de la corriente de carga, por lo que no se considera que aumentan para corrientes de carga no senoidales.⁴

Aunque la corriente de magnetización consiste de armónicas, éstas son muy pequeñas comparadas con las de la corriente de carga, por lo que sus efectos en las pérdidas totales son mínimos.

Pérdidas I^2R : si la corriente de carga contiene componentes armónicas, entonces estas pérdidas también aumentarán por el efecto piel.

⁴ L. W. PIERCE, 1996 "Transformer Design and Application Consideration for Nonsinusoidal Load Currents," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, NO. 3, pp. 633-645, May/June.

Pérdidas por corrientes de eddy: estas pérdidas a frecuencia fundamental son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia, razón por la cual se puede tener un aumento excesivo de éstas en los devanados que conducen corrientes de carga no senoidal (y por lo tanto en también en su temperatura). Estas pérdidas se pueden expresar como:

$$P_e = P_{e,R} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2$$

donde:

h = armónica

I_h = corriente de la armónica h , en amperes

I_R = corriente nominal, en amperes

$P_{e,R}$ = pérdidas de eddy a corriente y frecuencia nominal

Pérdidas adicionales: estas pérdidas aumentan la temperatura en las partes estructurales del transformador, y dependiendo del tipo de transformador contribuirán o no en la temperatura más caliente del devanado. Se considera que varían con el cuadrado de la corriente y la frecuencia, como se muestra en la ecuación⁵.

$$P_{AD} = P_{AD,R} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h$$

donde:

$P_{AD,R}$ = pérdidas adicionales a corriente y frecuencia nominal

Aun dado a estas pérdidas, algunas cargas no lineales presentan una componente de corriente directa en la corriente de carga. Si este es el caso, esta componente aumentará las pérdidas de núcleo ligeramente, pero incrementarán substancialmente la corriente de magnetización y el nivel de sonido audible, por lo que este tipo de cargas se debe evitar.

⁵ E. J. CURRENCE, 1995. "Harmonic Resonance at a Medium-Sized Industrial Plant," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, NO. 4, pp. 682-690, July/Aug.

En el caso de transformadores conectados en delta - estrella (comúnmente de distribución) que suministran cargas no lineales monofásicas como pueden ser fuentes reguladas por conmutación, las armónicas “triplen” (múltiplos de 3) circularán por las fases y el neutro del lado de la estrella, pero no aparecerán en el lado de la delta (caso balanceado), ya que se quedan atrapadas en ésta produciendo sobrecalentamiento de los devanados.

Se debe tener especial cuidado al determinar la capacidad de corriente de estos transformadores bajo condiciones de carga no lineal puesto que es posible que los volts-amperes medidos en el lado primario sean menores que en el secundario.

Con el constante aumento de cargas no lineales, se han llevado a cabo estudios para disminuir la capacidad nominal de los transformadores ya instalados que suministran energía a este tipo de cargas; un ejemplo de este caso se puede encontrar en.

Además, en el caso de transformadores que operarán bajo condiciones de carga no lineal, es conveniente en lugar de sobredimensionar el transformador, utilizar un transformador con un factor K mayor a 1.

Estos transformadores son aprobados por UL (Underwriter’s Laboratory) para su operación bajo condiciones de carga no senoidal, puesto que operan con menores pérdidas a las frecuencias armónicas. Entre las modificaciones con respecto a los transformadores normales están:

El tamaño del conductor primario se incrementa para soportar las corrientes armónicas “triplen” circulantes. Por la misma razón se dobla el conductor neutro.

Se diseña el núcleo magnético con una menor densidad de flujo normal, utilizando acero de mayor grado, y utilizando conductores secundarios

aislados de menor calibre, devanados en paralelo y transpuestos para reducir el calentamiento por el efecto piel.

El factor K se puede encontrar mediante un análisis armónico de la corriente de la carga o del contenido armónico estimado de la misma. La ecuación que lo define es:

$$\text{factor K} = \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[I_{h(\text{pu})} \right]^2 h^2$$

donde:

h = armónica

$I_{h(\text{pu})}$ = corriente armónica en p.u. tomando como base la corriente I_{rms}

Con el valor del factor K de la corriente de la carga, se puede escoger el transformador adecuado.

La Tabla 5 muestra los valores comerciales de transformadores con factor K

K- 4
K- 9
K- 13
K- 20
K- 30
K- 40

En esta misma referencia se puede encontrar una lista del factor K estimado de un buen número de cargas no lineales comunes.⁶

Efecto en interruptores (circuit breakers): los fusibles e interruptores termomagnéticos operan por el calentamiento producido por el valor rms de la corriente, por lo que protegen de manera efectiva a los conductores de fase y al equipo contra sobrecargas por corrientes armónicas.

⁶ G. W. MASSEY, 1995. "Power Distribution Systems Design for Operation Under Nonsinusoidal Load Conditions," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, NO. 3, pp. 513-519, May/June.

Por otro lado, la capacidad interruptiva no se ve afectada por las componentes armónicas en los sistemas eléctricos puesto que durante condiciones de falla, las fuentes que contribuyen a la misma son de frecuencia fundamental.

Efecto en las barras de neutros]: dado que este es el primer punto de unión de los neutros de las cargas monofásicas, en el caso balanceado, las corrientes (fundamental y armónicas) de secuencia positiva y negativa se cancelan aquí.

Estas barras pueden llegar a sobrecargarse por el efecto de cancelación de las componentes armónicas de secuencia positiva y negativa entre los conductores neutros que sirven diferentes cargas.

En el caso de corrientes armónicas de secuencia cero (armónicas “triplen”), estas no se cancelarán en el neutro aun con condiciones balanceadas, por lo que estas barras se pueden sobrecargar por el flujo de estas corrientes. En la realidad, las barras de neutros transportan corrientes de secuencia positiva y negativa producidas por el desbalance de cargas más las armónicas “triplen” de secuencia cero generadas por éstas.

Por esta razón las barras que están dimensionadas para soportar la misma corriente de fase pueden sobrecargarse fácilmente en presencia de cargas no lineales. En el caso de que se estén alimentando cargas no lineales, es recomendable que las barras de neutros tengan una capacidad de corriente igual al doble de la de las fases.

Efecto en los bancos de capacitores: el principal problema que se puede tener al instalar un banco de capacitores en circuitos que alimenten cargas no lineales es la resonancia tanto serie como paralelo, como se muestra en la Figura 8. A medida que aumenta la frecuencia, la reactancia inductiva del circuito equivalente del sistema de distribución aumenta, en tanto que la reactancia capacitiva de un banco de capacitores disminuye.

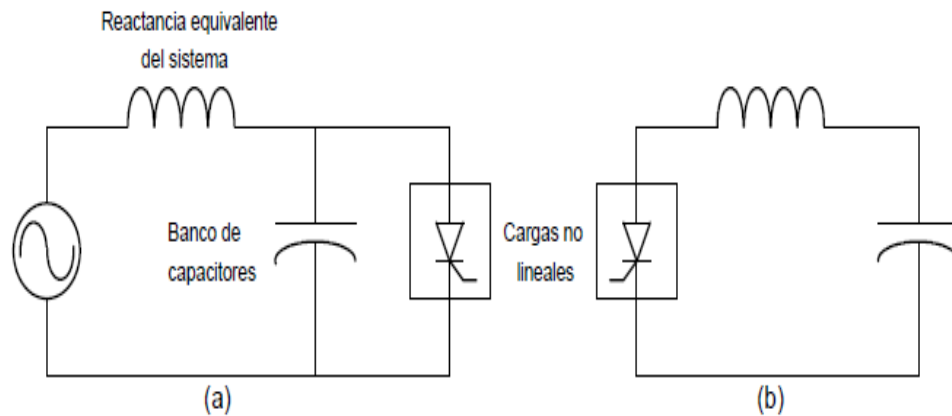


FIG. 8 Circuitos que ejemplifican (a) Resonancia paralelo y (b) resonancia en serie

Resonancia paralelo: la Figura 8 (a) muestra el circuito equivalente para el análisis de la resonancia paralelo en un sistema eléctrico. La carga no lineal inyecta al sistema corrientes armónicas, por lo que el efecto de dichas corrientes se puede analizar empleando el principio de superposición. De esta manera, el circuito equivalente a distintas frecuencias se puede dibujar Como Fig 9:

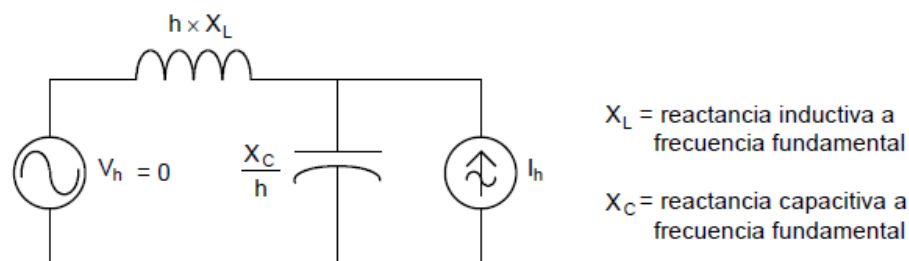


FIG. 9 Circuito equivalente para el análisis del sistema a frecuencias armónicas.

En general, la fuente de voltaje V_h vale cero (cortos circuitos), puesto que sólo presenta voltaje a frecuencia fundamental. Entonces a frecuencias armónicas, el circuito equivalente visto por la carga (fuente de corrientes armónicas) será una inductancia y capacitancia en paralelo, por lo que la frecuencia de resonancia se tendrá cuando:

$$f = f_1 \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$$

donde

f_1 = frecuencia fundamental

Si la carga inyecta una corriente armónica de una frecuencia igual o cercana a la frecuencia de resonancia paralela del sistema, entonces las corrientes y voltajes experimentarán una amplificación puesto que la admitancia equivalente se acerca a cero (impedancia muy alta).

Esto produce los problemas de calentamiento inherentes a las corrientes armónicas (en cables, transformadores, interruptores), la operación de fusibles, y el posible daño o envejecimiento prematuro de equipo.

Resonancia Serie: esta resulta en un circuito como el mostrado en la Figura 8 (b). En este caso la expresión matemática de la frecuencia de resonancia es la misma que muestra la ecuación, la diferencia es que ahora el circuito presenta una trayectoria de baja impedancia a las corrientes armónicas (casi un corto circuito). Esta resonancia causará problemas similares a los que se tienen en el caso de la resonancia paralelo.

Una forma de minimizar los problemas de resonancia por la instalación de bancos de capacitores consiste en distribuir los mismos en diferentes puntos del sistema, para alejar la frecuencia de resonancia a valores más altos.

También es importante considerar que los capacitores se deben conectar en delta y/o estrella no aterrizada (para evitar atraer las armónicas “triplen”) en sistemas menores a 69 kV .

Efecto en los motores de inducción: fundamentalmente, las armónicas producen los siguientes efectos en las máquinas de corriente alterna: un aumento en sus pérdidas y la disminución en el torque generado.

Este ha sido el tema de análisis de muchos artículos por su importancia en la industria y a continuación se mostrará un estudio simplificado de estos efectos en base a las referencias citadas.

Pérdidas en los motores de inducción: si el voltaje que se alimenta a un motor de inducción contiene componentes armónicas, entonces se incrementarán sus pérdidas I^2R en el rotor y estator, pérdidas de núcleo (eddy e histéresis) y pérdidas adicionales, en tanto que las pérdidas de fricción y ventilación no son afectadas por las armónicas. En forma más detallada, tenemos el siguiente análisis de las pérdidas.

Pérdidas I^2R en el estator: según IEEE (**Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos**), una asociación técnico-profesional mundial dedicada a la estandarización), las pérdidas en el estator son determinadas utilizando la resistencia a corriente directa de la máquina, corregida a la temperatura especificada. Al operar la máquina de inducción con voltajes con contenido armónico no sólo aumentan estas pérdidas por el efecto piel que incrementa el valor de la resistencia efectiva, sino que también aumenta el valor de la corriente de magnetización, incrementándose aún más las pérdidas I^2R .

Pérdidas I^2R en el rotor: éstas aumentan de manera más significativa que las anteriores, por el diseño de la jaula en los motores de inducción que se basa en el aprovechamiento del efecto piel para el arranque. Esta resistencia aumenta en forma proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia y por ende las pérdidas.

Pérdidas de núcleo: estas pérdidas son función de la densidad de flujo en la máquina. Éstas aumentan con excitación de voltaje no senoidal puesto que se tienen densidades de flujo pico más elevadas, sin embargo su aumento es aún menor que el de las pérdidas mencionadas anteriormente e incluso son más difíciles de cuantificar.

Pérdidas adicionales: son muy difíciles de cuantificar aun bajo condiciones de voltaje senoidal. Al aplicar voltaje no senoidal, éstas aumentan en forma particular para cada máquina.

Torque en el motor de inducción: las armónicas de secuencia positiva producen en el motor de inducción un torque en el mismo sentido de la dirección de rotación, en tanto que las de secuencia negativa tienen el efecto opuesto. En caso de que se tenga conectado el neutro, el par producido por las armónicas “triplen” es igual a cero.

Dependiendo del contenido armónico del voltaje aplicado, el par promedio de operación puede verse disminuido considerablemente, sin embargo en la mayoría de los casos el efecto producido por las armónicas de secuencia negativa se cancela con el efecto de las de secuencia positiva, por lo que su efecto neto en el par promedio puede despreciarse.

La interacción de las corrientes armónicas del rotor con el flujo en el entrehierro de otra armónica resultan torques pulsantes en los motores, los que pueden afectar la calidad del producto donde las cargas de los motores son sensibles a estas variaciones [8]. Estos torques pulsantes también pueden excitar una frecuencia de resonancia mecánica lo que resultaría en oscilaciones que pueden causar fatiga de la flecha y otras partes mecánicas conectadas. Por lo general la magnitud de estos torques es generalmente pequeña y su valor promedio es cero.

Efectos en otros equipos: equipos electrónicos sensitivos son susceptible a operación incorrecta a causa de las armónicas. En algunos casos estos equipos dependen de la determinación precisa del cruce por cero del voltaje u otros aspectos de la forma de onda del mismo, por lo que condiciones de distorsión pueden afectar su operación adecuada.

En lo que respecta a equipo de medición e instrumentación éstos son afectados por las componentes armónicas, principalmente si se tienen

condiciones de resonancia que causen altos voltajes armónicos en los circuitos.

Para el caso de medidores se pueden tener errores positivos o negativos, dependiendo del tipo de medidor y de las armónicas involucradas.

CAPITULO II

SIMULADOR DE CARGAS NO LINEALES.

2.1 INTRODUCCIÓN.

Los sistemas eléctricos de corriente alterna son diseñados para operar con tensiones y corrientes sinusoidales. Sin embargo, las cargas no lineales y/o variantes con el tiempo distorsionan las formas de onda de tensión y corriente en estado estable provocando la aparición de las componentes armónicas.

El análisis de la generación y propagación de tales componentes a través del sistema eléctrico se denomina flujo de potencia armónica.

Los estudios de armónicos son utilizados para cuantificar la distorsión de las ondas de tensión y corriente en varios puntos en un sistema eléctrico y determinar si existen condiciones resonantes que deban ser mitigadas.

La investigación se ha centrado en la evaluación del flujo de potencia armónico en las redes eléctricas; esto condujo a la disponibilidad de una gran variedad de programas de computador en donde se implementan técnicas de formulación y solución de los problemas de propagación armónica.

2.2 SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS CARGAS NO LINEALES.

En la simulación de circuitos y sistemas debe existir un equilibrio entre la complejidad de los modelos y el tiempo de simulación necesario para obtener resultados dentro de una incertidumbre especificada.

Representación de sistemas de electrónica de potencia.

Generalmente, no se representan todos los elementos; lo que debe simularse es la característica en terminales del subsistema. De esta forma puede sugerirse el siguiente procedimiento para reducir la complejidad del modelo⁷.

1. Utilizar elementos equivalentes para combinaciones serie y paralelo.
2. Utilizar el modelo más simple para cada aplicación.
3. Representar sólo las características en terminales del elemento.
4. Utilizar modelos modulares para sistemas a gran escala.

Errores de simulación.

Los errores de simulación pueden provenir de la aproximación de los modelos del sistema, elementos de circuito adicionados para control de oscilación numérica, truncamiento relacionado con el paso de integración, estructura del programa y métodos de solución o condiciones iniciales incorrectas.

El paso de integración recomendado no debe superar 1/5 a 1/20 del periodo de la frecuencia más alta de interés. Para reducir los errores por condiciones iniciales se permite al programa ejecutar un periodo de tiempo para alcanzar una condición inicial corregida.

Para simulaciones en corriente continua el tiempo total de simulación debe ser mayor a tres veces la constante de tiempo (τ) más grande.

En sistemas de corriente alterna se deben simular varios ciclos para permitir la estabilización de la forma de onda.

⁷ **A. SHABAN, 2009.** “A MATLAB/SIMULINK Based Tool for Power Electronic Circuits”. Proceedings of World Academy of Science Engineering and Technology. Vol. 37, pp. 274-279. January

MODELOS DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA.

Los componentes del sistema pueden ser elementos de características lineal o no lineal. A continuación se describen los modelos de los principales elementos y subsistemas utilizados.

Modelo de la red lineal.

El modelo de una red lineal trifásica se realiza en el dominio de la frecuencia y por fase para permitir el tratamiento de circuitos desequilibrados.

Modelo de las cargas.

Las cargas se pueden representar en forma agregada en un punto determinado del sistema. La carga se modela con una conductancia G en paralelo con una susceptancia B , a partir de la potencia activa (P) y reactiva (Q) consumidas en cada fase, y la tensión nominal (V) a frecuencia fundamental.

Líneas de transmisión.

Una línea de transmisión se compone de resistencia, inductancia y capacitancia distribuidas en su longitud. Una línea equilibrada de longitud media puede ser modelada mediante su equivalente π (Figura 10).

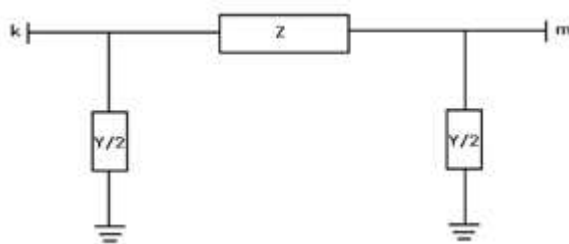


Figura 10. Equivalente π de una línea de transmisión

Transformadores.

La matriz de admitancias de nodo de los transformadores se forma a partir de las matrices de admitancia de ramas obtenidas de cada devanado y las de la admitancia de la rama de magnetización.

La matriz que relaciona las tensiones (V_{rama}) y corrientes (I_{rama}) en los devanados del transformador es la matriz de admitancia de devanados, definida por:

$$I_{rama} = Y_{rama} * V_{rama}$$

A partir de esta matriz se obtiene la matriz de admitancias nodales por medio de una matriz (C) que la relaciona al grupo de conexión del transformador de la siguiente manera:

$$V_{rama} = C * V_{nodo}$$

$$I_{nodo} = C^t * I_{rama}$$

Sustituyendo se obtiene:

$$Y_{nodo} = C^t * Y_{rama} * C$$

La matriz Y_{rama} se puede ordenar en submatrices que representan los acoplamientos primarios, secundarios y mutuos, como se muestra en la ecuación.

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{pp} & Y_{ps} \\ Y_{sp} & Y_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \\ V_s \end{bmatrix}$$

Fuentes de tensión y corriente.

Debido a que se trabaja con equivalentes Norton, y para evitar singularidades en la matriz de impedancias, todas las fuentes de tensión se consideran en serie con una impedancia. Ver Figura 11.

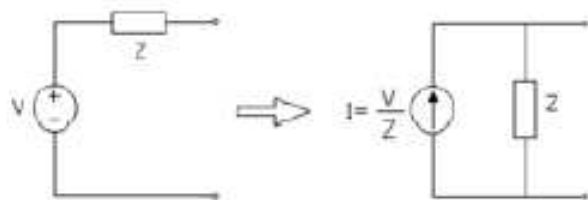


FIG. 11 Equivalente Norton de una fuente de tensión

Filtros pasivos.

Estos filtros, en serie o paralelo, atenúan las componentes armónicas y compensan el factor de potencia a la frecuencia fundamental.

Cargas no lineales.

En las redes eléctricas los sistemas no lineales generalmente están representados por los semiconductores de potencia y la saturación de los núcleos de los transformadores.

Semiconductores.

Los elementos semiconductores pueden ser analizados con una conductancia no lineal dada por la relación entre tensión (u) e intensidad (i) descrita por:

$$i=gn(u) \quad (6)$$

Si esta conductancia está conectada a un circuito resistivo lineal, cuyo equivalente Norton en bornes de la resistencia es:

$$i=iN - g.u$$

La obtención de la tensión y la corriente será el resultado de la solución de la ecuación no lineal.

$$gn(u)=iN - g.u$$

La solución de esta ecuación se obtiene por medio de un método iterativo, al hallar los valores de i_0 y u_0 . En un circuito con fuentes de corriente alterna, el valor del equivalente Norton en bornes de la resistencia no lineal cambia en cada instante de tiempo, debido a esto se tiene que obtener el circuito discreto asociado cada vez que se avance en un paso de la simulación. El proceso iterativo para calcular el equivalente Norton se debe actualizar en cada instante de tiempo.

Al trabajar con circuitos linealizados por tramos, se hace el proceso más eficiente y práctico. En este caso, las resistencias o conductancias tendrán valores distintos en cada tramo m , que se define por:

- Las intensidades límite que definen la extensión del tramo: i_{m-1} e i_m .
- La tensión de una de las intensidades límite: u_{m-1} .
- La conductancia de cada tramo g_m .

Con estos valores se obtiene el equivalente Norton del tramo m , cuando la corriente de la resistencia no lineal está entre i_{m-1} e i_m . Las ecuaciones son:

$$i(t_n) = g_m u(t_n) + i'_m$$

$$i'_m = i_{m-1} - g_m u_{m-1}$$

El equivalente lineal a tramos es como en la Figura 12.

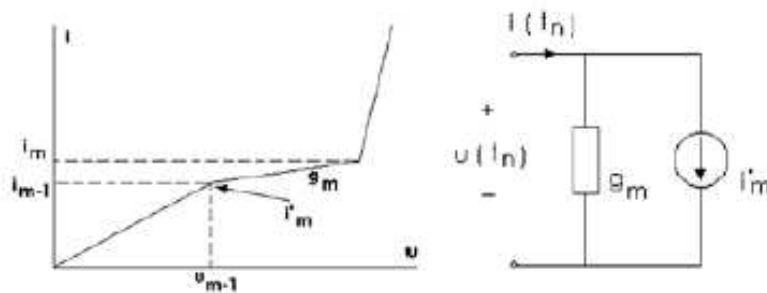


FIG. 12 Circuito lineal por tramos y su equivalente Norton.

El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Para un tramo dado, se incluyen los parámetros del equivalente Norton en la matriz de admitancias del sistema y en el vector de corrientes, obteniéndose así las tensiones y corrientes en el elemento.
- Se comprueba si estas magnitudes están dentro del tramo elegido. Si no, se analiza el equivalente Norton del tramo en el que esté comprendida la corriente obtenida y se regresa al paso anterior.

Los semiconductores, modelados como interruptores, son resistencias no lineales con dos posibles estados, baja impedancia o alta impedancia. La característica lineal por tramos de un diodo es:

$$i = g_m u \text{ para } i > 0$$

$$i = 0 \text{ para } i < 0$$

Donde gm es una conductancia de valor muy alto, idealmente infinito.

La característica tensión-corriente de los tiristores es determinada por el disparo de compuerta, que hace que el elemento pase del estado de bloqueo al de conducción si se encuentra polarizado directamente.

Este disparo ocurre un tiempo después del cruce por cero con pendiente positiva de la tensión del elemento.

2.3 ARMÓNICOS MEDIDOS EN CARGAS COMERCIALES.

En teoría, en un sistema de distribución eléctrica, las corrientes y tensiones tienen una forma de onda sinusoidal perfecta, un factor de potencia igual a la unidad y están equilibradas, es decir, las tensiones y corrientes de cada fase tienen magnitudes idénticas y éstas están desfasadas exactamente 120 grados.

En la práctica, debido principalmente a la naturaleza de las cargas que introduce el usuario, se produce una distorsión de las corrientes y de las tensiones y se deteriora el equilibrio entre las fases [1]. A lo largo de las dos últimas décadas la situación se ha venido empeorando y las redes actuales presentan tensiones y corrientes distorsionadas, e incluso en su estado estable, no pueden considerarse como un “régimen sinusoidal equilibrado”.

Entre las causas de esta situación se pueden citar:

Las corrientes armónicas introducidas por cargas no lineales como son los rectificadores monofásicos y trifásicos, los hornos de arco, compensadores estáticos-variables, etc.

Las corrientes interarmónicas producidas por hornos de arcos de c.a. y de c.c., motores de c.a., etc.

Los desequilibrios producidos por cargas monofásicas conectadas al sistema trifásico.

El parpadeo producido por cargas fluctuantes.

Las variaciones de tensión (caídas e interrupciones de tensiones) causadas por averías en la red, caída de rayos, etc.

En un mercado no regulado, en el que muchas compañías compiten por hacerse con los usuarios de la misma red, la calidad de la energía supone una preocupación importante, puesto que la responsabilidad de suministrar una “energía limpia” está repartida. A fin de preservar la buena calidad de la energía en la red, es fundamental disponer de un conjunto de normas que especifiquen claramente los límites que se deben imponer a las cargas y a las redes.

El objetivo es proporcionar un entorno en el que se consiga la compatibilidad electromagnética (EMC), definida en una norma de la IEC [2] como:

“La capacidad de un equipo o de un sistema de funcionar satisfactoriamente en su entorno electromagnético sin introducir perturbaciones electromagnéticas intolerables fuera de ese entorno.”

El problema de la compatibilidad electromagnética.

El problema de la compatibilidad electromagnética tiene dos caras. Los equipos de los usuarios conectados a la red causan perturbaciones en ésta, y esas perturbaciones afectan al funcionamiento correcto de otros equipos de la red.

Para asegurar la compatibilidad es necesario controlar el nivel máximo de perturbación que puede estar presente en cualquier punto de la red y establecer un nivel de perturbación al cual todos los equipos sean inmunes.

La red es muy grande y está lejos de ser homogénea. Por ejemplo, la impedancia en el punto de conexión depende de la estructura y “robustez” de la red local y la densidad de equipos varía enormemente. Cada equipo introduce alguna perturbación que de algún modo se suma a la producida por los otros equipos. Se han desarrollado normas para los equipos para garantizar que:

Los niveles de emisión de cada clase de equipos sean tales que la conexión de un equipo a la red no aumente indebidamente el nivel total de la perturbación. El equipo no sea sensible a los niveles de perturbación que pueden esperarse en la red.

Interpretación de los niveles de compatibilidad.

Existen varios parámetros que es necesario especificar y controlar:

1. Nivel de emisión (EL)
2. Nivel de inmunidad (IL)
3. Nivel de compatibilidad (CL).
4. Límite de emisión (E).
5. Límite de inmunidad (I).

Y en redes de media y alta tensión:

1. Nivel de planificación (PL).
2. Estos límites y niveles se describen en los apartados siguientes.

Nivel de emisión (EL).

El nivel de emisión es el nivel de distorsión introducido por una determinada carga en un lugar determinado. Su valor depende principalmente de dos factores:

De las características del equipo, incluso de las variaciones inherentes a los equipos fabricados en serie, y De las características de la red de suministro eléctrico en el punto de conexión.

Aunque los equipos están diseñados y fabricados para ajustarse a una norma, que incluye el nivel de emisiones permitido, cada una de las unidades específicas de los equipos producidos en serie presentarán inevitablemente pequeñas diferencias en cuanto a la emisión de perturbaciones.

Los equipos se someten a “ensayos tipo” para verificar que se cumplen los requisitos exigidos por las normas, pero la variaciones en los componentes y los detalles exactos de montaje dan como resultado pequeñas variaciones en el nivel de emisión.

Esto implica que el nivel de la perturbación producida en una determinada red por diferentes ejemplares de equipos iguales será diferente.

Dado que muchas perturbaciones se manifiestan como variaciones o distorsiones de la corriente absorbida por el equipo, la perturbación resultante, medida como perturbación de tensión, dependerá de la impedancia de la red de suministro, que a veces se expresa como potencia de cortocircuito.

Aspectos estadísticos del nivel de emisión.

La red tiene un número muy grande de cargas conectadas a ella, cada una con su propio nivel de emisión.

Debido a las diferencias en la impedancia de la red (nivel de cortocircuito), la densidad espacial de las cargas y sus condiciones operativas, los niveles de emisión medidos en puntos diferentes de la red serán distintos. En otras palabras, el valor del nivel de emisión medido se distribuye estadísticamente como se muestra en la Figura 13.

El gráfico muestra la probabilidad (p) de encontrar un determinado valor del nivel de emisión de una perturbación determinada. Como algunos rangos de valores de emisión son más frecuentes, la probabilidad de que se presenten es mayor.

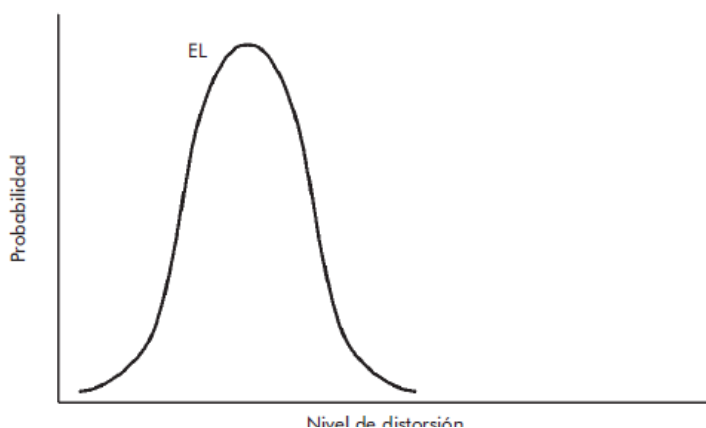


Figura 13 - Distribución del nivel de emisión.

La perturbación de fondo está constituida por la contribución de las perturbaciones procedentes de muchos equipos. Algunas perturbaciones tienen una naturaleza esencialmente aleatoria, ya que su fase y magnitud no están relacionadas con la perturbación producida por otros equipos.

El resultado es que, para estas perturbaciones, el efecto de añadir un nuevo equipo al sistema no es simplemente aditivo. Sin embargo, hay algunas perturbaciones importantes, como las corrientes del tercer armónico y las caídas de tensión derivadas de ellas, que son aditivas localmente.

Nivel de inmunidad (IL).

Cada equipo está diseñado y fabricado conforme a una norma que exige que sea inmune a las perturbaciones que estén por debajo de un determinado nivel.

El nivel de inmunidad (IL) es el valor máximo de una perturbación presente en la red que no degrada el comportamiento de un equipo concreto bajo las condiciones de ensayo.

En la práctica, la inmunidad de un equipo a la perturbación viene afectada también por otros factores.

Por ejemplo, las tolerancias de los componentes y los detalles exactos del montaje afectan al nivel de inmunidad respecto a las muestras en las que se han efectuado los “ensayos tipo”, y también es probable que introduzcan variaciones las condiciones de la instalación, tales como las longitudes de los cables y los procedimientos de puesta a tierra.

En consecuencia, el nivel de inmunidad de un equipo también se distribuye estadísticamente de la misma forma que el nivel de emisión (Figura anterior).

Nivel de compatibilidad (CL).

Las perturbaciones producidas por una carga determinada se combinan para crear un nivel de perturbación en todas las líneas de la red. El nivel de perturbación será mayor en unas líneas que en otras, dependiendo de su impedancia y de la carga que tengan conectada, y variará con la hora del día, con el día de la semana y con la época del año.

El nivel de compatibilidad se define como el nivel de perturbación que no debe ser superado por el 95% de las mediciones efectuadas en toda la red.

Hay que tener en cuenta que el nivel de compatibilidad es un valor estadístico que caracteriza el estado de toda la red, por lo que no puede utilizarse para describir la situación de una línea determinada. Véase la Figura 14, que muestra las medidas sucesivas del nivel de distorsión (DL) de una perturbación particular en todas las líneas de la red a lo largo de una semana.

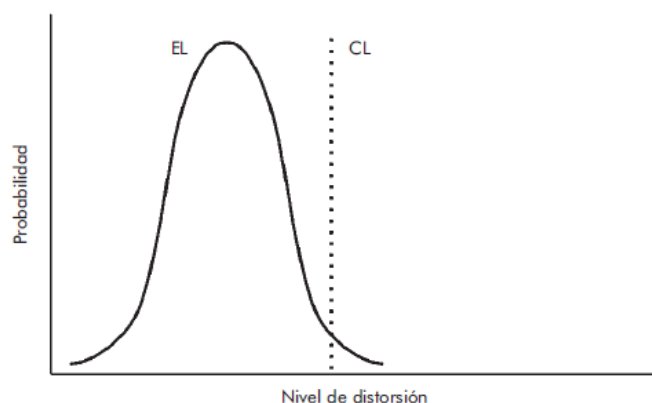


Figura 14 - Nivel de compatibilidad.

El nivel de compatibilidad se define absolutamente, por ejemplo, los niveles de compatibilidad para algunas tensiones armónicas en redes de b.t., que se muestran en la **Tabla 5**, se expresan como un porcentaje de la componente fundamental de la tensión. Sin embargo, los niveles de perturbación con los que están relacionados (al nivel del 95%) son estadísticos, ya que son el resultado del efecto de un gran número de variables.

Armónico	CL [%]
5	6
7	5
11	3.5
13	3

Tabla 5 - Niveles de compatibilidad de tensiones armónicas de baja tensión.

Aunque es sencillo especificar la magnitud del nivel de compatibilidad, la definición de las especificaciones de diseño del equipo y las reglas de planificación de la red que permiten alcanzarlo es una tarea bastante más complicada que depende mucho de la experiencia operativa. El límite de emisión que se describe en el apartado siguiente es un componente del nivel de compatibilidad.

Límite de emisión (E).

El límite de emisión es el valor máximo permitido para el nivel de emisión generado por un equipo determinado. Hay que tener en cuenta que el límite de emisión se aplica a un solo equipo, mientras que el nivel de compatibilidad se refiere a toda la red. Los límites de emisión se pueden verificar mediante ensayos, desechando los diseños de equipos que no los cumplan.

En la práctica el control de este proceso se deja en manos del mercado, dejando a los fabricantes los ensayos de sus diseños, y a los usuarios la tarea de informar sobre los equipos que no cumplan los límites.

El límite de emisión es un nivel de perturbación que se establece algo más bajo que el nivel de compatibilidad. Esto se debe a que las perturbaciones producidas por todas las cargas del sistema se agregan de una forma compleja constituyendo el nivel de perturbación “global”.

Algunas perturbaciones, como las corrientes del tercer armónico, simplemente se suman de forma aritmética localmente, pero después se atenúan, por ejemplo, al pasar a través de los arrollamientos de transformadores en delta.

Otras corrientes armónicas tienden a agruparse como suma de sus valores eficaces, pero también se suavizan al mezclarse con los procedentes de otras fuentes, ayudados por las variaciones de fase que se producen cuando los armónicos pasan a través de los transformadores y los efectos de la inductancia y capacitancia de la red.

Sin embargo, localmente pueden producirse incrementos inesperados debidos a efectos resonantes.

Los niveles de emisión se definen en términos absolutos, por ejemplo, un límite absoluto sobre la corriente a una determinada frecuencia armónica, a diferencia de los niveles de perturbación de la red, que se describen en términos estadísticos. La correspondencia entre ambos depende de las características de las redes y se ha logrado como consecuencia de muchos años de experiencia operativa.

Los organismos reguladores y de normalización han especificado unos límites de emisión de los equipos que se espera que den como resultado unos niveles de perturbación que no superen los niveles de compatibilidad requeridos.

Como ejemplo, la **Tabla 6** muestra los límites de emisión de algunas corrientes armónicas en redes de b.t. (EN 61000-3-2) [3]. Las corrientes se expresan en Amperios.

Armónico	Límite [en A]	
	Clase A	Clase B
5	1.14	1.710
7	0.77	1.155
11	0.33	0.495
13	0.21	0.315

Tabla 6 - Límites de emisión de corrientes armónicas de baja tensión.

Debido a que diferentes tipos de equipos afectan al sistema de forma distinta, en la norma EN 61000-3-2 se han definido varias clases. Aquí se presentan como ilustración dos ejemplos. En la Clase A se encuentran equipos tales como los sistemas trifásicos equilibrados o los aparatos domésticos. Los equipos de la Clase B son las herramientas portátiles (equipos de baja carga de trabajo).

Límite de inmunidad (I).

El límite de inmunidad (I) es el nivel de perturbación que el equipo debe soportar sin pérdida de su eficacia.

El nivel de inmunidad se determina por el diseño y se garantiza mediante la realización de “ensayos tipo”, por lo que presentarán pequeñas variaciones entre las distintas unidades particulares del mismo diseño nominal. Dado que las condiciones de instalación varían, habrá una disparidad mucho mayor de prestaciones entre equipos similares en instalaciones diferentes. Por lo tanto, en la red existirá una distribución de los niveles de inmunidad de los equipos.

Si se pretende conseguir una auténtica compatibilidad electromagnética, el 95% de los niveles de inmunidad de los equipos instalados debe estar por encima del nivel de compatibilidad, como se muestra en la **Figura 15**

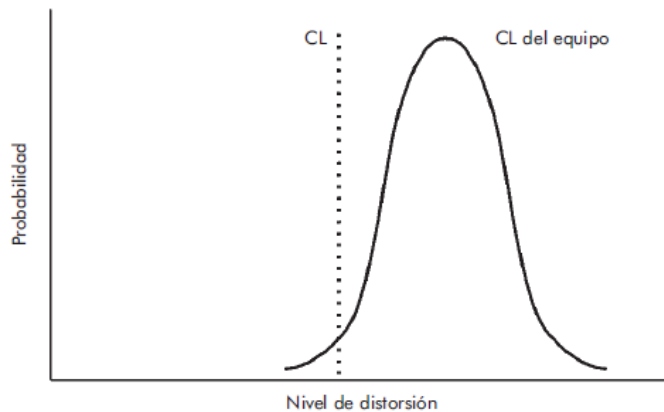


Figura 15 - Distribución del nivel de inmunidad.

Esta situación ideal sólo se puede conseguir, para un razonable nivel de compatibilidad determinado, estableciendo las especificaciones adecuadas para los límites de inmunidad de los equipos y utilizando buenas prácticas de instalación.

Nivel de planificación (PL).

Los niveles de planificación se utilizan en las redes de media y alta tensión y representan objetivos internos de las compañías eléctricas. Se emplean en el diseño de las redes, por ejemplo, para decidir cómo conectar nuevas cargas.

En muchos regímenes reguladores, los niveles de planificación se aplican a clientes industriales y comerciales para limitar las corrientes armónicas que puede introducir en la red un determinado usuario.

Los niveles de planificación son más bajos que los niveles de compatibilidad, en parte porque en el sistema existen muchas cargas desconocidas (p. ej. cargas domésticas) que sólo pueden estimarse, y en parte porque el problema es estadístico y los reguladores se curan en salud.

Relación entre estos parámetros.

La Figura 16 muestra la interrelación entre estos límites.

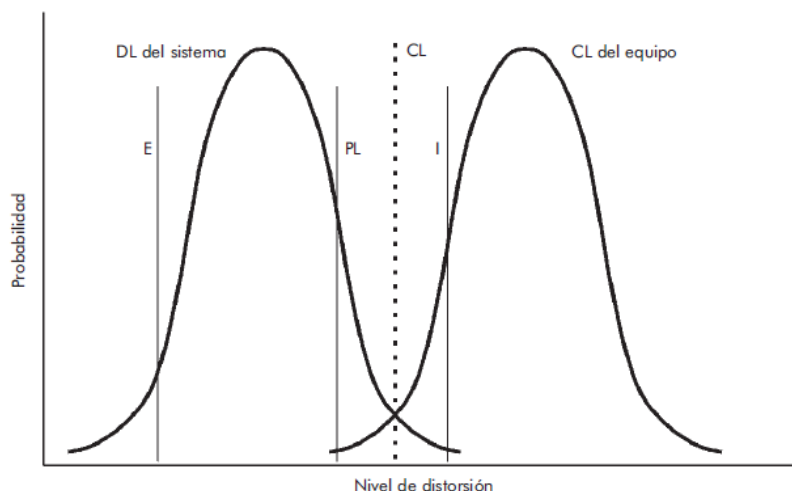


Figura 16 - Relación entre el límite de emisión, el límite de planificación, el límite de compatibilidad y el límite de inmunidad.

El nivel de compatibilidad se establece para un nivel de perturbación superior al 95% de los valores medidos en el conjunto del sistema a lo largo del tiempo.

Como resultado, sólo en el 5% de los casos el nivel de perturbación ambiente superaría el nivel de compatibilidad.

La distribución del nivel de perturbación se controla de modo que sólo el 5% de los valores estén por debajo del nivel de compatibilidad.

El nivel de compatibilidad se puede considerar como un nivel de perturbación que sólo es superado por el 5% de las mediciones efectuadas en la red, y al cual sólo será sensible el 5% de los equipos.

Sólo es probable que se produzca un problema cuando se conecten equipos problemáticos en un lugar problemático.

En otras palabras, el requisito de compatibilidad electromagnética se cumplirá en la gran mayoría de los casos.

En realidad la situación es que se han establecido los niveles de compatibilidad de facto como consecuencia de las especificaciones de diseño utilizadas por las compañías de distribución de electricidad, y del hecho de que los equipos de los fabricantes sólo se aceptan en el mercado si son suficientemente inmunes y si su comportamiento es bastante bueno para coexistir con otros equipos.

Ahora estas circunstancias se han formalizado como se ha descrito en los apartados anteriores.

2.4 MODELO DE CARGAS NO LINEALES DE BAJA POTENCIA.

El modelamiento de cargas no lineales ha tomado especial interés en los análisis de flujo de carga armónico [2], [6], ya que se requieren técnicas de cálculo especializadas para determinar los armónicos inyectados por las cargas no lineales al sistema, de tal manera que no se comprometa el tiempo de cálculo y la convergencia.

En el flujo de carga convencional, los elementos del sistema son modelados considerando régimen sinusoidal permanente. Con la presencia de elementos no-lineales, las tensiones del sistema presentan distorsión armónica.

Para el estudio de las cargas no-lineales, ellas son clasificadas en tres grupos:

Electrónicas o con control electrónico.

Basadas en descargas o arcos.

Construidas con materiales ferromagnéticos.

En este documento se tratan las cargas del primer grupo porque la forma de onda de corriente que circula por ellas es estrictamente periódica y es posible realizar una descomposición en series de Fourier.

Las cargas del segundo grupo no tienen una onda estrictamente periódica y los problemas de interarmónicos deben ser considerados. Para estas señales es más conveniente recurrir a otras técnicas matemáticas como la Transformada de Wavelet o la transformada de Fourier de ventana móvil.

Las cargas del tercer grupo se modelan utilizando una combinación entre lo teórico y lo experimental ya que es importante conocer las características del material, forma de conexión, forma constructiva, etc., para poder establecer un modelo analítico.

La estructura del trabajo es como se describe a continuación: Inicialmente se presentan algunas metodologías utilizadas para modelar los elementos no lineales. Posteriormente se utiliza una técnica de cálculo por tramos para implementarla en dos tipos de cargas: El rectificador trifásico de 6 y 12 pulsos y el rectificador controlado por tiristores (TCR) de 6 y 12 pulsos; finalmente se muestran los resultados obtenidos y las conclusiones respectivas, determinan los valores de tensión armónica en cada uno de los nodos del sistema.

La ecuación (1) expresa el modelo de inyección de corrientes.

$$I_{1h} / Y_{1h} V_h = (1)$$

Y_{1h} es interpretada como la relación entre cada armónico de corriente y la componente fundamental de la tensión, y no es necesariamente lineal.

Existen diversas maneras para obtener los valores de inyecciones de corriente. El método más común es el modelo porcentual en el cual, suponiendo conocida la magnitud de la componente fundamental, se especifican las componentes armónicas como un porcentaje de la fundamental.

Los porcentajes se conocen bien sea a partir de un análisis previo de la onda de corriente del elemento no-lineal o a partir de mediciones de campo.

METODOLOGÍAS DE MODELAMIENTO.

Modelo de inyección de corrientes.

En esta metodología la onda de corriente es descompuesta en series de Fourier y cada componente armónica es inyectada al sistema en forma de fuente de corriente; realizando un barrido en frecuencia se determinan los valores de tensión armónica en cada uno de los nodos del sistema.

La ecuación (1) expresa el modelo de inyección de corrientes.

$$I_h = Y_{1h} \cdot V_1$$

Y_{1h} es interpretada como la relación entre cada armónico de corriente y la componente fundamental de la tensión, y no es necesariamente lineal.

Existen diversas maneras para obtener los valores de inyecciones de corriente. El método más común es el modelo porcentual en el cual, suponiendo conocida la magnitud de la componente fundamental, se especifican las componentes armónicas como un porcentaje de la fundamental. Los porcentajes se conocen bien sea a partir de un análisis previo de la onda de corriente del elemento no-lineal o a partir de mediciones de campo.

Circuito equivalente de Norton.

Una manera más precisa de modelar los elementos no lineales es mediante un circuito equivalente de Norton, el cual es representado en la **figura 17**.

Allí, I_{1h} es la fuente de corriente para cada armónico y varía con la componente fundamental de tensión. La corriente I_h es la diferencia entre I_{1h} y la corriente absorbida por la admitancia para cada tensión armónica aplicada al barraje. Lo anterior es descrito mediante la siguiente relación.

$$I_h = Y_{1h} \cdot V_1 - Y_{hh} \cdot V_h$$

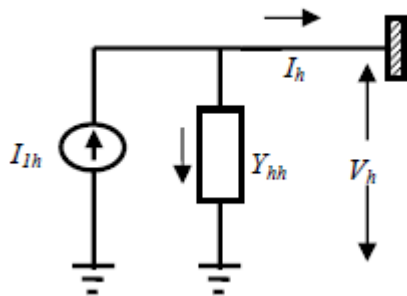


Figura 17. Equivalente de Norton de una carga no lineal.

Donde $Y_{1h} \cdot V_1 = I_{1h}$ y Y_{hh} es la admitancia que modela el efecto del armónico h de tensión. De acuerdo a [2] Y_{hh} es obtenida de la siguiente manera: Aplicando una señal de tensión sinusoidal pura a la carga no lineal se obtiene Y_{1h} a partir de (1),

posteriormente, superponiendo una perturbación V_h se calcula Y_{hh} a partir de (2)
Despejando Y_{hh} de (2) se obtiene que:

$$Y_{hh} = \frac{I_{1h} - I_h}{V_h}$$

Considerando que el sistema se encuentra con baja distorsión de voltaje, la variación de la carga no lineal depende principalmente de la componente fundamental de tensión; entonces I_{1h} e I_h son cantidades muy parecidas, luego el error cometido al intentar medir Y_{hh} puede llegar a ser apreciable, lo cual implica que no todas las cargas podrán ser representadas con este tipo de modelamiento. Esta manera de modelar es vista como un caso particular de la forma:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \cdots & Y_{1h} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \cdots & Y_{2h} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & \cdots & Y_{3h} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{h1} & Y_{h2} & Y_{h3} & \cdots & Y_{hh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_h \end{bmatrix}$$

La expresión ilustra cómo cada componente armónica de corriente de la carga no-lineal depende, en general, de cada componente armónica de tensión aplicada.

Matriz de acople armónico.

Esta técnica es particularmente aplicada a los convertidores AC/DC que hacen parte de un sistema HVDC. La relación entre el sistema AC y DC es descrita mediante la expresión (5).

$$\begin{pmatrix} I_{ac} \\ V_{dc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{ac} \\ I_{dc} \end{pmatrix}$$

Con esta metodología se consideran no solamente los armónicos en la parte AC de la red sino también los armónicos que se están generando en el lado DC.

Simulación en el dominio del tiempo.

Son métodos muy completos pero requieren mayor esfuerzo computacional. También existe una combinación de análisis en el dominio del tiempo y la frecuencia, la cual es ampliamente utilizada en algoritmos computacionales.

Consiste básicamente en realizar análisis en el dominio del tiempo y convertir las expresiones obtenidas al dominio de la frecuencia para obtener la inyección de corrientes armónicas. Esta última metodología será implementada en este trabajo.

TÉCNICA DE SOLUCIÓN POR TRAMOS.

Rectificador trifásico de 6 pulsos.

Los rectificadores trifásicos son uno de los componentes más utilizados en la industria para las situaciones en donde se requiere energía DC; tales como máquinas de lavado industrial, trituradoras, aplicaciones en el endurecimiento de piezas de acero, equipos de tracción, controladores de velocidad, convertidores AC-DC. Por el nivel de potencia que maneja y la distorsión armónica que introduce al sistema es importante realizar un análisis detallado de este tipo de carga para estudiar su impacto en el sistema. Una topología típica es mostrada en la **figura 18**

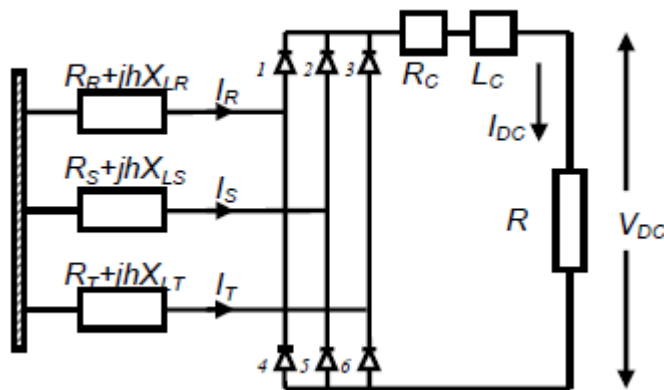


Fig. 18 Diagrama de rectificador trifásico de 6 puntos.

En la figura anterior R_R y X_{LR} representan la impedancia de dispersión en la fase R del transformador conectado al rectificador o en su defecto la impedancia de la línea que comunica al barraje más próximo. R_C es la resistencia de la línea en el lado DC, L_C es la inductancia del lado DC y R es la carga.

La emisión de armónicos de este componente está regida por la regla: $h = p.k \pm 1$ $k \in \mathbb{Z}^+$, donde p es el número de pulsos del rectificador.

Se requiere encontrar una expresión para la forma de onda de la corriente de línea y partir de ella sus componentes armónicas. La manera de realizar esto es determinando la onda por tramos [2] o utilizando funciones de suicheo [5].

Las funciones de suicheo se ajustan mejor cuando se considera que la inductancia $LC = \infty$. Esta condición es de gran importancia en sistemas de alto voltaje DC (HVDC) en donde se desea que el contenido armónico de corriente sea bajo en el lado DC; en éste la inductancia se comporta como un filtro pasa bajo.

En este trabajo se utiliza un desarrollo por tramos, por considerar que un análisis a partir del dominio del tiempo permite interpretar mejor los resultados obtenidos.

Condiciones del modelamiento.

Los voltajes son simétricos y balanceados pero pueden presentar distorsión armónica.

Las impedancias de las fases R, S y T son de igual valor, es decir no existe desbalance. Para la carga se considera que la corriente y el voltaje son continuos por lo que solamente una resistencia es modelada.

No se llevan en cuenta los períodos de traslape, es decir, las conmutaciones entre una fase y otra son instantáneas.

La inductancia del lado DC no es considerada, esto implica que la onda de corriente presenta el máximo rizado.

La corriente que circula por una fase del rectificador trifásico está dada por la expresión:

$$i(t) = \sum_{n=1}^{N_{\max}} a_n \cos(n.w.t) + b_n \sin(n.w.t)$$

(6)

La manera de obtener ' $n a$ ' y ' $n b$ ' es descrita en el apéndice y es de carácter general ya que se puede aplicar a cualquier carga del primer grupo (con control electrónico). Con el conocimiento de estas constantes, se determina el valor de la inyección de corriente para cada frecuencia armónica.

Para el cálculo de (6) es necesario conocer los parámetros del rectificador. Asumiendo que los parámetros del transformador son conocidos y si la corriente DC consumida por el rectificador es dada, la resistencia de carga es estimada por medio de (7):

$$R = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \text{ donde: } V_{DC} = \frac{3 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot V_1}{\pi} \quad (7)$$

V1: Valor eficaz del voltaje línea neutro de frecuencia fundamental.

RC es normalmente muy pequeño comparado con R y se puede despreciar. Para el caso en que la potencia activa consumida por el rectificador sea conocida la resistencia de carga es calculada a partir de (7) con la siguiente Modificación.

$$\begin{aligned} P_{DC} &= P_1 \\ I_{DC} &= \frac{P_{DC}}{V_{DC}} \end{aligned} \quad (8)$$

En (8) se ha considerado el hecho de que el puente rectificador no almacena ni disipa energía por lo que toda la potencia inyectada en el lado AC es transferida al sistema DC.

Las cargas que se muestran a continuación utilizan la misma metodología que se presentó para el rectificador trifásico de 6 pulsos, por lo que su desarrollo no aparece en este documento.

Rectificador trifásico de 12 pulsos.

Una unidad de 12 pulsos consiste de 2 unidades de 6 pulsos conectadas en serie.

El rectificador de 12 pulsos tiene la ventaja de introducir menor distorsión armónica al sistema pero a un precio mayor al tener que utilizar dos transformadores. FIG. 19

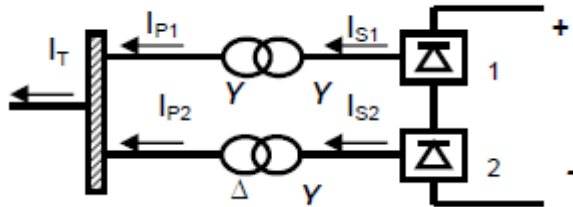


Figura 19 Rectificador de 12 pulsos.

Por medio de una conexión YD o DY en uno de los transformadores se logra un desfase de $\pm 30^\circ$. Para el caso del quinto armónico, por ejemplo, el desfase es $\pm 30^\circ \cdot 5 = \pm 180^\circ$ lo que hace que quede en contrafase con el quinto armónico producido por el otro rectificador.

La tensión promedio del rectificador de 12 pulsos es el doble de la indicada en (7).

TCR de 6 pulsos

Este dispositivo es un compensador de potencia reactiva que consiste de un sistema de control basado en tiristores en serie con una inductancia. Los TCR comúnmente se disponen en arreglos en delta para eliminar los armónicos triple-n como se muestra en la figura 20.

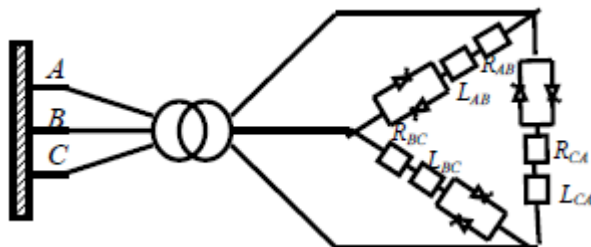


Figura 20. Arreglo en delta del TCR

TCR de 12 pulsos.

La configuración de 12 pulsos se obtiene utilizando dos unidades de 6 pulsos operando en paralelo y realizando una conexión YD o DY para lograr la cancelación de armónicos. Los TCR siguen la misma regla de emisión de armónicos que los rectificadores. FIG 21

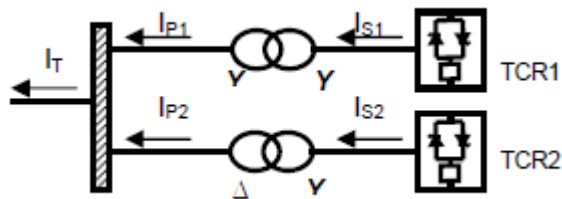


Figura 21. TCR de 12 pulsos.

RESULTADOS OBTENIDOS.

Se realizaron comparaciones entre los modelos propuestos y la simulación en el dominio del tiempo en Matlab/Simulink. Los datos de distorsión de tensión para las unidades de **6 pulsos** se muestran en la **tabla 7, 8 Y 9, 11** .

Las unidades de 12 pulsos (**Tabla 10,12**) no incluyen los armónicos 5 y 7 de tensión. El TCR se simuló con un transformador ideal y un ángulo de disparo de 120°.

h	HD (%)	THDV ACUMULADO (%)	ÁNGULO (°)
1	0	0	0
5	8.5	8.5	-43
7	8	11.7	-70
11	5	12.3	-9
13	4	13.3	-61

Tabla N. 7 Distorsión armónica de tensión.

CARGA	V_{LL}(KV)	R_{CC}(%)	X_{CC}(%)	P (MW)
Rect. 6 p.	13.8	0.3	3	5
Rect. 12 p.	13.8	0.3	3	5
CARGA	V_{LL}(KV)	L (mH)	R (Ω)	ALFA(°)
TCR 6 p.	13.8	100	0.5	120
TCR 12 p.	13.8	200	0.9	120

Tabla N. 8 Datos de las cargas No lineales.

ARMÓNICO	AMPLITUD MÁXIMA (A)	
h	Modelo	Simulink
1	288.7	288.6
5	62.85	60.82
7	41.76	34.09
11	21.67	25.17
13	26.90	16.50
THDI	28.75%	26.31%

Tabla N. 9 Corriente de rectificación de 6 Pulsos

ARMÓNICO	AMPLITUD MÁXIMA (A)	
h	Modelo	Simulink
1	288.48	292.7
5	0	0.10
7	0	0.09
11	21.23	25.18
13	18.73	18.43
THDI	9.82%	10.66%

Tabla N. 10 Corriente de rectificación de 12 Pulsos

ARMÓNICO	AMPLITUD MÁXIMA (A)	
h	Modelo	Simulink
1	375.51	350.6
5	35.16	33.72
7	6.63	17.56
11	8.97	2.44
13	1.92	2.23
THDI	9.84%	10.88%

Tabla N. 11 Corriente del TRC de 6 Pulsos

ARMÓNICO	AMPLITUD MÁXIMA (A)	
	Modelo	Simulink
H		
1	351.19	345.4
5	0	0
7	0	0
11	6.75	1.89
13	3.28	2.20
THDI	2.14%	0.84%

Tabla N. 12 Corriente del TRC de 12 Pulsos.

2.5 CONCLUSIONES.

Se han descrito los principales límites utilizados en las normas para regular la emisión e inmunidad de los equipos conectados a la red eléctrica, y se ha explicado la relación entre ellos.

El establecimiento de estos límites es una solución de compromiso. Un nivel de emisión muy bajo producirá un nivel de perturbación muy bajo, lo cual impondrá un nivel de compatibilidad bajo. Los niveles de inmunidad bajos son tolerables, pero el coste de fabricación de equipos de baja emisión es mayor.

Por otra parte, permitir niveles de emisión mayores requiere un aumento del nivel de compatibilidad establecido, lo que requerirá un aumento de los niveles de inmunidad, lo que de nuevo aumenta los costes de fabricación.

Se presentó una metodología que para el caso sinusoidal y, en general, para condiciones de baja distorsión, se aproxima a las simulaciones en el dominio del tiempo realizadas en Matlab/Simulink y con un tiempo de cálculo mucho menor.

Si las unidades de 12 pulsos se someten a un voltaje cuya distorsión contiene armónicos que no están incluidos en los armónicos de corriente y que fueron causados por otro elemento no lineal presente en el sistema; no se sigue la regla de emisión que los caracteriza. Esto se debe a que la cancelación de armónicos por desfase ya no es perfecta.

El algoritmo puede ser mejorado si se implementan subrutinas que determinen cada cruce por cero para la onda de tensión y de corriente y así obtener una mejor

aproximación; pero esto puede resultar problemático si las señales presentan demasiadas oscilaciones alrededor de cero.

Hasta hoy, la mayor parte de los esfuerzos por regular los límites de contaminación armónica se han llevado a cabo para las cargas industriales; sin embargo, el problema también existe en las líneas de distribución residencial, aunque quizás, aún no se ha medido el efecto perjudicial del fenómeno.

Muy a pesar de la existencia de normas que establecen límites para el contenido armónico en la corriente demandada por las cargas eléctricas, el estudio realizado en este trabajo demostró que los aparatos electrónicos más utilizados en los hogares, generan altos niveles de contaminación armónica sobre las líneas de distribución eléctrica.

Una gran preocupación de las compañías generadoras de electricidad (específicamente la CFE en México) sigue siendo reducir el consumo de energía en los hogares.

Si las fuentes internas de los aparatos electrónicos se diseñan empleando convertidores que demanden corrientes de tipo senoidal, con un alto factor de potencia (algunas veces también llamados convertidores limpios), se lograría no solo reducir la contaminación armónica introducida hacia las líneas de suministro eléctrico, sino que también permitiría reducir el consumo de potencia, que se traduce en un beneficio, tanto para los productores de electricidad como para los usuarios.

Por último, es muy importante atender la recomendación de mantener desconectado todo electrodoméstico cuando no está siendo utilizado. Sin importar que estén apagados, la potencia que estos equipos consumen al estar conectados de ninguna manera puede considerarse una cantidad despreciable, pues representa un importante gasto energético infructuoso. Su impacto no solo es económico sino también ambiental, pues la mayoría de los procesos utilizados actualmente para generar energía eléctrica, contribuyen de manera importante a la contaminación del medio ambiente.

CAPITULO III

CONTROL DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA.

3.1 CONSTRUCCIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS.

Fase de planeamiento.- Antes de realizar un estudio más detallado, son necesarias algunas informaciones sobre el comportamiento de la carga especial, tales como característica de la carga, potencia y régimen de trabajo. Esas informaciones deben ser suministradas por el consumidor o por el fabricante del equipo en una fase de negociación que antecede la asignatura del contrato de suministro.

Después de este paso la empresa de suministro debe evaluar la necesidad de realizar estudios de penetración de armónicos tratando de establecer los límites de las corrientes armónicas inyectadas por la carga especial en el punto de entrega, Este estudio sirve también para entregar al consumidor el comportamiento de la impedancia armónica de la red vista desde la barra donde será conectada la carga especial.

El consumidor debe suministrar las corrientes armónicas generadas por los equipos causantes de las distorsiones, las que serán consideradas en el estudio.

En el caso en que no se cumplan los límites de tensión por consumidor o los límites de corriente inyectadas en el punto de entrega, el consumidor deberá instalar equipos de filtrado de modo de cumplir con los límites.

En la aplicación de estos límites a una carga especial en fase de implantación, se debe buscar el cumplimiento de los límites por consumidor considerando los estudios de simulación apenas con solo su presencia en el sistema, o sea despreciando las distorsiones causadas por las demás cargas.

En el caso que este no se cumpla los límites, posiblemente será necesario mejorar los dispositivos de atenuación y filtrado de aquella carga.

Después de que está definida la configuración de las instalaciones de la carga especial la empresa deberá realizar estudios de penetración de armónicos para verificar si esas alteraciones topológicas no acarrearán problemas para otros consumidores o para el sistema eléctrico. En caso afirmativo ella debe proponer y negociar medidas correctivas con el consumidor que se está instalando.

Para permitir futuras evaluaciones de las instalaciones de la carga especial, la empresa debe mantener un historial de datos del proyecto, de los equipos de filtrado y de las corrientes armónicas generadas por la carga especial que fueron consideradas en el estudio y servirán de base para su aprobación.

Definidas las medidas correctivas y la verificación de instalación, deben ser establecidos los procedimientos operativos en caso de emergencia del equipo de atenuación de los armónicos, bien como flexibilidades temporales de los criterios,

Estos procedimientos deben ser parte de un acuerdo operacional entre la empresa suministradora y el consumidor elaborado por el área de operación de la empresa suministradora.

En este acuerdo deben estar incluidas las responsabilidades de la empresa en la corrección de los problemas que surjan “posteriormente”, debido a cambios no previstos en la evolución del sistema. El consumidor debe ser identificado como responsable en el caso de que surjan problemas debido al cambio en las características de sus equipos causantes de distorsión armónica o del equipo de atenuación de las distorsiones.

Para facilitar los procedimientos de medición rutinaria de las distorsiones armónicas en las instalaciones de los consumidores con cargas especiales y en las subestaciones de la propia empresa deben ser realizadas la instalación definitiva de transductores de tensión y de corriente específicos, dedicados a las mediciones de armónicos.

Fase pre-operacional.- Con información actualizada del sistema, la empresa debe hacer un revisión de los estudios de penetración de armónicos con el objetivo de identificar los puntos críticos de la red para efecto de la medición de las tensiones armónicas.

Es recomendable que sean realizadas mediciones antes de la entrada en operación de la carga especial para fines de comparación. Para eso deben ser realizadas mediciones previas en los puntos críticos de la red identificados por los estudios.

Durante la fiscalización deben ser medidas, además las tensiones en los puntos críticos de la red, las corrientes armónicas generadas por la carga especial y las corrientes armónicas inyectadas en el punto de entrega.

Las tensiones armónicas medidas deben ser comparadas con los límites globales definidos anteriormente.

Las corrientes armónicas generadas por la carga especial deben ser comparadas con los valores suministrados por el consumidor u adoptadas en los estudios de penetración de armónicos. Las corrientes armónicas inyectadas en el punto de entrega deben ser comparadas con los límites establecidos anteriormente por la empresa de suministro.

Fase de operación.- La verificación de los criterios a través de mediciones no es posible realizarlo en todos los puntos de la red. Pero ese problema puede ser controlado en parte por la observación de los puntos críticos del sistema identificado por los estudios.

Periódicamente, u siempre que se juzgue necesario, en base en mediciones topológicas actualizadas y en las corrientes armónicas generadas por las cargas especiales existentes en la red, La empresa debe de realizar estudios de penetración de armónicas analizando e identificando los puntos críticas.

En estos puntos deben ser realizados mediciones de los niveles de tensión armónica que deben ser comparados con los límites globales, establecidos anteriormente, que garantizan el nivel de compatibilidad, En el caso de que se superen estos límites se debe proceder con una investigación de las causas, el que puede exigir estudios más detallados o mediciones más específicas en los puntos de conexión de las cargas especiales más significativas.

La empresa se debe reservar el derecho de exigir, siempre que juzgue necesario, la comprobación por los consumidores de la adecuación de sus equipos de filtrados y

de las corrientes armónicas generada por sus equipos e inyectadas en el sistema eléctrico.

Esa comprobación debe ser hecha a través de mediciones, de las cuales la empresa suministradora podrá participar. En caso de que se constate algún desvío.

La empresa deberá exigir las debidas correcciones al consumidor.

Cabe a la empresa de suministro adoptar medidas de reducción de los niveles de distorsión armónica, en caso en que la violación de los límites globales no fuera atribuidos a un consumidor específico.

3.2 TÉCNICAS DE CANCELACIÓN DE ARMÓNICOS. CANCELACIÓN DE ARMÓNICOS EN LOS INTERRUPTORES AUTOMÁTICOS DE LOS CIRCUITOS.

Se deberán utilizar cables de sección superior a la indicada en los catálogos técnicos, para evitar calentamientos excesivos debidos a la presencia de armónicos, separar las cargas no lineales de las restantes cargas “limpias” y colocar cuadros e interruptores adecuados para cargas no lineales donde sea necesario.

Cancelación en las barras de neutro.

La sobrecarga de los conductores neutros puede evitarse dimensionando dichos neutros adoptando una sección suficiente que tenga en cuenta la eventual presencia de un medio ambiente eléctrico rico en armónicos. Puede ser una práctica aconsejable prever un neutro con una sección 1.7 veces mayor que la de los conductores de fases o simplemente doblar el neutro cuando el circuito final debe alimentar sistemas informáticos. También pueden utilizarse un conductor neutro separado para cada fase.

Cancelación En Los Motores De Inducción.

Utilizar circuitos separados, para alimentar a los equipos generadores de armónicos tales como los equipos informáticos y los variadores de velocidad, de los que alimenten cargas sensibles a los armónicos tales como los motores de inducción. Es conveniente limitar la distorsión total armónica de la tensión a menos de un 5%.

Cancelación en Los Transformadores.

Una forma de proteger un transformador de los armónicos es limitar su carga a valores inferiores a su valor nominal. Los transformadores standard se encuentran, en algunas ocasiones, incapacitados para soportar el calentamiento adicional que les ocasionan los armónicos. Dependiendo de las condiciones presentes, se pueden dar casos en los que es necesario limitar las cargas que alimenta un transformador hasta un 50% de la potencia nominal. Esto puede ayudar a resolver el problema de los armónicos, pero disminuye notablemente la eficiencia efectiva del transformador.

Alternativamente, pueden utilizarse transformadores de categoría K. Se trata de unos transformadores especialmente diseñados para alimentar cargas con armónicos.

El diseño de un transformador K puede incluir una o varias de las modificaciones siguientes: sobredimensionado del bobinado del primario para soportar las corrientes circulantes armónicas triplens, doblar la sección del conductor neutro del secundario para soportar las corrientes armónicas triplens, diseñar los núcleos magnéticos con una baja densidad de flujo para utilizar categorías superiores de hierro, emplear varios conductores en paralelo de pequeña sección en el bobinado del secundario para reducir el efecto piel y/o diseñar bobinados múltiples en el secundario que cambien la fase a secuencia cero para cancelar las corrientes armónicas triplens.

Cancelación en sobrecargas de los condensadores de corrección del factor de potencia.

Puede evitarse la presencia de resonancias añadiendo una inductancia (un inductor de línea) en serie con el condensador para desintonizar la frecuencia de resonancia de la respuesta característica del sistema o, alternatively, instalar un dispositivo de corrección de la corriente reactiva (kVAR) especialmente diseñado.

3.3 FILTROS ARMÓNICOS.

Como en cualquier problema la mejor solución para evitar un efecto no es mitigarlo, sino eliminar la causa que lo produce. En nuestro caso, eliminar los armónicos de la red.

Normas como las ya citadas limitan el contenido de armónicos que una carga puede introducir a la red.

Algunos armónicos se han distinguido por ser especialmente dañinos en los sistemas de distribución. Los 3eros armónicos y múltiplos de este (p. Ej., 9th, 15th, 21o) reciben atención especial porque ellos son los “triplens” ($6n-3$).

Los “triplens”, en frecuencia - dominio armónico - análisis de secuencia, retornan a través del neutro. Como se constata donde la corriente de carga retorna a través del neutro con valores superiores a los de fase. Los armónicos de secuencia negativa (p. Ej., 5th, 11th, 17th) tienen gran impacto sobre transformadores y motores porque su rotación se opone a la rotación de la fundamental (60Hz componente).

Las combinaciones de armónicos también tienen impacto. Por ejemplo, los armónicos de voltaje a los 5th y 7th combinados dentro de motores producen un evento que está en el orden del 6to armónico. El armónico originado ocasiona una amplia gama de problemas que llevan a elevar la temperatura de motores, vibración y desgaste.

El bajo factor de potencia para cargas no lineales ocurre debido a que la corta duración de la corriente eleva los VA sin el correspondiente incremento en los Watts.

Como el factor de potencia es igual a los vatios divididos por los voltio-amperios, cualquier aumento en VA sin un aumento correspondiente en los vatios conducirá a un factor de potencia menor.

Como los problemas ocasionados por cargas no lineales llegar a ser cada vez más obvios, compañía de electricidad y MIS de gerentes se encaran con una necesidad disminuir los efectos de cargas no lineales sobre sus instalaciones.

Además, algunas compañías eléctricas comienzan a aplicar el estándar IEEE-519 para limitar la magnitud de corrientes armónicas que los usuarios individuales producir hacia la compañía de electricidad. Los filtros armónicos son ofrecidos por vendedores para resolver estas necesidades. Generalmente, los filtros armónicos proveerán una solución, aunque esta no sea la solución para todos los casos.

Los ofrecimientos de filtro incluyen reactores en la línea, filtros pasivos, filtros activos, filtros de retroalimentación electrónica y transformadores especiales que usan un devanado fuera de fase para realizar la reducción las armónicas.

Clasificación de filtros armónicos.

Básicamente, los equipos de filtrado permiten resolver los inconvenientes planteados anteriormente.

Para definir el tipo de equipo a instalar es necesario efectuar un minucioso estudio de armónicas, con mediciones de tensión y corriente, análisis mediante simulador y selección del equipo más adecuado.

Como el filtrado absorbe parte o la totalidad de las armónicas generadas por los convertidores, deberá ser adecuadamente diseñado. Los filtros pueden clasificarse en:

Filtros desintonizados o antirresonantes.

Están diseñados para presentar una frecuencia de resonancia por debajo de la menor armónica que ofrece el sistema (generalmente la 5^o). El valor de frecuencia de desintonía se encuentra comprendido entre 179 y 223 Hz y se logra agregando un reactor de desintonía en serie con los capacitores de uso convencional.

Dicho reactor elevará la tensión del capacitor por sobre la tensión de la red, siendo por lo tanto que la tensión nominal de éste deberá elegirse superior al valor resultante. El valor de la sobretensión en el capacitor dependerá del grado de desintonía elegido.

Este tipo de instalación tiene además un efecto parcial de filtrado permitiendo la reducción del nivel de distorsión armónica de tensión existente en la red, y este efecto es tanto más importante a medida que la frecuencia de resonancia del filtro se aproxima a la frecuencia de resonancia armónica natural, dicho en otros términos cuanto mayor es el grado de desintonía menor será la absorción de armónicas. Un mayor efecto de absorción (grado de filtrado) siempre depende de la impedancia de corto circuito del sistema y la resistencia residual del circuito de filtrado.

Los filtros antirresonantes (o de rechazo) se recomiendan para todos los casos donde las cargas generadoras de armónicas se encuentran entre un 20 y un 50% de la carga total a compensar, dependiendo este rango del grado de distorsión que presenten las cargas no lineales.

Filtros sintonizados.

Estos filtros presentan una impedancia muy baja para la corriente armónica individual, derivando la mayor parte de la corriente distorsiva generada por las cargas no lineales, hacia el filtro y no hacia el suministro. El valor de frecuencia de resonancia en este caso, se encontrará siempre levemente por debajo de la armónica que se desea filtrar, aunque mucho más próxima que en el caso de los filtros desintonizados. En estos casos es muy importante tener en cuenta el valor de la corriente armónica máxima que se desea filtrar, pues de ésta, depende el dimensionamiento del reactor y de la tensión del condensador. El dimensionamiento de este tipo de filtros, requiere por lo tanto un estudio más a fondo de las características de la instalación, las armónicas presentes y el objetivo de distorsión en barras al cual se quiere llegar.

Aplicación.

Los equipos de filtrado, empleados en las instalaciones industriales y redes antes mencionadas, permiten obtener las siguientes mejoras:

Compensación de la potencia reactiva a la frecuencia fundamental para un factor de potencia especificado. Disminuyen el porcentaje de distorsión armónica total (THD). Evitan fenómenos de resonancia, que surgirían al conectar capacitores sin protección contra armónicas. Disminución de pérdidas activas en cables y aparatos electromagnéticos, por reducción del THD.

Soluciones para atenuar los armónicos.

Existen tres tipos diferentes de soluciones para atenuar los armónicos:

1. Modificaciones en la instalación.
2. Dispositivos especiales en el sistema de alimentación.
3. Filtros.

Soluciones básicas.

Para limitar la propagación de los armónicos en la red de distribución, existen diferentes soluciones y deben tenerse en cuenta, especialmente al diseñar una nueva instalación.

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

Las perturbaciones armónicas generales aumentan a medida que disminuye la potencia de cortocircuito.

Dejando a un lado todas las consideraciones económicas, es preferible conectar cargas no lineales lo más aguas arriba posible (ver **Figura 22**).

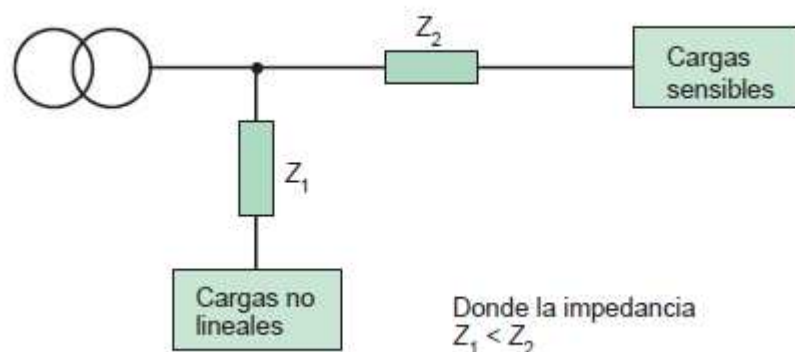


Fig 22. Cargas no lineales colocadas lo más aguas arriba posible (disposición recomendada).

Agrupación de las cargas no lineales.

Al preparar el diagrama de una sola línea, los dispositivos no lineales deben separarse del resto (ver **Figura 23**).

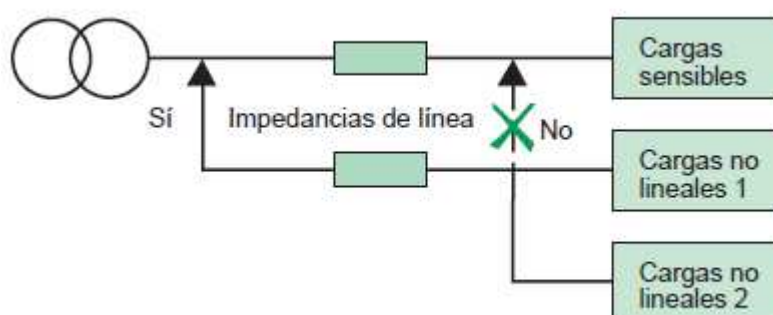


Fig. 23 Agrupación de cargas no lineales y conexión lo más aguas arriba posible (disposición recomendada).

Creación de fuentes separadas.

En el intento de limitar los armónicos, se puede obtener una mejora adicional alimentando las cargas no lineales desde una fuente independiente del resto de cargas de la instalación (ver **Figura 24**).

La desventaja es un aumento del coste de la instalación.

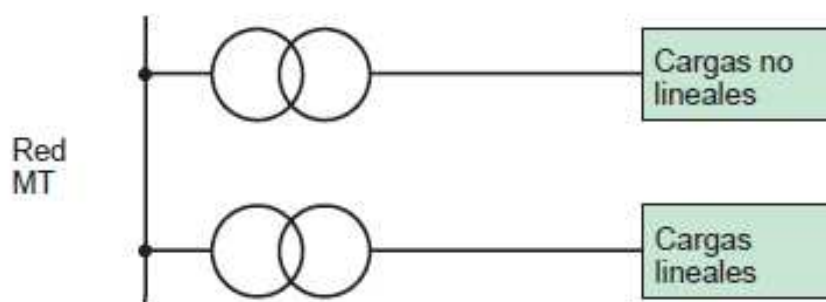


Fig. 24 Alimentación independiente de cargas no-lineales.

Transformadores con conexiones especiales.

Determinadas conexiones de transformador pueden eliminar algunos rangos de armónicos, tal y como se indica en los ejemplos siguientes:

Una conexión Dyd elimina los armónicos de rangos 5° y 7° (véase la **Figura 25**).

Una conexión Dy elimina el 3.er armónico.

Una conexión DZ 5 elimina el 5.º armónico.

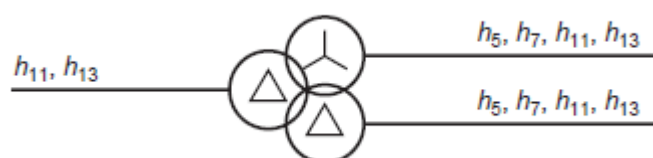


Fig. 25 Un transformador DYD bloquea la propagación de los armónicos de 5° y 7° en la red aguas arriba.

Instalación de inductancias.

Cuando se alimentan variadores de velocidad, es posible atenuar la corriente instalando inductancias. Al aumentar la impedancia del circuito de alimentación, la circulación de armónicos se limita.

La instalación de inductancias antiarmónicas en las baterías de condensadores aumenta la impedancia de la combinación reactor/condensador para los armónicos de gran orden. De esta forma se evita la resonancia y se protege a los condensadores.

Filtro de armónicos.

En los casos en los que la acción preventiva indicada anteriormente sea insuficiente, es necesario equipar la instalación con sistemas de filtrado.

Existen tres tipos de filtros:

Pasivos.
Activos.
Híbridos.

Filtros pasivos: Aplicaciones típicas.

Instalaciones industriales con una serie de cargas no lineales que representan más de 200 kVA (variadores de velocidad, SAI, rectificadores, etc.).

Instalaciones que requieren corrección del factor de potencia.

Instalaciones en las que la distorsión de tensión debe reducirse para evitar perturbar las cargas sensibles. Instalaciones en las que la distorsión de corriente debe reducirse para evitar sobrecargas.

Principio de funcionamiento.

Un circuito LC, sintonizado a cada rango armónico que se va a filtrar, se instala en paralelo con la carga no lineal (ver **Figura 26**). Este circuito de derivación absorbe los armónicos, evitando así que circulen por la red de distribución.

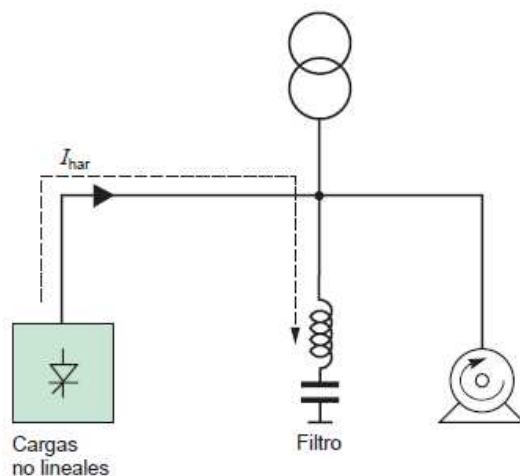


Fig. 26 Principio de funcionamiento con un filtro pasivo.

De manera general, el filtro pasivo se ajusta a un rango de armónicos próximo al que se desea eliminar. Se pueden utilizar varias ramificaciones de filtros conectadas en paralelo si se necesita una reducción significativa de la distorsión global.

Filtros activos (compensador activo de armónicos).

Aplicaciones típicas.

Instalaciones comerciales con una serie de cargas no lineales que representan menos de 200 kVA (variadores de velocidad, equipos de oficina, etc.).

Instalaciones en las que la distorsión de corriente debe reducirse para evitar sobrecargas.

Principio de funcionamiento.

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

La **Figura 27** muestra un compensador activo de armónicos conectado en paralelo que compensa la corriente armónica ($I_{har} = -I_{act}$).

El AHC inyecta en la fase opuesta los armónicos de la carga no lineal, de forma que la corriente de línea I_s permanece senoidal.

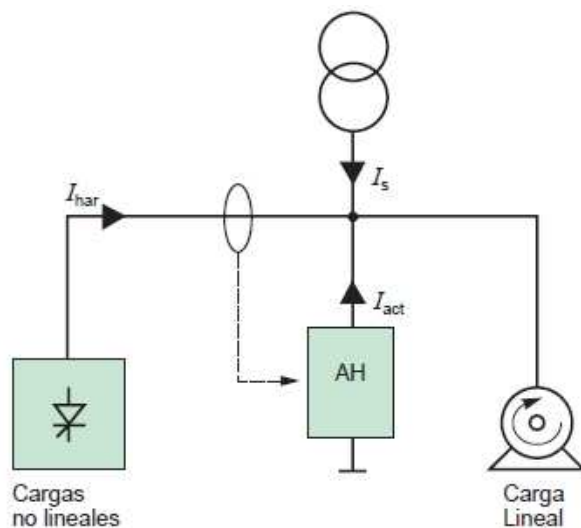


Fig. 27 Principio de funcionamiento con un filtro activo

Filtros híbridos.

Aplicaciones típicas.

Instalaciones industriales con una serie de cargas no lineales que representan más de 200 kVA (variadores de velocidad, SAI, rectificadores, etc.).

Instalaciones que requieren corrección del factor de potencia.

Instalaciones en las que la distorsión de tensión debe reducirse para evitar perturbar las cargas sensibles.

Instalaciones en las que la distorsión de corriente debe reducirse para evitar sobrecargas.

Instalaciones en las que deben cumplirse límites estrictos de emisiones de armónicas.

Principio de funcionamiento.

Los filtros pasivos y activos se combinan en un único sistema para constituir un filtro híbrido (ver **Figura 28**). Esta nueva solución de filtrado ofrece las ventajas de los dos tipos de filtros y abarca una amplia gama de niveles de potencia y rendimiento.

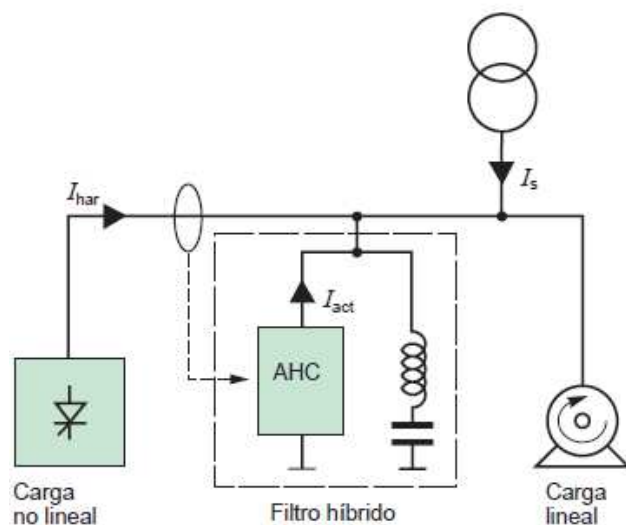


Fig. 28 Principio de funcionamiento con filtro Híbrido.

Criterios de selección.

Filtro pasivo.

Ofrece tanto corrección del factor de potencia como capacidad para el filtrado de corrientes.

Los filtros pasivos también reducen las tensiones armónicas en las instalaciones en las que la tensión de alimentación tiene perturbaciones. Si el nivel de la potencia reactiva suministrada es elevado, se recomienda desactivar el filtro pasivo cuando el porcentaje de la carga sea bajo.

Los estudios preliminares para un filtro deben tener en cuenta la posible presencia de una batería de condensadores que puede resultar necesario eliminar.

Acondicionadores de armónicos activos.

Filtran los armónicos en un amplio rango de frecuencias y se pueden adaptar a cualquier tipo de carga. Por otro lado, las especificaciones de potencia son bajas.

Filtros híbridos.

Combinan el rendimiento de los filtros activos y pasivos.

Método.

La mejor solución, tanto desde el punto de vista técnico como económico, se basa en los resultados de un estudio detallado.

Análisis de armónicos en redes de MT y BT.

Utilizando los servicios de un especialista se asegura que la solución propuesta tenga los resultados esperados (p. ej., un THDu máximo garantizado).

Un análisis de armónicos se lleva a cabo por un ingeniero especializado en las perturbaciones que afectan a las redes de distribución eléctrica y que están equipadas con potentes equipos y software de análisis y simulación.

Los pasos para un análisis son los siguientes:

Medición de las perturbaciones que afectan a la corriente y a las tensiones compuestas y simples en la fuente de alimentación, los circuitos de salida perturbados y las cargas no lineales.

Simulación por ordenador del fenómeno para obtener una explicación precisa de las causas y determinar la mejor solución.

Un informe completo del análisis presenta:

Los niveles de corriente de las perturbaciones.

Los niveles máximos permitidos de las perturbaciones (IEC 61000, IEC 60034, etc.).

Una propuesta que incluye soluciones con niveles de rendimiento garantizados.

Finalmente, la aplicación de la solución seleccionada utilizando los medios y los recursos necesarios.

Todo el proceso de la auditoría está certificado con la ISO 9002.

Productos específicos.

Filtros pasivos.

Los filtros pasivos se componen de inductancias y condensadores instalados en circuitos resonantes ajustados al rango concreto de armónicos que debe eliminarse.

Un sistema puede incluir varios filtros para eliminar distintos rangos de armónicos.

Adecuado para las tensiones trifásicas de 400 V; las especificaciones de potencia pueden alcanzar:

265 kVAR / 470 A para el rango del armónico 5.

145 kVAR / 225 A para el rango del armónico 7.

105 kVAR / 145 A para el rango del armónico 11.

Se pueden crear filtros pasivos para todos los niveles de intensidad y tensión.

Filtros activos.

Compensador de armónicos activos SineWave.

Adecuados para las tensiones trifásicas de 400 V, pueden compensar entre 20 y 120 A por fase.

SineWave compensa todos los rangos armónicos del 2 al 25. La compensación puede ser total o estar dirigida a rangos de armónicos específicos.

Atenuación: Carga THDi / THDi aguas arriba superior a 10 a la capacidad nominal.

Las funciones incluyen corrección del factor de potencia, compensación de armónicos de secuencia cero, sistemas de diagnóstico y mantenimiento, conexiones en paralelo, control remoto, interface de comunicación Ibus/RS485.

Filtros activos Accusine.

Adecuados para las tensiones trifásicas de 400 y 480 V, pueden filtrar entre 50 y 300 A por fase.

Se filtran todos los rangos de armónicos hasta 50.

Las funciones incluyen corrección del factor de potencia, conexiones en paralelo, respuesta instantánea a las variaciones de carga.

Filtros híbridos.

Estos filtros combinan las ventajas de los filtros pasivos y el compensador activo de armónicos SineWave en un solo sistema.

Filtro pasivo.

Rango de armónicos 5.

Compensador activo de armónicos de 20 a 120 A.

Tensión trifásica de 400 V.

Corrección del factor de potencia hasta 265 kVAr.

Filtrado de órdenes de armónicos 2 a 25.

Acondicionamiento de corrientes de armónicos hasta 440 A.

3.4 CONVERTIDORES.

El desarrollo espectacular de la electrónica de estado sólido en los últimos años ha posibilitado la evolución de todas las ramas de la electrónica, y entre ellas la

electrónica de potencia, que se ha beneficiado de la aparición de conmutadores de estado sólido que permiten reducir el volumen y prestaciones de los equipos de conversión de energía, imprescindibles en la mayoría de las aplicaciones domésticas e industriales actuales.

Como resulta de sobra conocido, el más maduro, eficiente y fiable de todos los convertidores existentes es el transformador, que presenta como inconvenientes más importantes su escasa adaptabilidad a sistemas automáticos de control, excepto en el caso del autotransformador servomotorizado, que con una velocidad de respuesta en el rango de las centenas de milisegundos (no hay que olvidar que se trata de sistemas electromecánicos) no puede competir en este aspecto con la electrónica de potencia.

Lógicamente, el transformador sólo puede ser utilizado para transformar valores de tensión e intensidad alternos, siendo incapaz de realizar transformaciones de la frecuencia. Desde el punto de vista electromecánico, existen también otros convertidores significativos, como el grupo Ward-Leonard, que utiliza un motor asíncrono para arrastrar un generador de corriente continua en derivación cuya salida se regula mediante una resistencia intercalada en el circuito de excitación.

Existen también otros sistemas como la amplidina que pueden ser utilizados para obtener una tensión continua regulable. Sin embargo, prácticamente todos estos sistemas han sido desplazados por la electrónica de potencia, que posee, en general, una mejor relación precio / prestaciones.

El objetivo de este capítulo es introducir la estructura y características principales de los convertidores electrónicos de energía, indicando sus aplicaciones más comunes, especialmente aquellas orientadas a los accionamientos eléctricos.

No hay duda de que la energía eléctrica constituye la fuente básica de energía de los sistemas electrónicos. Sin embargo, esta energía no se produce ni se consume de una forma unificada, esto es, está disponible con diferentes formatos: corriente continua, alterna en formato monofásico o trifásico, pulsada, etc.

Es necesario, por tanto, disponer de elementos de conversión que permitan transformar la energía entre los diferentes formatos, con el máximo rendimiento

posible. Uno de los problemas que aparecen cuando se diseñan convertidores de elevado rendimiento es la generación de subproductos no deseados.

Sirva como ejemplo el caso de los convertidores ca/cc o rectificadores que transforman la corriente alterna en continua. Este tipo de convertidores generan a su salida componentes alternas no deseadas que se suman a la componente continua.

En otras ocasiones, la conmutación de corrientes elevadas necesaria para completar el proceso de conversión de energía genera radiación electromagnética que puede producir interferencias en equipos electrónicos sensibles próximos. Existe, por tanto, una antítesis eficiencia energética – calidad de la conversión que debe tenerse en cuenta para un correcto diseño y utilización de los convertidores.

Concepto de convertidor.

Un convertidor de energía es un sistema o equipo electrónico que tiene por objetivo la conversión de energía eléctrica entre dos formatos diferentes. Por ejemplo, obtener corriente continua a partir de corriente alterna.

El concepto inicial de convertidor puede extenderse para incluir aspectos como: eficiencia, reversibilidad, grado de idealidad, fiabilidad, volumen o tecnología por citar las más importantes. En la figura 29, se muestra la estructura básica de un convertidor.



Fig. 29. Estructura básica de un convertidor electrónico de energía.

Antes de continuar, es necesario definir los parámetros básicos que permiten caracterizar las diferentes formas de manifestación de la energía eléctrica, considerando en una primera aproximación que la energía se manifiesta con una

estructura periódica, esto es, olvidándonos de los fenómenos transitorios propios de todos los sistemas electrónicos.

Tipos de convertidores.

Los convertidores pueden clasificarse según diferentes criterios.

Uno de los más comúnmente utilizados es agruparlos según el formato de las energías de entrada y salida. Básicamente y según este criterio pueden establecerse cuatro grandes grupos:

Convertidores ca/cc o rectificadores. Este tipo de convertidores transforman corriente alterna, monofásica o trifásica, en continua. Desde el punto de vista de los accionamientos, presentan una importancia fundamental, ya que se utilizan de forma general en las máquinas siguientes:

Máquina de corriente continua. Alimentación tanto del circuito de excitación como del inducido.

Máquina asíncrona. El control, tanto escalar como vectorial de velocidad en la máquina asíncrona se realiza mediante algún tipo de convertidor cc/ca que necesita como fuente de alimentación una tensión continua. Otra aplicación de este tipo de convertidores es el frenado de los motores asíncronos.

Máquina síncrona. La utilización de los convertidores ca/cc en la máquina síncrona se dirigen a dos grandes grupos de aplicación.

En el caso de los generadores síncronos, es necesario contar con una corriente continua para la excitación de la máquina.

Desde el punto de vista de su utilización como motor, es necesario contar con un convertidor ca/cc para el control de la excitación, y en aquellos casos en que se realice un control de velocidad de la máquina, será necesario contar con una etapa rectificadora como paso previo para atacar el convertidor cc/ca que alimentará la máquina a tensión y frecuencia variables.

Destacar asimismo el campo de los generadores síncronos de pequeña y media potencia que funcionan en un régimen de velocidad muy variable, como pueden ser

los generadores eólicos. En este tipo de aplicaciones es común utilizar un convertidor ca/cc para transformar la energía generada en continua como paso previo a la transformador cc/ca de la misma para su acoplamiento a un sistema eléctrico de frecuencia y tensión fijas.

Motores especiales. Algunas máquinas como los motores paso a paso necesitan una fuente de corriente continua que debe conmutarse adecuadamente para conseguir su control. Lo mismo sucede con algunas máquinas de tipo *brushless* (sin escobillas) que requieren una fuente de corriente continua como paso previo para alimentar un convertidor cc/ca.

Convertidores cc/cc. Este tipo de convertidores transforman un determinado valor de corriente continua de entrada en uno distinto de salida, con la posibilidad de incluir, además, aislamiento galvánico entre entrada y salida.

Desde el punto de vista de los accionamiento su campo de aplicación es el mismo que el de los convertidores ca/cc, con la diferencia de que la fuente de energía no es alterna, sino continua.

Su utilización se restringe a sistemas embarcados, donde la distribución de energía se realiza en corriente continua, o en algunas situaciones especiales, su utilización combinada con los rectificadores no controlados permite diseñar convertidores ca/cc con un mejor factor de potencia.

Convertidores cc/ca. Este tipo de convertidores reciben también el nombre de inversores.

Básicamente, realizan una conversión de corriente continua en corriente alterna, con la posibilidad de poder controlar tanto la frecuencia como el valor eficaz de la tensión o intensidad de salida, lo que les hace fundamentales para el diseño de accionamientos basados en máquinas asíncronas y síncronas.

Dado que normalmente la distribución de energía se realiza en corriente alterna, suelen ir asociados a un rectificador. Se utilizan también para acoplar al sistema eléctrico la energía generada por los generadores eólicos, que se caracterizan por un motor primario de velocidad muy variable.

Convertidores ca/ca. Este tipo de convertidores se utilizan ampliamente en el diseño de arrancadores suaves para reducir la intensidad demandada durante el arranque de los motores de inducción. En su estructura de control más básica, su función es modificar el valor eficaz de la tensión de entrada, conservando su frecuencia, aunque también puede conseguir una tensión de salida con una frecuencia submúltipla de la de entrada. En este último caso reciben el nombre específico de ciclo convertidores, habiendo obtenido durante la última década un especial protagonismo en el diseño de sistemas de tracción eléctrica.

CAPITULO IV

ANALIZADOR TRIFASICO DE CALIDAD DE ENERGIA ELECTRICA. (FLUKE 190-204).

4.1 INTRODUCCION.

Los nuevos osciloscopios ScopeMeter 190-204 (200 MHz.) de Fluke combinan las más altas homologaciones de seguridad y la resistencia portátil con las altas prestaciones de un osciloscopio para banco. Diseñados para técnicos e ingenieros de mantenimiento industrial, estos robustos osciloscopios trabajan en condiciones industriales de máxima dureza, suciedad y riesgo para efectuar todo tipo de comprobaciones, desde dispositivos microelectrónicos hasta aplicaciones electrónicas de gran potencia.

La nueva serie 190 II cuenta con todas las funciones estándar de ScopeMeter, incluidas las siguientes: TrendPlot™, disparo Connect-and-View™ y ScopeRecord™ y mucho más:

- Cuatro entradas aisladas eléctricamente.
- Categoría de seguridad CAT III 1000V, CAT IV 600V.
- Escoja entre los modelos con ancho de banda de 200 o 100 MHz.
- Adquisición única, anchura de impulsos y disparo de vídeo.
- Velocidad de muestreo rápida: hasta 2,5 GS/s con resolución de hasta 400 ps.
- Gran profundidad de memoria, con 10.000 muestras de captura de formas de onda por canal que puede ampliar mediante la función zoom.
- Homologación IP-51 contra el polvo y las salpicaduras para soportar los entornos industriales más exigentes.
- Puertos USB aislados para establecer conexiones con dispositivos de memoria y PC.

- Batería de 8 horas de duración, estándar con la nueva tecnología de ión-litio.
- Tapa del compartimento de la batería de fácil acceso para cambiar la batería con rapidez.
- Ranura para cerrar manualmente y proteger el osciloscopio mientras no esté vigilado.

Cuadruple su potencia de diagnóstico junto con la categoría de seguridad CAT IV.

Los nuevos osciloscopios portátiles de la serie 190 II de Fluke son instrumentos flotantes con aislamiento doble y homologación de seguridad para entornos CAT III 1000 V y CAT IV 600 V.

Inspeccione al mismo tiempo señales de entrada, bucles de retroalimentación de salida y bloqueo de seguridad para localizar una gran variedad de problemas tales como:

- Sobrecarga de corriente o voltaje del circuito.
- Compruebe los armónicos, los transitorios y las cargas en las entradas de alimentación trifásicas.

4.2 Entradas: Conexiones de entrada.

Mire la parte superior del instrumento de medida. El instrumento de medida cuenta con cuatro entradas de señal de clavija BNC de seguridad (modelos 190–204). La arquitectura de entradas aisladas permite mediciones flotantes independientes con cada entrada (Fig. N.30).

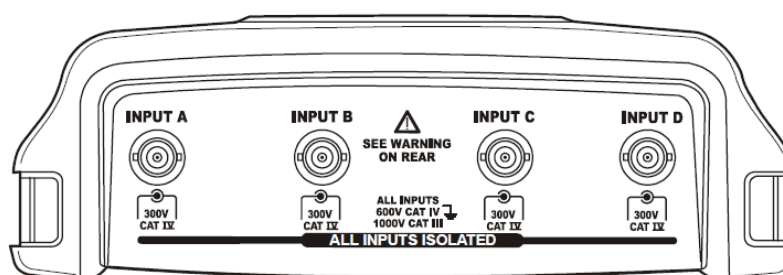


Figura. 30 Conexiones de medida

Realización de conexiones de entrada.

Para realizar mediciones osciloscópicas, conecte la sonda de tensión roja a la entrada A, la sonda de tensión azul a la entrada B, la sonda de tensión gris a la entrada C y, por último, la sonda de tensión verde a la entrada D. Conecte los cables cortos de conexión a tierra de **cada** sonda de tensión a su **propio** potencial de referencia. (Fig. N.31)

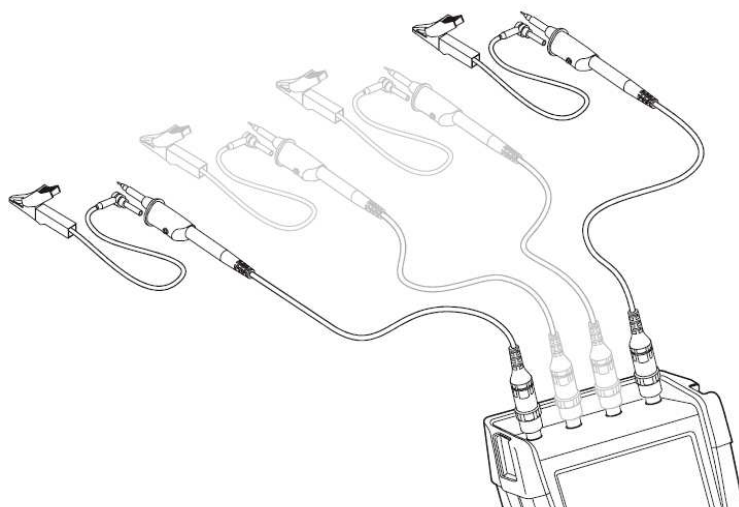


Figura 31. Conexiones de osciloscopio

Ajuste de la configuración de tipo de sonda.

Para obtener resultados de medición correctos, los ajustes de tipo de sonda del instrumento de medida deben corresponderse con los tipos de sonda conectados. Para seleccionar el ajuste de sonda de entrada A, proceda como se indica a continuación: (Fig. N.32)

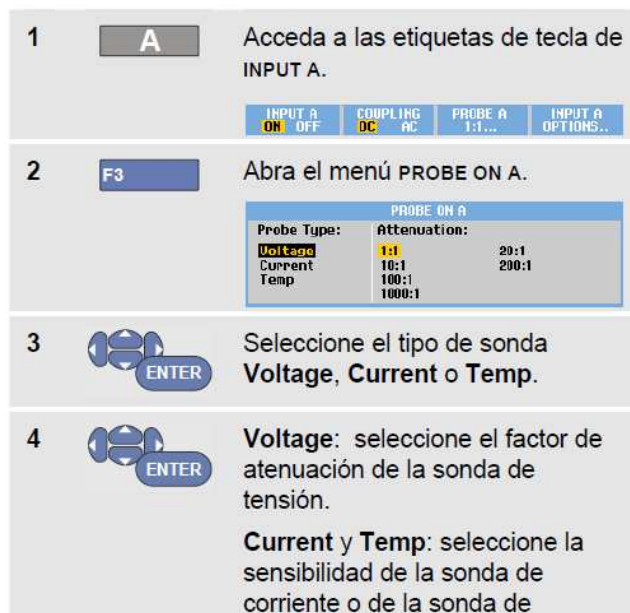


Figura 32. Configuración de sonda.

4.3 Voltaje/Amperios: Medición de Voltajes.

El voltaje se puede medirse tanto en modo de osciloscopio como de multímetro. El modo de osciloscopio tiene la ventaja de que aparecen dos formas de onda mientras se realizan las mediciones.

Por su parte, el modo de multímetro tiene la ventaja de proporcionar una medición de alta resolución. El siguiente ejemplo explica una medición de voltaje típica en modo de multímetro. (Fig. N.33, 34, 35)

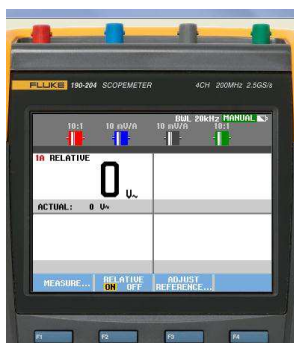


Figura 33. Medición de voltajes.

F1

Abra el menú **MEASUREMENT**
(Medición).



Figura 34. Panel de Medición de voltajes



Resalte V ac

ENTER

Abra el submenú



Observe la sensibilidad de la sonda
RESALTE LA SENSIBILIDAD
CORRESPONDIENTE EN EL MENU

ENTER

Acepte la medición

Figura 35. Indicaciones de Medición de voltajes

Medición de una corriente.

La corriente puede medirse tanto en modo de osciloscopio como de multímetro. El modo de osciloscopio tiene la ventaja de que aparecen dos formas de onda mientras se realizan las mediciones.

Por su parte, el modo de multímetro tiene la ventaja de proporcionar una medición de alta resolución. El siguiente ejemplo explica una medición de corriente típica en modo de multímetro. (Fig. N.36,37, 38)

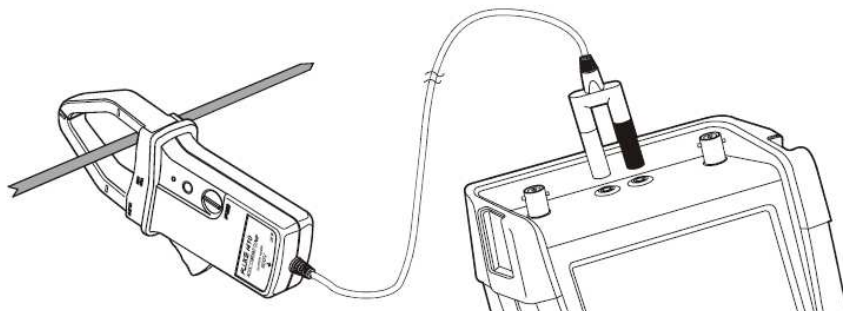


Figura 36. Medición de corriente.

F2

Abra el menú (READING).

READING 1

on A	V ac	A ac...	Hz	Temp...
on B	V dc	A dc...	Rise time	dB...
on C	V ac+dc	A ac+dc...	Fall time	mAs
on D	Peak...	Power...	Pulse...	
Off	V pwm...	Phase	Duty...	

⬅ ➡

Resalte A ac.

Figura 37. Indicadores de Medición de corriente.

READING 1

on A	V ac	A ac...	Hz	Temp...
on B	V dc	A dc...	Rise time	dB...
on C	V ac+dc	A ac+dc...	Fall time	mAs
on D	Peak...	Power...	Pulse...	
Off	V pwm...	Phase	Duty...	

READINGS

1 2 3 4

CLOSE

ENTER Abra el submenú **CURRENT PROBE** (Sonda amperimétrica).

CURRENT PROBE	
Sensitivity:	
100 μ V/A	400 mV/A
1 mV/A	1 V/A
10 mV/A	10 V/A
100 mV/A	100 V/A

 Observe la sensibilidad de la sonda amperimétrica. Resalte la sensibilidad correspondiente en el menú; p.ej. **1 mV/A**.

ENTER Acepte la medición de corriente.

Figura 38. Panel de Medición de corriente

NOTA.

Se pueden obtener datos desde los 200 mA, hasta los 10 KA

Captura de transitorios: Visualización de los transitorios rápidos.

Para capturar los transitorios rápidos de la forma de onda, proceda del siguiente modo: (Fig. N.39).

- 1** **SCOPE** Abra las etiquetas de la tecla **SCOPE**.
- 2** **F4** Abra el menú **WAVEFORM OPTIONS**.

WAVEFORM OPTIONS			
Glitch:	Acquisition:	Average:	Waveform:
On	Normal	Off	Normal
Off	Fast	On...	Persistence...
	Full		Mathematics...
			Reference...
- 3**  **ENTER** Seleccione **Glitch: On**.
- 4** **F4** Salga del menú.

Figura 39. Panel de Medición de transistores rápidos.

Puede utilizar esta función para ver eventos (transitorios rápidos u otras formas de onda asíncronas) de 8 ns (8nanosegundos, debido a ADC con 125 MS/s de velocidad de muestreo) o más amplios, o bien para ver las formas de onda moduladas de alta frecuencia.

Al seleccionar el rango 2 mV/div, la detección de transitorios rápidos se desactivará automáticamente. En el rango 2 mV/div, puede configurar la activación de los transitorios rápidos manualmente.

4.4 Registro.

Este capítulo presenta una introducción paso a paso a las funciones de registrador del instrumento de medida. La introducción incluye ejemplos que muestran cómo utilizar los menús y realizar las operaciones básicas.

Apertura del menú principal del registrador.

En primer lugar, seleccione una medición en modo de osciloscopio o de multímetro. Ahora podrá seleccionar las funciones de registrador en el menú principal del registrador. Para abrir el menú principal, proceda del siguiente modo: (Fig. N.40)

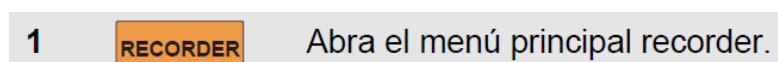




Figura 40. Menú principal del registrador (Recorder).

4.4.1 Trend Plot: Trazado de mediciones en un intervalo de tiempo (TrendPlot™).

Utilice la función TrendPlot para trazar el gráfico de mediciones (lecturas) del osciloscopio o el medidor como una función de tiempo. (Fig. N.40)

Modo de registro sin papel TrendPlot: registra de hasta 16 días para encontrar fallos intermitentes.

Inicio de una función TrendPlot.

Para iniciar la función TrendPlot, proceda del siguiente modo

RECORDER	Abra el menú principal RECORDER .
 	Resalte Trend Plot .
ENTER	Inicie el registro de TrendPlot.

Figura 40. Registro Trend Plot.

El instrumento de medida registrará continuamente las lecturas digitales de las mediciones y las presentará en forma de gráfico. El gráfico de TrendPlot se desplaza de derecha a izquierda, como un registrador de gráficos.

Observe que en la parte inferior de la pantalla aparece el tiempo registrado desde el principio. La lectura actual aparecerá en la parte superior de la pantalla. (Fig. N.42)

Al realizar un trazado TrendPlot simultáneo de dos lecturas, el área de la pantalla se dividirá en dos secciones de cuatro divisiones cada una. Al realizar un trazado TrendPlot simultáneo de tres o cuatro lecturas, el área de pantalla se dividirá en tres o cuatro secciones con dos divisiones cada una.

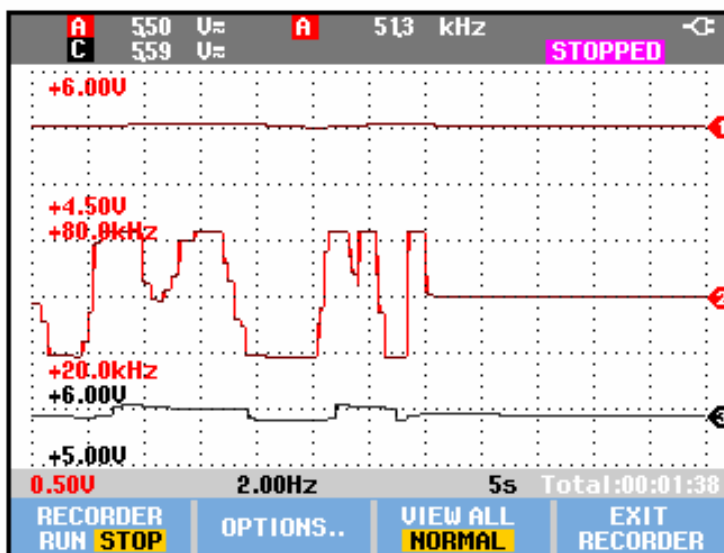


Figura 42. Registrador (Recorder).

Una vez que la memoria del registrador se llene, se utiliza un algoritmo de compresión automático para comprimir todas las muestras en la mitad de la memoria sin perder los transitorios. La otra mitad de la memoria del registrador volverá a quedar libre para continuar registrando.

4.4.2 SCOPE RECORD: Registro de formas de onda osciloscópicas en la memoria profunda (Scope Record).

La función **SCOPE RECORD** es un modo de desplazamiento que registra una forma de onda larga de cada entrada activa. **Graba hasta 48 horas de**

formas de onda de alta resolución mediante ScopeRecor. Esta función puede utilizarse para controlar formas de onda similares a señales de control de movimiento o el evento de activación de una fuente de alimentación ininterrumpida (UPS). Durante el registro se capturan los transitorios rápidos. Gracias a la profundidad de memoria, es posible efectuar registros de más de un día. Esta función es similar al modo de desplazamiento de muchos osciloscopios de almacenamiento digital, con la diferencia de que la memoria es más profunda y la funcionalidad es mejor. (Fig. N.43, 44)

Inicio de una función de registro osciloscópico.

Para registrar, por ejemplo, la forma de onda de las entradas A y B, proceda como se indica a continuación:

- 1 Aplique una señal a las entradas A y B.
- 2  Abra el menú principal **RECORDER**.
- 3  En el menú principal del registrador, resalte **Scope Record** y comience el registro.

Figura 43. Registrador (Recorder)



Figura 44. Inicio del Registrador (Recorder)

La forma de onda recorre la pantalla de derecha a izquierda al igual que un registrador gráfico normal. (Fig. N.45)

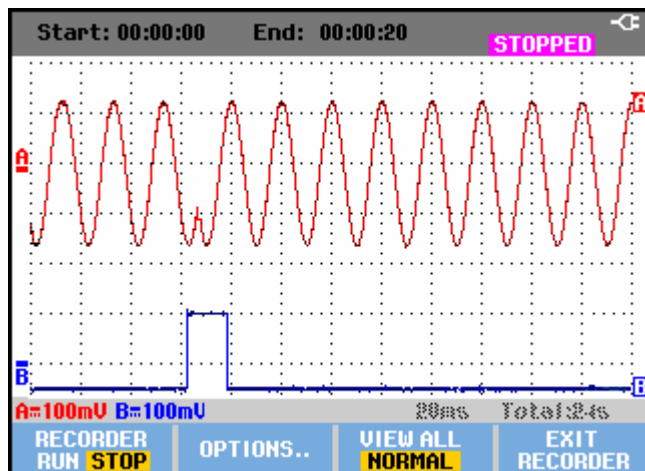


Figura 45. Registro de formas de onda.

Obsérvese que en la pantalla aparecerá lo siguiente:

Tiempo desde el inicio en la parte superior.

El estado, en la parte inferior, que incluye la configuración de división de escala de tiempo y la duración total que cabe en la memoria.

Uso de Scope Record en modo de barrido único.

Utilice la función del registrador **Single Sweep** para detener automáticamente el registro cuando se llene la memoria profunda.

A partir del paso 3 de la sección precedente, continúe del siguiente modo: (Fig. N.46)

F1	Detenga el registro para desbloquear la tecla de función OPTIONS...
F2	Abra el menú RECORDER OPTIONS . 
	Avance hasta el campo Mode , seleccione Single Sweep y acepte las opciones del registrador.
F1	Inicie el registro.

Figura 46. Indicadores de Registro de formas de onda

4.5 Memorias.

Se realiza una introducción paso a paso a las funciones generales del instrumento de medida que pueden utilizarse en los tres modos principales: Osciloscopio, Medidor o Registrador.

Uso de los puertos USB.

El instrumento de medida está equipado con dos puertos USB: (Fig. N.47)

Un puerto host USB para conectar una unidad de memoria Flash externa ("pastilla USB") para almacenar datos.

Un puerto mini USB de tipo B que le permite conectar el instrumento de medida a un PC para el control remoto y la transferencia de datos bajo el control de un PC.

Los puertos están totalmente aislados de los canales de entrada y están provistos de una tapa que los protege del polvo cuando no están en uso.

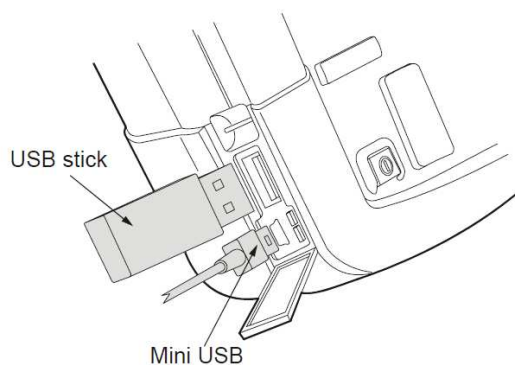
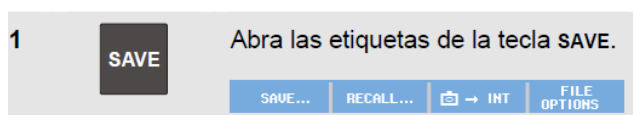


Figura 47. Conexiones USB del instrumento de Medida.

Almacenamiento de pantallas con configuraciones asociadas.

Siga los pasos que se indican a continuación para guardar, por ejemplo, una pantalla + configuración en modo de osciloscopio: (Fig. N.48, 49)



La pantalla quedará congelada a partir de este punto.

Figura 48. Indicadores de Conexiones USB.

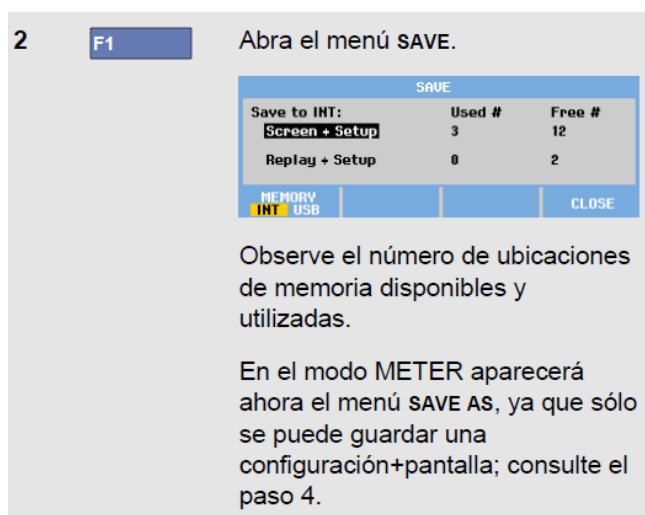


Figura 49. Indicadores de Conexiones USB.

3

F1

Seleccione la memoria de destino INT (memoria interna) o USB (dispositivo USB).

Observe el nuevo menú **SAVE** si selecciona USB.

4





Seleccione **Screen+Setup** y, a continuación, abra el menú **SAVE AS**.



Debajo de **Save As**: aparecen ya seleccionados el nombre predeterminado + el número de serie y **OK SAVE**.

Para modificar el nombre de esta pantalla+configuración específica o para modificar el nombre predeterminado, consulte "**Edición de nombres**" más adelante.

5

ENTER

Guarde la pantalla+configuración.

Para reanudar las mediciones, pulse .

Figura 49. Indicadores de Conexiones USB.

Recuperación de pantallas con configuraciones asociadas.

Haga lo siguiente para recuperar una pantalla + configuración: (Fig. N.50)

1

SAVE

Abra las etiquetas de la tecla **SAVE**.






2

F2

Abra el menú **RECALL**.

3

F1

Seleccione el origen, memoria interna (INT) o un dispositivo USB.

4




Resalte **DATA**.

5

ENTER

Acepte su selección y avance hasta el campo de nombre de archivo.

6




Seleccione el archivo que desea recuperar.

7

ENTER

Recupere la pantalla+configuración seleccionada.

Figura 50. Indicadores de recuperación de pantalla.

Observe que aparece la forma de onda recuperada y que en la pantalla se ve el texto **HOLD**. A partir de este punto podrá utilizar los cursores y el zoom para analizar, o bien imprimir la pantalla recuperada.

4.6 SOFTWARE DEL FLUKE 190 – 204: Utilización de FlukeView.

Con el software FlukeView® podrá cargar datos de forma de onda y mapas de bits de pantalla en un PC o en un ordenador portátil para procesarlos. Fig. N. 51)

Conexión a un ordenador.

Para conectar el instrumento de medida a un PC o un portátil (notebook) y utilizar el software FlukeView para Windows, proceda del siguiente modo:

- Use un cable de comunicación de USB de tipo A a
- mini USB de tipo B para conectar un ordenador al
- puerto mini USB del instrumento de medida (consulte figura).
- Instale los controladores USB del instrumento de medida.
- Instale la versión de demostración de FlukeView.

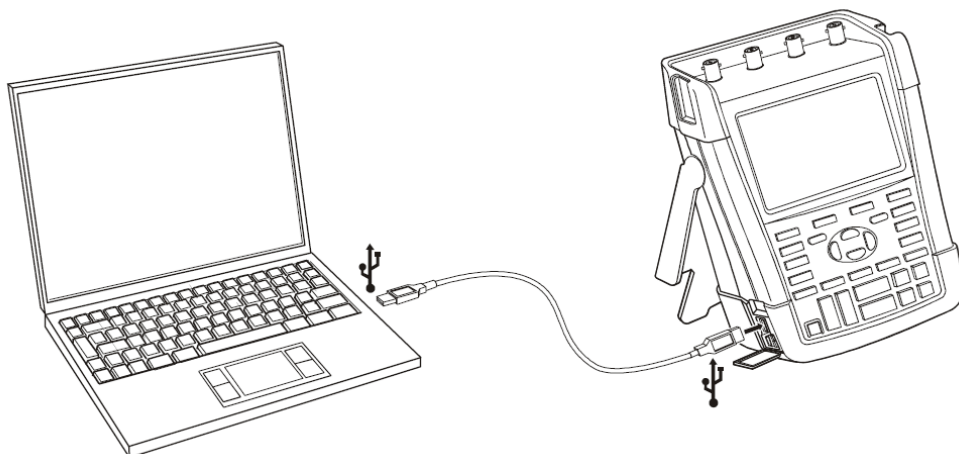


Figura 51. Conexión a un ordenador.

Durante el arranque (con excepción de la primera vez), el software FlukeView automáticamente intenta realizar una conexión con el instrumento de acuerdo con la última conexión válida. (Fig. N.52)

Si la conexión automática no se realiza correctamente, el cuadro de diálogo que se muestra a continuación aparece, lo que le permite establecer una conexión.

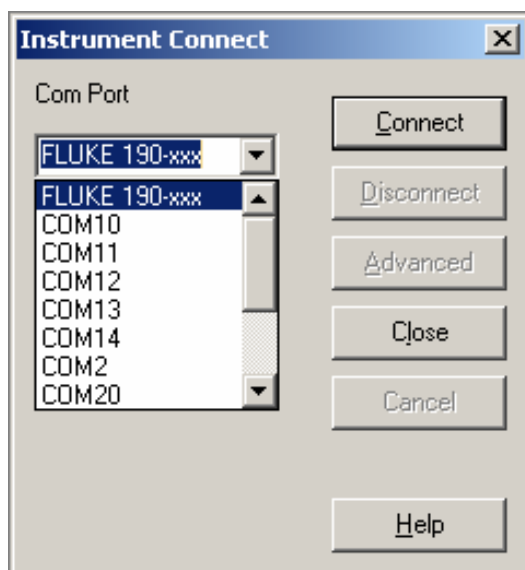


Figura 52. Indicadores de pantalla del FLUKE

Usando FlukeView: *Al presentar el Software FlukeView.*

Al hacer clic en los botones siguientes en la barra de herramientas, se puede leer datos directamente desde el instrumento de medida ScopeMeter:

Puede guardar, abrir e imprimir los datos, o exportarlo a otro programas.

FlukeView software le permite leer los siguientes tipos de los datos de la herramienta de prueba ScopeMeter en una ventana en el PC pantalla. (Fig. N.53)

- Pantallas
- Formas de onda
- Configuraciones
- Lecturas
- Reproducir

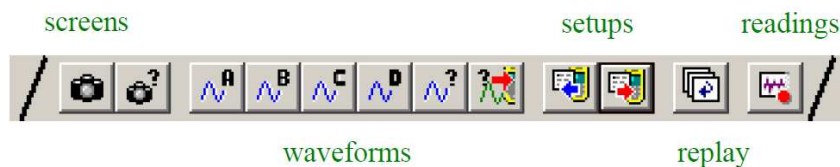


Figura 53. Comandos de Indicadores de pantalla del FLUKE

Analizando formas de onda.

Usted puede leer las muestras numéricas de forma de onda de la ScopeMeter herramienta de prueba y visualizar estas muestras en una ventana de forma de onda. Hasta cuatro formas de onda se puede visualizar en una ventana. (Fig. N.54, 55, 56)

Para demostrar esto, una traza se lee desde la entrada A y B.

Mostrar formas de onda en el PC

1 Haga clic en. Aparecerá un cuadro de diálogo que le permite seleccionar las formas de onda que desea leer.



2 Elige la forma de onda activa.

3 Elija la entrada A y la entrada B.

4 Haga clic en Inicio para leer y mostrar las formas de onda seleccionada.

Para cambiar la ventana de su preferencia:

5 Seleccione Opciones - Añadir Descripción y escriba una descripción en el cuadro de texto debajo de la ventana (máximo 10 líneas).

6 Seleccione Ver - BLOQUE DE DATOS para mostrar el bloque de datos.

7 Seleccione Ver - Cursores para mostrar los cursores.

8 Seleccione Opciones - Colores Para cambiar los colores de forma de onda.

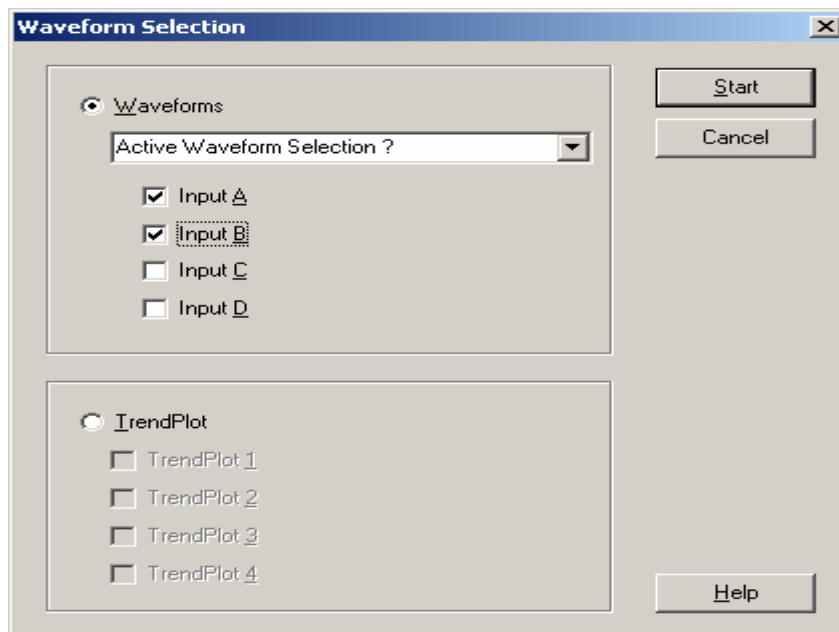


Figura 54. Comandos de Indicadores de pantalla del FLUKE

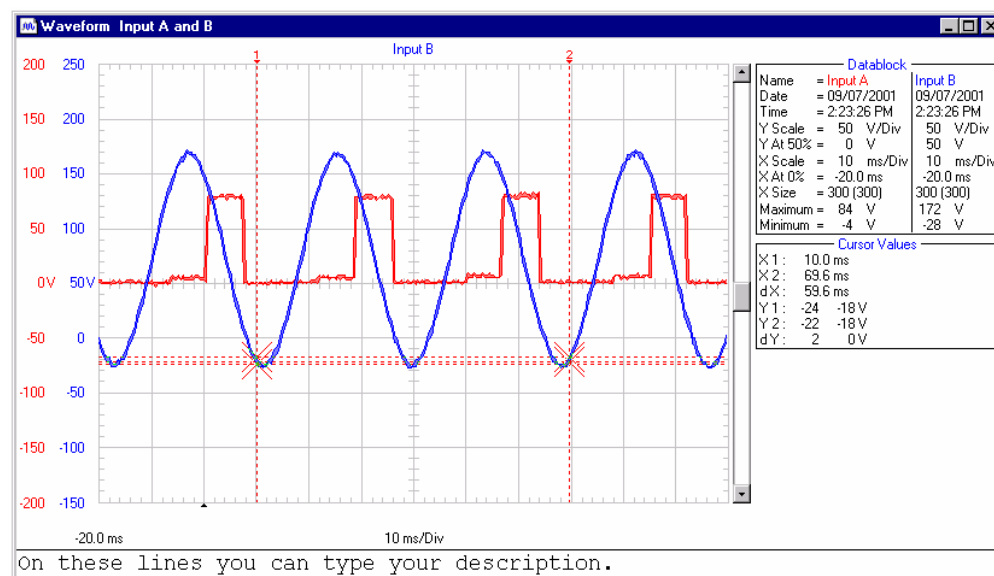


Figura 55. Gráfico de ondas en la pantalla del FLUKE

Datablock	Cursor Values
Name : Name of the waveform	X1 : Time at cursor 1
Date : Date of the waveform	X2 : Time at cursor 2
Time : Time of the waveform	dX : X2 - X1
Y Scale : Vertical scale	Y1 : Minimum and maximum value at cursor 1
Y At 50% : Vertical position	Y2 : Minimum and maximum value at cursor 2
X Scale : Horizontal scale	dY : Minimum and maximum Y2 - Y1
X At 0% : Horizontal position	
X Size : Shown (Total) number of waveform points	
Maximum: Maximum value	
Minimum : Minimum value	Notice that values apply to the active waveform.

Figura 56. Reporte gráfico de ondas en la pantalla del FLUKE.

La generación de un espectro FFT (Transformada Rápida de Fourier) de una forma de onda.

Para los cálculos de espectro, una forma de onda repetitiva o una forma de onda que contiene componentes repetitivos se superpone de un fijo valor de desplazamiento (componente de CC) y un número de ondas sinusoidales. La espectro muestra la amplitud y la frecuencia de cada onda senoidal como un gráfico de barras. El valor de la componente DC se muestra en la bloque de datos. (Fig. N.57, 58)

1 Seleccione la forma de onda de la que desea generar un espectro.

En una ventana de forma de onda múltiple, seleccione **Ver – Activo de forma de onda** o hacer clic con el ratón para elegir el activo forma de onda.

2 Seleccione **Herramientas - Spectrum**. El espectro se crea y se muestra en una ventana de espectro. Para cambiar la ventana de su preferencia:

3 Seleccione **Opciones - Añadir Descripción** y escriba una descripción en el cuadro de texto debajo de la ventana (máximo 10 líneas).

4 Seleccione **Ver - BLOQUE DE DATOS** para mostrar el bloque de datos.

5 Seleccione **Ver - Cursores** para mostrar los cursores.

6 Seleccione **Opciones - Colores** Para cambiar los colores del espectro.

Consulte la página siguiente para obtener un ejemplo de una ventana de espectro.

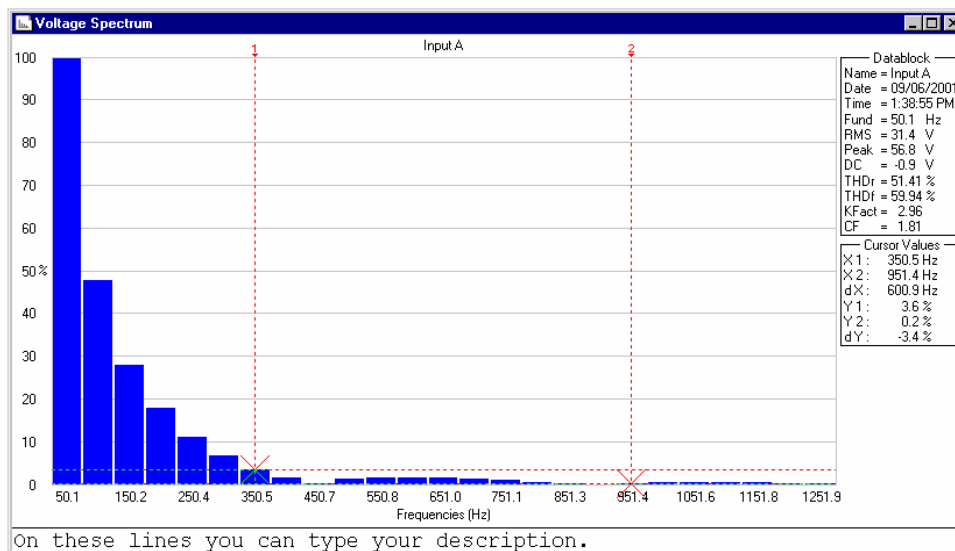


Figura 57. Reporte espectral de ondas en la pantalla del FLUKE

Datablock	Cursor Values
Name : Name of the spectrum	X1 : Frequency (or Harmonic Number) at cursor 1
Date : Date of the waveform	X2 : Frequency (or Harmonic Number) at cursor 2
Time : Time of the waveform	dX : X2 - X1
Fund : Fundamental frequency	Y1 : Spectrum value at cursor 1
RMS : Root Mean Square	Y2 : Spectrum value at cursor 2
Peak : Maximum value	dY : Y2 - Y1
DC : Direct Current value	
THDr : Total Harmonic Distortion (RMS)	
THDf : Total Harmonic Distortion (Fund)	
KFact : K-factor	
CF : Crest factor (Peak/RMS)	

Figura 58. Reporte gráfico de ondas en la pantalla del FLUKE

Inserción de lecturas en una hoja de cálculo.

- 1 Haga clic en la forma de onda de las lecturas que desee insertar.
- 2 Seleccione **Edición - Copiar datos** a copiar los datos de la lectura a la portapapeles.
- 3 Cambiar a un programa de hoja de cálculo.

4 Abra o cree una hoja de cálculo y coloque el cursor en el lugar desea insertar los datos.

5 Seleccione **Editar - Pegar** para insertar los datos en la hoja de trabajo con las lecturas numéricas dispuestos en columnas.

6 Haga clic para guardar la hoja de cálculo.

Control Remoto.

1 Seleccione **Instrument - Control Remoto**.

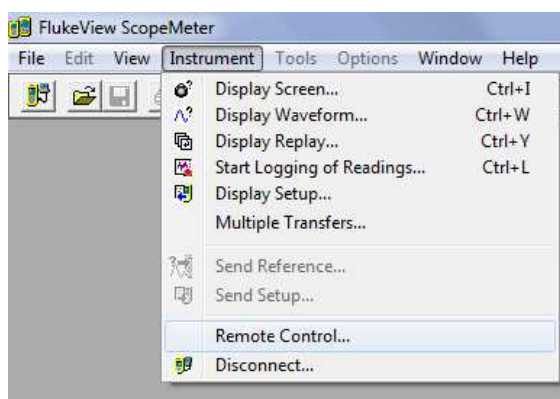


Figura 59. Pantalla del FLUKE para control remoto.

FlukeView se abrirá una pantalla de instrumentos de control remoto. La pantalla instrumento de control remoto es una copia del ScopeMeter frente. Que le permite operar el ScopeMeter en su PC (Mando a distancia).

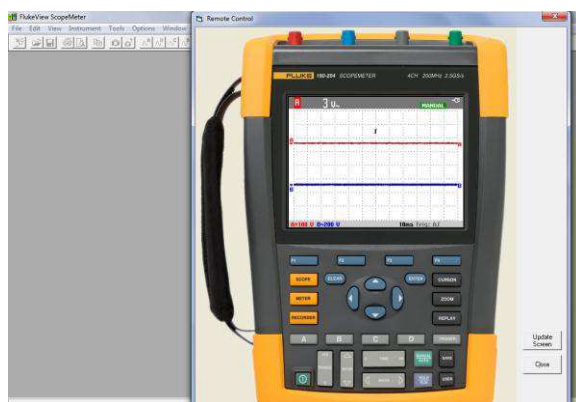


Figura 60. Scopemeter

Para operar el ScopeMeter conectado a través de esta pantalla, haga clic en las teclas simuladas. Además, su PC F1. F4, flecha llaves, y la tecla Intro realizará la misma acción que teclas correspondientes del instrumento.

CAPÍTULO V

PRÁCTICAS

5.1 USUARIO DE MEDIA TENSIÓN (NIVELES DE VOLTAJE, ARMÓNICOS) EN LAS ÁREAS INDUSTRIALES.

5.2 TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN (NIVELES DE VOLTAJE, ARMÓNICOS) EN REDES DE DISTRIBUCIÓN.

IDENTIFICAR LAS CARACTERÍSTICAS DE ARMÓNICOS HASTA EL RANGO 7° EN LAS DOS EMPRESAS DEL ESTUDIO.

Tabla A Características de AMPLITUD de los armónicos encontrados en la EMPRESA N.1

DÍA 1		AMPLITUD EMPRESA 1		
		ARMO 3	ARMO 5	ARMO 7
	MÁX	47,30	45,80	25,50
	MINI	20,00	15,80	7,70

DÍA 2		AMPLITUD EMPRESA 1		
		ARMO 3	ARMO 5	ARMO 7
	MÁX	46,20	44,50	26,10
	MINI	23,10	15,20	7,80

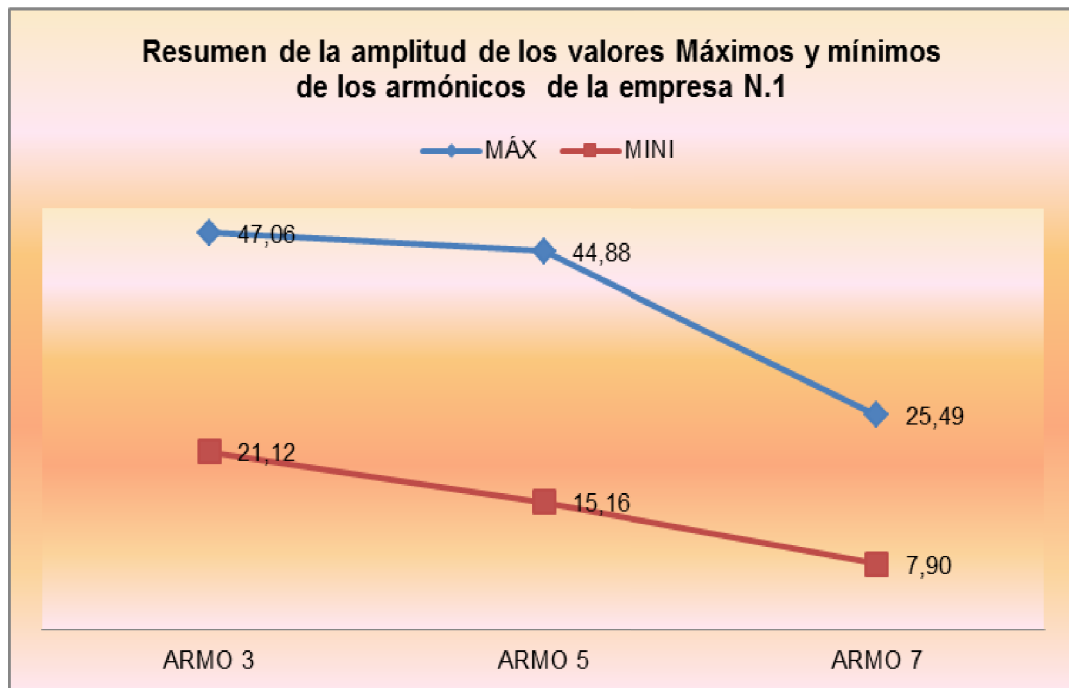
DÍA 3		AMPLITUD EMPRESA 1		
		ARMO 3	ARMO 5	ARMO 7
	MÁX	46,90	43,20	24,90
	MINI	21,10	16,10	8,90

DÍA 4		AMPLITUD EMPRESA 1		
		ARMO 3	ARMO 5	ARMO 7
	MÁX	47,20	44,70	26,90
	MINI	20,10	15,78	8,20

DÍA 5		AMPLITUD EMPRESA 1		
		ARMO 3	ARMO 5	ARMO 7
	MÁX	47,68	46,20	24,03
	MINI	21,30	15,90	6,90

		ARMO 3	ARMO 5	ARMO 7
PROMEDIO	MÁX	47,06	44,88	25,49
	MINI	21,12	15,16	7,90

GRÁFICO N. A



Fuente: Medición de armónicos en instalaciones comerciales.

Elaborado por: Autores

Se realizó un monitoreo de la tensión en la EMPRESA N.1, durante 5 días consecutivos, siendo los resultados que caracterizaron a la amplitud de las ondas que se registraron en el gráfico N.3 (un ejemplo) correspondiente a los rangos de los armónicos de 3, 5 y 7 encontrados.

Observándose a manera general que la amplitud más grande fue detectada el día 5 con 47,68 el día 5to, siendo el mínimo -20 el día 1ro, esto en relación a los armónicos de 3, luego el voltaje máximo para los armónicos de 5 se observó el mismo 5to día con un rango de 46,20 la máxima y -15,20 la mínima día 2, y para los armónicos de 7, se encontró rangos máximos entre 26,90 en el 4to día y 6,90 en el día 3.

Resumiendo en los 5 días de observación se determinó que los valores máximos para armónicos de TERCERA, encontrados fluctuaron entre 47,06 y -21,12, para armónicos de QUINTA entre 44,88 y -15,16 y para armónicos de SÉPTIMA entre 25,49 y -7,90.

Tabla B Características de AMPLITUD de los armónicos encontrados en la EMPRESA N. 2

DÍA 1		AMPLITUD EMPRESA 2		
		ARMO 3	ARMO 5	ARMO 7
	MÁX	6,43	23,34	23,20
	MINI	5,30	19,70	47,50

DÍA 2		AMPLITUD EMPRESA 1		
		ARMO 3	ARMO 5	ARMO 7
	MÁX	7,20	22,13	25,50
	MINI	5,90	15,80	7,70

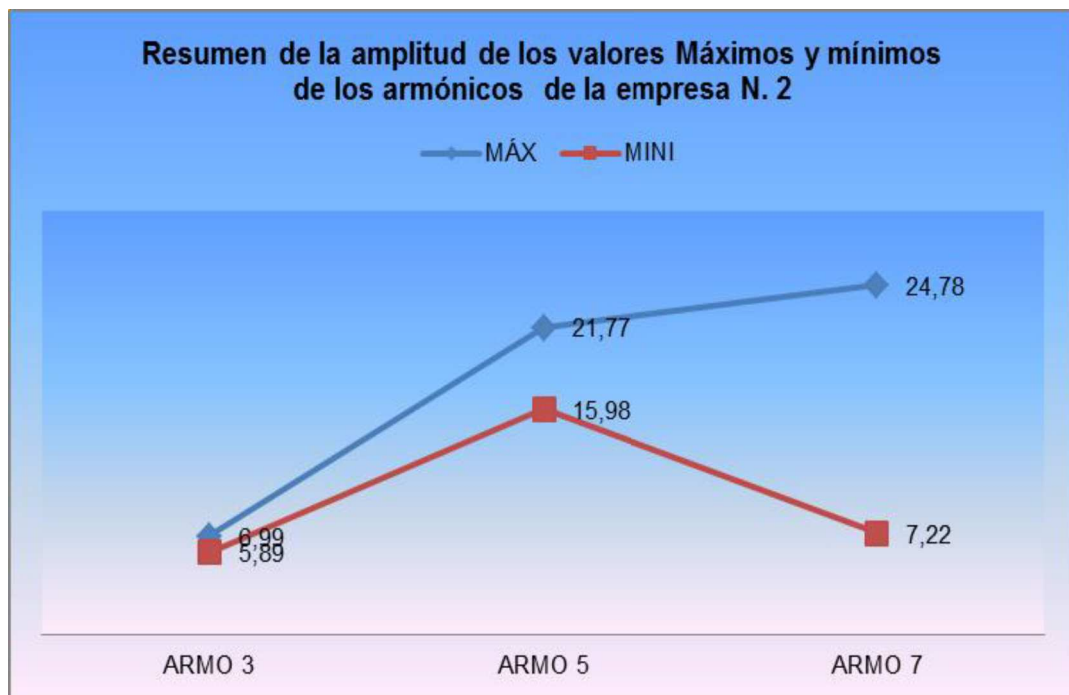
DÍA 3		AMPLITUD EMPRESA 1		
		ARMO 3	ARMO 5	ARMO 7
	MÁX	7,87	21,14	24,30
	MINI	6,20	16,03	7,80

DÍA 4		AMPLITUD EMPRESA 1		
		ARMO 3	ARMO 5	ARMO 7
	MÁX	6,45	22,78	24,76
	MINI	5,90	14,55	7,99

DÍA 5		AMPLITUD EMPRESA 1		
		ARMO 3	ARMO 5	ARMO 7
	MÁX	6,98	20,13	25,11
	MINI	6,13	15,03	6,78

		ARMO 3	ARMO 5	ARMO 7
PROMEDIO	MÁX	6,99	21,77	24,78
	MINI	5,89	15,98	7,22

GRÁFICO B



Fuente: Medición de armónicos en instalaciones industriales.

Elaborado por: Autores

De igual manera se realizó un monitoreo de la tensión en la EMPRESA N.2, durante 5 días consecutivos, siendo los resultados que caracterizaron a la amplitud de las ondas que se registraron en el gráfico N.4 (un ejemplo) correspondiente a los rangos de los armónicos de 3, 5 y 7 encontrados.

Observándose de manera general que la amplitud más grande fue detectada el día 3 con 7,87 de voltaje, siendo el mínimo -5,90 el día 2 y 4, esto en relación a los armónicos de 3, luego el voltaje máximo para los armónicos de 5 se observó el mismo 1to día con un rango de 23,34 la máxima y -14,55 la mínima el 4to día, y para los armónicos de 7, se encontró rangos máximos entre 25,50 en el 2to día y el mínimo 6,78 en el día 5to.

Resumiendo en los 5 días de observación se determinó que los valores máximos para armónicos de TERCERA, encontrados fluctuaron entre 6,99 y -5,89, para armónicos de QUINTA entre 21,77 y -15,98 y para armónicos de SÉPTIMA entre 24,78 y -7,22.

Tabla C Características del tiempo de aparición de los armónicos encontrados en la EMPRESA N. 1

	AMPLITUD EMPRESA 1		
	ARMO 3	ARMO 5	ARMO 7
MAÑANA (8 A.M. A 16:00 P.M.)	5	6	3
TARDE (16:00 A 12 P.M.)	4	5	4
MAÑANA (24:00 P.M. A 08:00 A.M.)	5	4	2

	AMPLITUD EMPRESA 1		
	ARMO 3	ARMO 5	ARMO 7
MAÑANA (8 A.M. A 16:00 P.M.)	2400	2880	1440
TARDE (16:00 A 12 P.M.)	1920	2400	1920
MAÑANA (24:00 P.M. A 08:00 A.M.)	2400	1920	960
TOTAL	6720	7200	4320

Se observa en la tabla superior la frecuencia de armónicos detectados durante 1 minuto y en la tabla inferior se observa la cantidad de armónicos presentados durante 24 horas en los períodos de 8 a.m hasta las 24:00 h.

De tal manera que para los armónicos de 3ra, la frecuencia total en 24 horas fue de 6.720, mientras que para los armónicos de 5ta fueron, 7.200, y para los armónicos de 7ma, fueron 4320, lo que corresponde al primer día de medición; siendo su porcentaje de 36,36% armónicos de 3ra, 40,34% armónicos de 5ta y 23,29% armónicos de 7ma.

Posteriormente se siguió la misma metodología para el 2, 3, 4 y 5 día de medición.

Tabla D Características del tiempo de aparición de los armónicos encontrados en la EMPRESA N. 2

	AMPLITUD EMPRESA 2		
	ARMO 3	ARMO 5	ARMO 7
MAÑANA	3	5	7
TARDE	3	3	5
NOCHE	2	5	6

	AMPLITUD EMPRESA 1		
	ARMO 3	ARMO 5	ARMO 7
MAÑANA (8 A.M. A 16:00 P.M.)	1440	2400	3360
TARDE (16:00 A 12 P.M.)	1440	1440	2400
MAÑANA (24:00 P.M. A 08:00 A.M.)	960	2400	2880
TOTAL	3840	6240	8640

Se observa en la tabla superior de la empresa N.2 la frecuencia de armónicos detectados durante 1 minuto y en la tabla inferior se observa la cantidad de armónicos presentados durante 24 horas en los períodos de 8 a.m hasta las 24:00 h.

Siendo entonces que para los armónicos de 3ra, la frecuencia total en 24 horas fue de 3.840, mientras que para los armónicos de 5ta fueron, 6240, y para los armónicos de 7ma, fueron 8640, lo que corresponde al primer día de medición; siendo su porcentaje de 19,05% armónicos de 3ra, 34,10% armónicos de 5ta y 46,85% armónicos de 7ma.

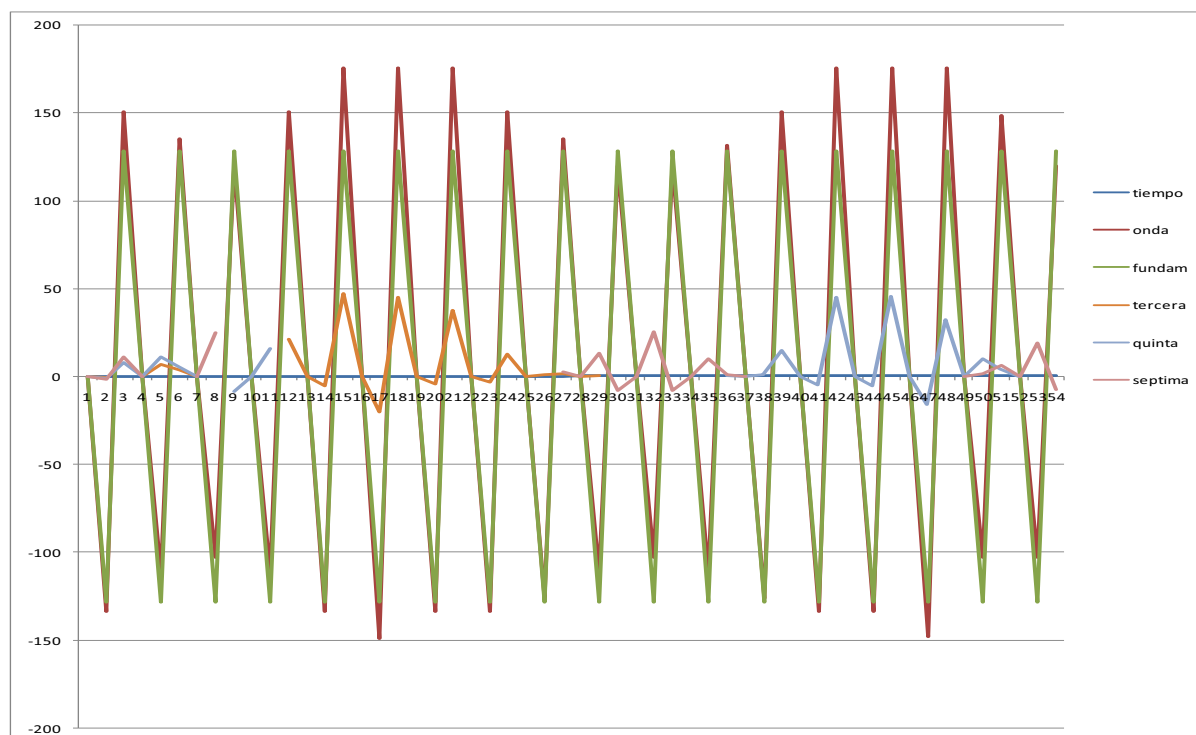
Posteriormente se siguió la misma metodología para el 2, 3, 4 y 5 día de medición.

EVALUAR LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS IDENTIFICANDO LOS ARMÓNICOS DE RANGOS 3°, 5°, 7°

Tabla E Armónicos de 3°, 5° y 7° EMPRESA N.1

	APORTE DE ARMONICOS A LA DISTORSION (%)			
EMPRESA 1	TERCER ARMONI (%)	QUINTO ARMONI (%)	SEPTIMO ARMONI (%)	TOTAL (%)
promedio	34,22	40,23	25,55	100,00

GRÁFICO C



Fuente: Medición de armónicos en EMPRESA N.1

Elaborado por: Autores

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS.

El gráfico y tabla anterior nos demuestra un segmento de medición, en el cual se presenta la onda fundamental y los armónicos de 3, 5, y 7, los cálculos correspondientes determinaron que el porcentaje de armónicos al total fueron distribuidos de la siguiente manera; 36,36% para los armónicos de tercera, 40,34% para los armónicos de 5ta y 25,55% para los de 7ma.

El cálculo se realizó de la siguiente manera: (este es un segmento del cálculo realizado en Excel)

$$v(t) \cdot dt$$

tiempo	onda	fundam	diferencia	Diferencial	Tercera	quinta	séptima
0	0	0	0		-	-	-
0,0056	(-133,70)	128,69	-5,01	-0,028056	(0,55)	(0,92)	(1,28)
0,0112	151,20	128,69	22,51	0,126056		8,11	11,10

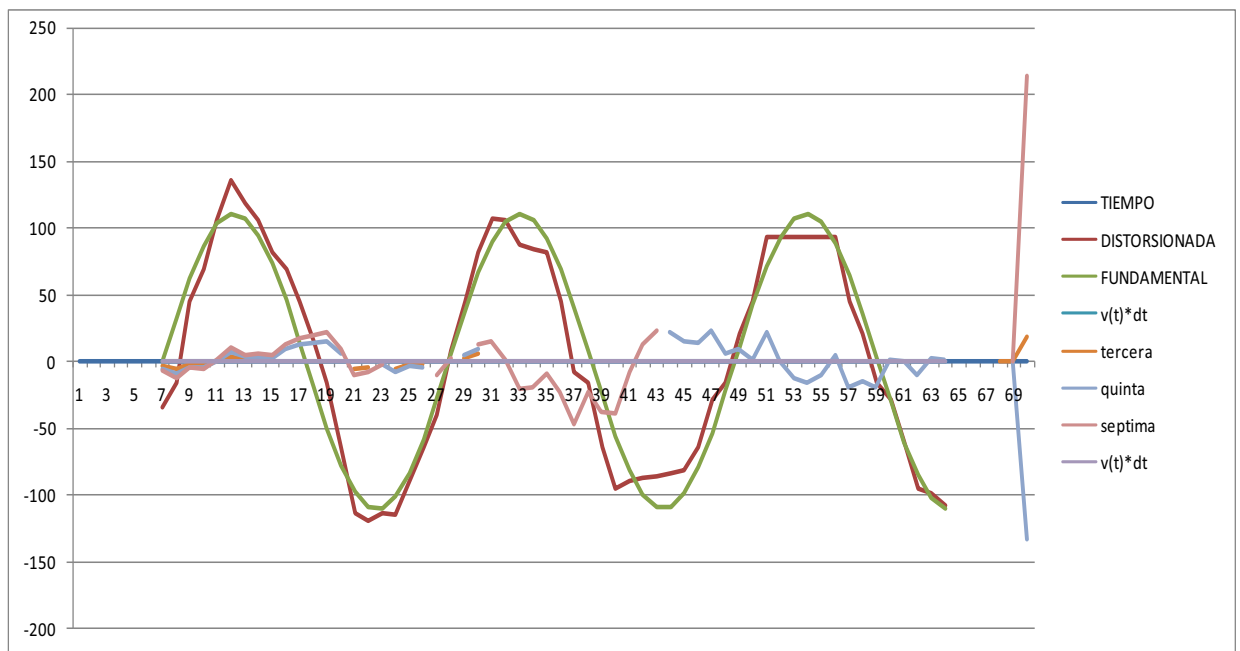
En la primera columna se observa la variable tiempo, cuyo dato puede observarse en el gráfico N.3, al medir el eje de las X, se obtiene el valor de 0,0056 seg. , luego se observa el pico de la onda distorsionada que aproximadamente se encuentra en -133,70, posteriormente se observa la fundamental que cae en el orden de -128,69 de voltaje, con éstos datos procedemos a calcular los armónicos de tercera, quinta y séptima los que se realizaron en Excel.

- 1.- Se establece la diferencia entre ONDA - FUNDAMENTAL (-133,70-128,69), en la primera fila fue -5,01, luego
- 2.- Se obtiene el diferencial TIEMPO x DIFERENCIA (0,0056 x -5,01) se obtiene 0,028056 diferencial.
- 3.- Luego se define la fórmula del armónico de tercera =Diferencia*SENO((((1130,97*F8(tiempo 0,0056))/180)*3,1416), lo que es igual a DIFERENCIA x (1130,97 x t (0,0056) / 180 (radial 360°) x π (3,1416) y se obtiene 0,55.
- 4.- El valor de 1130,79 se obtiene de (3 (armónico) x2 x π (3,1416) x f (60 Hz))

Tabla F Armónicos de 3°, 5° y 7° EMPRESA N.2

APORTE DE ARMONICOS A LA DISTORSION (%)			
TERCER ARMONI(%)	QUINTO ARMONI (%)	SEPTIMO ARMONI (%)	TOTAL (%)
19,1	34,1	46,9	100,00

GRÁFICO D



Fuente: Medición de armónicos en EMPRESA N. 2

Elaborado por: Autores

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS.

El gráfico y tabla anterior nos demuestra un segmento de medición en el tiempo, en el cual se presenta la onda fundamental y los armónicos de 3, 5, y 7, los cálculos correspondientes determinaron que el porcentaje de armónicos al total fueron distribuidos de la siguiente manera; 19,1% para los armónicos de tercera, 34,1% para los armónicos de 5ta y 46,9% para los de 7ma.

El cálculo se realizó de la siguiente manera: (este es un segmento del cálculo realizado en Excel).

TIEMPO	DISTORSIONADA	FUNDAMEN	diferencia	v(t)*dt	tercera	quinta	séptima
0							
0,0008	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,0016	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,0024	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,0032	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,004	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,0048	(34,30)	0	(34,30)	(0,03)	(3,25)	(5,39)	(7,52)
0,0056	(16,00)	32,76584972	(48,77)	(0,04)	(5,38)	(8,93)	(12,44)
0,0064	45,00	62,57391377	(17,57)	(0,01)	(2,21)	(3,67)	(5,11)
0,0072	69,40	86,73340691	(17,33)	(0,01)	(2,46)	(4,07)	(5,64)

En la primera columna se observa la variable tiempo, cuyo dato puede observarse en el gráfico N. 4 (como ejemplo), al medir el eje de las X, se obtiene el valor de 0,0008 seg. , luego se observa el pico de la onda distorsionada que aproximadamente se encuentra en 34,30 (al tiempo 0,0048), posteriormente se observa la fundamental que cae en el orden de 0 de voltaje, con éstos datos procedemos a calcular los armónicos de tercera, quinta y séptima los que se realizaron en Excel.

- 1.- Se establece la diferencia entre ONDA distorsionada - FUNDAMENTAL (-34,30 - 0), en la primera fila fue -34,30, luego
- 2.- Se obtiene el diferencial TIEMPO x DIFERENCIA (0,0008 x -34,03) se obtiene 0,03 diferencial.
- 3.- Luego se define la fórmula del armónico de tercera =Diferencia*SENO(((1130,97*F8(tiempo 0,0008))/180)*3,1416), lo que es igual a DIFERENCIA x (1130,97 x t (0,0008) / 180 (radial 360°)x π (3,1416) y se obtiene 3,25. Para el de QUINTA será 5,39 y el de SÉPTIMA 7,52.

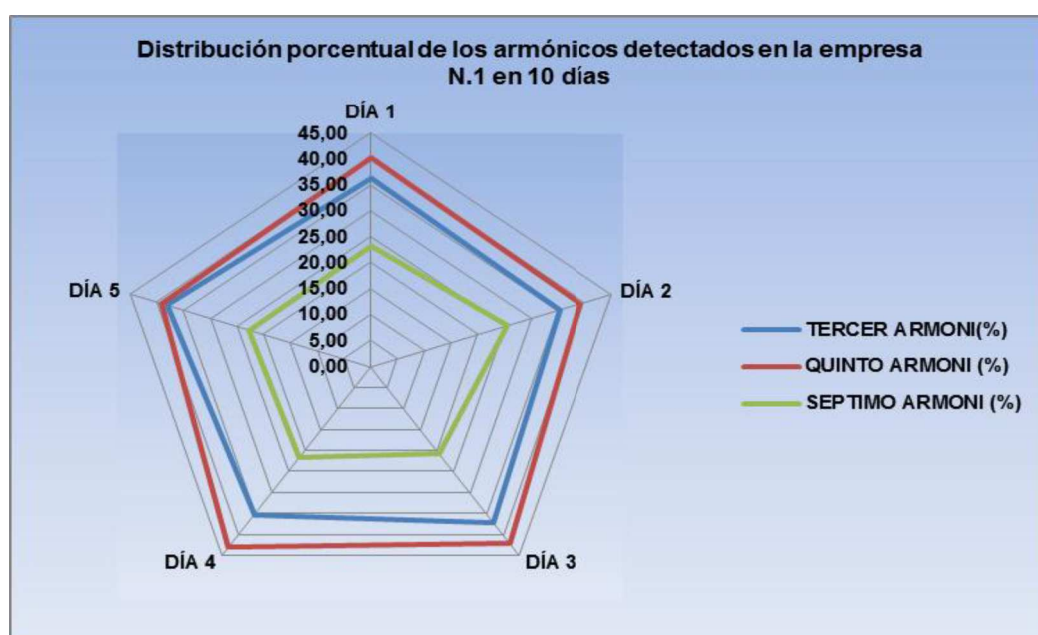
4.- El valor de 1130,79 se obtiene de $(3 \text{ (armónico)} \times 2 \times \pi (3,1416) \times f (60 \text{ Hz}))$.

Tabla G Resumen de aporte porcentual de las mediciones obtenidas en la EMPRESAS 1 con Armónicos de 3°,5° y 7°

APORTE DE ARMONICOS A LA DISTORSION (%)				
EMPRESA 1	TERCER ARMONI(%)	QUINTO ARMONI (%)	SEPTIMO ARMONI (%)	TOTAL (%)
DÍA 1	36,36	40,34	23,29	100,00
DÍA 2	35,28	39,21	25,51	100,00
DÍA 3	37,13	42,13	20,74	100,00
DÍA 4	35,33	43,01	21,66	100,00
DÍA 5	38,02	39,23	22,75	100,00

promedio 36,42 40,78 22,79 100,00

GRÁFICO E



Fuente: Medición de armónicos en instalaciones comerciales.

Elaborado por: Autores

ANÁLISIS

Los valores arriba anotados en la tabla N.5 corresponden al porcentaje de carga total en relación al armónico encontrado, de tal manera que para el primer día, se calculó todos los resultados encontrados en 24 horas, se procedió a la sumatoria de los armónicos de 3, 5 y 7 luego:

A modo de ejemplo 2 lecturas y el total de medición del día 1 en empresa N.1

	3x2xpxf 60	5x2xpxf 60	7x2xpxf 60		v(t)*dt
ARMÓNICOS	tercera	quinta	septima	sumatoria	dif
24 HORAS DE MEDICIÓN	-	-	-		
	-0,55	-0,92	-1,28	-2,75	-0,02
		8,11	11,1	19,21	0,11
TOTAL DE DÍA 1	0,81	0,9	0,52		2,24

De tal manera que la sumatoria del total de armónicos de 3, fue 0,81, el de quinta fue de 0,9 y el de séptima fue de 0,52, mientras que la sumatoria del diferencial (diferencia x tiempo constante en este ejemplo fue para la primera fila $(-2,75 \times 0,0056 = -0,02)$, lo que dio el total de 2,24.

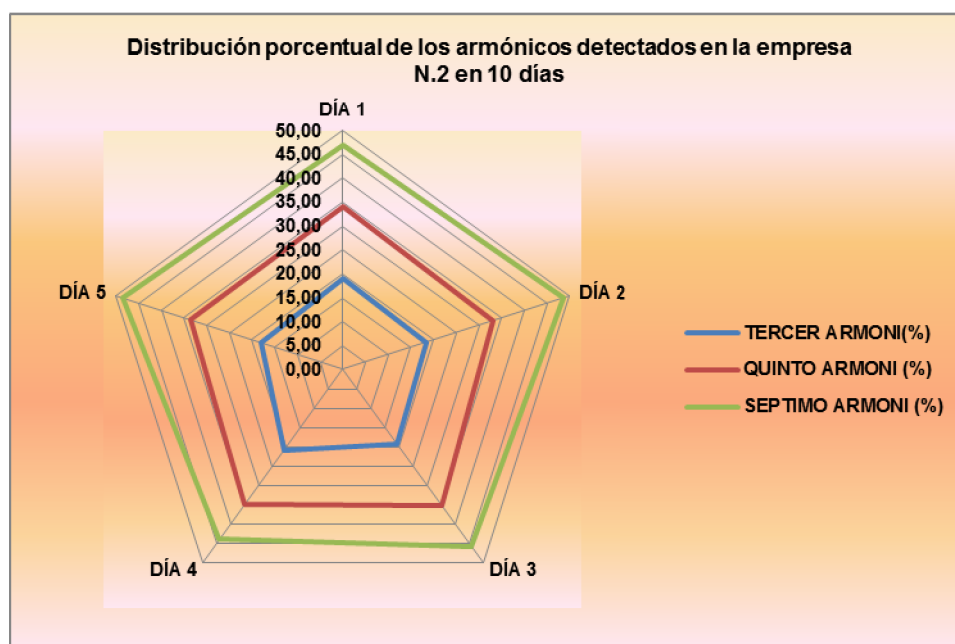
Luego dividimos la sumatoria vertical de los armónicos de 3 que fueron 0,81 / 2,24 x 100 y obtenemos la carga % de aporte del armónicos de 3, en este caso fue 36,36%, para armónico de 5ta, 40,34% y para armónico de 7ma, 23,29%. Así se lo realizó para los días 2,3, 4 y 5to.

Se observa además en el gráfico N.5 el comportamiento de los armónicos en un gráfico de dispersión radial, como varía de un día a otro, siendo el de mayor frecuencia el armónico de QUINTA.

Tabla H Resumen de aporte porcentual de las mediciones obtenidas en la EMPRESA 2 con Armónicos de 3°,5° y 7°.

APORTE DE ARMONICOS A LA DISTORSION (%)				
EMPRESA 2	TERCER ARMONI(%)	QUINTO ARMONI (%)	SEPTIMO ARMONI (%)	TOTAL (%)
DÍA 1	19,05	34,10	46,85	100,00
DÍA 2	18,35	33,10	48,55	100,00
DÍA 3	19,14	35,07	45,79	100,00
DÍA 4	21,03	34,99	43,98	100,00
DÍA 5	18,09	33,45	48,46	100,00

GRÁFICO F



Fuente: Medición de armónicos en instalaciones industriales.

Elaborado por: Autores

ANÁLISIS.

Los valores arriba anotados en la tabla N. 6 corresponden al porcentaje de carga total en relación al armónico encontrado, de tal manera que para el primer día, se calculó todos los resultados encontrados en 24 horas, se procedió a la sumatoria de los armónicos de 3, 5 y 7 EN LA empresa n.2 luego:

A modo de ejemplo 4 lecturas y el total de medición del día 1 en empresa N.2

	3x2xpxf 60	5x2xpxf 60	7x2xpxf 60		v(t)*dt
ARMÓNICOS	tercera	quinta	septima	sumatoria	v(t)*dt
24 horas de lectura	-3,25	-5,39	-7,52	-16,16	-0,02
	-5,38	-8,93	-12,44	-26,75	-0,02
	-2,21	-3,67	-5,11	-10,99	-0,01
	-2,46	-4,07	-5,64	-12,17	-0,01
TOTAL DE DÍA 1	(11,04)	77,05	(123,97)	(57,96)	(0,053)

De tal manera que la sumatoria del total de armónicos de 3, fue 11,04, el de quinta fue de 77,05 y el de séptima fue de 123,97, mientras que la sumatoria del diferencial (diferencia x tiempo constante en este ejemplo fue para la primera fila $(-3,25 \times 0,0008 = -0,02)$, lo que dio el total de 0,053.

Luego dividimos la sumatoria vertical de los armónicos de 3 que fueron $11,04 / 0,053 \times 100$ y obtenemos la carga % de aporte del armónicos de 3, en este caso fue 19,05%, para armónico de 5ta, 34,10% y para armónico de 7ma, 46,85%. Así se lo realizó para los días 2,3, 4 y 5to.

Se observa además en el gráfico N. 6 el comportamiento de los armónicos en un gráfico de dispersión radial, como varía de un día a otro, siendo el de mayor frecuencia el armónico de SÉPTIMA.

DESARROLLAR MEDIDAS PREVENTIVAS Y CORRECTIVAS HASTA LOS ARMÓNICOS DE RANGO 7º O MÁS.

Las mediciones se realizan en el centro industrial o comercial:

De forma preventiva, para obtener una idea general del estado de la red y de la distribución (mapa de red).

Para realizar una acción correctiva:

Diagnosticar una perturbación y determinar las soluciones necesarias para eliminarla.

Comprobar la validez de una solución (seguida de modificaciones en la red de distribución para comprobar la reducción de los armónicos).

En los casos en los que la acción preventiva indicada anteriormente sea insuficiente, es necesario equipar la instalación con sistemas de filtrado.

Existen tres tipos de filtros:

Pasivos.

Activos.

Híbridos.

Filtros pasivos.

Aplicaciones típicas.

Instalaciones industriales con una serie de cargas no lineales que representan más de 200 kVA (variadores de velocidad, SAI, rectificadores, etc.).

Instalaciones que requieren corrección del factor de potencia.

Instalaciones en las que la distorsión de tensión debe reducirse para evitar perturbar las cargas sensibles.

Instalaciones en las que la distorsión de tensión debe reducirse para evitar sobrecargas.

Principio de funcionamiento.

Un circuito LC, sintonizado a cada rango armónico que se va a filtrar, se instala en paralelo con la carga no lineal. Este circuito de derivación absorbe los armónicos, evitando así que circulen por la red de distribución.

De manera general, el filtro pasivo se ajusta a un rango de armónicos próximo al que se desea eliminar. Se pueden utilizar varias ramificaciones de filtros conectadas en paralelo si se necesita una reducción significativa de la distorsión global.

Filtros activos (compensador activo de armónicos).

Aplicaciones típicas.

Instalaciones comerciales con una serie de cargas no lineales que representan menos de 200 kVA (variadores de velocidad, SAI, equipos de oficina, etc.).

Instalaciones en las que la distorsión de tensión debe reducirse para evitar sobrecargas.

Principio de funcionamiento.

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

Filtros híbridos.

Aplicaciones típicas.

Instalaciones industriales con una serie de cargas no lineales que representan más de 200 kVA (variadores de velocidad, SAI, rectificadores, etc.).

Instalaciones que requieren corrección del factor de potencia.

Instalaciones en las que la distorsión de tensión debe reducirse para evitar perturbar las cargas sensibles.

Instalaciones en las que la distorsión de tensión debe reducirse para evitar sobrecargas.

Instalaciones en las que deben cumplirse límites estrictos de emisiones de armónicas.

Principio de funcionamiento.

Los filtros pasivos y activos se combinan en un único sistema para constituir un filtro híbrido. Esta nueva solución de filtrado ofrece las ventajas de los dos tipos de filtros y abarca una amplia gama de niveles de potencia y rendimiento.

Criterios de selección.

Filtro pasivo.

Ofrece tanto corrección del factor de potencia como capacidad para el filtrado de tensiones.

Los filtros pasivos también reducen las tensiones armónicas en las instalaciones en las que la tensión de alimentación tiene perturbaciones. Si el nivel de la potencia reactiva suministrada es elevado, se recomienda desactivar el filtro pasivo cuando el porcentaje de la carga sea bajo.

Los estudios preliminares para un filtro deben tener en cuenta la posible presencia de una batería de condensadores que puede resultar necesario eliminar.

Acondicionadores de armónicos activos.

Filtran los armónicos en un amplio rango de frecuencias y se pueden adaptar a cualquier tipo de carga.

Por otro lado, las especificaciones de potencia son bajas.

Filtros híbridos.

Combinan el rendimiento de los filtros activos y pasivos.

Filtros pasivos.

Los filtros pasivos se componen de inductancias y condensadores instalados en circuitos resonantes ajustados al rango concreto de armónicos que debe eliminarse.

Un sistema puede incluir varios filtros para eliminar distintos rangos de armónicos.

Adecuado para las tensiones trifásicas de 400 V; las especificaciones de potencia pueden alcanzar:

265 kVAR / 470 A para el rango del armónico 5.

145 kVAR / 225 A para el rango del armónico 7.

105 kVAR / 145 A para el rango del armónico 11.

Se pueden crear filtros pasivos para todos los niveles de intensidad y tensión.

Filtros activos.

Compensador de armónicos activos SineWave.

Adecuados para las tensiones trifásicas de 400 V, pueden compensar entre 20 y 120 A por fase.

SineWave compensa todos los rangos armónicos del 2 al 25. La compensación puede ser total o estar dirigida a rangos de armónicos específicos.

Atenuación: Carga $THDi$ / $THDi$ aguas arriba superior a 10 a la capacidad nominal.

Las funciones incluyen corrección del factor de potencia, compensación de armónicos de secuencia cero, sistemas de diagnóstico y mantenimiento, conexiones en paralelo, control remoto, interface de comunicación Ibus/RS485.

Filtros activos Accusine.

Adecuados para las tensiones trifásicas de 400 y 480 V, pueden filtrar entre 50 A 300 A por fase.

Se filtran todos los rangos de armónicos hasta 50.

Las funciones incluyen corrección del factor de potencia, conexiones en paralelo, respuesta instantánea a las variaciones de carga.

Filtros híbridos

Estos filtros combinan las ventajas de los filtros pasivos y el compensador activo de armónicos SineWave en un solo sistema.

Filtro pasivo.

Rango de armónicos 5.

Compensador activo de armónicos de 20 a 120 A.

Tensión trifásica de 400 V.

Corrección del factor de potencia hasta 265 kVAr.

Filtrado de órdenes de armónicos 2 a 25.

Acondicionamiento de tensiones de armónicos hasta 440 A

Equipo para mejorar la calidad de Energía Eléctrica.

Filtros de Armónicas (pasivos y activos)

Transformadores de Aislamiento

Transformadores Ferroresonantes

Fuentes ininterrumpibles (UPS)

Compensadores estáticos

Interruptor automático de estado sólido

CAPITULO VI.

6.1 CONCLUSIONES.

Los armónicos son el resultado de cargas no lineales, las cuales ante una señal de tipo sinusoidal presentan una respuesta no sinusoidal. Las principales fuentes de armónicos son: · Hornos de arco y otros elementos de descarga de arco, tales como lámparas fluorescentes. Los hornos de arco se consideran más como generadores de armónicos de voltaje que de corriente, apareciendo típicamente todos los armónicos (2º, 3º, 4º, 5º,) pero predominando los impares con valores típicos con respecto a la fundamental de: 20% del 3er armónico, 10% del 5º, 6% del 7º, 3% del 9º

Se han descrito los principales límites utilizados en las normas para regular la emisión e inmunidad de los equipos conectados a la red eléctrica, y se ha explicado la relación entre ellos. El establecimiento de estos límites es una solución de compromiso. Un nivel de emisión muy bajo producirá un nivel de perturbación muy bajo, lo cual impondrá un nivel de compatibilidad bajo. Los niveles de inmunidad bajos son tolerables, pero el coste de fabricación de equipos de baja emisión es mayor. Por otra parte, permitir niveles de emisión mayores requiere un aumento del nivel de compatibilidad establecido, lo que requerirá un aumento de los niveles de inmunidad, lo que de nuevo aumenta los costes de fabricación.

Los equipos de filtrado, empleados en las instalaciones industriales y redes antes mencionadas, permiten obtener las siguientes mejoras: Compensación de la potencia reactiva a la frecuencia fundamental para un factor de potencia especificado. Disminuyen el porcentaje de distorsión armónica total (THD). Evitan fenómenos de resonancia, que surgirían al conectar capacitores sin protección contra armónicas. Disminución de pérdidas activas en cables y aparatos electromagnéticos, por reducción del THD.

Soluciones para atenuar los armónicos: Existen tres tipos diferentes de soluciones para atenuar los armónicos: Modificaciones en la instalación. Dispositivos especiales en el sistema de alimentación. Filtros. Soluciones básicas: Para limitar la propagación de los armónicos en la red de distribución, existen diferentes soluciones y deben tenerse en cuenta, especialmente al diseñar una nueva instalación.

6.2 RECOMENDACIONES

A continuación establecemos algunas recomendaciones generales para la realización de mediciones armónicas:

Los transformadores de potencial (TP) deben tener una respuesta de frecuencia por encima de los 3 kHz.

No se deben utilizar divisores capacitivos en las mediciones de armónicos.

Los límites de distorsión de la corriente se expresan como un porcentaje de la fundamental y su medición debe expresarse en condiciones de máxima carga.

Los transformadores de corriente (TC) deben tener una atenuación menor de los 3 dB para frecuencias superiores a los 3 kHz.

Para la realización de muestreo de señales, se recomienda realizar con un equipo de múltiple muestreo en un mismo instante de tiempo, para asegurar la exactitud de la mediciones realizadas y sobre las conclusiones que de ellas deriven.

Mediante las mediciones de inyección armónica de las cargas, se recomienda retirar los bancos capacitivos de compensación, con el fin de evitar los problemas de resonancia armónica (y caracterizar apropiadamente las cargas).

Los analizadores de armónicos deben utilizar la FFT (Transformada Rápida de Fourier) que permiten obtener de forma adecuada, los datos para posteriores análisis. Las mediciones de voltajes y corrientes se deben realizar de manera simultánea para evitar conclusiones erróneas.

Como la distorsión armónica es un fenómeno continuo, debe ser caracterizada por mediciones en el tiempo y no solamente mediante muestreos instantáneos.

Las pinzas de corriente no deben tocar los conductores para evitar distorsiones en las mediciones.

Se debe encerrar, en el interior de la pinza de corriente, a todos los conductores de la misma fase.

En los puntos de medición.

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

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

En las mediciones en el punto de acoplamiento común (pcc).

Las mediciones deben realizarse con el fin de determinar la contaminación armónica en el PCC. Las mediciones en estos puntos del sistema pueden ayudar a realizar una evaluación global del sistema.

Las medidas directamente en bornes de las cargas no lineales sirven para caracterizarlas y analizar su comportamiento temporal.

Las mediciones en alimentadores (ramas) donde convergen varias cargas armónicas permiten realizar la cancelación o suma de las distintas cargas no lineales conectadas.

En la medición de corrientes.

Los límites de distorsión de corrientes se expresan en general en términos de la demanda máxima (un valor máximo para cada armónico y un valor de distorsión total máximo). Por ello, se debe medir en amperes y no en porcentaje del valor fundamental.

Es importante medir la fase de cada armónico (con la misma referencia) para determinar las cancelaciones o sumas de las distintas contribuciones.

Si se usan TC deben tener una atenuación menor a 3 dB hasta los 3 kHz.

Normalmente los TC tienen un efecto importante en la fase de los valores medidos.

En la medición de voltajes.

En BT pueden realizarse mediciones directas de voltaje en las barras. En AT se usan TP a fin de obtener señales a bajo voltaje para los equipos de medida. Los TP tienen en general una buena respuesta de frecuencia hasta los 3 kHz ($h=50$).

No deben usarse transformadores capacitivos en las mediciones armónicas porque presentan grandes errores a frecuencias superiores a la nominal.

En la duración de las mediciones

Deben realizarse en períodos de tiempo que permitan caracterizar la naturaleza variable de los niveles de distorsión.

Deben determinar la tendencia temporal de la contaminación armónica (histogramas probabilísticas).

En general las mediciones se realizan en períodos de por lo menos una semana.

En procesos estables las medidas durante un día de operación normal pueden ser suficientes.

Algunos sistemas requieren un monitoreo permanente de los niveles de distorsión.

En dichos sistemas pueden emplearse las mediciones para detectar cambios de operación en el sistema: fallas de filtros, entrada de condensadores, entradas o salidas de cargas y otras condiciones.

Normativa referente a armónicos.

Medir y registrar la calidad del suministro significa, por un lado proporcionar una declaración cuantitativa con respecto a los parámetros individuales comparados con los valores límites permitidos y, por otro, describir las causas de una perturbación, y si es posible, localizarlas.

BIBLIOGRAFIA

1. **GRAINER J. 2010.** "Análisis de Sistemas de Potencia". pág.33
2. **U.T.F.S.M. 1996.** "Introducción al Proyecto Eléctrico". "Armónicas en Sistemas Eléctricos"
3. **J. ARRILLAGA 2007.** "Armónicos en Sistemas de Potencia". pág.77
4. **R. Boylestad 2008.** "Electrónica, Teoría de Circuitos". pág.41
5. **FITZGERALD A. 2003.** "Máquinas Eléctricas". pág.69
6. **SAUCEDO R. 2005.** "Introduction to continous and digital control systems". pág.112
7. **KATSUHIKO O. 2005.** "Ingeniería de Control Moderna". pág.22
8. **R.V. HONORAT. 2003.** "Dispositivos Electrónicos de Potencia". pág.107
9. **TÉLLEZ R. 2005.** "Racionalización de Consumos Eléctricos en la Base Aeronaval "Viña del Mar". pág.31
10. **ALEXIS TEJADA PERALTA 2002.** Efectos de las armónicas en los sistemas eléctricos. Ingeniería Eléctrica del Programa de Graduados en Ingeniería del ITESM Campus Monterrey pág.1
11. **L. W. PIERCE, 1996** "Transformer Design and Application Consideration for Nonsinusoidal Load Currents," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, NO. 3, pp. 633-645, May/June.
12. **E. J. CURRENCE, 1995.** "Harmonic Resonance at a Medium-Sized Industrial Plant," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, NO. 4, pp. 682-690, July/Aug.
13. **G. W. MASSEY, 1995.** "Power Distribution Systems Design for Operation Under Nonsinusoidal Load Conditions," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, NO. 3, pp. 513-519, May/June.
14. **R.C. DUGAN, 2004.** "Electrical Power Systems Quality". McGraw-Hill. Second Edition, p. 521. USA.
15. **SHABAN. 2009.** "A MATLAB/SIMULINK Based Tool for Power Electronic Circuits". Proceedings of World Academy of Science Engineering and Technology. Vol. 37, pp. 274-279. January

ANEXOS.

