



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO MECÁNICA**

**TEMA:**

**Análisis de propagación y distorsión de armónicos en redes  
eléctricas de media tensión con cargas no lineales utilizando Matlab**

**AUTOR:**

Veintimilla Gutiérrez, José Luis

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de **INGENIERO  
EN ELÉCTRICO MECÁNICA**

**TUTOR:**

Ing. Vallejo Samaniego, Luis Vicente, MSc

**GUAYAQUIL, ECUADOR**

**20 de septiembre 2017**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA**

**DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO MECÁNICA

### **CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por el Sr. **Veintimilla Gutiérrez, José Luis** como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero en Eléctrico Mecánica**.

### **TUTOR**

---

Ing. Vallejo Samaniego, Luis Vicente, MSc

### **DIRECTOR DE LA CARRERA**

---

Ing. Heras Sánchez, Miguel Armando, MSc

**Guayaquil, a los 20 días del mes de septiembre del año 2017**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO MECÁNICA.

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

**Yo, Veintimilla Gutiérrez, José Luis**

**DECLARO QUE:**

El trabajo de titulación “**Análisis de propagación y distorsión de armónicos en redes eléctricas de media tensión con cargas no lineales utilizando Matlab**” previa a la obtención del Título de **Ingeniero en Eléctrico Mecánica**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total auditorio.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación referido.

**AUTOR**

---

Veintimilla Gutiérrez, José Luis

**Guayaquil, a los 20 días del mes de septiembre del año 2017**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**  
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO MECÁNICA

**AUTORIZACIÓN**

**Yo, Veintimilla Gutiérrez, José Luis**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la publicación en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación **Análisis de Propagación y Distorsión de Armónicos en redes eléctricas de media Tensión con cargas no lineales utilizando Matlab**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

**AUTOR**

---

Veintimilla Gutiérrez, José Luis

**Guayaquil, a los 20 días del mes de septiembre del año 2017**

# REPORTE URKUND

## Datos

**Documento:** Trabajo de Titulación  
**Título del Trabajo:** "ANÁLISIS DE PROPAGACIÓN Y DISTORSION EN REDES ELÉCTRICAS DE MEDIA TENSIÓN CON CARGAS NO LINEALES UTILIZANDO MATLAB"  
**Carrera:** Ingeniería en Eléctrico Mecánica  
**Estudiante:** JOSÉ LUIS VEINTIMILLA GUTIERREZ  
**Semestre:** A-2017  
**Fecha:** AGO/2017

## Reporte final URKUND



**Conclusión:** La revisión de coincidencias del resultado de la revisión, considera la desactivación de la información de texto de los formatos de presentación de trabajos de titulación en la UCSG. Se adjunta documento de Reporte URKUND de la Revisión Final en medio digital. Porcentaje de coincidencia final del 1%.

  
Ing. Luis Vallejo Samaniego, M.Sc.  
DOCENTE-TUTOR

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por ser uno de los pilares más importantes para desarrollar mi trabajo de titulación.

A mis padres, María Gutiérrez Morán y Carlos Julio Veintimilla Ochoa por ser mi inspiración y darme su apoyo incondicional en la preparación de mi carrera profesional.

A la Dra. Irma Lam por darme su apoyo incondicional.

Al Ing. Armando Heras por la ayuda brindada, a los demás de igual manera.

Autor  
Veintimilla Gutiérrez, José Luis

## **DEDICATORIA**

A Dios por darme vida para la realización de mi trabajo de titulación

A mis padres por el sacrificio incondicional de cada día y noche.

A mi novia la Dra. Irma Lam por su compañía y apoyo durante la realización de mi carrera.

Y un agradecimiento a todas las personas que de alguna u otra manera estuvieron ahí no directamente, pero si apoyándome para la realización de mi tema.

Autor

Veintimilla Gutiérrez, José Luis



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**  
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO MECÁNICA

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f. \_\_\_\_\_

**ING. HERAS SÁNCHEZ, MIGUEL ARMANDO, MSC**  
DIRECTOR DE CARRERA

f. \_\_\_\_\_

**ING. MONTENEGRO TEJADA, RAUL, MSC**  
COORDINADOR DE AREA

f. \_\_\_\_\_

**ING. HERAS SÁNCHEZ, MIGUEL ARMANDO, MSC**  
OPONENTE

## ÍNDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS .....	XII
INDICE DE TABLA .....	XV
RESUMEN .....	XVI
CAPÍTULO 1 .....	2
INTRODUCCIÓN .....	2
1.1 Justificación .....	2
1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.3 Objetivos .....	2
1.3.1 Objetivo general.....	2
1.3.2 Objetivos específicos .....	3
1.4 Tipo de investigación.....	3
1.5 Hipótesis .....	3
1.6 Metodología .....	3
PARTE I MARCO TEÓRICO.....	4
CAPÍTULO 2.....	4
REDES ELÉCTRICAS EN MEDIA TENSIÓN EN SECTORES INDUSTRIALES .....	4
2.1 Generalidades.....	4
2.1.1 Conductor eléctrico .....	4
2.1.2 Capacidad de un conductor eléctrico .....	5
2.2 Sistemas no lineales .....	5
2.3 Tipos de instalaciones de media tensión.....	6
2.3.1 Instalaciones aéreas.....	6
2.3.2 Instalaciones subterráneas.....	7
2.4 Sistemas Monofásicos.....	7
2.6 Transformadores en media tensión .....	11
2.7 Conexión Delta a nivel industrial.....	13
2.8 Conexión de transformadores .....	14
2.9 Los SED, o subestación de distribución.....	18
2.10 Banco de capacitores.....	19
2.11 Máquinas rotatorias.....	19
CAPÍTULO 3.....	21
FUNDAMENTOS DE PROPAGACIÓN Y DISTORSIÓN DE ARMÓNICOS .....	21
3.1 Generalidades de los armónicos.....	21
3.3 Dispositivos rectificadores.....	23
3.4 Hornos industriales generadores de arco eléctrico.....	24
3.6 Tipos de armónicos .....	26

3.6.1	Formas de ondas no senoidales .....	26
3.6.2	Onda de magnetización de un transformador.....	28
3.6.3	Onda tercer armónico.....	29
3.6.4	Onda Quinto armónico.....	30
3.7	Tolerancia de armónicos para redes de media tensión.....	32
3.7.1	Normas vigente con relación de armónicos en media tensión .....	33
3.8	Índice de distorsión armónica .....	35
3.9	Índice de distorsión armónica total de voltaje.....	37
3.10	Índice de distorsión armónica total de corriente .....	39
3.11	Desfase con ondas de tensión, corriente y potencias .....	40
3.11.1	Potencia instantánea.....	40
3.11.2	Potencia promedio o activa.....	41
3.11.3	Potencia aparente .....	41
3.12	Parámetro y relación eléctrica periódica.....	42
3.13	Voltajes senoidales en sistemas de media tensión. ....	44
3.14	Efectos de los armónicos en componentes de media tensión.....	47
CAPÍTULO 4.....		53
ELEMENTOS DE MEDIA TENSIÓN Y EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS .....		53
4.1	Consideraciones metodológicas.....	53
4.2	Trabajo del transformador con presencia de armónico .....	53
4.3	Conexión delta en sistema industrial .....	55
4.4	Efecto de armónico en factor de potencia.....	58
4.6	Máquinas de inducción .....	60
4.7	Línea de distribución.....	61
4.7.1	Tendido eléctrico corto .....	62
4.7.2	Tendido eléctrico medio.....	63
4.7.3	Tendido eléctrico largo .....	63
4.8	Cargas industriales en sistemas lineales.....	64
4.9	Caso especial motores de inducción .....	64
4.10	Trabajo de capacitores con presencia de armónicos .....	65
CAPÍTULO 5.....		66
MATLAB PARA SEÑALES NO SENOIDALES .....		66
5.1	Consideraciones básicas para su aplicación.....	66
5.2	Funciones periódicas.....	66
5.3	Utilización y funcionamiento del programa.....	68
5.4	Creación de gráficos .....	70
5.5	Vectores y Matrices .....	73

5.6	Visualización de un elemento de un vector y de una matriz.....	74
5.7	Matrices especiales en Matlab .....	75
PARTE II APORTACIONES .....		77
CAPÍTULO 6.....		77
SIMULACIÓN DE ARMÓNICOS CON CARGAS NO LINEALES .....		77
6.1	Simulación de onda en matlab de un circuito de Media Tensión.....	77
6.2	Visualización de ondas no senoidales en los nodos .....	87
CAPÍTULO 7.....		93
ANÁLISIS DE FILTROS ACTIVOS PARA ELIMINACIÓN DE ARMÓNICOS .....		93
7.1	Filtros primer orden para una red de media tensión.....	94
7.2	Filtro segundo orden para una red de media tensión.....	95
7.3	Mejoramiento de sistemas monofásicos y trifásicos .....	97
CAPÍTULO 8.....		101
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		101
8.1	Conclusiones .....	101
8.2	Recomendaciones .....	102
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		103
ANEXOS.....		106

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Partes de un conductor.....	4
Figura 2.2 Reguladores de Potencia.....	5
Figura 2.3 Instalación Eléctrica Aérea.....	6
Figura 2.4 Instalación Subterránea eléctrica .....	7
Figura 2.5 Onda senoidal de un Sistema Monofásico.....	8
Figura 2.6 Conexión monofásica a cargas .....	9
Figura 2.7 Onda senoidal de un sistema trifásico .....	9
Figura 2.8 Conexión trifásica a cargas.....	10
Figura 2.9 Vista interna de transformador 150 KVA Tipo seco .....	11
Figura 2.10 Representacion Vectorial de las intensidades.....	12
Figura 2.11 Esquema conexión estrella-Placa bornes para motor .....	12
Figura 2.12 Conexión Delta.....	14
Figura 2.13 Esquema conexión Delta-Placa de bornes para conexión a Motores .....	14
Figura 2.14 Conexión Delta- Delta.....	15
Figura 2.15 Conexión Estrella – Delta.....	16
Figura 2.16 Conexión Estrella- Estrella.....	17
Figura 2.17 Conexión Estrella Delta.....	18
Figura 2.18 Subestación Eléctrica.....	18
Figura 2.19 Resonancia paralela (a)-Resonancia serie(b).....	19
Figura 3.1 Origen de una onda senoidal .....	21
Figura 3.2 Rectificador Modelo 2501 .....	24
Figura 3.3 (A) Molécula no imantada (B)Molécula imantada .....	25
Figura 3.4 Onda Fundamental más onda no senoidal .....	26
Figura 3.5 Forma de ondulaciones de armónicos.....	27
Figura 3.6 Onda de magnetización .....	28
Figura 3.7 Onda de magnetización Negra y onda triple armónico Verde.....	29
Figura 3.8 Onda de tercer armónico.....	29
Figura 3.9 Onda de quinto armónico .....	30
Figura 3.10 Onda no senoidal en bobinas de un transformador magnetizado .....	31

Figura 3.11 Aplicación de Fourier a voltaje inducido en bobina.....	31
Figura 3.12 Salida senoidal de la inducción magnética .....	32
Figura 3.13 Salida no senoidal de inducción magnetizada .....	32
Figura 3.14 Distorsión de armónico.....	36
Figura 3.15 Triangulo de potencia .....	42
Figura 3.16 Secuencia Positiva .....	43
Figura 3.17 Secuencia Positiva ACB .....	44
Figura 3.18 Secuencia Cero .....	44
Figura 3.19 Voltaje inducido senoidalmente .....	45
Figura 3.20 Onda de magnetizacion .....	46
Figura 3.21 Descomposición de ondas en amplitudes frecuencias y fase.....	46
Figura 3.22 Algunos Efectos producidos por armónicos.....	52
Figura 4.1 Representación Propia del Transformador de potencia .....	54
Figura 4.2 Representación en paralelo con inducción .....	54
Figura 4.3 Conexión delta a fuente trifasica .....	55
Figura 4.4 Onda no senoidal inducido por voltaje senoidal.....	56
Figura 4.5 Corriente de componente fundamental.....	56
Figura 4.6 Corriente Fundamental .....	57
Figura 4.7 Circulacion de triples armonicos en conexión delta .....	57
Figura 4.8 Relé de control de factor de potencia.....	58
Figura 4.9 Triangulo de potencia Coseno.....	59
Figura 4.10 Triangulo de potencia Factor de potencia.....	59
Figura 4.11 Calentamiento de conductores.....	58
Figura 4.12 Modelo de equivalencia de maquina de inducción.....	61
Figura 4.13 Modelo de equivalencia del motor inducción en serie.....	61
Figura 4.14 Tendido eléctrico corto .....	62
Figura 4.15 Modelo de tendido eléctrico Medio.....	63
Figura 4.16 Modelo de tendido eléctrico Largo.....	63
Figura 4.17 Banco de capacitores .....	65
Figura 5.1 Onda Periódica Coseno .....	67
Figura 5.2 Onda no periódica Coseno.....	68

Figura 5.3 Funciones Altas Para Graficos .....	70
Figura 5.4 Visualización de una función de Alto Nivel.....	70
Figura 5.5 Visualización de una función de medio nivel.....	71
Figura 5.6 Visualización Comando Date Cursor .....	72
Figura 5.7 Visualización de una Función de Alto Nivel.....	72
Figura 5.8 Comando Linspace .....	73
Figura 5.9 Visualización de un Vector.....	74
Figura 5.10 Visualización de una Matriz .....	75
Figura 5.11 Matrices Especiales .....	76
Figura 6.1 Circuito propuesto para análisis .....	77
Figura 6.2 Armonicos en el Nodo 1 .....	85
Figura 6.3 Armonico en el Nodo 2 .....	86
Figura 6.4 Armonic en el Nodo 3 .....	87
Figura 6.5 Señales armonicos en el sistema.....	87
Figura 6.6 Presencia de armonicos 3 en el Nodo 1 .....	84
Figura 6.7 Presencia de armonico 3 en el Nodo 2 .....	89
Figura 6.8 Presencia de armonicos 3 en el Nodo 3 .....	90
Figura 6.9 Sumatoria de tercer armónico con onda fundamenta.....	91
Figura 6.10 Anulación de Corriente Armónica .....	92
Figura 6.11 Calentamiento del neutro por Armónicos.....	92
Figura 7.1 Filtros en serie y paralelo.....	96
Figura 7.2 Colocación de filtro para eliminación de Armónicos .....	92
Figura 7.3 Onda senoidal aguas arribas en media tensión .....	96
Figura 7.4 Eliminacion de ondas no senoidales por medio de filtro.....	99
Figura 7.5 Anulación de ondas no senoidales mediante filtro .....	99

## **INDICE DE TABLA**

Tabla 3.1 Problemas generados en redes de media tensión.....	21
Tabla 3.2 Fuentes de ondas o frecuencias no armónicas .....	25
Tabla 3.3 Fuentes de ondas o frecuencias Armónicas.....	25
Tabla 3.4 Normas internacionales sobre límites de emisión de armónicos.....	33
Tabla 3.5 Normas IEEE-IEC sobre límites de emisión de armónicos .....	35
Tabla 3.6 Tolerancia de armónicos en redes de media tensión.....	35
Tabla 3.7 Principales problemas y efectos que generan los armónicos en redes de M/T.....	51
Tabla 5.1 Sintaxis de Matlab para procesos y operadores matemáticos.....	69
Tabla 6.1 Valores de Nodos.....	84
Tabla 6.3 Resultados de armónicos en simulación.....	90

## **RESUMEN**

El presente trabajo de investigación tiene por objetivo dar a conocer algunos de los resultados de la propagación y distorsión de los armónicos que inciden en las redes de media tensión por medio de la aplicación Matlab.

Toda empresa que se encuentran conectada a la red de media tensión presenta diversos problemas tanto para equipos eléctricos como electrónicos, entre algunos de estos problemas tenemos el calentamiento de cables conductores, problemas en las revoluciones de máquinas rotatorias y aunque estas máquinas mantengan elementos de protección, algunas ondas no senoidales denominas armónicas, pueden y son capaces de modificar frecuencias de operación y llegar a ocasionar daños a nivel industrial.

Existen diferentes tipos de protección, sin embargo, cuando se trata de armónicos el problema es más grave. No es suficiente el colocar un buen sistema de puesta a tierra pues tenemos que considerar todos los parámetros que influyen en el tendido eléctrico de media tensión más cuando ésta se encuentra en expansión y utilizan sistemas que modifican la señal de frecuencia que entrega la empresa distribuidora.

La aplicación Matlab será presentada y expuesta como parte del trabajo con una introducción de todos los parámetros y funcionamientos del mismo. Se analizará un circuito con cargas no lineales por medio de esta aplicación, para así poder observar algunos de los armónicos existentes en los nodos del circuito para posteriormente dar alguna forma de protección contra ellos y el tipo de conexión de transformadores para mitigar sus efectos.

**PALABRAS CLAVES:** ARMÓNICO, CARGA NO SENOIDAL, TRIFASICO, MATLAB, MONOFASICO, CONDUCTORES

## **ABSTRACT**

The aim of this research is to present some of the results of the propagation and distortion of the harmonics that affect medium voltage networks through the Matlab application.

Every company that is connected to the medium voltage network presents various problems for both electrical and electronic equipment, among some of these problems we have the heating of conductive wires, problems in the revolutions of rotary machines and although these machines maintain elements of protection, some non-sinusoidal harmonic denominations, they are able to modify operating frequencies and causing industrial damage

There are different types of protection, however, when it comes to harmonics the problem is more serious. It is not enough to place a good grounding system because we have to consider all the parameters that influence the electric medium voltage mains, when it is in expansion and use systems that modify the frequency signal delivered by the distributor company.

The Matlab application will be presented and exposed as part of the work with an introduction of all the parameters and functions of the same. A circuit with non-linear loads will be analyzed by means of this application, in order to be able to observe some of the harmonics existing in the nodes of the circuit to later give some form of protection against them and the type of connection of transformers to mitigate its effects.

**KEY WORDS:** HARMONIC, NON-SINUSOIDAL LOAD, TRIFASICO, MATLAB, SINGLE PHASE ELECTRICALLY CONDUCTIVE,

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Justificación**

La gran demanda y la implementación de nuevos equipos no lineales en sistemas industriales son las causantes de muchos problemas en las redes eléctrica de media tensión. Uno de esos problemas es la demanda de cargas no lineales que cambian la frecuencia original del sistema distribuidor sustituyéndola por otra ocasionando ondas denominadas armónicos que serán las causantes de daños en sistemas monofásicos, trifásicos y en la red principal de distribución. El diseño de las empresas y la complejidad de los circuitos eléctricos pueden originar problemas muy grandes en el tendido eléctrico de media tensión, ocasionando sobretensiones por lo que las distribuidoras tratan de aumentar su cargabilidad para solventar problemas energéticos. Por lo que en este trabajo se analizará la propagación, distorsión de la onda, el efecto de los armónicos por medio de la aplicación Matlab, y se presentará una serie de graficas donde se describirán las ondas que se encuentran distorsionadas en la red analizada.

### **1.2 Planteamiento del problema**

Los sistemas industriales poseen cargas no lineales en sus instalaciones la cual originará el cambio de la frecuencia que entregan las distribuidoras, esta modificación de la frecuencia y amplitud de ondas senoidales en los conductores eléctricos, producirá calentamiento en las cargas dando como resultado daños en equipos tanto eléctrico como electrónicos.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo general**

-Analizar el impacto de los armónicos en redes electricas de media tensión con la aplicación Matlab.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Analizar los parámetros y distorsión de onda no senoidales producida por cargas no lineales.
- Elaborar por medio de la aplicación diferentes ondas no senoidales.
- Basar los resultados de los tipos de armónicos para mejorar los sistemas monofásicos y trifásicos.

### **1.4 Tipo de investigación**

En este tipo de investigación se utilizará un método analítico y documental, ya que se tratará una metodología de diseño a través de la aplicación Matlab, para analizar los armónicos que se encuentran en las redes eléctricas de media tensión y los problemas que originarían en sistemas monofásicos y trifásicos.

### **1.5 Hipótesis**

Simular por medio de la aplicación Matlab los diferentes tipos de armónicos que causan daños en las redes eléctricas de media tensión y tomar medidas correctivas para los sistemas no lineales.

### **1.6 Metodología**

Este trabajo de investigación se basará en dos etapas; la primera se enfocará en un estudio teórico de redes eléctricas de media tensión, cargas no lineales, armónicos que afectan y modifican la frecuencia en los conductores eléctricos. La segunda parte, se enfocará en simular los armónicos que producen daños en cargas monofásicas y trifásicas para así dar procedimientos a la elaboración de estrategias contra los armónicos que son producidas por cargas no-senoidales.

## PARTE I MARCO TEÓRICO

### CAPÍTULO 2

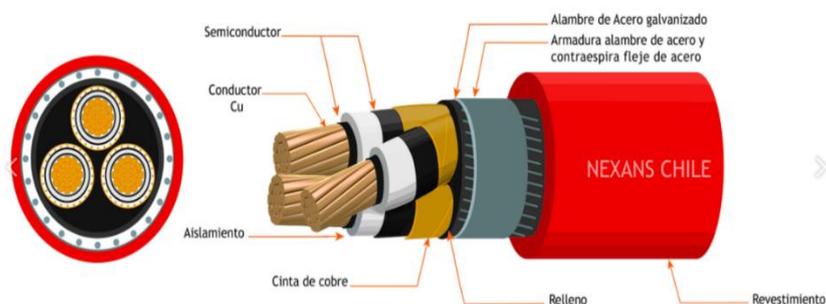
## REDES ELÉCTRICAS EN MEDIA TENSIÓN EN SECTORES INDUSTRIALES

### 2.1 Generalidades

#### 2.1.1 Conductor eléctrico

Se le denomina conductor eléctrico al metal que en su constitución podrá mantener poca resistencia al movimiento de carga eléctrica. Entre los materiales más comunes tenemos el hierro, la plata, el aluminio, oro, otros tipos de aleaciones como el grafito y soluciones salinas. En los conductores eléctricos los problemas originados con los armónicos son el aumento desmesurado de los IRMS (Corriente Constante), que también ocasionan el efecto skin provocando en ellos saltos o disparos en las protecciones y sobrecalentamiento en los mismos. El conductor eléctrico está constituido por varios elementos, ver la Figura 2.1.

- Parte semiconductor interna
- Semiconductor externa
- Aislamiento
- Pantalla
- Cubierta exterior y el conductor



**Figura 2.1 Partes de un conductor**  
Fuente: (Cables Electricos , s.f.)

La mayoría de los conductores presenta una forma cilíndrica y para que la transmisión de la energía eléctrica se presente de manera muy eficiente se requiere de una dureza eléctrica de cero. Para la selección del conductor se debe tener en cuenta tanto la capacidad de operación como la de cortocircuito, porque asociados a ellas está la temperatura que alcanzara el conductor en un instante determinado, la cual debe ser soportada por los materiales plásticos que rodean al conductor.

### 2.1.2 Capacidad de un conductor eléctrico

Para que un conductor eléctrico tenga carga tiene que adquirir cierto tipo de potencial en su interior y dependerá de su forma estructural para que alcance su conductividad. Por lo tanto, existe una relación íntima entre el potencial que generara y su carga. A este fenómeno le llamaremos capacidad y su unidad sera el faradio.

## 2.2 Sistemas no lineales

En la actualidad se encontrará circuitos totalmente diferentes en relación a su consumo y variación de frecuencia. A consecuencia de nuevos circuitos eléctricos no se puede mantener los mismos modelos resistivos, inductivos y capacitivos en sistemas industriales. Su integración física está compuesta por muchos elementos electrónicos que manifiestan un funcionamiento totalmente diferente a los tradicionales. Los elementos que modifican el comportamiento de la onda senoidal serán los transistores, tiristores, diodos como se observa en la Figura 2.2 donde se puede observar una placa reguladora de voltaje.



**Figura 2.2 Reguladores de Potencia**  
Fuente: Autor

## 2.3 Tipos de instalaciones de media tensión.

### 2.3.1 Instalaciones aéreas

Este tipo de instalación se mantiene a la interperie con su respectivo aislador. Se encuentran sujetadas en torres a grandes alturas por medio de pines de aislamiento y mantienen la ventaja de que no existe peligro alguno para personas cerca del lugar, este tipo de instalación mantiene una continuidad de servicio por más tiempo garantizando la fluidez del Servicio Eléctrico. Por lo general están formado por uno, dos o tres conductores de cobre o aluminio, con aislamiento individual termoplástico de polietileno de alta densidad (PEAD) en color negro, dispuesto helicoidalmente alrededor de un conductor-neutro mensajero desnudo de cobre o aluminio. Entre sus ventajas tenemos que:

- Su temple duro o semiduro le permite soportar la tensión de instalación y mayores longitudes de tendido.
- Su aislamiento de polietileno le ayuda a resistir la abrasión con ramas de árboles.
- Resistente a la luz solar e intemperismo.



**Figura 2.3 Instalación Eléctrica Aérea**  
**Fuente: (Electrica de Oriente, s.f.)**

### 2.3.2 Instalaciones subterráneas

Este tipo de instalación se encuentra ampliamente distribuida en redes de media y baja tensión. En grandes industrias comprende una forma de adaptabilidad a cualquier tipo de carga que se esté utilizando siendo ésta una ventaja dentro de ellos. Este tipo de instalación también es utilizado en centros comerciales, conjuntos residenciales u otro lugar específico para media tensión. En la Figura 2.4 se puede observar el recorrido interno de este tipo de instalación con sus respectivas cajas de paso.



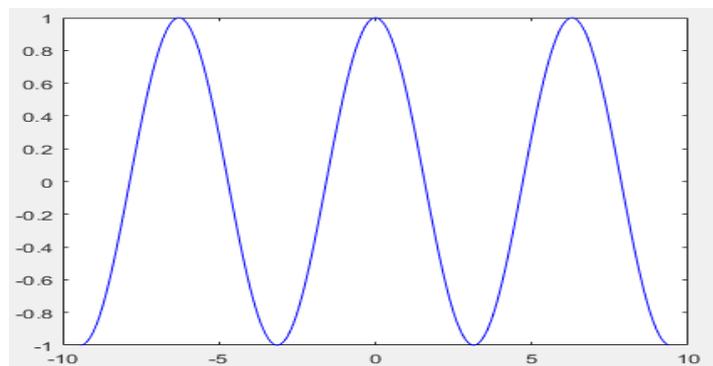
**Figura 2.4 Instalación Subterránea eléctrica**  
Fuente: (Instalaciones Electricas Residenciales, s.f.)

## 2.4 Sistemas Monofásicos

Existen diferentes tipos de cargas que se encuentran en los sistemas industriales. La instalación de cargas no lineales y expansión de las mismas, aumenta la demanda de consumo a las empresas distribuidoras, éste aumento origina la aparición de nuevos circuitos como son sistemas monofásicos los cuales estarán formados por una sola fase o en otro caso una corriente alterna dando como consecuencia que todo el voltaje varíe casi de la misma forma, este tipo de sistema se lleva a cabo cuando se mantiene cargas principalmente de luminaria, sistemas de calefacción hasta incluso pequeñas bombas o motores eléctricos etc.

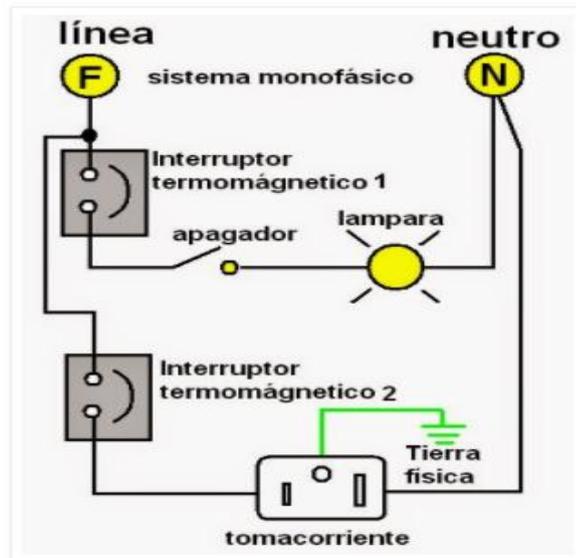
A consecuencia de esta implementación aparecen ondas no senoidales y de que las fluctuaciones de entrega de energía no sean constantes, la entrega no senoidal que se encuentra en redes de media tensión provoca serios problemas a los consumidores finales, se debe recalcar que en el Ecuador se entrega una frecuencia de 60 Hz sin embargo las cargas no lineales hacen que esta frecuencia varíe y produzca ondas perjudiciales a sistemas monofásicos.

Estos sistemas monofásicos estarán constituidos por una sola onda senoidal como se puede apreciar en la Figura 2.5.



**Figura 2.5 Onda senoidal de un sistema monofásico**  
**Fuente: Autor**

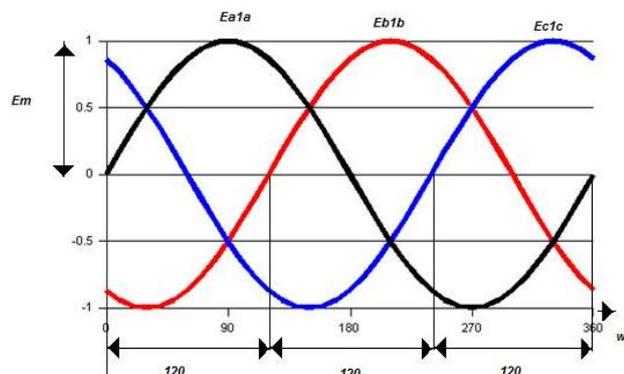
En la Figura 2.6 se observa la conexión monofásica existente en este tipo de instalación. A nivel industrial se respetará los componentes estructurales para el funcionamiento y la protección del mismo.



**Figura 2.6: Conexión monofásica a cargas**  
**Fuente: (Coparoman, 2014)**

## 2.5 Sistemas Trifásicos

Son sistemas formados por tres fases alternas monofásicas que mantienen su misma amplitud y la misma frecuencia, en este punto la aparición de armónicos es muy variable y perjudicial ya que el consumidor final alterará la frecuencia de ellas para la utilización de los mismos en motores por medio de variadores de velocidad, colocación de controladores lógicos programables y demás. Como consecuencia de la alteración de la frecuencia y amplitud de las ondas de voltaje y corriente esta dará como resultado: el calentamiento de terminales en las cargas, excitación en puntos de bornera y reducción de la vida útil de los equipos Etc. En la Figura 2.7 se observa las ondas senoidales en un sistema trifásico, que mantienen su frecuencia y amplitud senoidal los cuales garantizan un buen funcionamiento en Sistemas industriales.



**Figura 2.7 Onda senoidal de un sistema trifásico**  
**Fuente: (Telergia, 2010)**

La conexión a nivel industrial de sistemas trifásicos comprende componentes especiales para un funcionamiento íntegro de equipos como máquinas rotatorias y elementos de protección en este caso térmicos, guardamotores, breakers para la seguridad de los mismos. En la Figura 2.8 se puede observar la conexión correcta para sistemas trifásicos a una Máquina Rotatoria, garantizando el neutro como prioridad para el retorno de corrientes parasitas y que no se afecte el funcionamiento de máquinas industriales. Cabe recalcar que se tiene que mantener las conexiones en un estado aceptable de funcionamiento, y con los materiales de instrumentación adecuados podemos realizar chequeos continuos de la corriente a través de los conductores para poder determinar si se están produciendo problemas de excesivo consumo energético originados por malas conexiones, problemas con el equipo industrial u otro tipo de componente de protección.

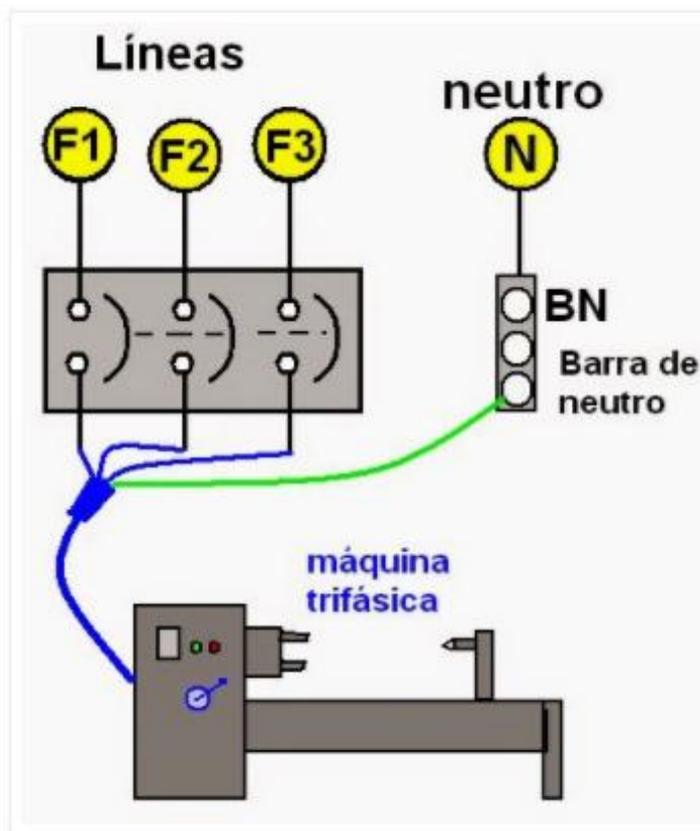


Figura 2.8 Conexión trifásica a cargas  
Fuente: (Coparoman, 2014)

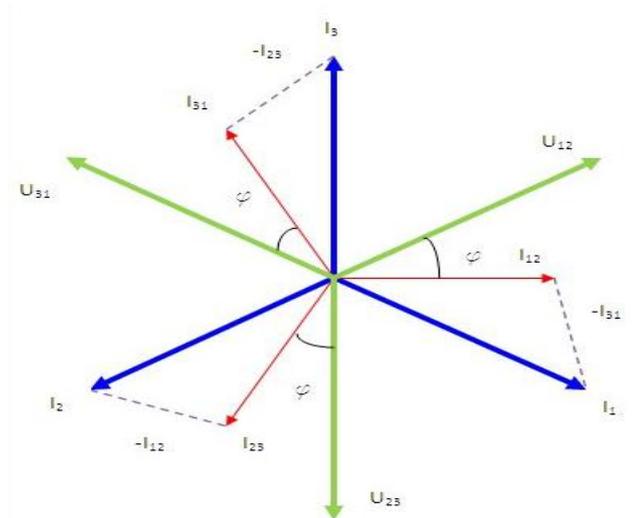
## 2.6 Transformadores en media tensión

Maquinas estáticas importantes para la funcionabilidad del sistema eléctrico dando como resultado la posibilidad de elevar o reducir la tensión en el circuito eléctrico, muy utilizados en salidas de distribuidores y redes me media tensión, sin embargo, problemas como el aumento o disminución de la frecuencia senoidal en este caso problemas con armónicos, ocasionan perdidas adicionales de generación de energía y de potencia del transformador produciendo el calentamiento del mismo, como consecuencia disminuya la vida útil del equipo afectando a demás componentes que se encuentran conectados a esa red. En la Figura 2.9 se puede apreciar la vista interna de un transformador tipo seco la cual mantiene una conexión Delta según el requerimiento de la empresa para su funcionamiento correcto dentro del sistema determinado. Por seguridad se deben de realizar los mantenimientos respectivos y preventivos para cuidar la integridad de la máquina y salvaguardar problemas de potencia en la industria. Esta conexión solo utiliza 3 conductores, ya que el neutro no existe. Si las tensiones forman un sistema equilibrado, las intensidades de líneas son, respecto a la fase.



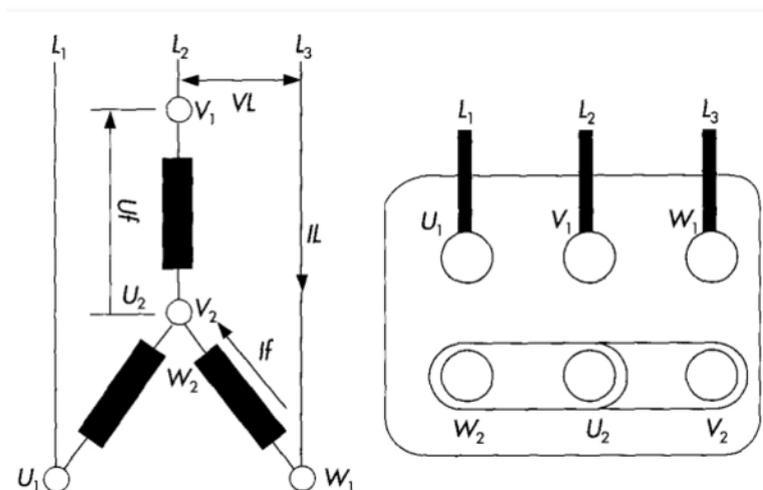
**Figura 2.9 Vista interna de transformador 150 KVA Tipo seco**  
Fuente: Envamet, 2017

Cada intensidad de línea se encuentra retrasada  $30^\circ$  respecto de la intensidad de fase como se puede observar en la Figura 2.10, donde se representa vectorialmente las intensidades de una conexión de fuentes en triángulo.



**Figura 2.10 Representación vectorial de las intensidades**  
**Fuente: (Plataforma Educativa Aragonesa, s.f.)**

En la Figura 2.11 se muestra la conexión de un sistema estrella a los terminales de motores trifásicos, cada línea tendrá que ir en su respectiva terminal para el correcto funcionamiento, si se altera una de las fases puede que el motor cambie de giro o presente ruido por mala conexión.



**Figura 2.11 Esquema conexión estrella-Placa bornes para motor**  
**Fuente: (Ingenio del Eléctrico, 2016)**

En sistemas industriales este tipo de conexión estrella cada transformador se comporta como si fuera un monofásico y producirá una tensión o una fase simple. El problema radica cuando se tiene la aparición de armónicos a nivel de este tipo de conexión, la corriente que el conduce se distorsionada más de lo normal por lo que en este sistema

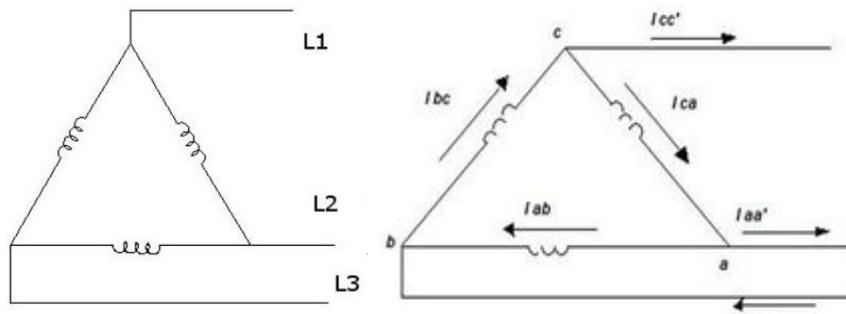
generará vibraciones especialmente en los transformadores, esto va a significar que los que estén conectados entre si generen calor aun si no estén a su capacidad nominal de carga. Este tipo de corriente en estos sistemas ocasionan que tenga un mal funcionamiento los drop outs (desconectivos) y que a nivel de protección todos los fusibles operen de manera incorrecta aun estando a un nivel de funcionamiento operativo de fábrica.

Entre las características de las conexiones estrella tenemos:

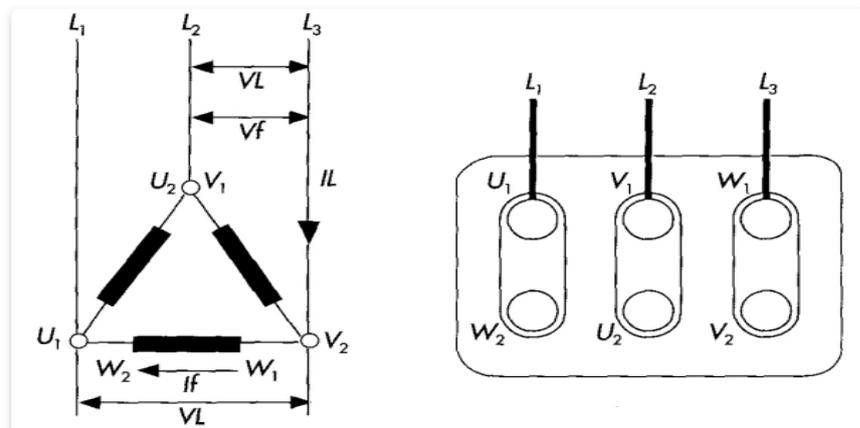
- Cuando se desconecta cualquiera de las fases, esto origina a que afecte a la carga que esa línea está alimentando.
- Los voltajes medidos entre una línea cualquiera y el neutro se lo conoce como voltaje de fase en la carga.
- En todo el sistema la corriente que demanda la línea, es también la corriente que consume cualquiera de las cargas conectadas a él.
- Los puntos de unión de las 3 líneas se anulan produciendo un potencial de cero voltios, este punto toma el nombre de neutro.
- La equivalencia triangulo lo usaremos en el arranque de algunos motores (motores asíncronos trifásicos de rotor en cortocircuito)
- Cuando se mantiene en esta conexión cargas equilibradas las impedancias son iguales, es decir las impedancias en triangulo don igual a tres veces las de estrella.
- La corriente que demanda la línea, es también la corriente que consume la carga.

## **2.7 Conexión Delta a nivel industrial**

Este tipo de conexión es muy usada en los sistemas industriales debido a que presenta la carencia de neutro lo que permite poner o quitar cargas en una sola fase. A continuación, en la Figura 2.12 se ilustra la conexión a las líneas L1, L2, L3 para posicionar cualquier carga dentro de este tipo de conexión, en la Figura 2.13 se puede observar la conexión a bornera para sistemas rotatorios y demás.



**Figura 2.12 Conexión Delta**  
**Fuente: (Ingenio del Eléctrico, 2016)**



**Figura 2.13 Esquema conexión Delta-Placa de bornes para conexión a Motores**  
**Fuente: (Ingenio del Eléctrico, 2016)**

Entre las características de esta conexión delta tenemos que:

- La corriente que va a necesitar cualquiera de las cargas que se encuentren conectadas, esta será menor a la corriente de línea que la suministra.
- Cuando se desconecta alguna de las fases se afecta a 2 cargas; 2 de los voltajes se reducen a la mitad.
- Las cargas que estarán conectadas en este tipo de conexión reciben mayor voltaje que las cargas conectadas en el tipo estrella.

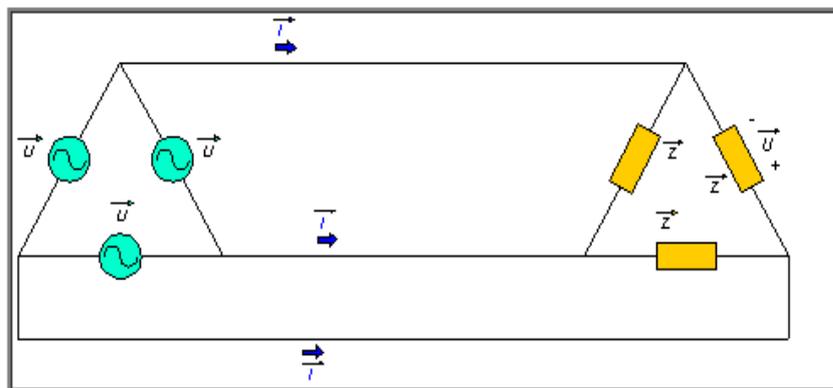
## 2.8 Conexión de transformadores

En sistemas industriales tenemos la aparición de muchos tipos de conexión y dependerá del tipo de carga que se tenga para dar paso a la conexión apropiada en el circuito de media tensión, por mencionar entre alguna de esas configuraciones de conexión tenemos:

- Conexión Delta – Delta
- Conexión Delta- Estrella
- Conexión Estrella – Estrella
- Conexión Estrella- Delta

### 2.8.1 Delta–Delta:

Se la denomina también triángulo-triángulo, utilizada cuando en el sistema no posee muchas cargas. El voltaje de salida disponible en el secundario es el voltaje de línea del primario por la relación de transformación individual. Las corrientes que circulan por cada bobina (fase) son 3 veces menores que las correspondientes de línea. Esta conexión no tiene desplazamiento de fase y tiene la ventaja que no tiene problemas con cargas desequilibradas o armónicos, además se le puede quitar transformadores para el mantenimiento o reparación de alguno y puede quedar funcionando con dos transformadores, pero como banco Trifásico, este tipo de configuración se llama triángulo abierto, delta abierta o configuración en V. En la Figura 2.14 podemos observar una configuración Delta-Delta.

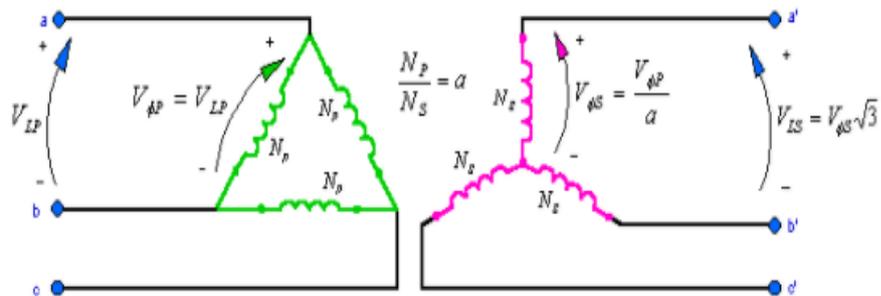


**Figura 2.14 Conexión Delta- Delta**  
Fuente: (Circuitos Eléctricos UCACUE, 2011)

### 2.8.2 Delta – Estrella:

Se los utiliza en los sistemas de potencia para elevar voltajes de generación o de transmisión. En este tipo de conexión se incorporan técnicas adicionales para la transformación de ciertas combinaciones de resistores que no se pueden manejar mediante ecuaciones para distribuciones en serie y en paralelo. También se le conoce como transformación Pi-T. Esta transformación permite reemplazar tres resistores en una configuración de Delta por tres resistores en configuración en Y, y viceversa.

Para que esta transformación sea equivalente, las resistencias entre ambos pares de los terminales tienen que ser la misma antes y después. En la Figura 2.15 se puede observar las características que toman las corrientes que se describirán a continuación.



**Figura 2.15 Conexión Estrella – Delta**  
Fuente; (Experimentos Magneticos, 2013)

**Característica de esta conexión:**

-Los voltajes de línea y de fase son iguales en el primario y secundario

$$V_{LP} = V_{\phi P}$$

$$V_{LS} = V_{\phi S}$$

-Los voltajes de línea de primario y secundario guardan la siguiente relación:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \alpha$$

**2.8.3 Estrella - Estrella**

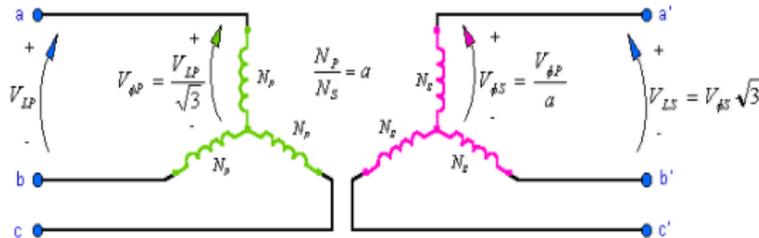
Esta tiene como ventaja ser utilizada para disminuir la tensión por fase del transformador, pero presenta desequilibrios cuando las cargas no están equilibradas. La relación de voltaje va a depender directamente del número de vueltas que tenga el transformador. Hay que recordar que la tensión de línea es  $\sqrt{3}$  veces mayores que la tensión de fase. Entre su característica se tiene que los voltajes de línea se relacionan con los voltajes de fase según las expresiones:

$$V_{LP} = \sqrt{3} \cdot V_{\phi P}$$

$$V_{LS} = \sqrt{3} \cdot V_{\phi S}$$

Los voltajes de línea del primario y secundario guardan la siguiente relación:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \alpha$$



**Figura 2.16 Conexión Estrella- Estrella**  
Fuente; (Experimentos Magneticos, 2013)

### 2.8.4 Estrella - Delta

Este tipo de conexión se utiliza en los sistemas de transmisión de alto voltaje entre sus características se tiene que:

-Los voltajes primarios de línea y de fase cumplen la relación:

$$V_{LP} = \sqrt{3} \cdot V_{\phi P}$$

-Las tensiones secundarias de línea y de fase son iguales:

$$V_{LS} = V_{\phi S}$$

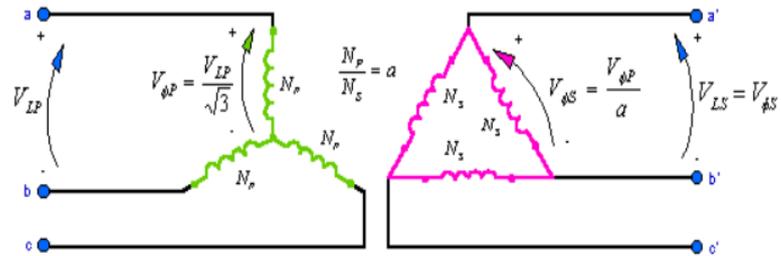
-La relación de tensiones de fase es:

$$\frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = \alpha$$

La relación entre los voltajes de línea del primario y secundario es:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \sqrt{3} \cdot \alpha$$

En la gráfica 2.17 se puede observar todas las corrientes que interactúan en este tipo de conexión.



**Figura 2.17 Conexión Estrella Delta**  
**Fuente; (Experimentos Magneticos, 2013)**

## 2.9 Los SED, o subestación de distribución

Son un conjunto de instalaciones para la transformación de energía o tensión que éste recibe a través de un sistema de distribución primaria y la entrega a otro sistema de distribución denominado secundario muy utilizados en sistemas de alumbrado público sistemas residenciales y comerciales. Este sistema (SED) o subestación de distribución comprende los equipos de maniobra que son:

- La medición
- Cuchillas de paso
- Interruptores

Grandes sistemas industriales mantienen sus propias subestaciones para mantenerse en operación y poder solventar su demanda energética, Como elemento importante en su estructura tienen al transformador para elevar o reducir la tensión y poder distribuirla a todo el circuito de la industria. En la Figura 2.18 vemos una subestación o (SED) con sus transformadores importantes a nivel industrial, seccionadores, interruptores y todo su componente para su maniobrabilidad y funcionamiento. Se puede mencionar que en estos sistemas de subestación una de las maniobras más habituales y a la vez peligroso es la apertura y cierre de interruptores debido a su carácter inductivo. Estos arcos eléctricos liberan una gran cantidad de energía que pueden poner en peligro tanto al personal como a la instalación industrial.



**Figura 2.18 Subestación Electrica 69.000 Kv**  
**Fuente: (Ministerio del poder Popular para la energía electrica, 2016)**

## 2.10 Banco de capacitores

Uno del problema que se mantiene en los bancos de capacitores, es cuando estos alimentan cargas no lineales, el efecto de resonancia aumenta tanto cuando están conectados en circuitos serie o paralelo. Se vera entonces que, a consecuencia del aumento desmesurado de la variable de frecuencia, da lugar al aumento de su reactancia inductiva de los circuitos equivalentes, y por otra parte en los bancos de capacitores esta disminuye por lo que solo existirá al menos una variable de frecuencia en que las reactancias sean iguales y como consecuencia ocasionaría resonancia.

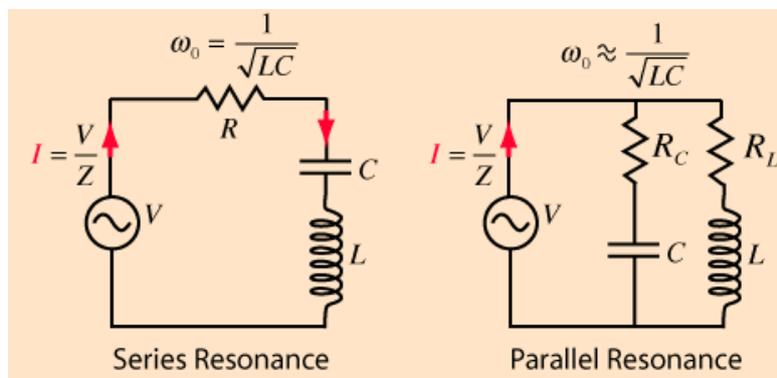


Figura 2.19 Resonancia paralela (a)-Resonancia serie(b)  
Fuente: (Hyperphysics, 2016)

En esta grafica a y b de la Figura 2.19 se observa el fenómeno de resonancia electrica como va en aumento tanto en la conexión en serie o paralelo, la onda senoidal se anula en ambos casos cuando se mantiene en serie o se hace infinita cuando está en paralela conjuntamente con el banco de capacitores.

## 2.11 Máquinas rotatorias

Como concepto básico debemos saber que una maquina rotatoria es aquella máquina que posee un sistema que convierte la energía electrica en energía mecánica, produciendo campos magnéticos en el interior de ella para poder realizar un movimiento necesario. En sectores industriales este tipo de maquina rotatorias son muy utilizados ya sea para la transportación o movimiento de producto. Por entendimiento a nivel industrial lo generalizamos o clasificamos en motores. Motores

generadores etc. En la tabla 2.1 se puede consultar algunas máquinas industriales y el tipo de corriente que necesita para su funcionamiento.

**Tabla 2.1 Máquina industrial y tipo corriente que utiliza**

<b>Tipo de Corriente</b>	<b>Maquinas Rotatorias</b>		<b>Maquinas estáticas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corriente Continua</li> </ul>	Conmutadas	Generadores, motores, compresores	Troceadores
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corriente alterna</li> <li>• Corriente directa</li> </ul>	Conmutada	Motores universales y convertidores	Rectificadores e inversores de giro
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corriente alterna monofásico y trifásica</li> </ul>	Síncronas	Motores, generadores, compresores	Transformadores, reguladores de inducción, variadores de fase, ciclo convertidor.
	Asíncronas	Motores, generadores, compresores	

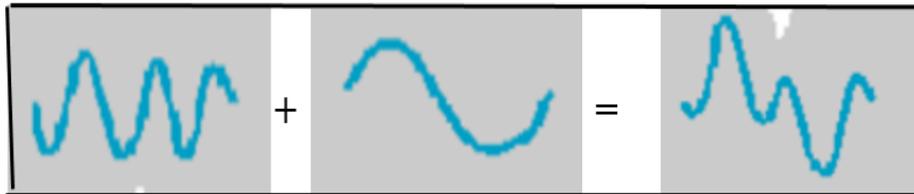
**Fuente: Autor**

## CAPÍTULO 3

### FUNDAMENTOS DE PROPAGACIÓN Y DISTORSIÓN DE ARMÓNICOS

#### 3.1 Generalidades de los armónicos

La aparición de armónicos es producto de la incorporación o montaje de ondas no senoidales en otra onda senoidal como se ve en la Figura 3.1.



**Figura 3.1 Origen de una onda senoidal**  
Fuente: Autor

A continuación, se presenta una tabla donde se muestra la cantidad de frecuencia que generan los armónicos siendo esta la que incide más y mantiene frecuencias que van desde los 110 a 2500 Hz

**Tabla: 3.1 Principales problemas generados en redes de media tensión**

FRECUENCIA	VARIACIONES DE FRECUENCIA	GENERADORES AISLADOS FRECUENCIAS DE 43 A 58 HZ		
AMPLITUD	DURACION MAYOR A 1 CICLO	TRANSITORIAS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• VARIACIONES LENTAS <math>\pm 10\%</math></li> <li>• SOBRETENSIONES <math>+10\% - 25\%</math></li> <li>• VALLES <math>-100\% - 10\%</math></li> </ul>	
		PERIODICAS	FRUCTUACIONES	MODULACIONES
			FLICKER	0.5 – 30 HZ
AMPLITUD	DURACION MENOS A 1 CICLO	TRANSITORIAS	VARIACIONES RÁPIDAS DE U TRANSITORIAS CRESTA Y VALLES	ESCALON ALTO d u/dt  IMPULSO(S)ALTO d u/dt
		PERIODICAS	ARMONICOS	<b>AMPLITUD &lt; 100%</b> <b>100...2500HZ</b>
SIMETRÍA		DESIQUILIBRIOS	SECUENCIAS INVERSAS	

		FUGAS	HOMOPOLAR 20 mA, 500 Ma
<b>ALTAS FRECUENCIAS EMI</b>	CONDUCIDAS		Banda A 10...150 KHz Banda B 150 KHz...30 KHz
<b>ALTAS FRECUENCIAS EMI</b>	RADIADAS		30...80 Mhz80 MHz...1 GHz

**Fuente:** (www.jcee.upc.edu, 2009)

Cuando se habla de cargas lineales, se refiere a la intensidad en la que esta carga absorbe la onda senoidal en una forma constante a lo largo de un tiempo determinado, entre algunos ejemplos de estar cargas tenemos:

- Cargas inductivas
- Cargas resistencias
- Sistemas Rotatorios

La mayoría de las generadoras entregan frecuencias de 60 Hertz, y se procura que siempre se mantenga una onda senoidal perfecta en cada ciclo, sin embargo, la mayor parte de las empresas industriales presentan convertidores de energía, resistencias, equipos electrónicos para realizar su funcionamiento las cuales son cargas no lineales que producen corrientes no delimitadamente senoidales dando lugar a un nuevo conjunto de ondas sobre las redes de media tensión a este fenómeno se lo denomina armónicos, ondas no senoidales que producen distorsiones de la tensión en sistemas eléctricos.

Estas ondas no senoidales presentan periodos cortos o largos que se incorporan o montan sobre la señal fundamental que entrega las empresas distribuidoras propagándose por toda la red de media tensión originando problemas como calentamiento en máquinas rotatorias, transformadores o consumos excesivos de energía. En las empresas se utilizan convertidores para un sin número de propósitos como por ejemplo aumentar la velocidad de transportadoras, Fuentes de energía para equipos electrónicos, aumento o disminución de máquinas rotatorias etc. Estos armónicos son considerados como un efecto de ruido eléctrico en todas las redes de Media Tensión. Otra razón más de la propagación de armónicos es por la expansión de empresas a nivel nacional lo cual origina que la red se vea afectada y origine problemas de ondas de armónicos a demás consumidores. Maquinas exportadas tienen elementos electrónicos que modifican la frecuencia, al ser estas más actualizadas

desempeñan trabajos más puntuales por lo que incorporan tarjetas electrónicas servomotores, Programadores lógicos y demás elementos que actúan a distinto voltaje.

### **3.2 Producto de ondas no senoidales**

Como se denominó anteriormente el fenómeno eléctrico llamado armónicos son producto de la integración de cargas no lineales a los sistemas de distribución, la onda senoidal que fluye a través de las redes de distribución son curvas con ciclos repetitivos comenzando un periodo y terminándolo. Grandes equipos electrónicos o conjunto de modificadores de frecuencia hacen que la onda senoidal no forme un ciclo o periodo completo haciendo que la curvatura no se extienda en amplitud y en el tiempo determinado formando intervalos de ondas cortas modificando su frecuencia que puede ir de 1 a más de un millón de Hertz.

Convertidores de corriente y rectificadores son causante de la conversión de corriente directa a corriente alterna causando problemas en grandes circuitos y modificando la frecuencia en redes de distribución eléctrica. Normalmente la carga no lineal, distorsionara la corriente por lo que va decreciendo cuando la distorsión de onda de tensión crece.

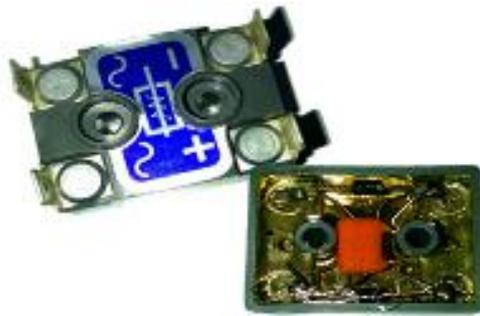
Existen algunos dispositivos productores de armónicos que son:

- Dispositivos convertidores y rectificadores
- Dispositivos que producen algún tipo de rayo o arco eléctrico
- Dispositivos grandes ferromagnéticos
- Balastos de lamparas
- Maquinas soldadoras en empresas liturjica
- Maquinas paletisadoras

### **3.3 Dispositivos rectificadores**

Es esencial mantener este tipo de aparato en sistemas de media tensión pues el funcionamiento es básico para la transformación o conversión de corriente alterna a corriente continua. Estos aparatos estáticos mantienen sistemas electrónicos de potencias para su función de conversión de tensión, entre algunas convertidores tenemos los más relevantes que trabajan por el número de fases denominados rectificadores monofásicos, bifásicos y trifásicos. En algunos casos en sistemas de media tensión un rectificador permite variar el voltaje promedio de salida empleando

para su funcionamiento tiristores de potencia con los cuales se puede variar el ángulo de disparo y por ende la potencia entregada a la carga. Los tiristores se disparan a unos intervalos de  $\pi/3$  . la frecuencia de rizo de voltaje en la salida es seis veces la frecuencia de la fuente de entrada, y el filtrado resulta menos complejo en comparación con el de los convertidores de media onda ya que este presenta menos rizo en el voltaje de salida. En la Figura 3.2. se observa un modelo de rectificador usados en media tensión.



**Figura 3.2 Rectificador Modelo 2501**  
Fuente: (www.electroimanesjove.com, s.f.)

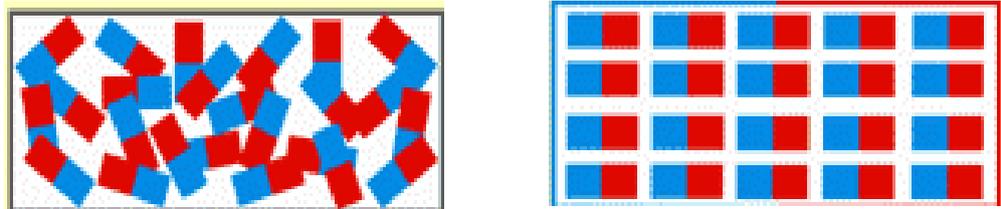
### **3.4 Hornos industriales generadores de arco eléctrico**

Estos hornos por lo general se encuentran en sistemas industriales, fábricas productoras de acero, la fundición de este elemento a grandes proporciones origina perturbaciones en la red. En su funcionamiento estos hornos poseen grandes electrodos que hacen contacto con el elemento para fundirlos, esta generación o magnitud eléctrica origina armónicos. Por no trabajar en estados equilibrados, estos dan grandes disparos por lo que modifican la tensión y frecuencia en las distribuidoras y en todos los componentes de media tensión, en su estructura mantienen grandes transformadores para modificar la tensión por lo que son fuertes productores de ondas no senoidales.

### **3.5 Materiales ferromagnéticos**

A este tipo de material se los denomina ferromagnéticos por mantener y poseer una estructura molecular absolutamente en desorden y no permiten su magnetismo, pero para fines industriales de una u otro forma con inducción estos se magnetizan, cuando

esto sucede surge un imán denominándolo temporal o permanente que es muy utilizado en sistemas industriales para la movilización de materia prima, en bandas transportadoras para el desplazamiento vertical de materiales metálicos, la sujeción de orejas en sistemas de soldadura para latas y un sin número de trabajo por medio de la magnetización. A continuación, En la Figura 3.3 se observa una molécula imantada y no imantada.



**Figura 3.3 (A) Molécula no imantada (B) Molécula imantada**  
**Fuente: (IPEP, s.f.)**

Se presenta una tabla en donde se puede apreciar y considerar algunos equipos que producen tipos de ondas senoidales y no senoidales:

**Tabla 3.2: Fuentes de ondas o frecuencias no armónicas**

Equipos controladores de velocidad	Equipos controladores de frecuencia
Algunos motores de inducción que tengan doble velocidad.	Motores con conductores sobredimensionados

**Fuente: Autor**

**Tabla 3.3: Fuentes de ondas o frecuencias armónicas**

Equipos convertidores de corriente alterna a corriente directa	Algunos equipos o elementos sobresaturados
Cúpulas o casas de arco de corriente alterna a corriente directa	Equipos como capacitores en paralelo
Balastro interior de lamparas fluorescentes	Equipos como variadores de velocidad
Equipos convertidores de fase	Anomalías con problemas del neutro.

**Fuente: Autor**

### 3.6 Tipos de armónicos

Para su entendimiento estas ondas no senoidales denominados armónicos se las describirá en ondas pares e impares. Pero como base fundamental todos los armónicos corresponden a números naturales comenzando con 1,2,3,4,5,6,7,8 armónico etc.

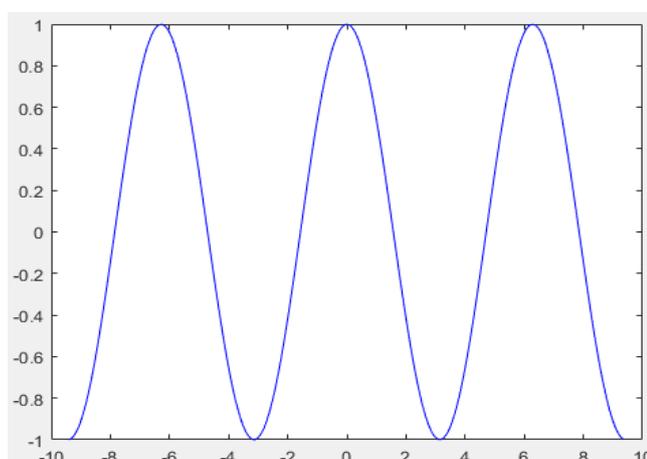
Estas ondas no senoidales se caracterizan por:

- La amplitud
- Su orden.

Esta amplitud hace referencia a el valor de la tensión o la intensidad del mismo. Su orden hace referencia al valor de la frecuencia referido a la onda fundamental en este caso 60Hz, así un armónico de orden 5 tiene una frecuencia cinco veces superior que la onda fundamental, es decir  $5 * 60\text{Hz} = 300\text{ Hz}$ . Entre la cantidad de armónicos perjudiciales en una red de media tensión los armónicos que son pares no son los causantes de problemas, pero los armónicos impares producto del armónico fundamental como el tercero y el quinto, estos son causantes de problemas en cargas monofásicas y trifásicas respectivamente. Para su representación futura en este trabajo lo representaremos con la letra  $h$ , para el numero de armónicos ( $h=1, h=2$  etc.)

#### 3.6.1 Formas de ondas no senoidales

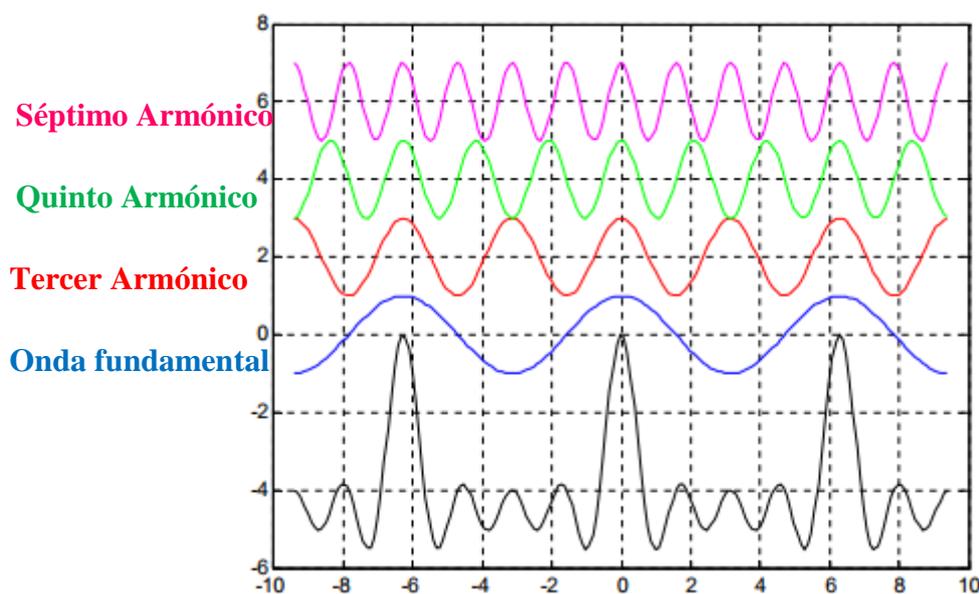
Para el entendimiento de las formas de ondas de armónicos se presenta a continuación algunos tipos de ondas existentes en los sistemas de media tensión, comenzando por la básica, que en este caso sera la fundamental con una frecuencia de 60 Hertz como se muestra en la Figura 3.4.



**Figura 3.4 Onda Fundamental 60 Hertz**

**Fuente: Autor**

A esta onda senoidal se le incorporara otro tipo de ondas no senoidales que serán perjudiciales en nuestros sistemas tanto monofásicos y trifásicos. Esta onda senoidal fundamental es acompañada por otras de diferente frecuencia a lo largo del tiempo produciendo problemas en los equipos de media tensión, la suma de la onda fundamental con las demás no senoidales a la llegada de los terminales de los equipos provocan vibraciones, calentamiento, mal funcionamiento y reducen la vida útil de los equipos. En la Figura 3.5 se observa la onda senoidal y la incorporación de otro tipo de ondas que serán los denominados armónicos afectando a los equipos de media tensión.



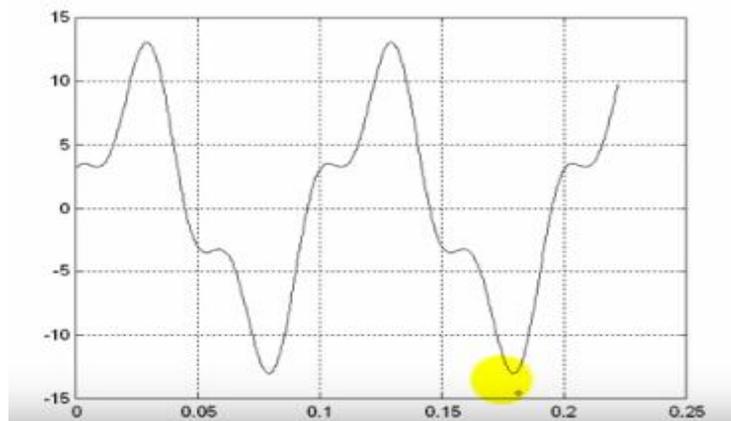
**Figura 3.5 Formas de ondulaciones armónicas**  
Fuente: Autor

Como se puede apreciar en la Figura 3.5 el tercer armónico de color rojo representa  $1/3$  de la onda fundamental, el quinto armónico representa  $1/5$  de la onda fundamental, y el séptimo armónico representa  $1/7$  de la onda fundamental. Cabe recalcar que la onda de color negro es la onda de magnetización que mantiene el transformador, sin embargo, esta onda de magnetización siempre está acompañada de la onda triple frecuencia apareciendo como un voltaje en toda la bobina creando una onda senoidal en el tiempo lo que induce en la bobina del secundario a que tenga un voltaje senoidal, esta apreciación de onda senoidal es muy importante ya que el consumidor será el

beneficiario de recibir una onda que garantizara un funcionamiento perfecto de sus cargas o equipos electrónicos..

### 3.6.2 Onda de magnetización de un transformador

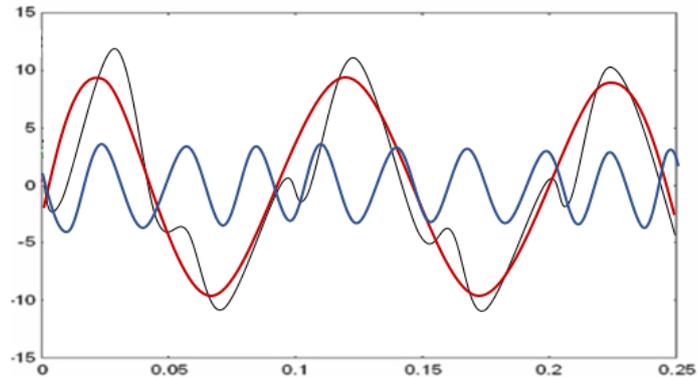
Cuando se realiza pruebas con equipos de instrumentación como un osciloscopio o un programa computacional por ejemplo la aplicación MATLAB se puede observar una onda de magnetización como se presenta en la Figura 3.6. Donde se puede apreciar un tipo de onda que no es senoidal sin embargo esta sigue siendo periódica, Fourier indica que estas ondas se las puede descomponer en una serie de partes u oscilaciones, las cuales nos servirá para analizar características esenciales como la fase, frecuencia y amplitud que serán de vital importancia para conocer su comportamiento trayectoria y la incidencia de determinada onda no senoidal dentro de un sistema de media tensión.



**Figura 3.6 Onda de magnetización**  
Fuente: Autor

Cuando se somete esta onda, a la serie de Fourier, ésta se descompone y como resultado se observa una serie de ondas adjuntas a la onda de magnetización como se ve en la Figura 3.7 Donde aparecen ondas de diferentes magnitudes y frecuencias cada vez más altas. La primera onda que se origina es la fundamental de color rojo, la armónica de 60 Hertz y que tiene la misma frecuencia a la onda de magnetización. Luego de esta le sigue una onda de triple frecuencia que se puede apreciar de color verde de 180 ciclos por segundo y así sucesivamente la onda 5,7 hasta el infinito. Sin embargo, solo se hará relevante a la onda fundamental y la onda de triple frecuencia. Esta onda de magnetización es necesaria para crear: El flujo senoidal, la aparición de

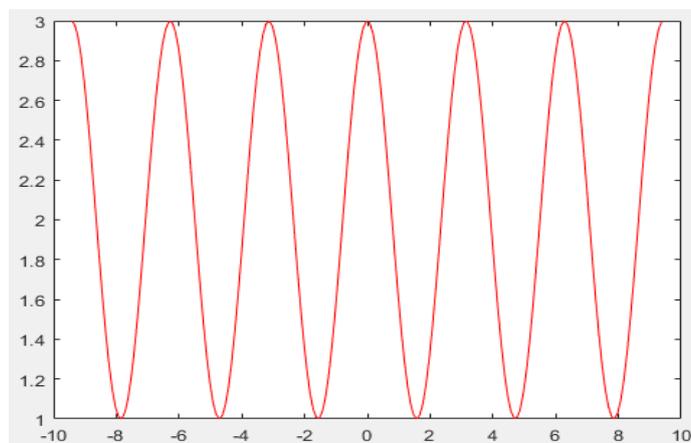
la componente fundamental de 60 ciclos de esa corriente y la componente de triple frecuencia como se observa en la Figura 3.7.



**Figura 3.7** Onda de magnetización Negra y onda triple armónico Verde  
Fuente: Autor

### 3.6.3 Onda tercer armónico

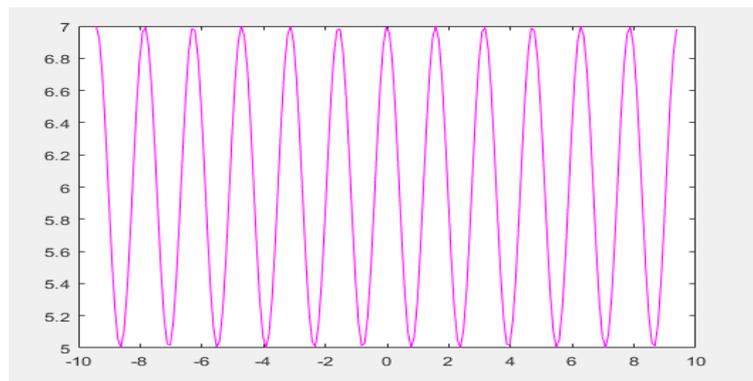
Este tipo de armónico mantiene picos menos elevados con un tercio de la onda fundamental en tamaño manteniendo ciclos cada vez más cortos y más repetitivos con relación a la onda fundamental provocando vibraciones en líneas de media tensión. En la Figura 3.8 se puede apreciar ciclos de ondas periódicas que se hacen más repetitivos y más cortos en el mismo tiempo de la onda fundamental. Este tipo de armónicos es considerado en sistemas monofásicos perjudicial en equipos de media tensión provocando saltos en sistemas de protecciones y calentamiento de terminales etc.



**Figura 3.8** Onda de tercer armónico  
Fuente: Autor

### 3.6.4 Onda Quinto armónico

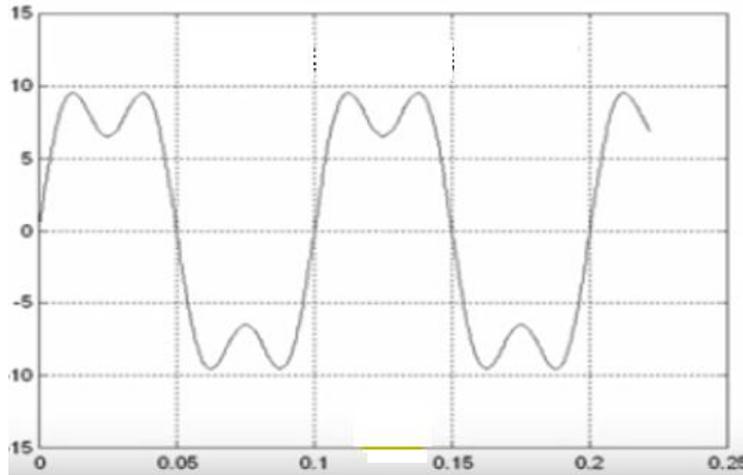
Se considerada en los sistemas trifásicos como el productor de ondas perjudiciales en máquinas rotatorias aumentando la temperatura en el funcionamiento nominal de los mismos. En la Figura 3.9 se observan picos cada vez más cercanos y su amplitud disminuida por lo que en estas máquinas y otros equipos de media tensión como transformadores provocan vibraciones y ruido excesivo.



**Figura 3.9 Onda de Quinto armónico**  
**Fuente: Autor**

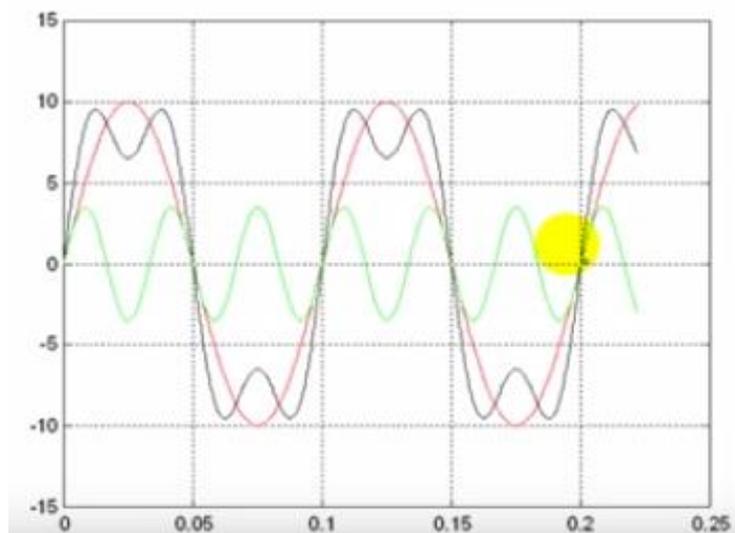
En resumen, si se quiere mantener un voltaje inducido senoidal tenemos que mantener un flujo magnético que este variando también senoidalmente con el tiempo, pero si queremos un flujo magnético que varía senoidalmente con el tiempo lo que necesitamos es una corriente que descompuesta contenga una componente senoidal de 60 ciclos por segundo llamada la componente fundamental o primer armónico. Una componente de triple frecuencia 180 ciclos por segundo conocido como el triple armónico o la componente de triple frecuencia.

En sistemas industriales este tipo de armónicos triple se trata de eliminar, pero a la vez esta corriente de 180 Hertz es necesaria para garantizar que el flujo es senoidal y que los voltajes inducidos en las bobinas sean senoidales respectivamente, si de alguna manera los filtramos este flujo deja de ser senoidal y el voltaje inducido en las bobinas se parecerá a las ondas que se presenta en la Figura 3.10.



**Figura 3.10 Onda no senoidal en bobinas de un transformador magnetizado**  
**Fuente: Autor**

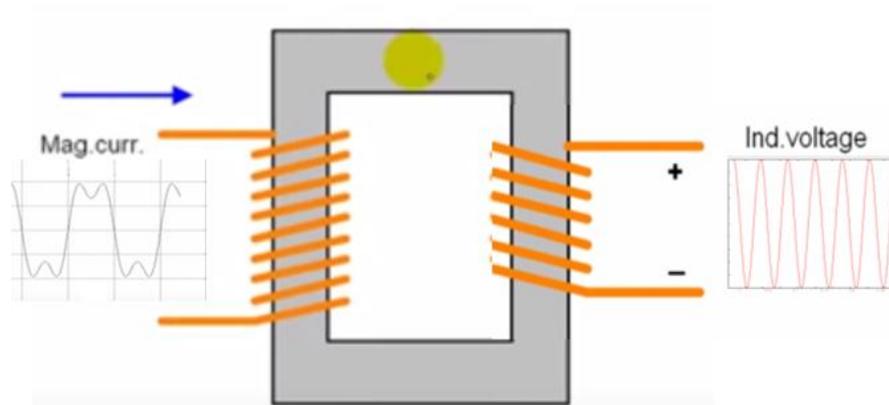
Como se observa en la gráfica este es un voltaje que no es senoidal y si le aplicamos Fourier al voltaje inducido en las bobinas conseguimos que en realidad ahora el voltaje no es solamente una senoidal de 60 Hertz, sino que además aparece un voltaje más pequeño de triple frecuencia de 180 Hertz como se observa en la Figura 3.11



**Figura 3.11 Aplicación de Fourier a voltaje inducido en bobina**  
**Fuente: Autor**

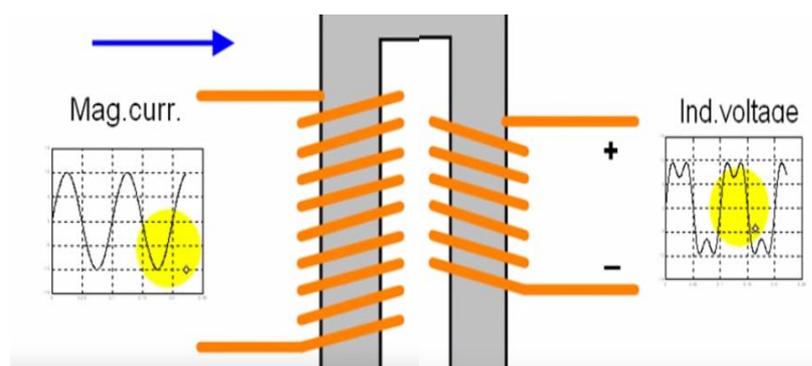
Para concretar cuando se logra deshacer de la triple frecuencia en la corriente de magnetización. la triple frecuencia ahora aparece con un voltaje en todas y cada una de las bobinas del transformador. Para su entendimiento veamos la Figura 3.12 donde

se aplica una corriente de magnetización que contiene las componentes de triple frecuencia, eso crea un flujo magnético senoidal en el tiempo, lo que induce a toda la bobina incluso en el secundario y formar un voltaje senoidal, lo que hace que el consumidor este satisfecho.



**Figura 3.12 Salida senoidal de la inducción magnética**  
Fuente: Autor

Sin Embargo, cuando se logra filtrar la componente de triple de frecuencia de la corriente de magnetización, el flujo deja de ser senoidal y el voltaje inducido se parece a lo que se observa en la Figura 3.13 y desarrolla una triple frecuencia de voltaje.



**Figura 3.13 Salida no senoidal de inducción magnetizada**  
Fuente: Autor

### **3.7 Tolerancia de armónicos para redes de media tensión**

Las normas propuestas por entidades la IEEE que es el instituto de ingeniería eléctrica y electrónica, presenta una tabla de límites de tolerancia de armónicos a redes

de media tensión que exige la regulación nacional tanto a distribuidores como normas para consumidores finales.

**Tabla 3.4. Normas internacionales sobre límites de emisión de armónicos**

<b>NORMA</b>	<b>DESCRIPCION</b>
<b>IEEE-519-1992</b>	Compatibilidad electromagnética CEM: Límites para las corrientes producidas por los equipos conectados a las redes públicas de baja tensión con corriente de entrada >16 A y <= A por fase.
<b>EC-61000-2-2</b>	Niveles de compatibilidad para perturbaciones a bajas frecuencias y señalización en sistemas públicos de alimentación de baja tensión.
<b>IEC-61000-3-2</b>	Clasificación de equipos: Equipos trifásicos balanceados Herramientas portátiles, Equipos de iluminación incluyendo Dimmer.
<b>EC-61000-3-4</b>	Limita emisiones de equipos de corrientes mayores de 16 A Y hasta 75 A
<b>EC-61000-3-6</b>	Límite de emisión de armónico para equipos conectados a sistemas de media tensión y alta tensión de 1 a 35 KV y entre 36 y 236 KV
<b>NRS-048-02</b>	Exige a proveedores a medir e informar su consumo al regulador nacional de electricidad

Fuente: (IEEE., 1992)

### **3.7.1 Normas vigente con relación de armónicos en media tensión**

Según lo expresado en el artículo 004/01 de CONELEC con respecto a la calidad de energía del servicio eléctrico de distribución solo se establece que se controlara las perturbaciones el factor de potencia y niveles de voltaje. cómo se explicará a continuación.

#### **3.7.7.1 Niveles o índices de calidad con referente a armónicos**

Para mantener la calidad y los índices de armónicos se presenta la siguiente ecuación para visualizar el voltaje entregado por empresas distribuidoras y la calidad que establece el Conelec.

$$\Delta V_K (\%) = \frac{V_K - V_N}{V_N} * 100$$

Donde:

$\Delta V_K$  = Es la variación de voltaje, punto de medición y con un intervalo de 10 minutos.

$V_K$  = Voltaje (RMS) O eficaz medido en intervalos que van desde 10 minutos.

$V_N$  = Este sera el voltaje nominal en el punto a medir medición.

Por medio de esta ecuación se puede deducir la calidad y los aspectos técnicos del voltaje propiamente entregado por la empresa distribuidora establecidos por el CONELEC. Con lo relacionado a armónicos este órgano regulador lo define como un tipo de perturbaciones, la cual merece cierto grado de prioridad y se mantiene un índice de calidad que se lo representara en los términos de (THD), denominándolo índice de distorsión armónica que mantiene la siguiente ecuación estándar.

$$\text{THD} = \left( \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{40} (V_i)^2}}{V_n} \right) * 100$$

$$V_i' = \left( \frac{V_i}{V_n} \right) * 100$$

$V_i$  = Es el calor rms de los voltajes armónicos y el subíndice i (para i=2, 3...40 y sera expresado en voltios.

$V_i'$  = Voltaje individual del factor de distorsión.

$V_n$  = Es el voltaje nominal del punto de medición y este es expresado en voltios.

Esta ecuación proporciona la información ideal para el cálculo de perturbaciones armónicas en sistemas que tengan el efecto de corrientes negativas a niveles industriales y que afecta a todos los equipos de cómputo y alumbrado. Dada esta ecuación correspondiente de los factores de distorsión se da por concluidos que los voltajes de armónicos y los que están expresados del voltaje nominal, no deben superar los límites  $V_i$  = los valores rms de los armónicos y thd = índice de distorsión. Para la

regulación presenta una tabla que comprende la tolerancia de armónicos. La IEEE en el inciso 519-1992 proporcionan algunas regulaciones para un servicio en calidad de energía en la que da como límites la cantidad de armónicos que se puede producir y que pueden fluir por las líneas de distribución en media tensión. A continuación, se puede visualizar estos valores. en la tabla 3.5 el cual presenta límites desde (120 v a 69.000v).

**Tabla 3.5. Normas internacionales sobre límites de emisión de armónicos**

<b>Máxima distorsión de corriente en porciento de la carga (IL)</b>						
<b>Orden de los armónicos (armónicos impares)</b>						
ISC/IL	2-11	11-16	17-22	23-34	> 34	Demanda total de distorsión
<20*	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20<50	7	3.5	4	2.5	0.5	8
50<100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100<1000	12	5.5	5	2	1	15
>1000	13	7	6	2.5	1.4	20
Los armónicos pares se limitan al 25% del límite del armónico impar superior						
Todo equipo de generación o distribución están limitados a razón Isc/IL						
Isc= Máxima corriente de cortocircuito						
IL=Máxima corriente de carga (componente fundamental)						

Fuente: (IEEE., 1992)

**Tabla: 3.6 Tolerancia de armónicos en redes de media tensión**

ORDEN (n) DE LA ARMONICA Y THD	TOLERANCIA  V <sub>r</sub> '  o  THD'  (% respecto al voltaje nominal del punto de medición)	
	V > 40 kV (otros puntos)	V ≤ 40 kV (trafos de distribución)
Impares no múltiplos de 3		
5	2.0	6.0
7	2.0	5.0
11	1.5	3.5
13	1.5	3.0
17	1.0	2.0
19	1.0	1.5
23	0.7	1.5
25	0.7	1.5
> 25	0.1 + 0.6*25/n	0.2 + 1.3*25/n

Fuente: (Agencia de Regulación y Control de Electricidad, s.f.)

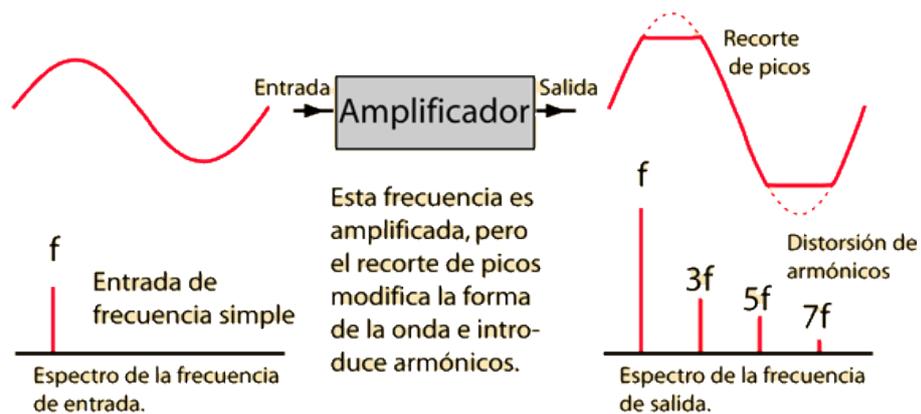
### 3.8 Índice de distorsión armónica

Antes de ver la manera de como evaluar un índice de distorsión armónica en redes de media tensión se tiene que tener en claro la representación teórica matemática de una señal cualquiera en el dominio de tiempo y recordar que existen dos tipos de distorsión: factor de voltaje ( $V_{df}$ ) Y factor de distorsión de corriente ( $I_{df}$ ).

Cabe recalcar que el factor de distorsión es la relación entre la potencia que posee el primer armónico y la potencia que tiene la señal como tal. también el cálculo de la potencia del primer armónico sera la corriente del primer armónico ( $I_1 \text{ RMS}^2$ )

multiplicado por la resistencia. Y la potencia de la señal es la corriente (IRMS<sup>2</sup>) multiplicado por la resistencia. Dando lugar a el factor de potencia  $(df)^2$  y prácticamente dividiendo el valor (IRMS) del primer armónico entre el valor rms de la señal completa se encontrará el valor de distorsión.

Para una mayor representación en nuestro caso de estudio escogeremos los 60 Hertz establecidos al inicio de la investigación, tenemos que tener en cuenta muchos factores matemáticos que están en un sistema no lineal como ejemplo se usara al inicio un tono de una frecuencia cualquiera denominada  $f_0$  (A la salida se obtiene que su fase y su amplitud serán diferentes), y a este mismo tono le sumaremos distintas frecuencias  $2f_0, 3f_0, 4f_0 \dots$  la cual están definidos como armónicos de tonos fundamental  $f_0$  en la siguiente grafica se representa la distorsión armónica como va en aumento cuando se genera un tono inicial.



**Figura 3.14 Distorsión de armónico**  
Fuente: (Hyperphysics, s.f.)

En la Figura 3.14 se observa que la onda de 60 Hertz al colocarse un amplificar esta onda se mantiene, pero a la salida como se observa incrementa su amplitud y fase de forma diferente. Por lo que la fórmula para el índice de distorsión de armónicos(*THD*) es la siguiente:

$$THD = \frac{\sum POTENCIA DE LOS ARMONICOS}{POTENCIA DE LAS FRECUENCIAS FUNDAMENTAL}$$

### 3.9 Índice de distorsión armónica total de voltaje

Para este índice de distorsión total de voltaje ( $V_{df}$ ) se lo definirá con la siguiente formula donde  $V_1$  sera el resultado de una componente fundamental de voltaje  $Vh^2$  sera el resultado de una componente armónica de orden de los armónicos  $h$ .

$$V_{df} = \frac{1}{V_1} \left( \sum_{h=2}^{\infty} Vh^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Se tendrá en cuenta que la distorsión total de voltaje siempre está directamente relacionada con un aumento progresivo de una carga resistiva pura generando temperatura. Por lo que se formula la siguiente ecuación y determinara la potencia disipada por la componente fundamental  $Pf$  y la potencia que disipa todas las armónicas  $Ph$ .

$$\frac{Ph}{Pf} = (V_{df})^2$$

$Pf$  Potencia disipada de componente fundamental

$Ph$  =Potencia disipada de armónicos

$V_{ef}$ = Índice eficaz de voltaje

$V_{df}$  =Valor de componente fundamental

Se pone en consideración ahora, el índice eficaz de voltaje ( $V_{ef}$ ) con el valor de su componente fundamental más el  $V_{df}$  y se lo puede expresar en la siguiente ecuación.

$$V_{ef} = V_{ef1} \sqrt{1 + V_{df}^2}$$

El índice de distorsión armónica individual de voltaje sera el resultado de la componente armónica de cualquier orden par o impar sobre el resultado final de la componente fundamental de voltaje.

$$V_{dh} = \frac{V_h}{V_1}$$

Los tipos de voltaje no senoidales como se ha indicado anteriormente producen algunos efectos o daños a equipos que se encuentren conectados en una red, y uno de los efectos que se puede mencionar son: que el o los equipos, su vida útil de funcionamiento o trabajo disminuyan antes de su tiempo determinado por fabrica, así como de su reducción de potencia o degradación de los mismos.

Para consideración se pone a disposición la causa que pueden ocasionar a corto o largo plazo estos efectos.

**-Efectos a corto tiempo:** Las ondas no senoidales en este caso los armónicos pueden y afectan a los sistemas que usen controles electrónicos, pues en este caso se verá afectado la conmutación de la mayoría de los tiristores por el movimiento o desplazamiento de la onda senoidal del voltaje.

Esto puede incidir a que se mantenga errores de lectura. Por ejemplo, en maquinaria de medición donde se necesita de una medición exacta para cortes medidas etc. La medida o marcación por así decirlo en pantalla no sera la precisa y aumentaría un 0.4% de su lectura real afectando de esta manera a todo el equipo que ve afectada tanto por la onda de tensión y de corriente dando origen a muchos errores de corte y al nacimiento de la armónica 5 colocando todo el sistema con una tasa del 4.5% en no precisión y errores totales. A corto plazo el efecto que ocasionan los armónicos que se encuentran asociados con fuerzas que serán electrodinámicas en una red de media tensión, provocan efectos de calentamiento, vibraciones y un exceso de ruido en equipos estáticos como los transformadores, balastos, reactores y demás equipos. Con respecto a sistemas de media tensión los armónicos que se encuentren en una red de distribución ocasionan que los componentes que estén a los extremos de la línea de media tensión operen de forma incorrecta como por ejemplo el salto de interruptores, breakers, o fusibles. etc. En algunos equipos como es el caso de lo que están protegidos contra variaciones de sobre voltaje cuyo sistema de funcionamiento o de protección fueron diseñados para una operación con voltajes de ondas senoidales, estos también se pueden ver afectados, y funcionarían de una manera incorrecta que puede ir o funcionar desde la sobreprotección de otros equipos hasta la desprotección del mismo por la no operación correcta ante una forma no senoidal afectando su integridad y funcionamiento de manera muy perjudicial y dañar al equipo severamente.

**- Efectos a largo tiempo:** Uno de los efectos cuando se trata a un largo tiempo se considera por la presencia de histéresis, el calentamiento, a largo plazo o tiempo en equipos como los transformadores, capacitores, reactores, en estos equipos el efecto pedicular está presente debido al incremento en la resistencia de sus conductores con una frecuencia  $x$ .

Los valores rms, un valor eficaz se incrementa y aumentan las variables dieléctricas(perdidas) en el aislamiento. Para dar una conclusión todo equipo que se encuentre incluido o sometido por corrientes no senoidales en este caso armónicos, sufren muchas pérdidas de potencia o la capacidad de generación. A continuación, se nombrará algunos comportamientos que ocasionan los armónicos u ondas no senoidales cuando están en las redes de media tensión generando pérdidas o algún tipo de molestia tanto a la parte generadora, distribuidora a los consumidores o clientes finales.

-Todo flujo de energía o potencia transmitida a una frecuencia de 60 o más Hertz demanda un esfuerzo en los terminales o aislamientos de máquinas estáticas aumentando demandas térmicas e incrementando perdidas de conductividad por lo tanto se mantiene el déficit de energía.

-La Mayoría de los equipos estáticos están diseñados para soportar frecuencias nominales, sin embargo, cuando esta variación de frecuencia cambia por motivos externos provoca en los equipos un efecto de vibración o ruido eléctrico.

-Un caso peculiar es que los equipos que generan algún tipo de onda no senoidal pueden crear tipos de ruido eléctrico causando molestias a líneas telefónicas que se encuentren cerca.

### **3.10 Índice de distorsión armónica total de corriente**

Se considerará el índice de distorsión armónica total de corriente  $I_{df}$  como el resultado eficaz de la componente de corriente por la componente armónica de cualquier orden como se expresa en la siguiente ecuación

$$I_{df} = \frac{1}{I_1} [\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2]^{1/2}$$

Se tiene en cuenta que la distorsión total de corriente siempre está directamente relacionada con un aumento progresivo de una carga resistiva pura generando temperatura. La potencia a la componente fundamental y la potencia a las armónicas en una resistencia será la siguiente ecuación.

$$\frac{P_h}{P_F} = (I_{df})^2$$

Dónde:

$P_f$  = Sera designada como la potencia disipada en la componente fundamental de corriente.

$P_h$  = Sera designada como la potencia disipada por todos los armónicos.

$I_{df}$  = El resultado eficaz de una corriente se puede definir en valores eficaces de su componente fundamental.

$$I_{ef} = I_{ef} \sqrt{1 + I_{df}^2}$$

El índice de distorsión de armónico individual de corriente ( $I_{dh}$ ) lo designamos en la siguiente ecuación.

$$I_{dh} = \frac{I_h}{I_1}$$

### 3.11 Desfase con ondas de tensión, corriente y potencias

Cuando se encuentran ciertas cargas estas determinarán la posición de la corriente con respecto a la tensión por este motivo consideramos que existirían dos tipos de corriente, la primera la corriente resistiva que estará en fase con la tensión y la otra, corriente reactiva la cual estará en desfase con la tensión  $90^\circ$ . Para lo cual se tiene la siguiente expresión  $I_x, I_R$  serán contempladas en Amperios(A):

$$I_R = \frac{V}{R} = I \cdot \cos \varphi \quad I_x = \frac{V}{x} = I \cdot \sin \varphi$$

$I_x$  = Corriente resistiva

$I_R$  = Corriente reactiva

#### 3.11.1 Potencia instantánea

La potencia proporciona directamente la cantidad de energía que nos facilita una fuente dándonos una potencia instantánea del producto del voltaje y la corriente. La

tensión instantánea en el elemento y la corriente Instantánea que es atravesado en él, dando la siguiente ecuación utilizada para encontrar la potencia instantánea.

$$p(t) = v(t) i(t)$$

$p(t)$  = Potencia instantánea

$i(t)$  = Corriente Instantanea

$v(t)$  = Tensión Instantánea

### 3.11.2 Potencia promedio o activa

En este caso la potencia activa (P) no mantiene la teoría de la conservación de la energía por lo que esta potencia es consumida en un periodo determinado.

$$P = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0} P(t) dt$$

Está en conclusión es la potencia que son leído por los lectores de energía en este caso los medidores de luz y la unidad de medición serán los Watts (W).

### 3.11.3 Potencia aparente

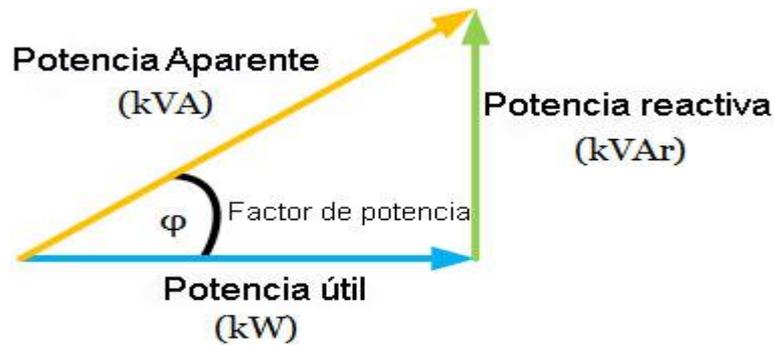
Con respecto a la potencia aparente(S) está también tiene su unidad la cual es voltios amperios. Esta resulta de la adición vectorial de la potencia tanto activa como reactiva. En representación a esta potencia tenemos la siguiente ecuación.

$$S = V_{rms} * I_{rms}$$

$V_{rms}$  = Voltaje

$I_{rms}$  = Corriente

Para los dos casos en la Figura 3.15 se observa el triángulo de potencia para una apreciación de los conceptos dados.



**Figura 3.15 Triangulo de potencia**  
**Fuente: (www.infootec.net, 2014)**

### 3.12 Parámetro y relación eléctrica periódica

Para un estudio en redes de media tensión va definido la potencia reactiva ( $Q$ ) y la potencia aparente ( $S$ ) con la siguiente ecuación:

$$S = V_{rms} I_{rms} \cos\theta$$

$$Q = V_{rms} I_{rms} \sin\theta$$

Las 2 expresiones presentadas más  $\theta$  se las utiliza o son aplicadas en condiciones no lineales tanto para corriente como voltaje, y el resultado de estas ecuaciones se representa cuando la carga cambia de lineal a altamente no lineal.

Se considera y mantiene que la potencia aparente está formulada por tres componentes mostradas en la siguiente ecuación:

$$S^2 = p^2 + Q_B^2 + D^2$$

Donde se detalla que la potencia en este caso reactiva va estar definida como:

$$Q_B^2 = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \sin\theta_n$$

Por consiguiente  $V_n$  y la expresión  $I_n$  de esta ecuación son resultante del voltaje y la corriente de un número no determinado de armónicos y  $\theta_n$  será el ángulo de fase en esta ecuación.

### Parámetros simétricos

A partir de un sistema desbalanceado trifásico se determina tres maneras de secuencia: secuencia positiva (1). Secuencia negativa (2), y secuencia cero (0).

La secuencia 0, estará formada por 3 fasores de igual magnitud y un desplazamiento de fase cero.

La secuencia negativa (2) estará formada por 3 fasores de igual magnitud y un desfase de 120 grados, originando las fases (a, b, c) o (x, y, z).

La secuencia positiva (1) estará formada por 3 fasores de igual magnitud y un desfase de 120 grados, originando las fases (a, b, c) o (x, y, z)

A continuación, se observa la relación matricial que va a transformar las fases en componentes simétricas:

$$\begin{Bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{Bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{Bmatrix}$$

Su resultante inversa es:

$$\begin{Bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{Bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{Bmatrix}$$

**-Secuencias positivas:** Serán construidas por el numero de 3 fasores de igual magnitud y estarán desfasados por 120 grados una con la otra y tendrán la misma secuencia fasorial que la original.

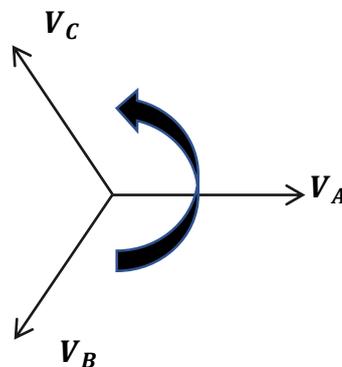
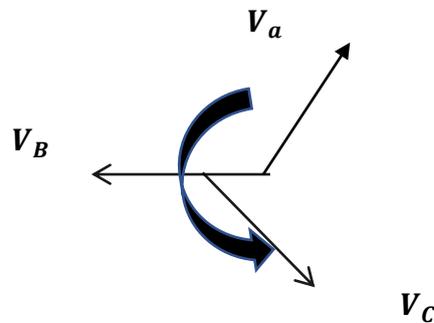


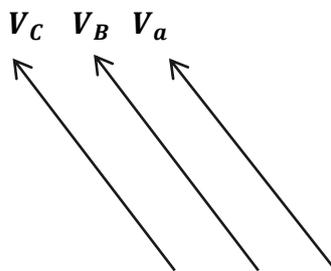
Figura 3.16 Secuencia Positiva  
Fuente: Autor

**-Secuencias negativas:** Serán construidas por el numero de 3 fasores de igual magnitud y estarán desfasado por 120 grados una con la otra, pero tendrán la secuencia fasorial contraria a la original.



**Figura 3.17 Secuencia Positiva ACB**  
Fuente: Autor

**-Secuencias cero:** También denominadas homopolares serán construidas por el número de 3 fasores de igual magnitud y con el desplazamiento fasorial cero una del otro.

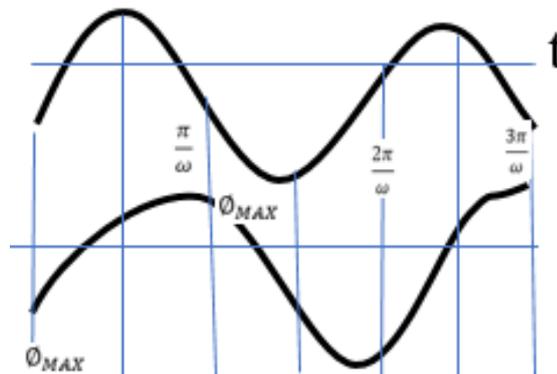


**Figura 3.18 Secuencia Cero**  
Fuente Autor

### 3.13 Voltajes senoidales en sistemas de media tensión.

Como se ha estipulado anteriormente se pretende que las señales de ondas sean perfectas y que los voltajes sean transmitidos por las redes de media tensión estando presentes en toda la trayectoria y sin ningún tipo de variaciones en su frecuencia. Por el lado industrial se necesita voltaje en cada una de las bobinas de los transformadores eléctricos de potencia, sin embargo, ese voltaje senoidal que se quiere obtener es inducido en la bobina de acuerdo por la ley de Faraday, por un flujo variable en el

tiempo. así que si el voltaje va a ser senoidal es porque el flujo también está variando senoidalmente con el tiempo como se puede apreciar en la Figura 3.19. En la parte superior, una onda de voltaje que se mantiene porque de alguna manera se ha creado un flujo que está variando senoidalmente con el tiempo en el núcleo del transformador, en la parte inferior se observa otra, pero para crear esta onda se necesita de un flujo de corriente.



**Figura 3.19 Voltaje inducido senoidalmente**  
Fuente: Autor

Para determinar que corriente se necesita para obtener el flujo senoidal nos vamos a referir a la característica de magnetización del núcleo magnético del transformador que sera sacada de un fragmento de una curva como la apreciamos en la Figura B. Se aprecia una curva cuando crece y la segunda cuando el flujo comienza a disminuir, en nuestro caso nos vamos a referir en el punto rojo que sera la curva ascendente y centraremos nuestra atención y obtenemos el valor de la corriente y dibujamos ese valor de la corriente en el punto del tiempo correspondiente al punto de flujo del cual partimos, si repetimos ese proceso para muchos puntos se observa la forma de la corriente de magnetización necesaria para crear el flujo senoidal que se está buscando como se muestra en la Figura C siendo esta onda no senoidal.

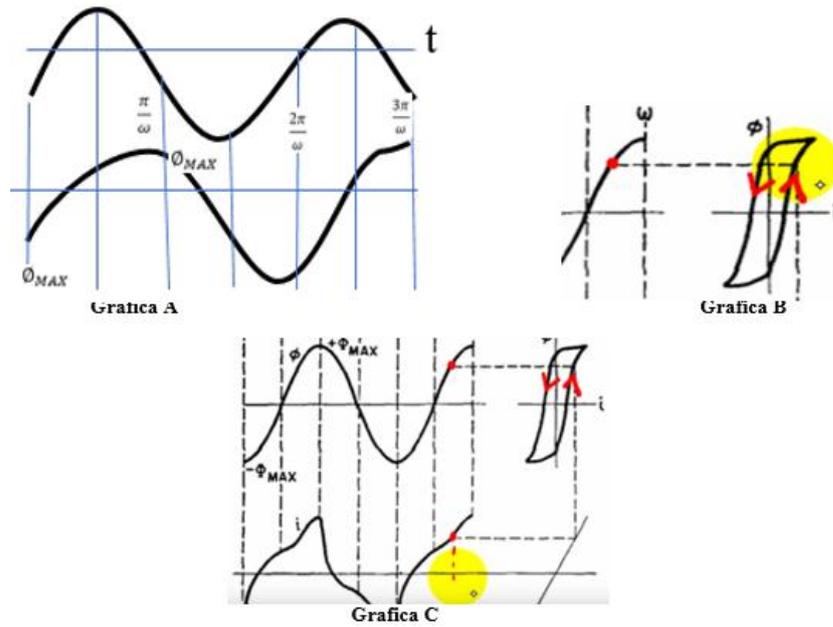


Figura 3.20: Onda de magnetización amplitud  
Fuente: Autor

Si se coloca este tipo de ondas en un osciloscopio se puede deducir que esa corriente de magnetización necesaria no es senoidal, sin embargo, es periódica como se muestra en la imagen Figura C. La consideración básica de Fourier nos habla que podemos descomponer una función del tiempo periódica en una serie de oscilaciones senoidales de distintas amplitudes y de distintas frecuencias y fases como se observa en la Figura 3.21.

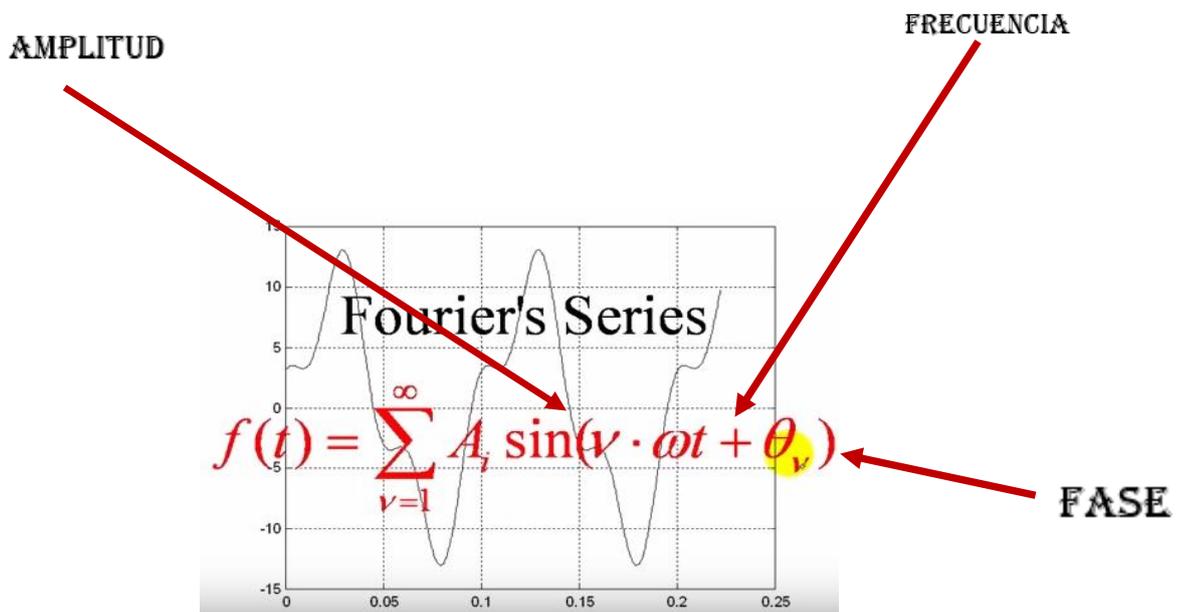


Figura 3.21 Descomposición de ondas en amplitudes frecuencias y fase  
Fuente: Autor

### **3.14 Efectos de los armónicos en componentes de media tensión**

En grandes sistemas de distribución se puede citar algunos problemas de tensión y corriente con respecto a los armónicos. En máquinas industriales o sistemas de factorías se puede deducir que el efecto que se lleva a cabo es de una reducción del desempeño de todo un sin número de sistemas de potencia, los cuales se introducen en sistemas de transferencia, de transportación y de la adaptación de energía para una utilización satisfactoria. Cuando en un sistema de media tensión se encuentran sistemas en serie o paralelo existe la posibilidad de un incremento de armónicos a causa del desmesurado de resonancia de los mismos. Podemos deducir la palabra resonancia en un sistema de energía cuando varios elementos que se encuentre conectados a redes de media tensión, poseen valores particulares las cuales juegan entre si fluctuando la amplitud y frecuencia. Los cambios bruscos de amplitud y frecuencia en un sistema de media tensión hacen que el sistema para lo cual fue diseñada exceda de sus capacidades técnicas originando consumos de energía excesivo. Y si no se logra mantener o controlar los índices de resonancia puede que genere destrucción en partes de la instalación de un sistema. A continuación, en la tabla 3.7 se da a conocer algunos problemas que causan los armónicos en redes de media tensión. Otro problema muy impotente que ocasionarían los armónicos a nivel de media tensión es la deformación de la onda senoidal de la tensión, que puede en primer lugar afectar a todas las cargas que se encuentren conectadas a la red y que necesitan de una amplitud correcta de la tensión para su funcionamiento. Por ejemplo, en un sistema industrial se pueden ver afectadas todas las cargas que mantengan una absorción de onda monofásica como los ordenadores y números equipos que realicen un bajo consumo. Esta onda no senoidal también incrementaría perdidas en motores de transportadoras y demás dispositivos que sean magnéticos. Así mismo se habla de la impedancia que van a mantener los condensadores para poder corregir el factor de potencia de un sistema industrial u otros. Estos disminuirían su capacidad de respaldo a medida que vaya aumentando la frecuencia, en esta se mantiene una onda de tensión distorsionada la cual va a contener armónicos a frecuencias que son múltiplos de la frecuencia fundamental en este caso 60 Hertz, la corriente puede ser mayor a la que se tendría que esperar, lo que de alguna manera sobrecargaría a los condensadores , dando como resultado el efecto de calentamiento o sobrecalentamiento e incluso puede llegar a destruirlos completamente dejando sin respaldo al sistema de media tensión.

También se puede producir una red resonante entre las inductancias de la red o sea las inductancias de fugas de transformadores y de la propia línea, Y los condensadores para la corrección del factor de potencia. Si la frecuencia de resonancia coincide en todo momento con algunas de las frecuencias armónicas, puede aparecer la resonancia, ocasionando un incremento de la corriente a esa frecuencia, lo que a la vez aumenta la distorsión de la tensión y sobrecarga de los condensadores y el sistema de distribución. A nivel industrial cuando se habla de media tensión, existen algunos requerimientos sobre la supresión de armónicos, si la distorsión de tensión que se analiza se produce únicamente en una instalación de cualquier empresa, en este caso de algún consumidor y no afecta a los demás usuarios, no nos podemos limitar a la distorsión por armónicos. Esto puede ser el caso si otros tipos de consumidores se conectan por decir al primario de 13KV del transformador de la alimentación. A este punto lo denominaremos PAC (Punto de acoplamiento común). Por otro lado, si el PAC se encuentra en el secundario es decir a 400V del transformador, ninguna distorsión de la tensión afectaría a los demás consumidores.

Hay que recordar que existen un sin número de normas que limitan la distorsión en el PAC. Para esto se realizará algunos cálculos para estimar la cargabilidad y la distorsión en la red de media tensión. Y para estos cálculos se necesitaría de más información como, por ejemplo:

- La corriente de la carga total
- El valor de THD
- Inductancia de mi transformador de alimentación

El valor de factor de cresta se definirá como la relación que existe entre el valor de la cresta de la corriente ( $I_m$  o  $V_m$ ) y los valores eficaces como se define a continuación mediante la siguiente ecuación.

$$K = \frac{I_m}{i_{RMS}} \quad \text{O} \quad K = \frac{V_m}{V_{RMS}}$$

Se puede también descomponer la intensidad y la tensión de las componentes armónicas mediante la siguiente ecuación.

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \varphi_h$$

$\varphi_h$  será destinado entre el desfase entre la tensión y la intensidad de los armónicos del orden  $h$ . Cuando en esta ecuación no se mantiene armónicos la ecuación propuesta quedara de la siguiente manera  $P = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1$  que indicara la potencia de la señal senoidal, donde  $\cos\varphi$ , será igual a  $\cos\varphi$ .

La potencia reactiva se define solo para la fundamental y será dada por la siguiente ecuación

$$Q = V_1 \cdot I_1 \cdot \text{Sen}\varphi_1$$

Potencia de distorsión que estará considerada de la siguiente manera donde la potencia aparente  $S$  será:

$$S = V_{rms} \cdot I_{rms}$$

En presencia de ondas no senoidales esta ecuación se comportará de la siguiente manera:

$$S^2 = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \varphi_1$$

En nuestro caso se tomará como señal a la frecuencia fundamental que opera la red de distribución eléctrica que será de 60 Hertz. Donde el voltaje y la corriente estarán definidos por:

$$v(t) = v \cdot \cos \omega_0 t \quad i(t) = i \cdot \cos \omega_0 t$$

Pero en estos sistemas como se puede dar la presencia de armónicos las ecuaciones quedaran de la siguiente manera.

$$v(t) = V_1 \cdot \cos(\omega_0 t + \theta_1) + V_2 \cdot \cos(\omega_0 t + \theta_2) + V_3 \cdot \cos(\omega_0 t + \theta_3) + \dots$$

$$i(t) = I_1 \cdot \cos(\omega_0 t + \theta_1) + I_2 \cdot \cos(2 \cdot \omega_0 t + \theta_2) + I_3 \cdot \cos(3 \cdot \omega_0 t + \theta_3) + \dots$$

Quedando simplificada las ecuaciones de la siguiente manera:

$$v(t) = \sum_{n=1}^k V_n \cdot \cos(n\omega_0 t + \theta_n)$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^k I_n \cdot \cos(n\omega_0 t + \theta_n)$$

Donde:

$V_n$ : Será tomada o definida como la armónica de voltaje de orden  $n$ ,  $a$ .

$I_n$ : Será tomada o definida como la armónica de corriente de orden  $n$ ,  $a$ .

$\theta_n$ : Será el ángulo de la armónica  $n$ .

La tasa de incidencia de armónico sera utilizada para definir el contenido de la señal no lineal y la ecuación siguiente definirá el THD.

$$THD = \frac{\sum_{h=2}^{\infty} y_h^2}{y_1} * 100\%$$

Cuando se aplica para la tensión quedara de la siguiente manera:

$$THD_v = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1} * 100\%$$

Cuando se aplica para la corriente quedara de la siguiente manera:

$$THD_i = \sqrt{\left(\frac{I_{RMS}}{I_1}\right)^2 - 1} * 100\%$$

Para armónicos individuales quedara de la siguiente manera:

$$IHD_n = \frac{V_N}{V_1} * 100\%$$

**Instalación de sistemas de distorsión de 12 pulsos:** Si se reparte una entrada rectificadora del equipo conversor de potencia entre dos puentes rectificadores, y las tensiones de cada uno de los puentes estarán desfasados 30° entre si, se puede decir que podemos eliminar los armónicos inferiores a 11. Y para realizar esto se necesita o se requiere de un transformador con doble secundario, uno que este designado o conectado en estrella y el otro designado o conectado a triangulo. Cada secundario alimentara la mitad de la carga, de tal forma que sus respectivas corrientes estarán desfasadas 30°. Estas corrientes se suman en el primario del transformador Esta onda resultante toma el nombre de 12 pulsos (variadores de velocidad) con rectificadores estándar (6 pulsos) conectados la mitad del secundario en estrella, y la otra mitad al triangulo, si las cargas están convenientemente equilibradas, se eliminarán los armónicos 5 y 7.

**Rectificadores Controlados:** Este tipo de rectificador posee por lo general componentes electrónicos como los diodos (controlado) y otros elementos como los tiristores (semicontrolados) para que estos realicen su conversión de corriente alterna a corriente continua que van a constituir las etapas de entradas de los variadores de velocidad a nivel industrial. Sin embargo, en estos equipos se mantiene el inconveniente de que la corriente de entrada de estos presenta una distorsión de armónico (*THDi*), lo que hace que disminuya el factor real de cualquier equipo. Los diseñadores de variadores de velocidad ofrecen factores de potencia que serán próximos a la unidad, pero se refieren al factor de potencia fundamental o de desplazamiento (*DPF*), cuando en realidad el factor de potencia total se expresa como se mostrara en la siguiente ecuación que posteriormente se explicara con detalle.

$$PF = \frac{DPF}{\sqrt{1+THD^2}}$$

Otro inconveniente y muy generalizado es la distorsión de corriente que no solo afectar al factor de potencia, sino que va a repercutir en un empobrecimiento de la calidad de suministro al producir distorsiones en las tensiones de alimentación. Y por último, los rectificadores convencionales no son reversibles de manera tal que los equipos variadores requieran en algunos casos módulos adicionales (resistencias de disipación) para que de esta manera se absorba la energía generada durante el frenada de alguna carga específica en este caso a nivel industrial algún motor.

**Tabla 3.7: Principales problemas y efectos que generan los armónicos en redes de M/T**

Componente /Elemento	Problema	Efecto
<b>CONDUCTOR</b>	La corriente en este elemento aumenta rapidamente.y la aparicion de un efecto ocasionanod calentamiento el cual es el (Efecto Joule),	Rapido deterioro de los conductores, envejeciminto de las protecciones y aumento de calentamiento del conductor.
<b>CONDUCTOR DE NEUTRO</b>	Por el retorno de este conductor, el indicio y la aparicon del triple armonico generara problemas.	Por el exceso de corriente a través del conductor se generará un aumento de calor, haciendo que todo tipo de

		proteccion se dispare por ese efecto.
<b>CONDENSADORES</b>	El efecto de resonancia aparece cuando se encuentra en paralelo. Todo tipo de armónico en este elemento generara aumento de armonicos.	El efecto de resonancia hace que exista calentamiento del conductor neutro. Envejemiento prematura del conductor de neutro. Destruccion de condensadores.
<b>TRANSFORMADORES</b>	Aumento de la corriente por los borners de la maquina, y aparicion de armonicos triples provocando calentamiento.	Supercalentamiento en los debanados de la máquina. Perdida de potencia y de rendimiento.
<b>MOTORES</b>	Circulacion de corrientes Armonicos por los devanados, generando aumento de temperatura.	Perdida de protectores y aislamientos termicos por calentamiento . Perdida de potencia y dismucion de rendimiento. Efecto de Histeresis.
<b>EQUIPOS DE MEDIDA Y CONTROL</b>	Errores en procesos de control y produccion	Datos erroneos de magnitudes y frecuencias.

Fuente: Autor

<b>Armónico</b>	<b>3</b>	Intensidades elevadas por el neutro
<b>Armónico</b>	<b>5</b>	Frena motores
<b>Armónico</b>	<b>7</b>	Acelera Motores
<b>Armónico</b>	<b>9</b>	Intensidades elevadas por el neutro
<b>Armónico</b>	<b>11</b>	Frena motores
<b>Armonico</b>	<b>13</b>	Acelera Motores

Figura 3.22 Algunos efectos producidos por armónicos

Fuente: Autor

## **CAPÍTULO 4**

### **ELEMENTOS DE MEDIA TENSIÓN Y EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS**

#### **4.1 Consideraciones metodológicas**

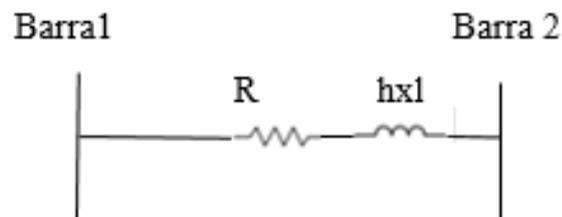
Este capítulo se enfocará en el análisis de los componentes de redes de media tensión. A lo largo de la investigación se puede decir que debido a la gran complejidad del estudio de armónicos y a la gran cantidad de modelos matemáticos que solo sirven como guía, no se puede dar por terminado un modelo absoluto que sea capaz de dar como resultado ondas fundamentales exactas. Solo como un estudio y el ejemplo de la magnitud de la aplicación se deducirán modelos propuestos que nos ayudan al entendimiento de los armónicos. Como se explicó anteriormente el origen de los armónicos se debe a la incorporación de cargas no lineales a la red de media tensión, el crecimiento industrial y la expansión de la ciudad genera que se utilicen nuevos sistemas o circuitos que cambian la frecuencia entregada por la red distribuidora en el caso comercial o industrial. Un ejemplo de un modificador de frecuencia son los variadores de velocidad que disminuyen o amplían la frecuencia para el funcionamiento o requerimiento necesario, la reducción de la tensión para circuitos electrónicos, utilización de tiristores etc. Son algunos de los grandes problemas y originadores de armónicos.

Para el análisis se partir de modelos que componen sistema de redes de media tensión que serán entre algunos: El transformador, máquinas síncrono, máquinas de inducción, líneas de distribución, y las cargas con su respectivo comportamiento frente a armónicos.

#### **4.2 Trabajo del transformador con presencia de armónico**

Diseñados para funcionar con corrientes alternas de cargas nominales de 60 Hertz. Para el análisis en este modelo no incluiremos la parte de capacitancia debido a que este fenómeno de resonancias magnéticas solo ocurre en sistema de alta tensión.

A continuación, se presenta como ejemplo un modelo que será el más simple y estará constituido por inductancia en serie con una resistencia en el devanado. La reactancia presentada deberá ser multiplicada por  $h$  veces (número de armónicos). Este transformador no considera la corriente magnetizada en el transformador.



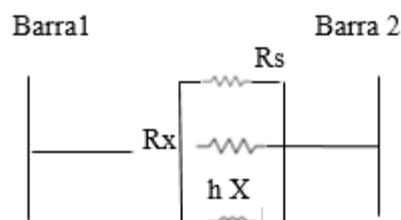
**Figura 4.1 Representación Propia del Transformador de potencia**  
Fuente: Autor

EL otro modelo propuesto consiste en la resistencia  $R_p$ , la cual estará en paralelo con una inductancia  $l$ , que será dada por medio de la reactancia de dispersión a la frecuencia fundamental, estas estarán colocadas en serie con  $R_s$ . Como se aprecia en la Figura 4.2 Las frecuencias son independientes de las resistencias y estas son estimadas por las siguientes ecuaciones:

$$90 < \frac{V^2}{S \cdot R_s} < 110$$

$$13 < \frac{S \cdot R_p}{v^2} < 30$$

En el transformador ( $v$ ) es la tensión, la potencia que será la nominal es ( $s$ ) y las expresiones ( $R_s$  y  $R_p$ ) serán las resistencias este diseño es el más propuesto para los estudios de los armónicos.

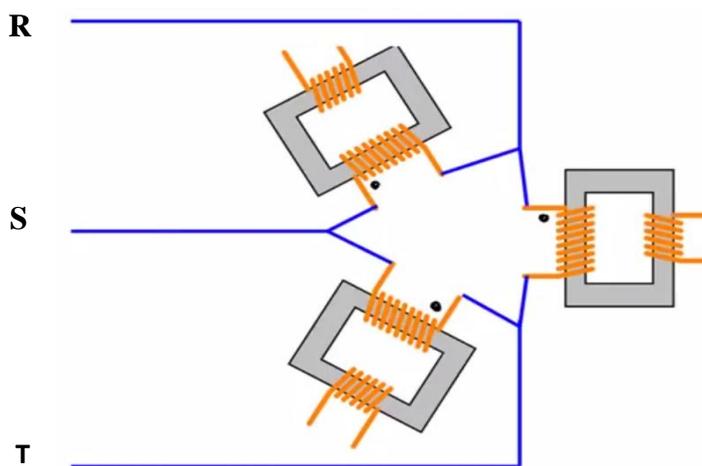


**Figura 4.2 Representación en paralelo con inducción**  
Fuente: Autor

Cuando se ejecutan los modelos para el estudio de armónicos en ellos se puede deducir que se originan pérdidas de potencia, aumenta la temperatura de los componentes del transformador y genera vibraciones en los devanados. Este calentamiento en sus bornes origina saltos de breaker principales en tableros de distribución. El calentamiento influye en la tensión de las líneas de media tensión originando problemas en sus demás componentes y afectando la vida útil de los demás equipos. Las conexiones de los transformadores que se encuentran en configuración delta – estrella suministran cargas monofásicas no lineales, los múltiplos de tres de los armónicos que se generaran en el son 180 Hertz, 240 Hertz 300 Hertz por lo cual los armónicos viajaran por las fases de dicha Estrella. Por la otra conexión Delta estos armónicos no aparecerán, serán un caso balanceado y quedarían atrapados de este lado ocasionando el origen de su sobrecalentamiento.

### 4.3 Conexión delta en sistema industrial

En sistemas industriales este tipo de conexión es muy utilizado, los cuales se conectarán con su fuente trifásica como se observa en la Figura 4.3 Cada uno de los voltajes de línea son voltajes senoidales por la simple razón de que son voltajes impuestos por las fuentes trifásicas.

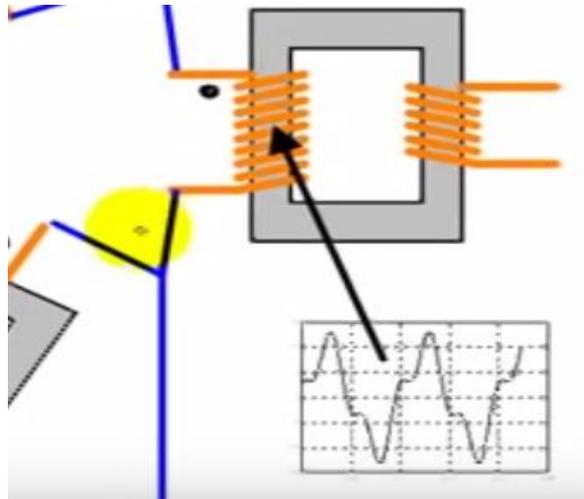


**Figura 4.3 Conexión Delta a fuente trifásica**  
Fuente: Autor

El voltaje de cada una de las líneas es igual en el voltaje de los arroyamientos de los primarios, pero, si ese voltaje es senoidal es porque la corriente de magnetización en

cada uno de esos transformadores tiene tercer armónico, tiene una triple frecuencia en la corriente.

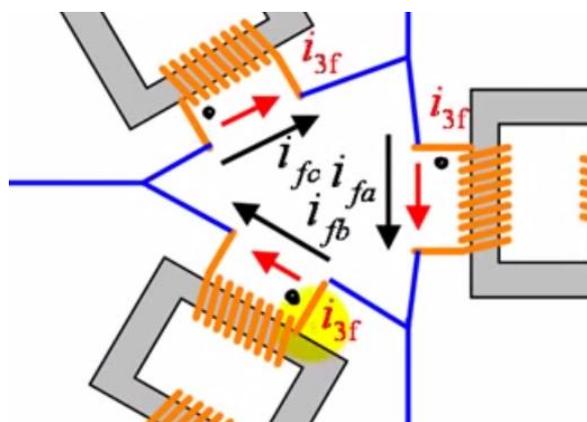
Cada transformador tiene una corriente no senoidal como se aprecia en la Figura 4.4 por el simple hecho de que el voltaje es senoidal como se mencionó anteriormente.



**Figura 4.4 Onda no senoidal inducido por voltaje senoidal**  
Fuente: Autor

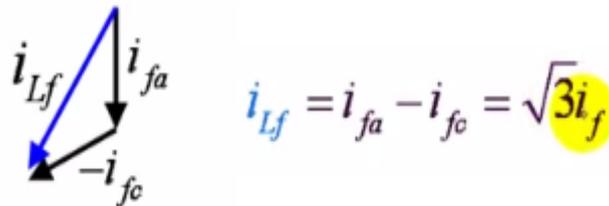
Esta onda tiene una componente  $i_{fa}$  y a su vez una componente de triple frecuencia  $i_{3f}$  que mantiene la misma magnitud y la misma fase con la componente de triple frecuencia de las otras 2 bobinas.

En los otros transformadores también tenemos la fundamental  $i_{fb}$  mas su triple armónico  $i_{3f}$  y en la tercera bobina también se encuentra la onda fundamental  $i_{fc}$  con su respectivo armónico  $i_{3f}$  cómo se observa en la Figura 4.5



**Figura 4.5 Componente Fundamental**  
Fuente: Autor

En esta grafica se adjuntar también la corriente de línea que se calcula tanto para la corriente fundamental como para la triple frecuencia usando ecuaciones de nodos donde la corriente fundamental  $i_L$  sera igual a  $i_{fa}$  menos  $i_{fc}$  quedando como resultado que la corriente fundamental de línea en uno de los arroyamientos sera:  $\sqrt{3i_f}$



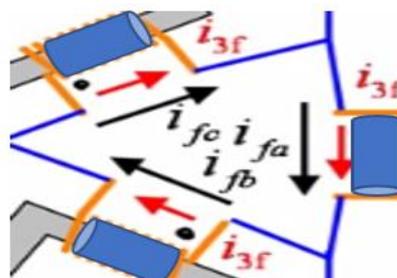
**Figura 4.6 Corriente Fundamental**  
Fuente: Autor

Para la componente de triple frecuencia en la línea  $i_{3fl}$  se utilizará la ley de corriente de Kirchhoff en ese nodo donde la corriente sera  $i_{3f}$  menos  $i_{3f}$  pero la corriente es la misma de triple frecuencia por lo que esa resta es cero.

$$i_{3fl} = i_{3f} - i_{3f} = 0$$

En resumen, la corriente de línea es una corriente de 60 ciclos, si despreciamos los armónicos superiores que se observan en la Figura 4.7 estos no tienen componente de triple frecuencia y esa corriente es senoidal por lo tanto eso simplifica el cálculo de la red primaria en sistemas de potencia. Sin embargo, cada uno de los arroyamientos si tiene corriente de triple frecuencia y el voltaje es senoidal lo que hace que los consumidores estén satisfechos.

No hay armónicos de triple frecuencia en el primario y las corrientes de triples frecuencias siempre circulará dentro de la Delta continuamente manteniendo excitado los núcleos de cada uno de los transformadores.



**Figura 4.7 Circulación de triples armónicos en conexión Delta**  
Fuente: Autor

#### 4.4 Efecto de armónico en factor de potencia

Para el factor de potencia se mencionará que existen varios problemas al momento de presencia de armónicos precisamente en los desfases que existen entre la corriente y la tensión en esta casi potencia reactiva.

Otro problema que marca en un visor <de 1 en FP, son los desequilibrios entre las líneas o fases en nuestro circuito. como base tenemos la ecuación para el factor de potencia, donde la potencia activa sera dividida para la potencia no activa más la potencia activa.

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{POTENCIA ACTIVA}{POTENCIA NO ACTIVA + POTENCIA ACTIVA}$$

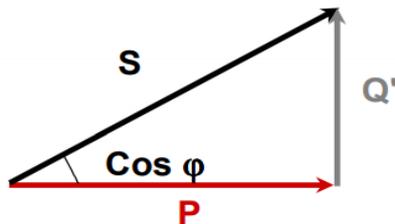
Visores de Factores de potencia registraran fluctuaciones por perdidas de potencia, producto y efecto de armónicos como se muestra en la Figura 4.8 las ondas producidas por las cargas no lineales pasan a los bancos de capacitores y a toda la línea de media tensión haciéndose ilegible para el visor el factor de potencia real. Mostrando tensiones elevadas e incluso reduciendo la vida útil de los bancos de capacitores por calentamiento



Figura 4.8 Relé de Control de factor de potencia  
Fuente: Autor

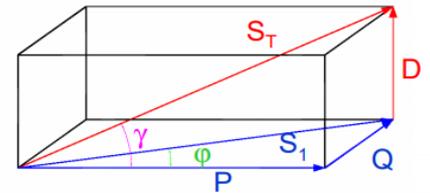
Con armónicos la carga o las fases oscilan en diferentes direcciones En la Figura 4.9 veremos ecuaciones para efectuar el factor de potencia y el Angulo  $\phi$ .

$$\text{Cos } \phi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$



**Figura 4.9 Triangulo de potencia Coseno**  
Fuente: Autor

$$\text{PF} = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}}$$



**Figura 4.10 Triangulo de potencia Factor de potencia**  
Fuente: Autor

De donde:

P= Potencia resistiva o activa expresada en watt(w).

S= Potencia total o aparente expresada en voltios Amperios(VA)

Q= Es la carga inductiva o reactiva expresada en Volteos amperios reactivo(VAR)

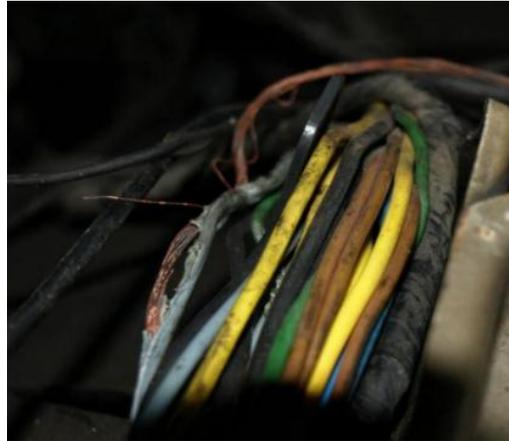
En estas ecuaciones su resultado siempre se deberá mantener en (1) o números que serán fraccionarios menores que 1 como ejemplo 0.88, 0.95. que representará el consumo o aprovechamiento de energía eléctrica en un sistema de media tensión

#### 4.5 Máquinas rotatorias

La presencia de armónicos en sistemas rotatorios como motores en sistemas industriales, ocasionan problemas como pérdidas de potencia por el excesivo calentamiento de los devanados tanto en el estator y el eje. La aparición de ondas no senoidales afecta en la velocidad del motor, incremento de ruido interno y desgastes de rodamientos por lo que el equipo se vería afectado totalmente.

Los conductores de estos motores rotatorios también son afectados e incluso afectarían a los paneles o breaker de donde estén conectados, saltos inesperados de térmicos serían producto de calentamiento excesivo de estas máquinas rotatorias afectando a los demás equipos conectados en esa red de media tensión.

El calentamiento del neutro es producto de la aparición del tercer armónico en mi sistema de media tensión por lo que se recomienda que se sobredimensione el conductor. Estos recalentamientos de los conductores pueden ocasionar cortocircuitos y poner en riesgo el equipo. En la Figura 4.11 vemos conductores por calentamiento que puede originar cortos en mi sistema.



**Figura 4.11 Calentamiento de conductores**  
Fuente: Autor

#### 4.6 Máquinas de inducción

Este tipo de máquinas se mantiene en la mayor parte de sistemas industriales la cual necesitan de una corriente eléctrica para que ellos puedan realizar un torque específico por influencia magnética de la bobina de sus estatores. Para un estudio de estas máquinas a una frecuencia industrial con armónicos se necesitará del deslizamiento de secuencia negativa y secuencia positiva que será presentada en la siguiente ecuación.

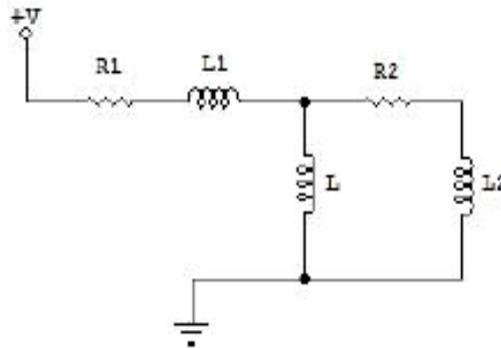
$$s(n) = \frac{n + (1 - s(1))}{n} \quad \text{Secuencia positiva}$$

$$s(n) = \frac{n - (1 - s(1))}{n} \quad \text{Secuencia negativa}$$

-s (1): será la frecuencia fundamental.

-s (n): será dado para el valor del desplazamiento armónico la cual será lo más próximo a la unidad

Todas las reactancias que se den serán multiplicadas por  $h$ . en la gráfica siguiente puede apreciar el diagrama equivalente de la máquina de inducción.



**Figura 4.12 Modelo de equivalencia de máquinas de inducción**  
Fuente: Autor

Otra manera de analizar este tipo de motores es representarlo por una reactancia equivalente, en altas frecuencias se aproxima a la unidad.  $R_1$  Y  $\frac{R_2}{s}$  son depreciable y se comportan como los valores de  $X_1$  Y  $X_2$ . A continuación, se presenta el modelo de la equivalencia del motor inducción.



**Figura 4.13 Modelo de equivalencia del motor inducción en serie**  
Fuente: El Autor

#### 4.7 Línea de distribución

Para las líneas de distribución o transmisión, para los dos casos es válida ciertas características estructurales como son su tensión, longitud y frecuencia. Para ellos la clasificación más utilizada sera por su longitud y se los designan en longitudes: cortas,

medianas y largas. Para un estudio de características de armónicos, se aplicará la siguiente ecuación.

$$l = \frac{0.05\lambda}{h} \text{ [Km]}$$

$\lambda$  = Es la longitud de la frecuencia fundamental.

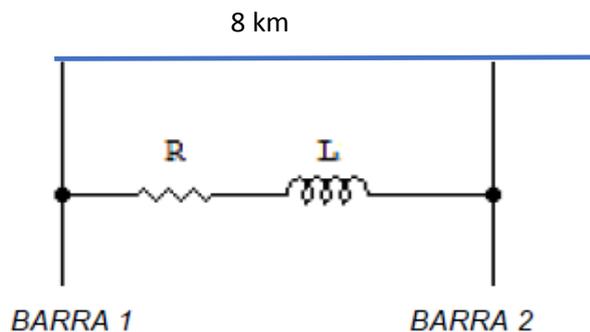
$f$  = Es la frecuencia fundamental [Hz].

$h$  = se mantiene en un orden de armónico, por ejemplo,  $h=1$  sera equivalente a 60 Hz establecido en Ecuador.

$l$  = Correspondiente a la longitud de la línea a estudiar

#### 4.7.1 Tendido eléctrico corto

En este tipo de tendido corto, no más de 8 km se desprecia el efecto SKIN (la admitancia paralela se desprecia totalmente), la inductancia ( $l$ ), la resistencia total ( $R$ ) la reactancia total se multiplica por  $h$ . siendo esta de cada componente a seguir en la escala de los armónicos ( $h=1,2,3,4,5,6$ , etc.), darán como resultado en Hertz en nuestro medio frecuencias de 60, 120, 180, 240, 300, 360 Hertz consecutivamente a continuación podemos apreciarlo en la Figura 4.14.



**Figura 4.14 Tendido eléctrico corto**  
Fuente: Autor

Para las perturbaciones armónicas, la capacidad o extensión del tendido corto en este caso sera mucho menor a medida que va aumentando la longitud de la línea. En esta situación no se podrán identificar todas las resonancias que existan en el tendido por el efecto inductivo o capacitivo.

### 4.7.2 Tendido eléctrico medio

En este tipo de tendido eléctrico medio, no más de 15 km, se va a considerar una serie de parámetros que son los capacitivos, resistivos e inductivos a lo largo de toda la trayectoria tendido eléctrico de media tensión. Se puede representar este modelo como se observa en la Figura 4.15.

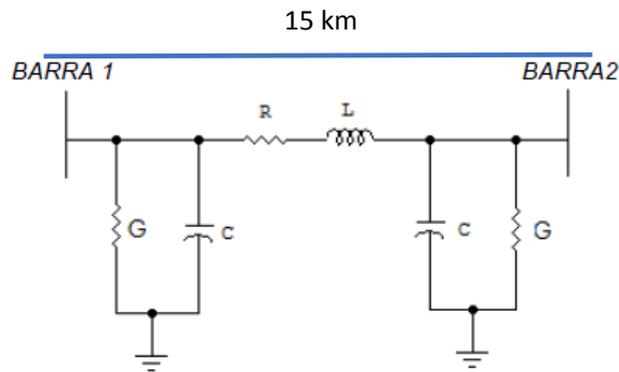


Figura 4.15 Modelo de tendido eléctrico Medio  
Fuente: Autor

### 4.7.3 Tendido eléctrico largo

Para este tipo de tendido no más de 25 km y se considera tanto la impedancia serie como la inductancia en paralelo, la cual esta estará compuesta por la conductancia  $G$  que dará lugar a las corrientes fugas (a través de los pines que sujetan toda la red y con relación a la tierra por medio de la capacitancia  $C$  que serán conectados en los terminales de cada línea. En la Figura 4.16 se aprecia el tendido de longitud larga.

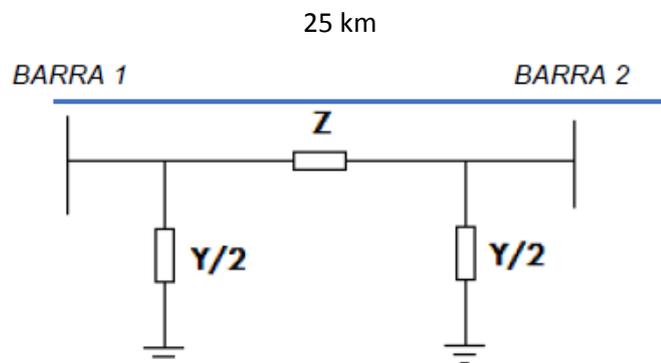


Figura 4.16 Modelo de tendido eléctrico Largo  
Fuente: Autor

#### 4.8 Cargas industriales en sistemas lineales

En sistemas industriales todas las cargas regularan el factor de potencia gracias a la disponibilidad de banco de capacitores por lo que ésta, es una razón importante a que contribuyen a la existencia de resonancia tanto en paralelo o serie en los sistemas de distribución.

En sistemas domésticos o comerciales esta resistencia simbolizada por la letra ( $R$ ), sera obtenida a través de la tensión nominal de las frecuencias armónicas para la potencia activa ( $P$ ). Quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$R = \frac{v^2}{P}$$

En sistemas industriales que tendrán en su mayor estructura motores los parámetros en este caso a determinar serán los siguientes.

$$R = \frac{v^2}{P(1-k-k_E)}$$

$$L = \frac{v^2}{1.2K * k_1 P * W}$$

$K$ : Es la parte de la demanda total correspondiente a los motores

$P$ : Para el sistema la demanda total ( $W$ ).

$k_E$ : Es la parte de la carga controlada electrónicamente

$k_1$ : Son las condiciones de arranque

Para estos casos, la resistencia de amortiguamiento del motor se calcula como veremos en la siguiente ecuación.

$$R_1 = \frac{L}{K_2}$$

#### 4.9 Caso especial motores de inducción

Para esta demostración se considera que la carga industrial seleccionada es netamente inductiva y tendrá grupos que serán conectados directamente a la red de sub transmisión. Los parámetros de inductancia y resistencia son definidos en el modelo o caso anterior, tanto que  $L_1$  y  $R_1$ .y quedaran designados de la siguiente manera.

$$R_1 = \frac{X_L}{K_3}$$

$$L_1 = \frac{0.1R}{W}$$

$W$  = Destinada para la frecuencia fundamental en este caso ( $w=2\pi f$  rad/s)

$K_3$  = Factor efectivo del circuito del motor.

$L_t$  = Es la inductancia de los devanados en los transformadores, en este lado las cargas están conectadas en el lado de baja tensión.

$R_1$  = Esta es la resistencia cuando el motor está en serie.

Los problemas que ocasionarían los armónicos en estos motores de inducción son la disminución del torque generando, disminución de velocidad, baja de potencia.

#### 4.10 Trabajo de capacitores con presencia de armónicos

Estos capacitores tienen modelos únicos para su análisis y pueden ser estructurados o fusionados a circuitos en paralelo o serie, por ser así dan como resultado reactancias capacitivas. La presencia de armónicos en ellos ocasiona vibraciones produciendo calentamiento excesivo y el envejecimiento rápido de los mismos, pérdida de la capacidad al respaldar circuitos, calentamiento en los terminales de conexión, A nivel industrial se posee grandes capacidades de alojamiento de capacitores, al verse afectado alguno de ellos indica que no tendrá un buen respaldo nuestro sistema industrial dando valores errados de consumo energético que perjudican a los mismos consumidores.



**Figura 4.17 Banco de capacitores**  
Fuente: Autor, Indeltro

## CAPÍTULO 5

### MATLAB PARA SEÑALES NO SENOIDALES

#### 5.1 Consideraciones básicas para su aplicación

Se le debe el nombre, serie de Fourier al matemático francés Jean Baptiste Joseph Fourier que desarrollo esta teoría cuando estudiaba LA ECUACION DEL CALOR Realizo publicaciones entre los años 1807 a 1811 llamándose análisis armónico. Esta serie es una rama más de las matemáticas usadas para funciones abstractas, pudiendo dar a conocer imágenes, análisis de vibraciones, ondas, acústicas, análisis estadístico etc.

Para la gran mayoría de formas de ondas tanto de corriente como voltaje se los puede describir tan solo mediante una ecuación definida de la siguiente manera.

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t)$$

Esta fórmula la desarrollamos de la siguiente manera:

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos(\omega t) + a_2 \cos(2\omega t) + \dots + a_n \cos(n\omega t) + b_1 \sin(\omega t) + b_2 \sin(2\omega t) + \dots + b_n \sin(n\omega t)$$

En esta ecuación podemos deducir que los coeficientes de Fourier en la ecuación serán:  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ , y  $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ .

$\omega = 2\pi f_0$ , Se determinará en rad/Seg y sera la frecuencia angular.

$f_0$  = Determinado en HZ, es la frecuencia.

$t$  = Determinado en segundos es el tiempo.

#### 5.2 Funciones periódicas

Para que se complete toda función periódica tiene que cumplir con la siguiente propiedad de todo valor t:

$$F(t) = f(t)$$

A la constante anterior, la constante mínima se le denomina periodo y de esa propiedad se puede obtener

$$F_{(t)} = f(t+nt)$$

Donde:  $n = 0, \pm 1, 0, \pm 2, 0, \pm 3, 0, \pm 4, \dots$

A continuación, un ejemplo donde se verá el periodo de una función X:

¿Cuál sería el periodo de la siguiente función  $F_{(t)} = \cos\left(\frac{t}{3}\right) + \cos\left(\frac{t}{4}\right)$  ?

$F_{(t)}$  es periódica por lo que se debe de cumplir:  $F_{(t)} = f(t+T)$

Sabiendo de antemano que su  $\cos(x+2K_1\pi) = \cos(x)$ , para cualquier entero k, y para que se cumpla cierta igualdad necesitamos decir que:

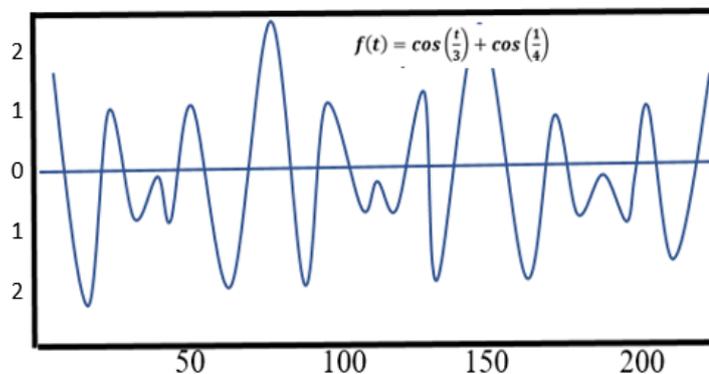
$$T/3 = 3K_1\pi, T/4 = 2K_2\pi$$

Resolviendo se obtiene:

$$T = 6K_2\pi = 8K_1\pi$$

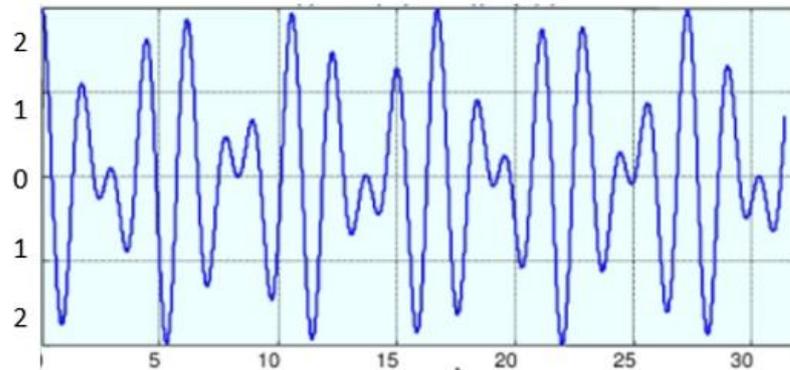
$K_1$  Y  $K_2$  Son enteros

El valor mínimo de T se obtiene con  $K_1 = 4$ ,  $K_2 = 3$  tendremos,  $T = 24\pi$  A continuación se muestra este tipo de ecuación en una gráfica de la aplicación mostrando la función.



**Figura 5.1 Onda Periódica Coseno**  
Fuente: Autor

La siguiente función contenida en  $\cos(3t) + \cos((\pi+3)t)$  no es periódica ya que en su contenido tenemos  $\frac{W_1}{W_2} = \frac{3}{3+\pi}$  este no es una número racional.



**Figura 5.2 Onda no periódica Coseno**  
Fuente: Autor

### 5.3 Utilización y funcionamiento del programa

Este programa integra análisis numéricos, proceso de señales, cálculos matriciales y presentaciones gráficas para su entendimiento.

El tipo de dato básico utilizado en esta plataforma serán matrices representado o tomado en forma de un solo valor y denominado Forma escalar dando una matriz 1 x 1. Cuando se da un listado de datos los cuales serán agrupados u ordenados en filas y columnas tomara el nombre de vector. La representación algebraica y matemática se la representa en columnas y filas dentro de símbolos denominados corchetes como se muestra en la gráfica siguiente como ejemplo:

$$Z = [x] \quad y = [3.6] \quad Z = \begin{bmatrix} 4 & 6 \\ 1 & 7 \end{bmatrix}$$

1\*1                      1\*2                      2\*2

En las gráficas respectivamente se da a conocer matrices de

1= (1 x1)

2= (1 x 2)

3= (2x 2)

## Procesos lógicos y operadores relacionales

Al momento de ingresar comando a la aplicación tenemos que dar a conocer y manejar la sintaxis de función y los bucles que se usan para la confirmación dentro de el. (While, for , end , if, switch ) estas son algunas de entre las más importante dentro de la aplicación en matlab para poder visualizar correctamente los procesos angulares.

También tenemos operadores lógicos dentro de la aplicación que se encontraran disponibles de la siguiente manera:

**Tabla 5.1: Sintaxis de matlab para procesos y operadores matemáticos.**

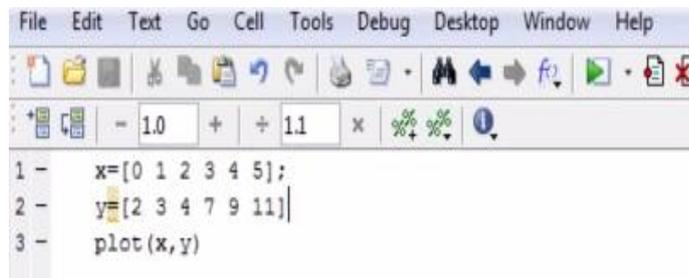
<b>Ischar</b>	Verdadero se la entrada es un vector de caracteres
<b>Isequal</b>	Verdadero si los vectores son iguales
<b>Is real</b>	Verdadero si todos los números del vector sin reales
<b>isnumeric</b>	Verdadero si el vector es de numero (no de caracteres)
<b>Isfloat</b>	Verdadero si el vector es de elemento en coma flotante
<b>Isnan</b>	Detecta los elementos que son NaN en un vector.
<b>Isfinite</b>	Detecta los elementos finitos de un vector
<b>Isinteger</b>	Verdadero si el vector es de números enteros
<b>&amp;</b>	Y
<b> </b>	O
<b>''</b>	Negación lógica
<b>Xor</b>	O excluyente
<b>All</b>	Verdad si cualquiera de los elementos de un vector no es cero
<b>Any</b>	Verdad si cualquiera de los elementos de un vector es no cero
<b>&lt;</b>	Menor que
<b>&gt;</b>	Mayor que
<b>bar()</b>	Simula la creación de barras en la aplicación
<b>&lt;=</b>	Menor o igual que
<b>&gt;=</b>	Mayor o igual que
<b>''=</b>	Distinto que

**Fuente:** (Moore, 2007)

En esta aplicación la expresión `isequal (A, B)` es igual o equivalente a `all (A==B)`. La expresión `isequal`, sera la suma de algunas expresiones lógicas matemáticas y estas empezaran con `is`. El índice de la aplicación, en este caso matlab nos facilita el hacer análisis complejos matemáticos, muy aparte de que da la facilidad de otros lenguajes de programación por la continuidad de variables que son reales y complejas. Para la visualización tendremos que colocar los comandos conocidos para que estos a su vez puedan producir representaciones graficas de las ecuaciones integradas.

## 5.4 Creación de gráficos

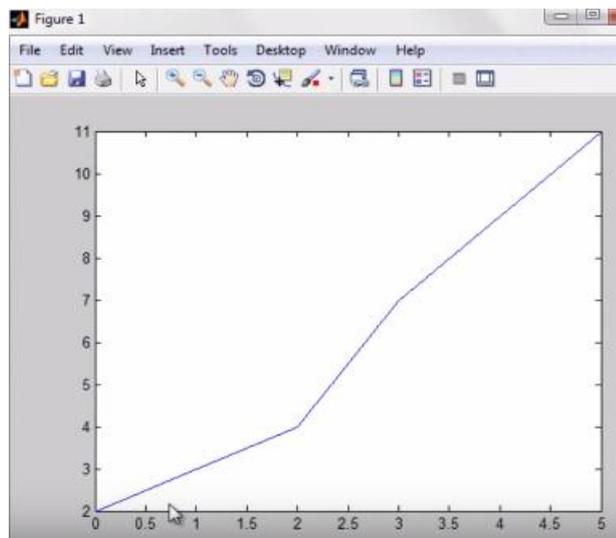
Para gráficos en matlab se dispone de funciones de alto y bajo nivel. Para dar inicio a graficas de alto nivel comenzaremos con la función plot [X, Y] en donde (X) es la variable y será el eje de las abscisas y la [Y] otra variable será el eje de las ordenadas. Con ese comando se puede graficar los valores ahora de [X, Y]. Como un ejemplo se da el punto  $x = [0 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5]$  dentro de su respectivo corchete y para la abscisa En la aplicación se digitan los valores de  $y = [2 \ 3 \ 4 \ 7 \ 9 \ 11]$  dentro del corchete como se muestra en la Figura 5.3



```
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
+ - 1.0 + ÷ 1.1 x % % ?
1 - x=[0 1 2 3 4 5];
2 - y=[2 3 4 7 9 11]
3 - plot(x,y)
```

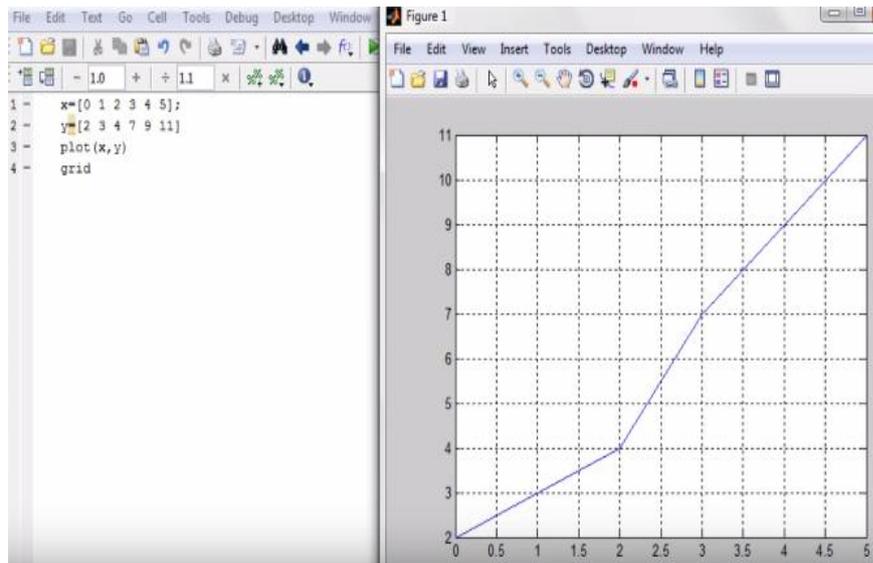
**Figura 5.3 Funciones Altas Para Gráficos**  
Fuente: Autor

Al dar Enter, en la aplicación se formará la onda dentro de la lógica de Matlab y podremos visualizar la función. cómo se observa en la figura 5.4



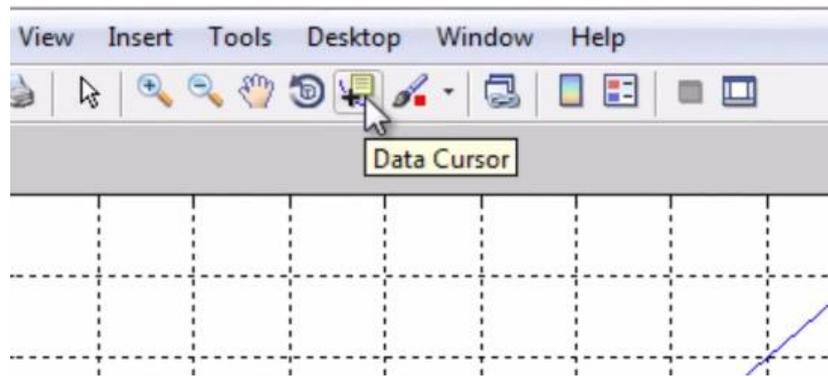
**Figura 5.4 Visualización de una función de Alto Nivel**  
Fuente: Autor

Como se puede observar se ha dado pares de coordenadas y la aplicación lo que hará es unirlos para poder visualizar dentro del comando de ventana Windows. Si en este caso queremos apreciar los puntos o la unión de las coordenadas podemos utilizar otro comando que para este caso es (GRID) donde si es ingresado en el ejemplo se puede ver dicha unión como se aprecia en la Figura 5.5



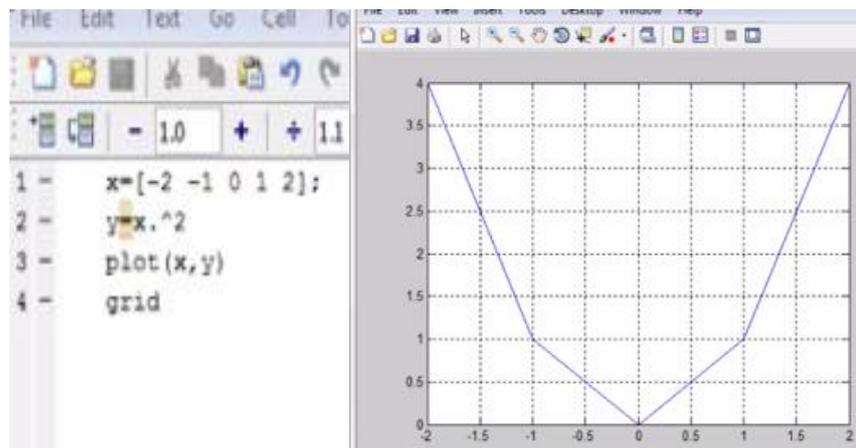
**Figura 5.5 Visualización de una función de Alto Nivel**  
**Fuente: Autor**

Como se aprecia la aplicación colocará una especie de malla en el fondo para poder apreciar los puntos exactos de la unión de las coordenadas. Por medio de este visor también se puede apreciar en que punto se encuentra cualquier ordenada haciendo clic en el visor de comandos Windows (DATE CURSE) como se muestra en la Figura 5.6. Se coloca el puntero sobre la línea trazada y este indicará automáticamente el valor de la ubicación de ese punto de coordenadas.



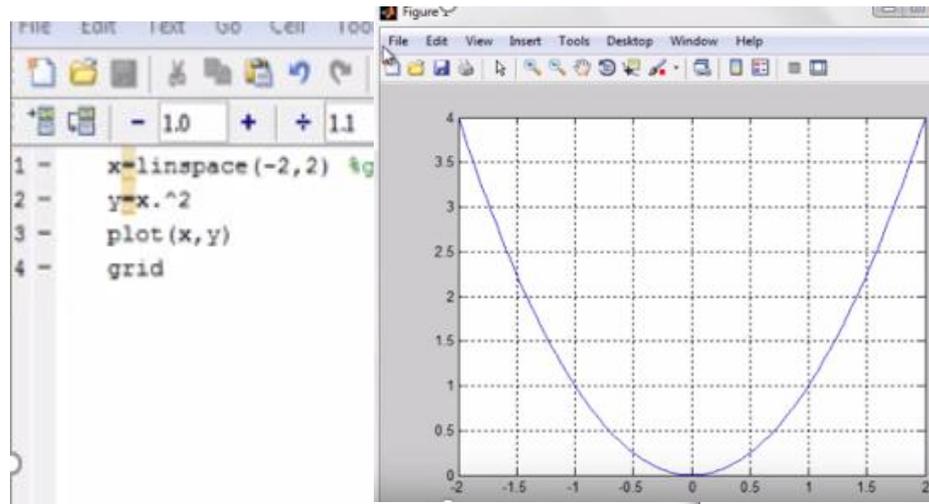
**Figura 5.6 Visualización Comando Date Cursor**  
Fuente: Autor

Para graficar una función determinada como una parábola como se explicara a continuación en la ventana comand Window se escribirá en [X] =(-2 -1 0 1 2) y en [Y] la siguiente función que es  $(x.^2)$ , en donde x tomara el valor de cada uno de los puntos =(-2 -1 0 1 2) y va a obtener un valor de [Y] como se observa en la parábola en la Figura 5.7.



**Figura 5.7 Visualización de una Función de Alto Nivel**  
Fuente: Autor

Para que en esta grafica los puntos de coordenadas se transformen en línea y se utilizará el comando (Linspace) el cual posee a su vez 3 argumentos un punto de inicio, medio y cantidad infinita de puntos. En esta se tiene que definir la cantidad de puntos necesarios, a continuación, se inserta en el inicio en -2 y 2 y se observa nuestra recta segmentada ahora en una sola línea como se observa en la Figura 5.8.



**Figura 5.8 Comando Linspace**  
Fuente: Autor

## 5.5 Vectores y Matrices

Existen diferentes formas de definir una variable como ejemplo variable

-[a:b] = define el vector cuyo primero y último elemento son [a y b] respectivamente y los elementos intermedios se diferencian en una sola unidad.

-[a:s:b] = Define el vector cuyo primero y último elemento son a y b y los elementos intermedios se diferencian en la cantidad especificado por los incrementos.

-Linspace(a,b,n) = Define el vector cuyo primero y último elemento son a y b que tienen en total n elementos uniformemente espaciados entre si.

-longspace(a,b,n) = define el vector cuyo primero y último elemento son los elementos especificados y que tienen en total n elementos en la escala logarítmica uniformemente espaciados entre si.

De todas estas formas la más común es la primera, la cual se suele denominar creación de un vector utilizando el operador, este operador es otra opción para crear arreglos donde cada par de elementos consecutivos posee una razón o paso constante, si se omite el paso los valores se incrementaran de 1 en 1 tomando en cuenta la sintaxis valor inicial: paso: valor final tenemos que  $c = 5 : 10$  con el resultado hemos obtenido los números entre 5 y 10 separados una unidad con  $d = -4.5 : 2.15$  el resultado va ser números entre -4.5 y 1.5 separados una unidad como se puede apreciar en la resolución de la figura 5.9

```

>> C=5:10
C =
     5     6     7     8     9    10

>> D=-4.5:1.5
D =
-4.5000 -3.5000 -2.5000 -1.5000 -0.5000  0.5000  1.5000

```

**Figura 5.9 Visualización de un Vector**  
**Fuente: Autor**

## 5.6 Visualización de un elemento de un vector y de una matriz

Se puede seleccionar un elemento de un vector o un sub conjunto de elementos como el ejemplo a continuación.

$x(n)$  =devuelve el enésimo elemento del vector  $x$ .

$x(a:b)$  =devuelve los elementos del vector  $x$  situados entre el  $a$ ésimo y el  $b$ ésimo ambos inclusive.

$x(a:p:b)$  devuelve los elementos del vector  $x$  situados entre el primer y último número, ambos inclusive pero separados de  $p$  en  $p$  unidades  $a > b$

Veamos el ejemplo a continuación ingresando la siguiente matriz

```
>>B= [10 5 2 78;23 12 45 2; 12 56 78 11 ]
```

Automáticamente el programa acomoda la matriz como se ve en la gráfica 5.10

```

>> B=[10 5 2 78; 23 12 45 2; 12 56 78 11]

B =

    10     5     2    78
    23    12    45     2
    12    56    78    11

```

Figura 5.10 Visualización de una Matriz  
Fuente: Autor

## 5.7 Matrices especiales en Matlab

Se describirá algunas de las matrices especiales que usa el programa internamente para el desarrollo de las aplicaciones.

- >> ones(m,n)= crea una matriz m por n todos unos
- >>zeros (m,n)= crea una matriz m por n todos ceros
- >>eye(m,n) = crea una matriz identidad 1 matriz de m por n con uno en la diagonal y cero en los demás elementos
- >>A` transpose (A) = crea la matriz transpuesta de A intercambia sus filas por las columnas
- >>diag(vect.) = crea una matriz diagonal a partir de un vector
- >> horzcat = con catea matrices horizontalmente.
- >>elig(A) = calcula los valores y vectores propios para la matriz A
- >>rref (A) =devuelve las matrices equivalentes o forma canónica de A
- >> magic(n) = crea una matriz cuadrada con n por n con filas columnas y diagonales cuya suma es la misma
- >> ran (m.n)= crea una matriz de n por n de forma aleatoria donde sus elementos están distribuidos unifórmemente entre 0 y 1
- >>find(A)= devuelve los índices de los elementos de la matriz a que no son ceros en forma vertical.
- >>size (A) = devuelve el tamaño de una matriz.
- >> trace(A)= computa a suma de los elementos de la diagonal principal
- >>inv (A) = devuelve la matriz inversa a la original
- >> det ( A)= entrega el valor de la determinante de la matriz.
- >>tril (A) = devuelve la parte triangular inferior de la matriz a
- >>triu(A) = devuelve la parte superior de la matriz A.
- >>reshape (A,m,n)= devuelve la matriz de orden m por n extraída de la matriz A tomando elementos consecutivos de A por columnas.

Hay que recordar que para utilizar estas matrices no se le tiene que colocar el signo de porcentaje a continuación en la Figura 5.11 se muestra 3 ejemplos de las matrices especiales (ones, zeros, eye).

```
Command Window
>> A=ones(2,3)
A =
    1    1    1
    1    1    1
>> B=zeros(3,2)
B =
    0    0
    0    0
    0    0
>> C=eye(3)
C =
    1    0    0
    0    1    0
    0    0    1
```

**Figura 5.11 Matrices Especiales**  
**Fuente: Autor**

SIMULACIÓN DE ARMÓNICOS CON CARGAS NO LINEALES

6.1 Simulación de onda en matlab de un circuito de Media Tensión

La prueba a realizar se puede originar en cualquier sistema industrial siendo el sistema eléctrico el más afectado por los armónicos. Problemas más visibles como calentamiento de conductores, condensadores, disparos de protecciones, sobrecalentamiento de devanados son causados por armónicos y solo con equipos tecnológicos apropiados se lo podrá detectar.

Para la aplicación de Matlab se hará la simulación de ondas no senoidales (armónicos), en un circuito lineal que constará de 3 nodos. Se simulará la presencia del armónico 1, 3, 5, 7 para ver conjuntamente con los datos introducidos la onda que afecta al sistema eléctrico. A continuación, los datos para mi simulación en el siguiente circuito.

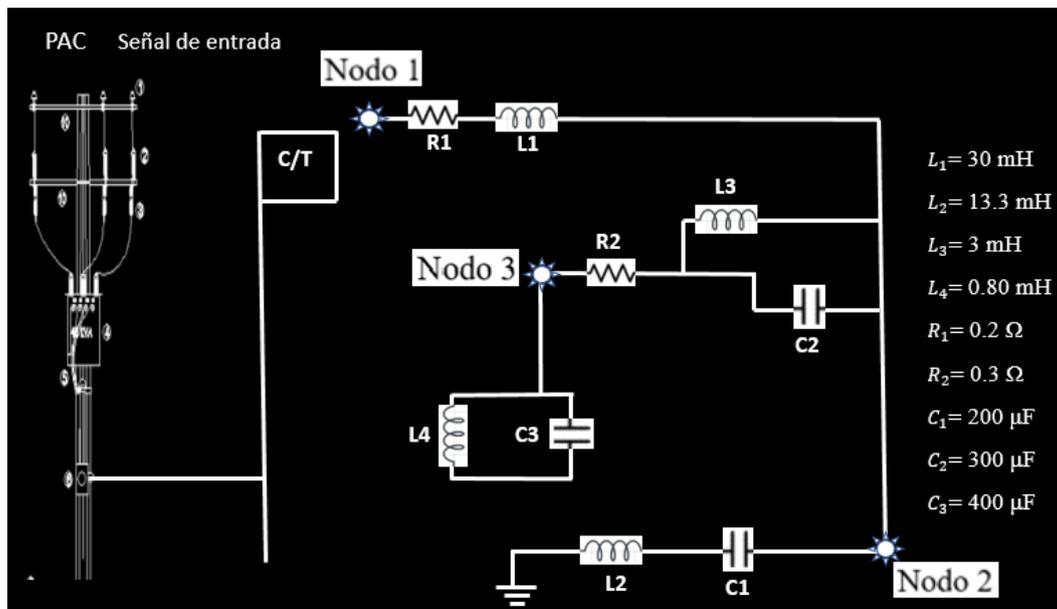


Figura 6.1 Circuito propuesto para análisis  
Fuente: Autor

Antes de realizar la simulación se tiene que tener un estudio o un análisis previo a realizar cualquier ajuste en la instalación, cabe recalcar que para saber si tiene incidentes de armónicos se realizará un estudio o evaluación a seguir.

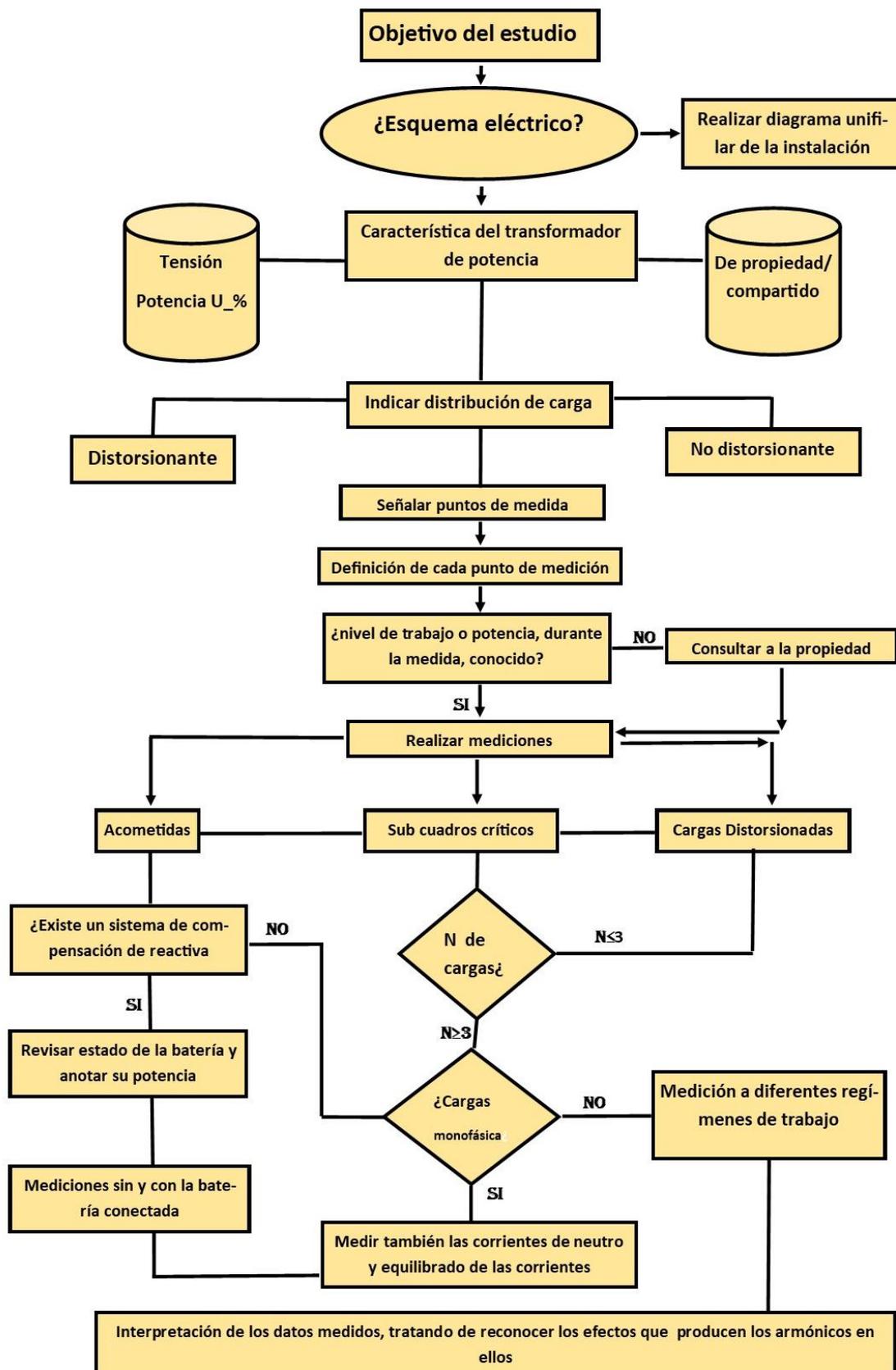
A continuación, se presentará un diagrama donde se visualizará los pasos a seguir para la evaluación de cargas no lineales en donde se estipulará los siguiente:

- Objetivo del estudio orientado a carga no lineales.
- Realizar un esquema eléctrico
- Si no se realiza un esquema eléctrico, se realizará solo un diagrama unifilar de la instalación.
- Si se realiza un esquema eléctrico, se hará el estudio de las características de potencia en la industria en este caso, específicamente a los transformadores.
- Se obtendrá el porcentaje de la potencia u demás características técnicas nominales de o los transformadores y demás elementos que generen energía en la industria.
- Se realizará un diagrama indicando la cantidad de cargas conectadas a la red de media tensión, una vez realizado el diagrama clasificaremos en cargas que distorsionan o no a la onda senoidal entregada por la red, y se señalará los puntos a medir.

Realizado el paso anterior se tomará los datos del nivel de demanda conocida en la empresa por las cargas.

- Se realizará y tomará los datos de las principales acometidas, más puntos críticos, y las cargas distorsionantes.
- Para los puntos críticos se tomará el número de cargas conectadas a la red y se describirán sus datos técnicos.
- De haber un sistema de banco de capacitores en el sistema, se realizará y anotará el estado de las baterías y ver el estado de su potencia, tanto cuando se encuentren conectadas o no al sistema
- Si son cargas monofásicas, se medirá la corriente de neutro y equilibrado de las corrientes
- De no haber cargas monofásicas se realizará la medición a los diferentes regímenes de trabajo.
- Con todo el muestreo se da a la interpretación de los datos medidos, tratando de reconocer los efectos que producen los armónicos en ellos.

**Diagrama o plan para el análisis de armónicos en redes de media tensión.**



## 1.-SEÑAL GENERADA

Señal propia generada por empresa distribuidora (60 Hertz).

## 2.-UTILIZACION DE INSTRUMENTACION

Se utilizarán pinzas amperométrías que se colocarán en breaker principales y terminales de maquinas rotatorias que se persiga algún tipo de calentamiento o tenga problemas de trabajo.

Cuarto de transformadores.

Tablero principal (oficinas, luminaria, etc.).

Tableros de distribución a cargas no lineales.

Principales acometidas.

## 3.-EQUIPO COMPUTACIONAL O PROGRAMA

Una vez realizado y recolectado los diferentes datos de las maquinas rotatorias y demás equipos se introducirá en la aplicación Matlab para una interpretación de los resultados y visualización de ondas.

Una vez evaluado el plan a seguir, se procederá a la toma de datos y ejecución en la aplicación para la visualización de las señales de voltajes en los nodos y por último el porcentaje de incidencia de corrientes armónicos en ellos.

Solo se tomará los resultados de la comparación de armónicos existentes en los 3 nodos.

Para obtener la matriz de las impedancias se tiene que invertir las admitancias.

**Primer paso:** Abrimos la aplicación Matlab 2016 y ejecutamos el comando Windows comand. La frecuencia a utilizar es de 60 Hz. A continuación, tenemos que encontrar el voltaje fundamental de cada nodo, debemos Introducir la corriente de armónico en el NODO 1 que sera:

$$\begin{aligned}I_{h=1}^1 &= 1 \angle 0^\circ \text{ A} \\I_{h=3}^1 &= 0.3 \angle 0^\circ \text{ A} \\I_{h=5}^1 &= 0.2 \angle 0^\circ \text{ A} \\I_{h=5}^1 &= 0.2 \angle 0^\circ \text{ A}\end{aligned}$$

**Segundo paso:** En la aplicación comenzaremos resolviendo los valores entre los nodos para esto ingresamos la siguiente ecuación descrita que sera:

Datos técnicos traducidos en notación decimal para su ejecución en la aplicación:

-Se introduce en la aplicación los valores tomados en los diferentes puntos del circuito.

$L_1 = 30 \text{ mH}$   
 $L_2 = 13.3 \text{ mH}$   
 $L_3 = 3 \text{ mH}$   
 $L_4 = 0.80 \text{ mH}$   
 $R_1 = 0.2 \Omega$   
 $R_2 = 0.3 \Omega$   
 $C_1 = 200 \mu\text{F}$   
 $C_2 = 300 \mu\text{F}$   
 $C_3 = 400 \mu\text{F}$

Una vez convertidos procedemos a la ejecución y modalidad de ecuaciones en el programa donde ingresaremos la corriente no senoidal.

```

>> L1=0.03;
L2= 0.0133;
L3= 0.003;
L4= 0.00080;
R1= 0.2;
R2= 0.3;
C1= 0.0002;
C2= 0.0003;
C3= 0.0004;

```

**Tercer paso:** La admitancia entre los nodos del sistema se encontrará aplicando la fórmula correspondiente. Se ingresará los valores de resistencias, valor de la frecuencia y los valores de las inductancias.

Encontramos los Valores de admitancia entre nodos

```

X1=1/(R1+i*2*pi*60*L1);
X2=1/((i*2*pi*60*L2)-i*(1/(2*pi*60*C1)));
X3=1/(R2+(((L3)/C2)/((i*2*pi*60*L3)-i*(1/(2*pi*60*C2)))));
X4=(i*2*pi*60*L4-i*(1/(2*pi*60*C3)))/(L4/C3);
Xh=( [X1, -X1, 0; -X1, X1+X3+X2, -X3; 0, -X3, X3+X4] )

```

Yh =

Nodo 1	nodo 2	nodo 3
0.0016 - 0.0884i 0.0000i	-0.0016 + 0.0884i	0.0000 +
-0.0016 + 0.0884i 0.7319i	0.1709 - 0.6991i	-0.1693 +
0.0000 + 0.0000i 3.8969i	-0.1693 + 0.7319i	0.1693 -

```

>> Zh1=inv(Xh);

```

$$I=[1;0;0];$$

$$Vh1=Zh1*I$$

$$Vh1 =$$

$$0.6626 + 13.2936i$$

$$0.4626 + 21.9839i$$

$$0.0177 + 3.920i$$

Los valores de la corriente para cada armónica que será ingresada en el circuito y la admitancia entre los nodos del sistema se encontrarán aplicando la fórmula correspondiente. Se ingresará los valores de resistencias, valor de la frecuencia y los valores de las inductancias.

Se procede a encontrar los valores de tensión para cada corriente de armónico.

Para el armónico 3

$$X1=1/(R1+i*3*2*pi*60*L1);$$

$$X2=1/((i*3*2*pi*60*L2)-i*(1/(3*2*pi*60*C1)));$$

$$X3=1/(R2+(((L3)/C2)/((i*3*2*pi*60*L3)-i*(1/(3*2*pi*60*C2)))));$$

$$X4=(i*3*2*pi*60*L4-i*(1/(3*2*pi*60*C3)))/(L4/C3);$$

$$Xh=[X1, -X1, 0, -X1, X1+X3+X2, -X3;0, -X3, X3+X4];$$

$$\gg Zh3=inv(Xh);$$

$$I=[0.3;0;0];$$

$$Vh3=Zh3*I$$

$$Vh3 =$$

$$0.1558 + 16.6515i$$

$$0.0958 + 6.4727i$$

$$-0.0138 - 4.740i$$

Los valores de la corriente para cada armónica que será ingresada en el circuito y la admitancia entre los nodos del sistema se aplicando la fórmula correspondiente. Se ingresará los valores de resistencias, valor de la frecuencia y los valores de las inductancias.

Para el armónico 5

$$X=1/(R1+i*5*2*pi*60*L1);$$

$$X=1/((i*5*2*pi*60*L2)-i*(1/(5*2*pi*60*C1)));$$

$$X=1/(R2+(((L3)/C2)/((i*5*2*pi*60*L3)-i*(1/(5*2*pi*60*C2)))));$$

$$X=(i*5*2*pi*60*L4-i*(1/(5*2*pi*60*C3)))/(L4/C3);$$

$$Xh=[X1, -X1, 0, -X1, X1+X3+X2, -X3;0, -X3, X3+X4];$$

$$Zh5=inv(Xh);$$

$$I=[0.2;0;0];$$

$$Vh5=Zh5*I$$

$$Vh5 =$$

$$0.1039 + 11.1010i$$

$$0.0639 + 4.3151i$$

$$-0.0092 - 3.160i$$

Los valores de la corriente para cada armónica que será ingresada en el circuito y la admitancia entre los nodos del sistema se encontrarán aplicando la fórmula correspondiente. Se ingresará los valores de resistencias, valor de la frecuencia y los valores de las inductancias.

Para el armónico 7

```
X=1/(R1+i*7*2*pi*60*L1);
X=1/((i*7*2*pi*60*L2)-i*(1/(7*2*pi*60*C1)));
X=1/(R2+(((L3)/C2)/((i*7*2*pi*60*L3)-i*(1/(7*2*pi*60*C2)))));
X=(i*7*2*pi*60*L4-i*(1/(7*2*pi*60*C3)))/(L4/C3);
Xh=(X1, -X1, 0,-X1, X1+X3+X2, -X3;0, -X3, X3+X4);
Zh7=inv(Xh);
I=[0.14;0;0];
vh7=Zh7*I
vh7 =
    0.0727 + 7.7707i
    0.0447 + 3.0206i
   -0.0064- 0.2121i
```

**Cuarto paso:** Para la gráfica de ondas o barras en el programa, se insertarán comandos predeterminados y ejecutores para que simulen ondas y correlacionar ecuaciones dentro de la aplicación. A continuación, se graficará los voltajes de los 3 nodos relacionados.

Voltaje primer nodo

```
t=linspace(0,0.05,1000);
Vh=13.2936 *sin(2*pi*60*t-1.5272)+16.6515*sin(3*2*pi*60*t-
1.57)+11.1010*sin(5*2*pi*60*t-1.568)+7.7707*sin(7*2*pi*60*t-1.569);
plot(t,Vh)
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Tensión (V)');
title('Forma de Onda para el Voltaje en EL Nodo 1');
```

Voltaje segundo nodo

```
Vh2=21.9839*sin(2*pi*60*t-1.338)+6.4727*sin(3*2*pi*60*t-
1.569)+4.3151*sin(5*2*pi*60*t-1.57)+3.0206*sin(7*2*pi*60*t-1.57);
t=linspace(0,0.05,1000);
plot(t,Vh2);
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Tensión (V)');
title('Forma de Onda para el Voltaje en el Nodo 2');
```

Voltaje tercer nodo

```
Vh3=3.9205*sin(2*pi*60*t-1.56)+4.740*sin(3*2*pi*60*t-
1.61)+3.160*sin(5*2*pi*60*t-1.57)+2.212*sin(7*2*pi*60*t-1.57);
t=linspace(0,0.05,1000);
```

```

plot(t,Vh3)
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Tensión (V)');
title('Forma de Onda para el Voltaje en el Nodo 3');

```

### Resultados de la aplicación

**Tabla 5.1: Valores de Nodos**

Armónicos	1	3	5	7
Nodo 1	13.2936	16.6515	11.1010	7.7707
Nodo 2	21.9839	6.4727	4.3151	3.0206
Nodo 3	3.920	4.740	3.160	2.212

Fuente: Autor

**Quinto paso:** Se encontrará (*vdf*) descrita en el capítulo anterior que es la distorsión total de voltaje para cada nodo con la siguiente ecuación.

$$VDF = \frac{1}{I_1} \left[ \sum_{h=2}^{\infty} I_h^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Nodo 1

$$VDF1 = \left( \frac{\sqrt{16.6515^2 + 11.1010^2 + 7.7707^2}}{13.2936} \right) * 100$$

$$VDF1 = 34.8543 \text{ v}$$

Nodo 2

$$VDF1 = \left( \frac{\sqrt{6.4727^2 + 4.3151^2 + 3.0206^2}}{21.9839} \right) * 100$$

$$VDF1 = 13.1404 \text{ v}$$

Nodo 3

$$VDF1 = \left( \frac{\sqrt{4.740^2 + 3.160^2 + 2.212^2}}{3.920} \right) * 100$$

$$VDF1 = 63.0631 \text{ v}$$

**Sexto paso:** Se procede a la visualización en barras para la apreciación y comparación de amplitud en el nodo 1.

Para el nodo 1

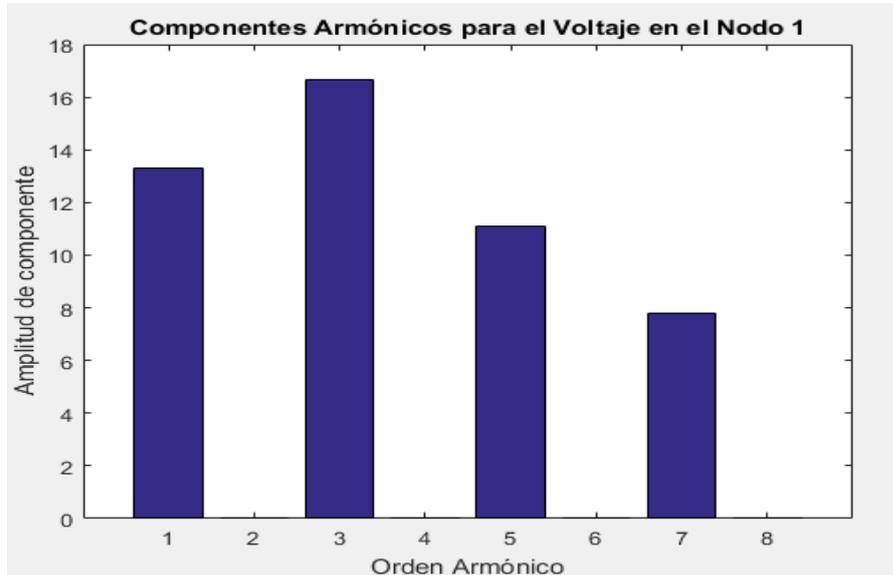
```
x=[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8];
```

```
y=[13.2936, 0, 16.6515, 0, 11.1010, 0, 7.7707, 0];
```

```
bar(x,y)
```

```
xlabel('Orden Armónico');
```

```
ylabel('Amplitud de componente');title('Componentes Armónicos para el Voltaje en el Nodo 1');
```



**Figura 6.2 Armónicos en el Nodo 1**  
**Fuente: Autor**

En la Figura 6.2 se puede observar la comparación de armónicos en el nodo 1 y con una presencia elevada de una onda no senoidal de triple frecuencia como es el tercer armónico con una frecuencia de 180 Hertz.

### **Diagrama de barra para la apreciación y comparación de amplitud en el nodo 2**

Para el nodo 2

```
x=[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8];
```

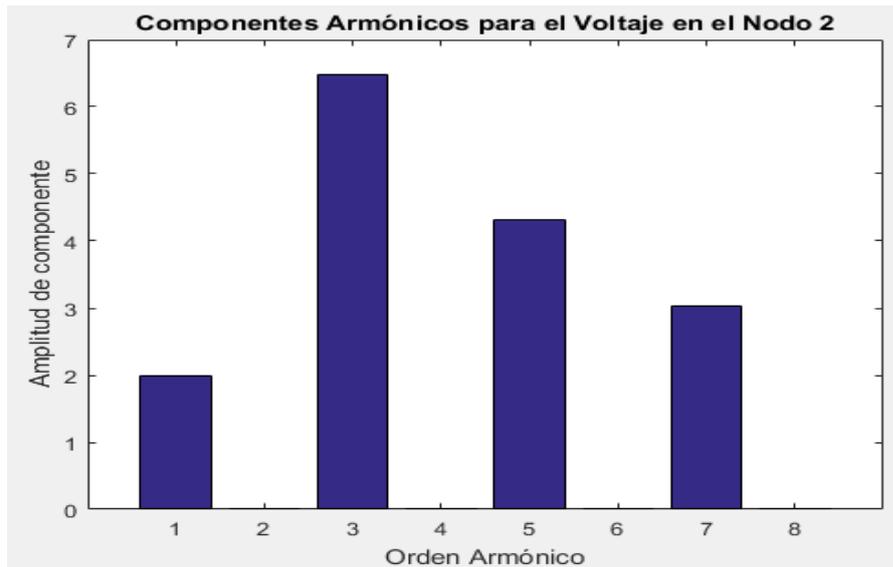
```
y2=[21.9839, 0, 6.4724, 0, 4.3151, 0, 3.0206, 0];
```

```
bar(x, y2)
```

```
xlabel('Orden Armónico');
```

```
ylabel('Amplitud de componente');
```

```
title('Componentes Armónicos para el Voltaje en el Nodo 2');
```



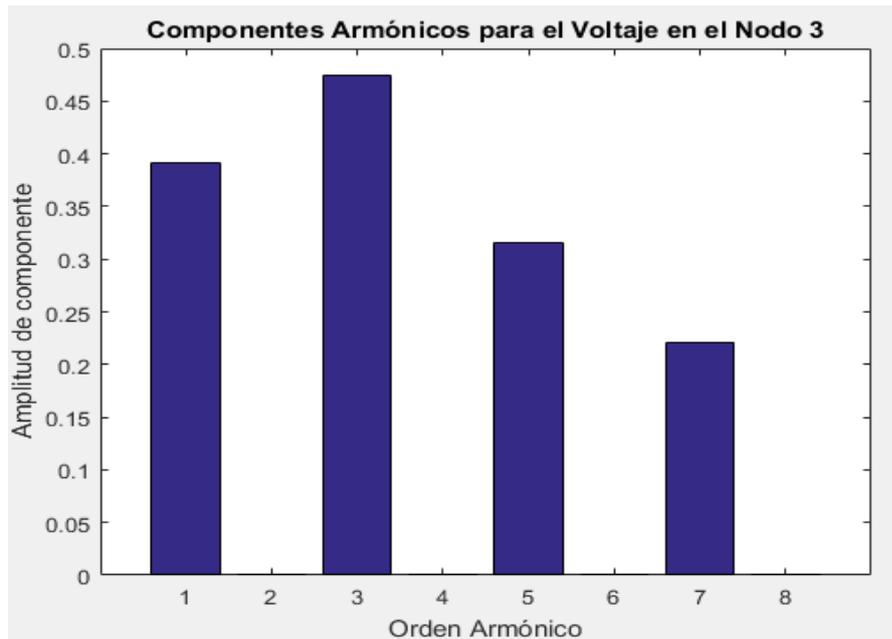
**Figura 6.3 Armónico en el Nodo 2**  
**Fuente: Autor**

En la Figura 6.3 se puede observar la comparación de armónicos en el nodo 2 y con una presencia elevada de una onda no senoidal de triple frecuencia como es el tercer armónico con una frecuencia de 180 Hertz.

Diagrama de barra para la apreciación y comparación de amplitud en el nodo 3

Para el nodo 3

```
>> x=[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8];
y3=[3.920, 0, 4.740, 0, 3.160, 0, 2.212, 0];
bar(x,y3)
xlabel('Orden Armónico');
ylabel('Amplitud de componente');
title('Componentes Armónicos para el Voltaje en el Nodo 3')
```

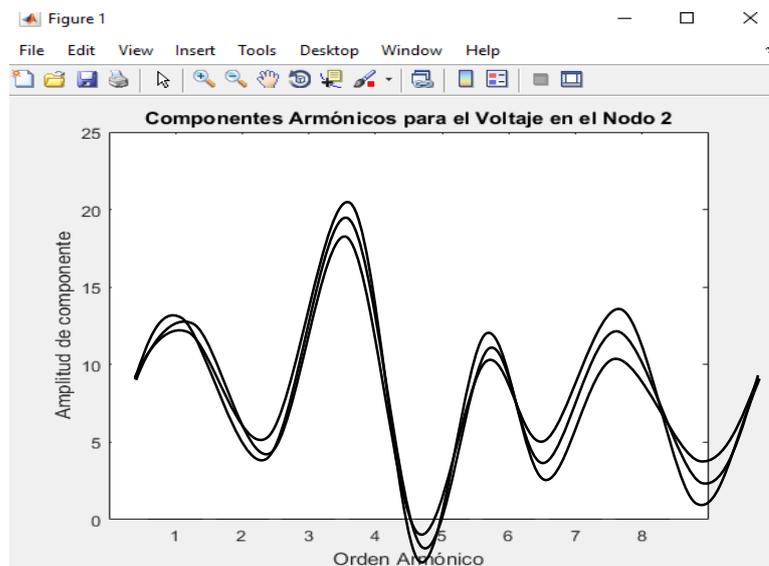


**Figura 6.4 Armónico en el Nodo 3**

Fuente: Autor

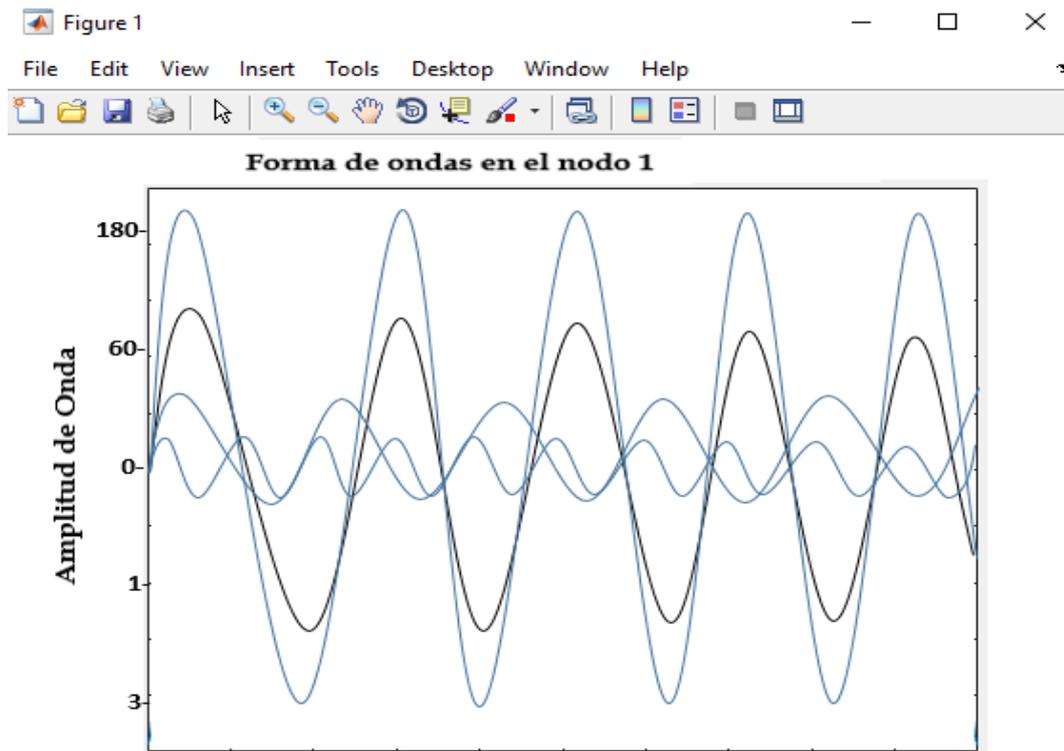
## 6.2 Visualización de ondas no senoidales en los nodos

En la gráfica 6.5 se observa las posiciones de las ondas no senoidales de los tres nodos en donde se puede observar que la onda no senoidal en este caso la armónica de triple frecuencia tiene más picos de elevación con respecto a la fundamental y las 5 y séptima armónica. Esta grafica fue tomada del análisis de simulink se la aplicación matlab donde toma en cuenta ciertos parámetros para la visualización de estas ondas dentro del régimen establecido



**Figura 6.5 Señales armónicas en el sistema**

Fuente: Autor



**Figura 6.6 Presencia de armónico 3 en nodo 1**  
**Fuente: Autor**

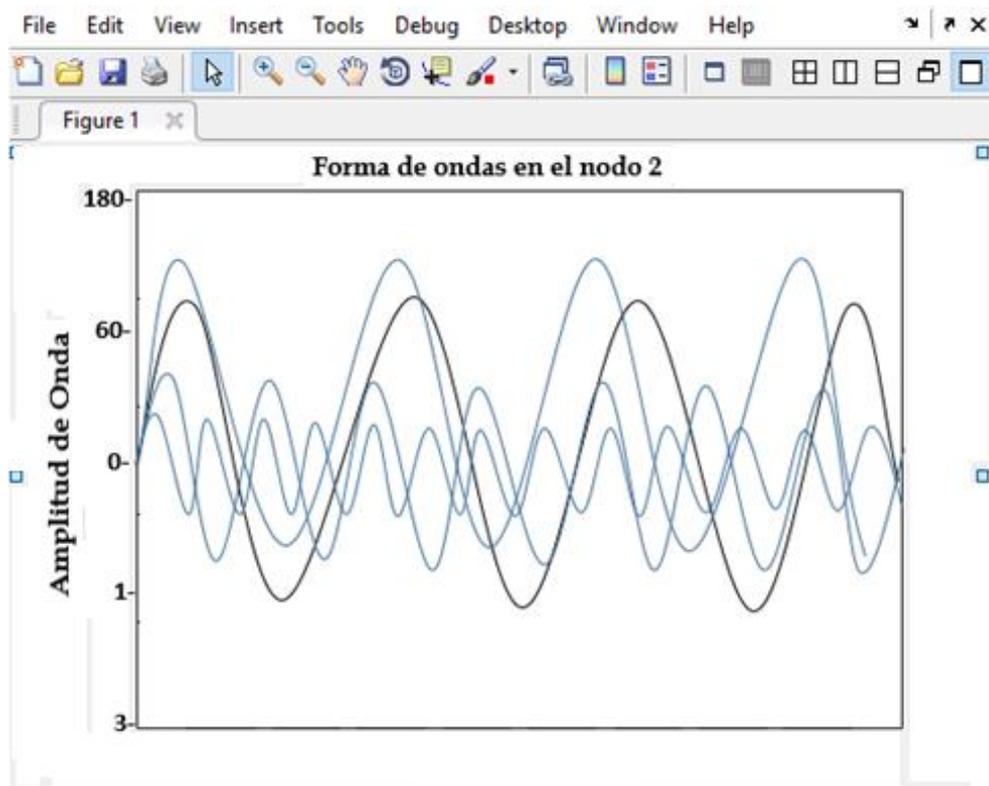
En la Figura 6.6 se observa una onda de color negro la cual es la onda fundamental de 60 Hertz, adjunta a esta se puede observar otras ondas que corresponden a las ondas de frecuencia triple de color rojo, la onda de quinta frecuencia con menos de 60 Hertz y por ultimo y de manera decreciente la onda séptima de color lila que no manifiesta ninguna perturbación en este nodo.

La onda triple frecuencia se adjunta con la onda fundamental por lo que esta se suma y vemos que las corrientes adjuntas provocaran efectos de calentamiento en el conductor del sistema los problemas y efectos se explicaran más adelante.

En un análisis comparativo describirá que cuando se adjuntan ondas, a la onda fundamental este conglomerado o sumatoria hace que el conductor se sature al llevar la corriente necesaria, provocando calentamiento del mismo por lo que aparatos eléctricos y sistemas de seguridad se disparen y equipos tengan problemas de potencia.

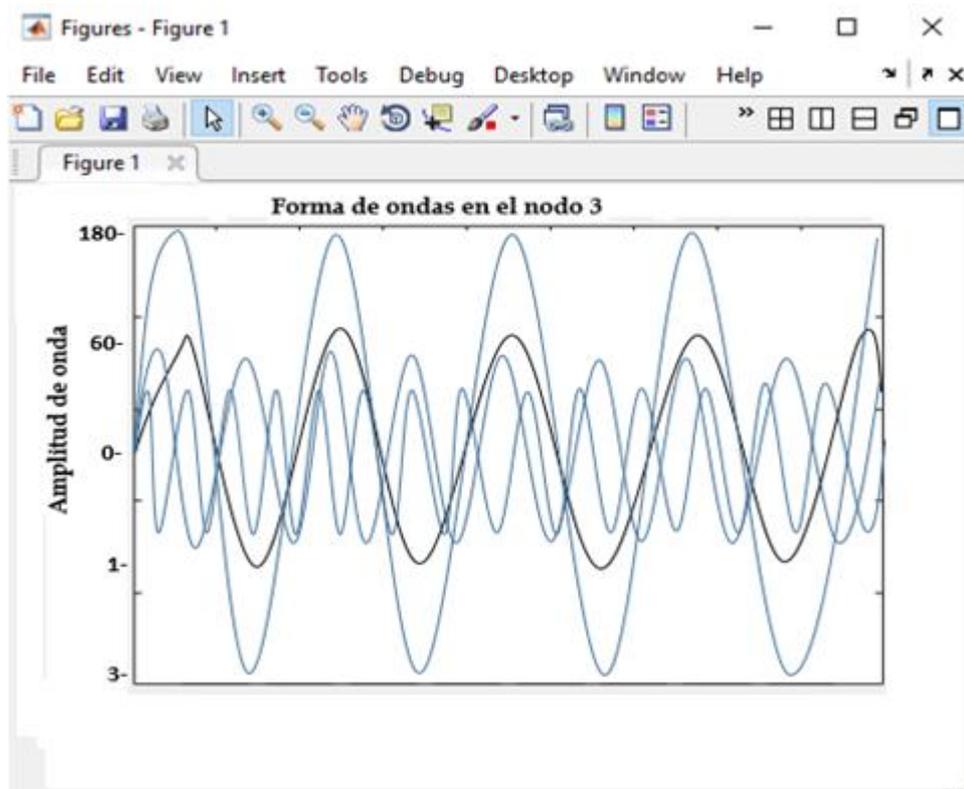
**Tercer Armónico 180 Hertz**

**Onda fundamental 60 Hertz**



**Figura 6.7 Presencia de armónico 3 en nodo 2**  
**Fuente: Autor**

En la Figura 6.7 se observa una onda no senoidal que en este caso representaría la ondulación esporádica de la tercera fundamental o tercer armónica, que se mantiene y persiste en el nodo número 2. Este armónico de tercera frecuencia es la de 180 Hertz con picos muy elevados y que ocasiona en sistemas monofásicos problemas de calentamiento en el conductor neutro por lo que se verá que se debe de sobredimensionar el calibre de este para evitar problemas como el de calentamiento y evitar posibles cortos en la instalación.



**Figura 6.8 Presencia de armónico 3 en nodo 3**  
**Fuente: Autor**

En la Figura 6.8 se observa una onda con un pico elevado, por visualización podemos apreciar la onda de triple frecuencia de un poco más de 180 Hertz, la cual se hará la evaluación del problema y características más adelante.

**Tabla 6.3 Resultado de armónicos en simulación**

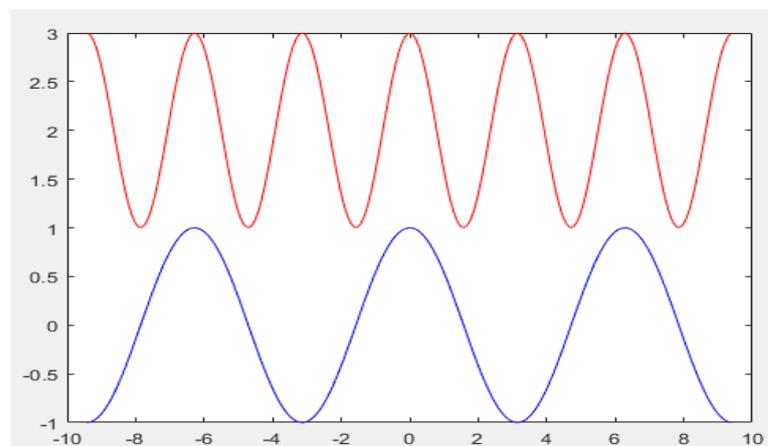
Origen	Armónico perjudicial
Nodo 1	3
Nodo 2	3
Nodo 3	3

**Fuente: Autor**

Por ser frecuencia de 60 Hz sus derivaciones monofásicas serán para la tercera armónica 180 Hz para la quinta armónica 300 Hz para el séptimo 420 Hz. Se puede concluir que por medio de los resultados arrojados se tiene indicios de ondas no senoidales, en este caso el armónico 3. A continuación, se mencionará los problemas ocasionados con este tipo de armónico.

### **Análisis y efecto del armónico 3, (calentamiento de neutro) Resultado de simulación**

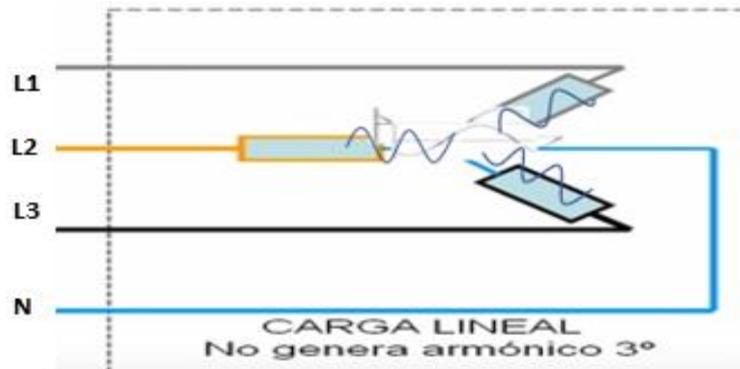
La onda fundamental se encuentra presente en las tres líneas (ondulación azul), sin embargo, una señal que se interpone en ella en este caso el tercer armónico (ondulación roja), será de una frecuencia el triple de la fundamental o sea mantiene 180 ciclos por segundo con una intensidad de  $1/3$  de la componente original como se muestra en la Figura 6.8.



**Figura 6.9 Sumatoria de tercer armónico con onda fundamental**  
Fuente: Autor

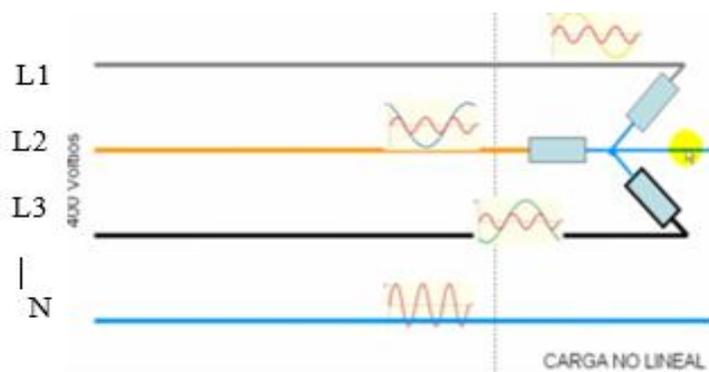
El motivo por el cual circula más tensión por el neutro es porque se suman los armónicos terceros presentes como se muestra en la Figura 6.10. En esta se puede observar el sistema R, S, T. En las tres líneas se presenta una onda senoidal fundamental, pero a su vez incluida en ellas otra onda no senoidal con diferente amplitud y frecuencia que será el tercer armónico manteniendo ella una oscilación de 180 ciclos por segundo. Este tercer armónico se encuentra en fase con la fundamental alcanzando su punto positivo y negativo coincidiendo con el tiempo en las tres fases haciendo que se suman las tres intensidades.

Si la red de media tensión alimentara un sistema de resistencias, bobinas o condensadoras, cualquier receptor compuesto con estos componentes como se observa en la Figura 6.10 tendría una carga lineal. Es decir, la corriente alterna no sufriría alguna deformación, y aunque están desfasados 120 grados al llegar al neutro unas se van a anular con las otras por lo tanto no circularía ninguna corriente.



**Figura 6.10 Anulación de Corriente Armónica**  
**Fuente: Autor**

Ahora si se coloca una carga no lineal como ordenadores, balastos electrónicos, variadores de frecuencia, variadores de velocidad en el mismo sistema presentado nos va a generar ondas de armónico tercero que estarán presentes en todas las fases R, S, T. En la Figura 6.11 se observa la onda fundamental más el tercer armónico integrado como se ve en el primer segmento de la imagen, estas se encuentran en fase, quiere decir que coincide en las tres señales el punto máximo positivo y se va a sumar cuando las tres ondas de corriente alcancen al neutro.



**Figura 6.11 Calentamiento del neutro por Armónicos**  
**Fuente: Autor**

Como dato importante el transformador monofásico cuando se le aplica la corriente de magnetización conjuntamente con el tercer armónico, esto por efecto crea otro flujo senoidal en el tiempo lo que produce una onda senoidal fundamental que es perfecta para el consumidor. Pero cuando se lo logra filtrar en el otro extremo de la bobina aparece el tercer armónico perjudicando las líneas de media tensión por calentamiento.

## **CAPÍTULO 7**

### **ANÁLISIS DE FILTROS ACTIVOS PARA ELIMINACIÓN DE ARMÓNICOS**

En la actualidad se trata de una u otra forma reducir ondas no senoidales que son las encargadas de dar problemas en los sistemas de redes de media tensión en todos sus componentes hasta los consumidores.

Para mejorar el sistema de media tensión podemos utilizar un tipo de filtros, estos serán filtros activos, que proporcionan una compensación y equilibraran al sistema. Además, por su estructura ayudaran en sistemas industriales, y comerciales. Aparte de ser filtros para armónicos también ayudan a los diferentes desequilibrios de las corrientes y los consumos de potencia (generación capacitiva).

Entre alguna de las funciones o ventajas que poseen los filtros de este tipo son que garantizaran:

- La reducción de las corrientes armónicas que van hasta el orden de 60, para este caso los 3000 Hertz, con la facilidad de poder filtrar la frecuencia como sea el requerimiento industrial.

- La capacidad de los filtros en la compensación de las potencias reactivas tanto como corrientes adelantadas o atrasadas o sea capacitivas o inductivas.

- La posibilidad de corregir las corrientes que se encuentren en cada fase (corrientes desequilibradas) considerándolos sumideros que atraen o absorben armónicos, y para ello estos dispositivos tienen una gran capacidad de impedancia para que exista el buen flujo de armónicos.

Para la instalación de estos filtros se los coloca en las terminales de corriente alterna que pueden ser los controladores de motores, rectificadores fuentes de Corriente continua y a la gran mayoría de cargas no lineales para de alguna manera reducir corrientes y voltajes que serán los aceptables en la conexión.

El funcionamiento de ellos está pensado para estar en condiciones estáticas, pero por condiciones de operación dentro de la industria ellos pueden funcionar conectándose o desconectándose de la red sin ningún problema, entre alguno de estos filtros

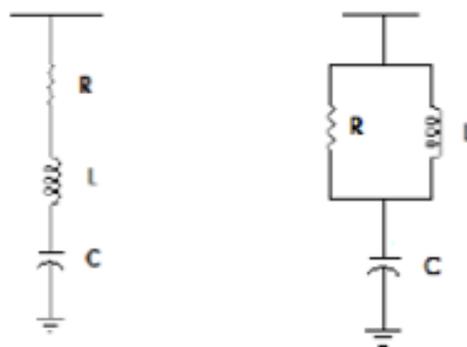
utilizados en estas condiciones son los puntos convertidores HVDC (sistemas de alta tensión de corriente continua), controladores de velocidades de bomba etc. En grandes redes de media tensión se debe y tiene que elaborar métodos para su conexión. En las industrias la desconexión de los filtros de valor alto es la mejor estrategia antes de los de valor bajo. Pero para la operación de los filtros se debe hacer lo contrario ya que las respuestas de estas solo se determinarán según las condiciones que necesite la planta o el usuario.

Algunos bancos de capacitores vienen provistos de sensores los cuales serán capaces de mantener la conexión de los filtros, otros sistemas como reguladores de voltaje y dispositivos de factor de potencia.

Por lo general tenemos filtros de primer y segundo orden, a continuación, se explicará sobre las generalidades de ellos.

### 7.1 Filtros primer orden para una red de media tensión

Por lo general cuando se habla de estos tipos de filtros se los hace para la configuración y estrategias de frecuencias bajas, los cuales estarán en paralelo a los sistemas y son de gran uso para sistemas resistivos inductivos y capacitivos los cuales son ajustados para la necesidad de armónicos determinados. En la Figura 7.1 se observa la colocación de estos sistemas tanto en serie y paralelo.



**Figura 7.1 Filtros en serie y paralelo**  
Fuente: Autor

Entre alguna de las ventajas o características de estos tipos de filtro de primer orden se tiene que:

-La impedancia de ellos se eleva consecutivamente cuando las frecuencias sobrepasan para la que este ajustado.

-Se activan a impedancias muy bajas para las frecuencias a las que fueron ajustados, a la que se les denomina Frecuencia de corte.

-En estos filtros cuando la impedancia de la fuente es inductiva, ellos rápidamente entran en resonancia lo cual actúa a bajas frecuencias. Siempre ocurre en frecuencias más bajas que la de corte a la que fueron ajustadas.

Los ajustes del filtro son descritos por el factor Q dado en la siguiente ecuación.

$$Q = \frac{hX_L}{R}$$

R: es resistencia del filtro utilizado

h: es el armónico a ajustar

$X_L$ : es reactancia del inductor el valor a colocar

En ocasiones el valor de R es dado con la resistencia del inductor, y solo con esto se obtiene Q, y parte de la característica del filtrado

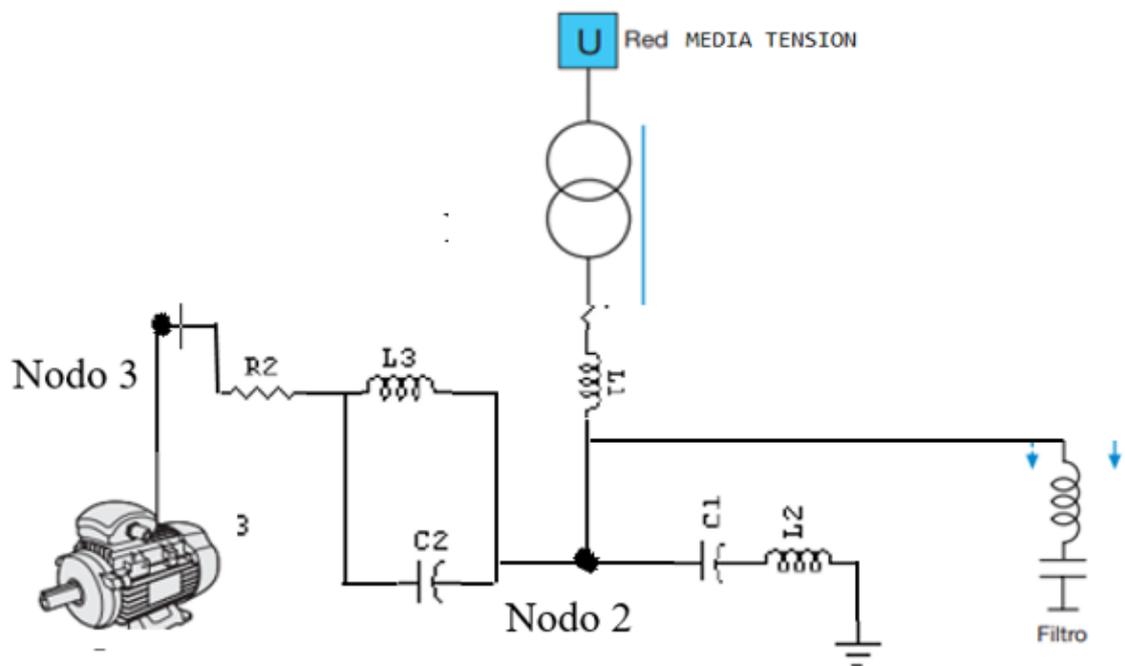
## 7.2 Filtro segundo orden para una red de media tensión

Para el filtro de segundo orden en estos casos con un  $h$  alto de armónicos derivados desde el décimo primero los denominaremos pasa alto y son normalmente usados en redes de media tensión, y tienen una característica de baja impedancia para frecuencias u ondas arriba del corte.

Estos son utilizados para erradicar armónicos de rangos superiores los que estarán ubicados por encima del corte. Para cuando los armónicos debajo de la onda o frecuencia seleccionada estos filtros no conducirán, por lo que no disiparán corrientes. Para la utilización de filtros en sistemas de media tensión su estructura y conexión de los mismos se deberá hacer si se desea en serie o paralelo según las necesidades.

Para la conexión en paralelo estarán constituidos por condensadores que de alguna u otra forma generara la potencia, en este caso reactiva del filtro. Para la conexión en serie estará en compuesto o estructura por inductancias tanto capacitivas como inductivas y con relación a la impedancia esta tiene y deberá estar en relación o función la frecuencia fundamental.

Por lo general para sistemas de media tensión se debe de calcular algunas características, como por ejemplo el condensador de potencia, para que a partir de esta se pueda obtener la potencia reactiva deseada a una frecuencia fundamental. Para los casos de media tensión a nivel industrial se diseña una medida de impedancia mínima para la frecuencia de armónicos y el factor de la variable calidad que es necesario para que el filtrado de las líneas se cumpla a cabalidad. Para una empresa que se encuentra conectada a una red de media tensión se puede decir que unos de estos filtros en nuestro caso un filtro colocado en serie puede eliminar automáticamente armónicos en la línea. Como se dijo estará compuesto por un condensador seguido a un medio inductivo un inductor, lo cual da como resultado el igualar toda la frecuencia de resonancia a la variable o frecuencia de  $n$  armónicos que se desea en la empresa eliminar. A continuación, en la ilustración 7.2 se puede visualizar la instalación a la derecha del filtro en paralelo a la industria para poder mitigar problemas de ondas no senoidales y la ubicación a la salida del generador.



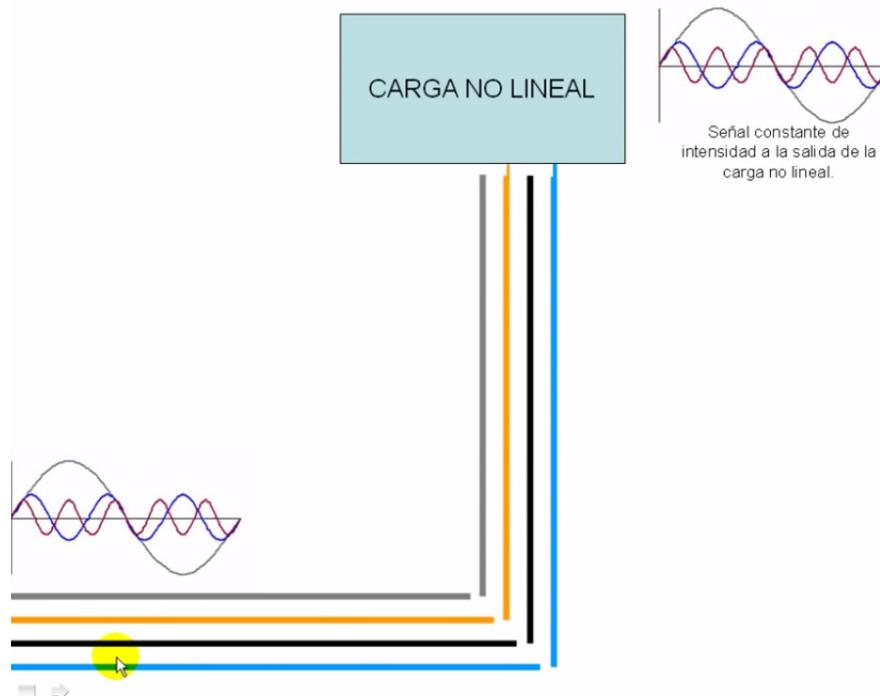
**Figura 7.2 Colocación de filtro para eliminación de Armónicos**  
Fuente: Autor

### **7.3 Mejoramiento de sistemas monofásicos y trifásicos**

Para un mejoramiento de sistemas industriales contra armónicos que interactúen en las redes de media tensión se tiene que colocar un sistema contra ondas no senoidales para sistemas monofásicos y trifásicos para mantener alejado todo tipo de perturbación en sistemas eléctricos y mantener una puesta a tierra garantizando de esta manera el aterrizamiento de cualquier circuito eléctrico que esté conectado a redes de media tensión.

Para el funcionamiento de un filtro de armónico se partirá de la forma elemental del funcionamiento de ellos

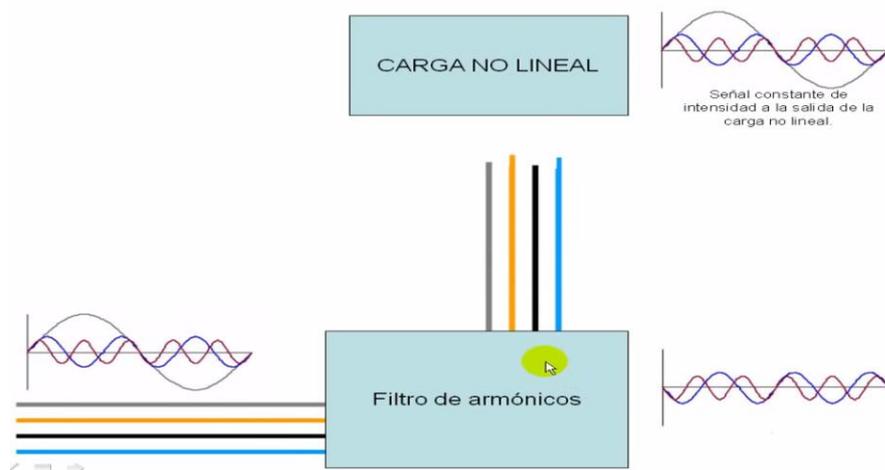
En un sistema trifásico se tiene las tres líneas y el neutro conjuntamente con ellos una onda senoidal perfecta sera de 60 Hertz, pero como ejemplo en redes de media tensión existen conectadas cargas no lineales que pueden ser de una parte comercial o industrial como balastos de fluorescentes, variadores de frecuencia, equipos electrónicos, equipos de computación etc. Cómo resultado de esta conexión se obtiene que el flujo es una onda no senoidal con la amplitud y frecuencias distintas dando lugar a armónicos. Como consecuencia de este fenómeno aguas arriba de las cargas no lineales tenemos aparición también de distintas ondas no senoidales por lo que puede y ocasiona calentamiento en el neutro por no tener una sección adecuada.



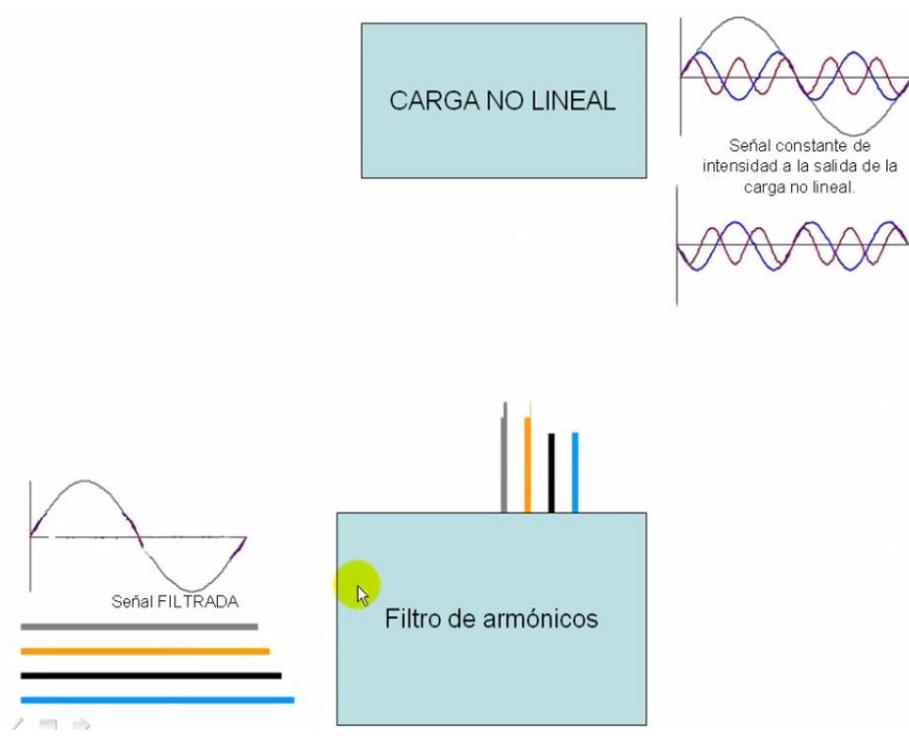
**Figura 7.3 Onda senoidal aguas arriba en media tensión**  
**Fuente: Autor**

A continuación, se coloca un filtro para la red de media tensión antes de la carga no lineal como se observa en la Figura 7.4

Este filtro genera mediándose un sistema electrónico que tienen incorporado en su interior un nuevo conjunto de señales senoidales, una vez analizado las ondas que recibe de las cargas no lineales. lo que hará el filtro es producir tanto armónicos como los que se encuentren en la señal que la origina, pero estarán desfasados 180 grados. esto indica que cuando los armónicos de la carga no lineal se encuentran en un pico negativo máximo, el armónico generado por el filtro tiene un antagonista en ese momento, el cual será el punto más positivo y cuando las señales se monten o incorporen encima de los armónicos generados por la carga no lineal estos se anulan aguas arriba, ahora se podrá obtener ondas senoidales perfectas, todas las impurezas que se encuentran en la red de media tensión o la generada por la parte industrial no se trasladarían a la entrada del filtro de armónico por lo cual desde acá el neutro no sufriría calentamientos.



**Figura 7.4 Eliminación de ondas no senoidales por medio de filtro**  
**Fuente: Autor**



**Figura 7.5 Anulación de onda no senoidal, mediante filtro**  
**Fuente: Autor**

Con todo lo mencionado en los capítulos anteriores se puede deducir que los armónicos son ondas no senoidales que se van a incorporar a la corriente y a la tensión y que cuyas frecuencias son y serán los múltiplos de una onda original en este caso la denominada onda fundamental.

Existen cargas no lineales como por ejemplo los rectificadores de corriente alterna a corriente continua los cuales producen corrientes de ondas no senoidales en este caso

los famosos armónicos. La amplitud de cada armónica va a ser una fracción de la fundamental de la corriente de carga.

Ahora el caso de los equipos variadores de velocidad que serán para los motores de inducción los armónicos de corriente originados por algún puente rectificador Trifásico con filtro inductivo serán pese a todo importante, sin embargo, estos circuitos rectificadores sin inductancias de corrientes continuas o de línea originarán niveles más elevados de corrientes armónicas.

Cabe recalcar que el primer efecto de los armónicos en el sistema de distribución de media tensión de corriente alterna es el incremento de los RMS de la corriente que va circular por los conductores y los transformadores.

Esta corriente extra no es real (productora de trabajo) y, sin embargo, obliga a sobredimensionar los transformadores y los conductores como se mencionó anteriormente para la rápida disipación de corrientes parasitas que provocan el sobrecalentamiento de los neutros.

El segundo efecto de estas ondas no senoidales en un sistema de media tensión es la distorsión de la tensión, esta distorsión puede producir algunos efectos para cargas magnéticas (motores y transformadores) y capacitivas (corrección de potencia). El nivel de distorsión originado esta en función de la impedancia aplicada en dicho sistema: cuanto mayor es la impedancia mayor es la distorsión que se produce.

También se mencionó de algunas normativas que se detallan la limitación del valor mínimo de la distorsión de tensión permitida en el punto de acoplamiento común con un consumidor. La distorsión armónica total que se puede estimar se lo conoce con la cantidad y la potencia de las cargas rectificadoras conectadas al sistema de media tensión y valores de las impedancias más la potencia de cortocircuito de los transformadores de distribución.

## CAPÍTULO 8

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 8.1 Conclusiones

Con lo redactado, se señala que se toma en consideración todos los conceptos teóricos fundamentales para el entendimiento de la simulación propagación y distorsión de armónicos cuyos conceptos se los considera como base en la práctica para la buena ejecución de sistemas de media tensión respetando sus limitaciones y alcances de cualquier tipo de proyecto a nivel comercial o industrial.

Se analizo distorsiones de ondas que causan las cargas no lineales a sistemas de media tensión por medio de la aplicación Matlab, gracias a este análisis se puede dar a conocer el tipo de amónico que afecta a dicho sistema y tomar las medidas necesarias.

Para una apreciación de los tipos de ondas no senoidales que afectan al sistema eléctrico de media tensión se elaboró por medio de la aplicación 4 graficas de señales de armónicos que son: El Primero, Tercero, Quinto y Séptimo para así poder visualizar la característica y cuál de ellos afecta a este tipo de circuito en media tensión.

Los datos obtenidos por medio de la aplicación Matlab dan como resultado la aparición de una onda no senoidal en este caso el Tercer armónico, el cual es muy perjudicial para sistemas industriales por el calentamiento del neutro, para tratar de erradicar este problema en estos sistemas tanto en cargas monofásicas y trifásicas se debe realizar algunos ajustes en el tipo de conexión de los transformadores, en este caso el más utilizado el tipo Delta para poder mantener controlado la aparición de este tipo de onda no senoidales y como complemento se puede realizar la instalación de filtros para garantizar un buen sistema eléctrico dentro de la industria y mejorar la potencia de media tensión.

## **8.2 Recomendaciones**

Para evitar problemas con armónicos debemos respetar las normas y conceptos teóricos al momento de instalar sistemas de media tensión, Para el montaje de sistemas monofásicos y trifásicos se deben de garantizar un buen aterrizamiento del neutro y una sobredimensión del mismo para mantener un retorno total de ondas no senoidales y evitar recalentamiento por terminales, Borner de transformadores o el neutro. En el ejemplo se pudo observar que el armónico tercero incide en los resultados por lo que periódicamente se debe realizar mantenimiento, de ser necesario aplicar la conexión Delta y colocar equipos eléctricos de protección en buen estado para garantizar el funcionamiento de estos sistemas.

Se recomienda la colocación de filtros para mitigar señales de armónicos que viajan tantas aguas arriba y aguas abajo provenientes de la conexión de sistemas industriales que originan la mayor parte de cargas no lineales modificando la frecuencia y afectando a todo el sistema de media tensión.

Cabe recalcar que se debe realizar los cálculos suficientes para mantener la confiabilidad de los sistemas de media tensión contra armónicos, cálculos matemáticos y mantenimiento a elementos eléctricos y electrónicos periódicamente.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia de Regulación y Control de Electricidad. (s.f.). Obtenido de <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/regulaciones/>
- Almira, J. M. (2005). Matemáticas para la recuperación de señales. GRUPO EDITORIAL UNIVERSITARIO (GRANADA).
- Alvarez. (2015). Universidad de Cantabria. Obtenido de [http://personales.unican.es/alvarez/calculoweb/calculoi/practic/pr7\\_armonicos\\_14\\_15.pdf](http://personales.unican.es/alvarez/calculoweb/calculoi/practic/pr7_armonicos_14_15.pdf)
- Cables Electricos . (s.f.). Obtenido de <http://cableselectricos.cl/articulos/que-es-un-conductor-electrico/>
- Cabral-Leite, J., Pérez-Abril, I., Santos-Azevedo, M. S., & de Lima-Tostes, M. E. (2014). Evolución del problema de optimización de los filtros pasivos de armónicos en sistemas eléctricos industriales. Dyna, vol. 81, núm. 188, 67-74.
- Casares, F. (2011). Obtenido de [http://www.trifasica.net/pdf/TEMA\\_8.\\_SISTEMAS\\_TRIFASICOS.pdf](http://www.trifasica.net/pdf/TEMA_8._SISTEMAS_TRIFASICOS.pdf)
- Circuitos Eléctricos UCACUE. (noviembre de 2011). Obtenido de <http://circuitoselectricosucacue.blogspot.com/2011/11/sistema-delta-estrella.html>
- CIRCUTOR. (s.f.). CIRCUTOR. Obtenido de <http://circuitor.com/es/formacion/armonicos-electricos/efecto-de-los-armonicos-en-el-sistema-de-potencia>
- Coparoman. (Abril de 2014). Obtenido de <http://coparoman.blogspot.com/2014/04/servicio-de-red-electrica-monofasica.html>
- Daza, S. A. (2000). Elementos no lineales en Circuitos Eléctricos y Procesos Iterativos. Ingenierías, vol III, N° 7, 46-51.
- Electrica de Oriente. (s.f.). Obtenido de <http://electricadeoriente.com.mx/proyectos/>

- Electricidad, A. d. (2015). Agencia de Regulación y Control de Electricidad. Obtenido de <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/regulaciones/>
- Eric Bettega, J. N. (2004). Schneider-electric. Obtenido de [https://www.schneider-electric.com.ar/documents/recursos/cuadernostecnicos/ct\\_183junio.pdf](https://www.schneider-electric.com.ar/documents/recursos/cuadernostecnicos/ct_183junio.pdf)
- Experimentos Magneticos. (2013). Obtenido de <http://experimentos-magnetismo.blogspot.com/2013/>
- Hernández Armenta, L. A., Romero Romero, D., & Robles García, J. (2015). Índice para la identificación de fuentes armónicas en sistemas eléctricos de potencia. *Computación y Sistemas*, vol. 19, núm. 2, 387-397.
- Hyperphysics. (s.f.). Obtenido de [https://www.google.com.ec/search?q=resonancia+serie+y+paralelo&rlz=1C1CHZL\\_esEC745EC745&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwi7u8DN1rTWAhXDylQKHVL4BIYQ\\_AUICigB&biw=1093&bih=530#imgrc=j4i2rcogSW67aM](https://www.google.com.ec/search?q=resonancia+serie+y+paralelo&rlz=1C1CHZL_esEC745EC745&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwi7u8DN1rTWAhXDylQKHVL4BIYQ_AUICigB&biw=1093&bih=530#imgrc=j4i2rcogSW67aM):
- Hyperphysics. (s.f.). Obtenido de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Audio/amp.html>
- Instalaciones Electricas Residenciales. (s.f.). Obtenido de <http://instalacioneselectricasresidenciales.blogspot.com/2016/01/normas-para-lineas-subterranas-de-cfe.html>
- John Grajales, J. R. (2004). Efectos de los armónicos en los motores de inducción. *Revista Facultad de Ingeniería No. 31 Universidad de Antioquia*, 116-123.
- Llamas, A. (2014). *Armonicas en Sistemas Eléctricos industriales*. México: Innovación Editorial.
- Ministerio del poder Popular para la energia electrica. (Septiembre de 2016). Obtenido de <http://www.fundelec.gob.ve/?p=3801>
- Moore, H. (2007). *MATLAB para ingenieros*. Pearson.

- Peralta, I. A. (s.f.). Instituto Tecnológico Monterrey. Obtenido de <http://www.mty.itesm.mx/etie/deptos/ie/profesores/allamas/cursos/ueee/armonicas/07efectarm.pdf>
- Plataforma Educativa Aragonesa. (s.f.). Obtenido de [http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3020/html/133\\_conexin\\_en\\_tringulo.html](http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3020/html/133_conexin_en_tringulo.html)
- Pozueta, M. A. (2016). Universidad de Cantabria. Obtenido de <http://personales.unican.es/rodrigma/pdfs/armonicos%20excitaci%C3%B3n.pdf>
- Quintero, E. G. (2010). Estudio del deterioro de materiales aislantes secos mediante técnicas de alta tensión (descargas parciales). *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, No 27.
- Rincón del Eléctrico. (s.f.). Obtenido de <https://automatismosuets.wordpress.com/conexion-estrella-triangulo/>
- Telergia. (Julio de 2010). Obtenido de <http://telergia.blogs.com/telergia/2010/07/index.html>
- Universidad Pontificia Comillas, Escuela Técnica Superior de Ingeniería . (2013). Obtenido de <https://www.iit.comillas.edu/pablof/asee/cc/componentes%20simetricas.pdf>
- Viego Felipe, P. R., Gómez Sarduy, J. R., de Armas Teyra, M. A., & Sousa Santos, V. (2014). Efecto de los armónicos en los motores monofásicos asincrónicos con capacitor de marcha. *Ingeniería Energética*, vol. XXXV, núm. 1, 27-37.
- www.electroimanesjove.com. (s.f.). Obtenido de <http://www.electroimanesjove.com/es/rectificadores.html>
- www.jcee.upc.edu. (s.f.). Obtenido de [www.jcee.upc.edu/JCEE2009/pdf\\_ponencies/PDFs/Fornieles\\_17\\_11\\_09\\_M.pdf](http://www.jcee.upc.edu/JCEE2009/pdf_ponencies/PDFs/Fornieles_17_11_09_M.pdf)

# ANEXOS

## 1. Corriente del circuito –versus tiempo de reactancia

IEEE Std 1547-2-2008  
IEEE Application Guide for IEEE Std 1547™, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems

**Table 6—Generator short-circuit current and reactance versus time**

T''	0.035 s
T'	1.50 s

Voltage	1 p.u.
I''	5
I'	3.333333333
I	0.666666667
System X from generator terminals: 0.295 (p.u., same base)	

For system faults (radial system)

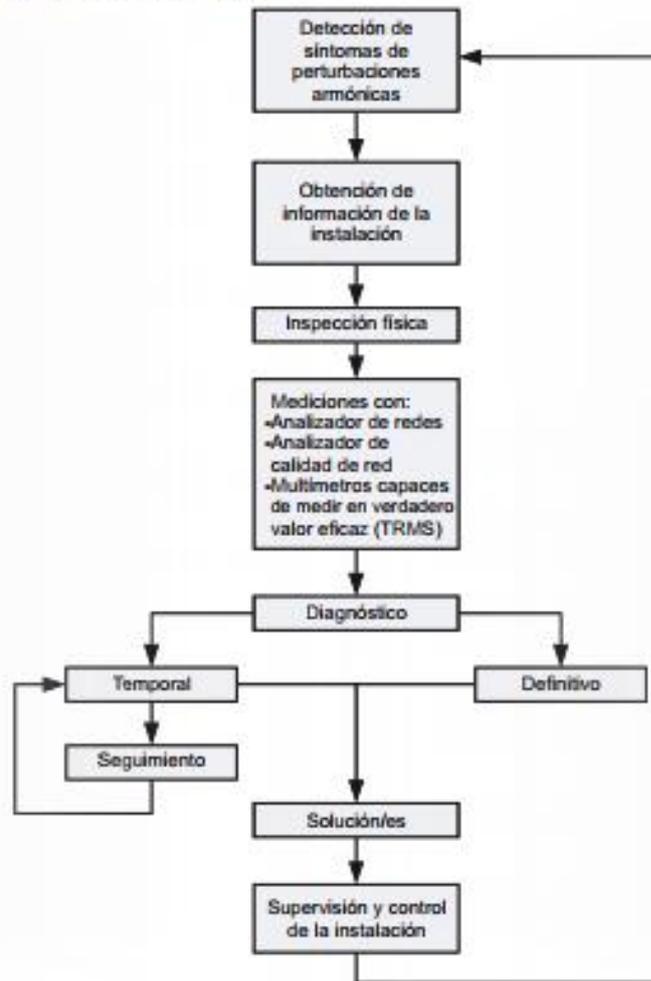
System X from generator terminals:

<b>Equation:</b>	$i(t) = (I'' - I')e^{-t/T''} + (I' - I)e^{-t/T'} + I$																
<b>Results:</b>	All in p.u. on same base as generator reactances																
Time (cycles)	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	7.000	10.000	20.000	30.000	50.000	70.000	100.000	200.000	300.000	500.000	700.000	1000.000
I(t)	4.339	3.918	3.645	3.343	3.193	3.067	2.802	2.577	2.197	1.892	1.545	0.956	0.762	0.677	0.668	0.667	0.667
Equiv X	0.230	0.255	0.274	0.299	0.313	0.326	0.357	0.388	0.455	0.529	0.647	1.046	1.313	1.477	1.497	1.500	1.500
Seconds	0.017	0.033	0.050	0.083	0.117	0.167	0.333	0.500	0.833	1.167	1.667	3.333	5.000	8.333	11.667	16.667	16.667
Total X (system faults)	0.525	0.550	0.569	0.594	0.608	0.621	0.652	0.683	0.750	0.824	0.942	1.341	1.608	1.772	1.792	1.795	1.795
Total I (system faults)	1.903	1.817	1.756	1.683	1.644	1.610	1.534	1.464	1.333	1.214	1.061	0.745	0.622	0.564	0.558	0.557	0.557
Gen term volts (p.u.)	0.561	0.536	0.518	0.497	0.485	0.475	0.453	0.432	0.393	0.358	0.313	0.220	0.183	0.166	0.165	0.164	0.164
Gen term apparent Z	0.295	0.295	0.295	0.295	0.295	0.295	0.295	0.295	0.295	0.295	0.295	0.295	0.295	0.295	0.295	0.295	0.295

Generator kV base:	4.16	Generator base I	138.78612
Generator kVA base	1000	Generator CT ratio	50.0
		Generator PT ratio	35.0
		51V relay tap	1.00

<b>System faults:</b>																	
51 V operating I (amperes)	5.282	5.044	4.875	4.672	4.564	4.470	4.258	4.064	3.700	3.370	2.945	2.069	1.727	1.566	1.549	1.546	1.546
51 V pickup I multiplier	1.798	1.883	1.948	2.033	2.081	2.125	2.231	2.337	2.568	2.819	3.225	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
51 V effective multipliers of p.u.	9.500	9.500	9.500	9.500	9.500	9.500	9.500	9.500	9.500	9.500	9.500	8.277	6.906	6.265	6.194	6.186	6.186

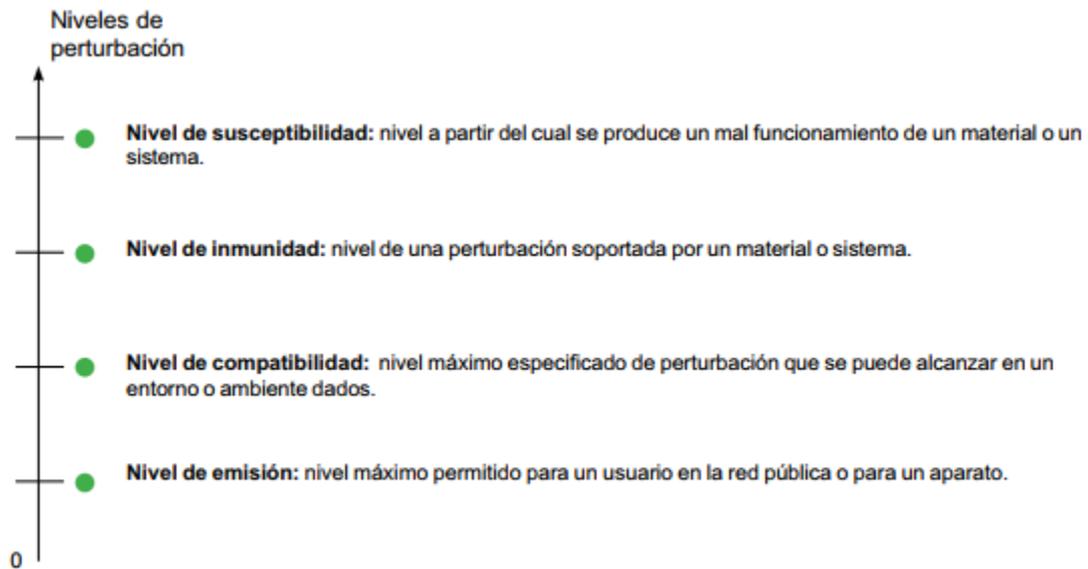
- Proceso de diagnóstico de la instalación:



Tasa en % de las tensiones armónicas aceptables (compatibilidad)

Armónico de orden:	Clase 1 (materiales y sistemas sensibles)	Clase 2 (redes públicas e industriales)	Clase 3 (para conexionado de grandes perturbadores)
2º	2	2	3
3º	3	5	6
4º	1	1	1,5
5º	3	6	8
6º	0,5	0,5	1
7º	3	5	7
8º	0,5	0,5	1
9º	1,5	1,5	2,5
10º	0,5	0,5	1
11º	3	3,5	5
12º	0,2	0,2	1
13º	3	3	4,5
TDA	5%	8%	10%

## Niveles de perturbaciones para la coexistencia de equipos perturbados (no lineales) y cargas sensibles.



## Normas IEC

La norma IEC 61000 define los niveles máximos de los diversos órdenes de armónicos. Para las redes públicas BT: IEC 61000-2-2 y las recomendaciones CIGRE (Conferencia Internacional de Grandes Redes Eléctricas). Para las redes públicas de MT y AT: proyecto de norma IEC para media tensión y recomendaciones de la CIGRE. Para las instalaciones industriales BT y MT: IEC 61000-2-4. Para evitar alcanzar estos niveles, hay que fijar los límites a las perturbaciones emitidas (niveles de emisión) para cada uno de los aparatos o bien para un conjunto de elementos respecto a su punto de conexión a la red eléctrica. En baja tensión y para los aparatos que absorben una corriente inferior a 16 A, está la norma IEC61000-3-2 y, para los aparatos que absorben una corriente superior a 16 A, el proyecto de guía IEC 61000-3-4. Para las aplicaciones industriales no hay norma, pero sí que hay una especie de consenso sobre las etapas de la autorización de conexión a la red pública: siendo la primera la aceptación automática para potencias bajas respecto a la potencia contratada; la segunda, la aceptación con reservas (el que un único usuario no sobrepase los niveles del orden de la mitad de los niveles de compatibilidad); y por último, la tercera, la aceptación, excepcional y provisional cuando el nivel anterior se sobrepasa. Por último, para garantizar un buen funcionamiento de los aparatos, es necesario que éstos puedan soportar niveles de perturbación superiores a los niveles de compatibilidad.

## **Norma IEEE 519**

Las normas estadounidenses con respecto a los armónicos han sido agrupadas por la IEEE en la norma 519: IEEE Recomendaciones Prácticas y Requerimientos para el Control de armónicas en Sistemas Eléctricos de Potencia. Existe un efecto combinado de todas las cargas no lineales sobre el sistema de distribución la cual tienen una capacidad limitada para absorber corrientes armónicas. Adicionalmente, las compañías de distribución tienen la responsabilidad de proveer alta calidad de abastecimiento en lo que respecta al nivel del voltaje y su forma de onda. IEEE 519 hace referencia no solo al nivel absoluto de armónicos producido por una fuente individual sino también a su magnitud con respecto a la red de abastecimiento. Se debe tomar en cuenta que la IEEE 519 está limitada por tratarse de una colección de recomendaciones prácticas que sirven como guía tanto a consumidores como a distribuidores de energía eléctrica.

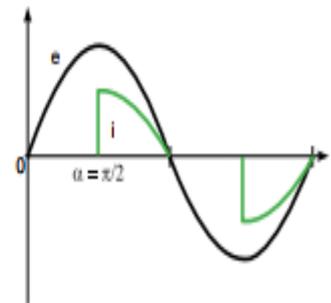
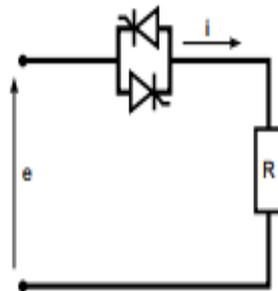
## Representación de ondas en sistemas rectificadores

**Tipo de convertidor  
de corriente**

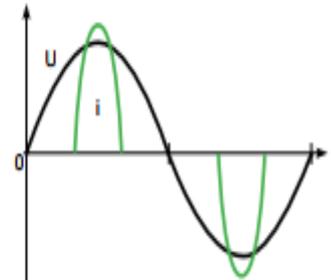
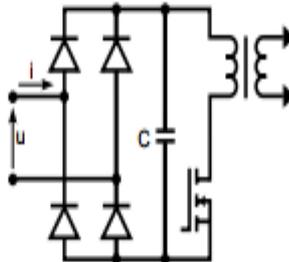
**Esquema**

**Grafica de**

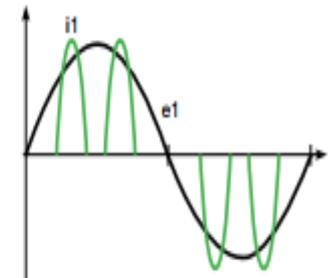
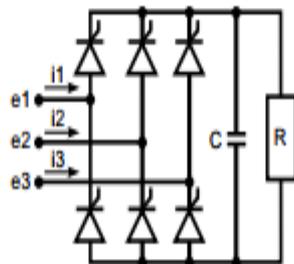
1: Regulador de luz o de temperatura



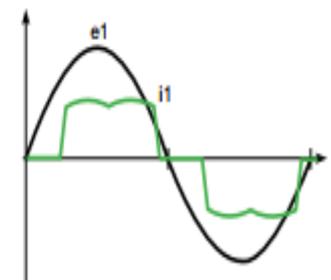
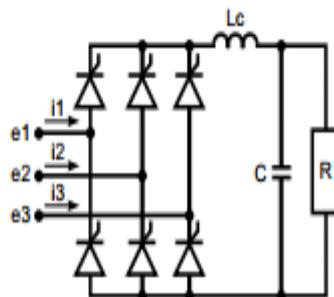
2: Rectificador de una fuente de alimentación conmutada, por ejemplo:  
■ de un ordenador,  
■ de un electrodoméstico



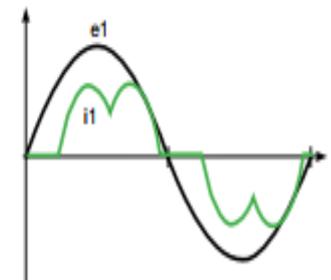
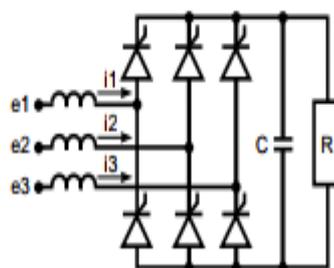
3: Rectificador trifásico con entrada a condensador en la parte de corriente continua, por ejemplo, de un variador de velocidad para motores asíncronos



4: Rectificador trifásico con autoinducción en el filtro en corriente continua, por ejemplo, de un cargador de batería



5: Rectificador trifásico con autoinducción de alisado en la entrada de la alimentación de la corriente alterna de red, por ejemplo, de un SAI de gran potencia



## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Veintimilla Gutiérrez José Luis**, con C.C: # **0925433609** autor/a del trabajo de titulación: **Análisis de propagación y distorsión de armónicos en redes eléctricas de media tensión con cargas no lineales utilizando Matlab** previo a la obtención del título **INGENIERO EN ELÉCTRICO MECÁNICO CON MENCIÓN EN GESTIÓN EMPRESARIAL INDUSTRIAL** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 20 de septiembre de 2017

f. \_\_\_\_\_

**Veintimilla Gutierrez, José Luis**

**C.C: 0925433609**



<b>REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA</b>		
<b>FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN</b>		
<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	ANÁLISIS DE PROPAGACIÓN Y DISTORSIÓN DE ARMÓNICOS EN REDES ELECTRICAS DE MEDIA TENSIÓN CON CARGAS NO LINEALES UTILIZANDO MATLAB	
<b>AUTOR(ES)</b>	VEINTIMILLA GUTIÉRREZ, JOSÉ LUIS	
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	ING. VALLEJO SAMANIEGO, LUIS VICENTE.MSC	
<b>INSTITUCIÓN:</b>	UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL	
<b>FACULTAD:</b>	FACULTAD DE EDUCACION TECNICA PARA EL DESARROLLO	
<b>CARRERA:</b>	INGENIERIA ELÉCTRICO MECÁNICA	
<b>TITULO OBTENIDO:</b>	INGENIERO EN ELÉCTRICO MECÁNICO CON MENCIÓN EN GESTIÓN EMPRESARIAL INDUSTRIAL	
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	20 DE SEPTIEMBRE Del 2017	No. DE PÁGINAS: 110
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA, DISEÑO, MONTAJE INDUSTRIAL	
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	ARMONICOS, TRIFASICO, MATLAB, CARGA NO SENOIDAL, MONOFÁSICO, CONDUCTORES	
<b>RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):</b>		
<p>El presente trabajo de investigación tiene por objetivo dar a conocer algunos de los resultados de la propagación y distorsión de los armónicos que inciden en las redes de media tensión por medio de la aplicación Matlab. Toda empresa que se encuentran conectada a la red de media tensión presenta diversos problemas tanto para equipos eléctricos como electrónicos, entre algunos de estos problemas tenemos el calentamiento de cables conductores, problemas en las revoluciones de máquinas rotatorias y aunque estas máquinas mantengan elementos de protección, algunas ondas no senoidales denominas armónicas, pueden y son capaces de modificar frecuencias de operación y llegar a ocasionar daños a nivel industrial. Existen diferentes tipos de protección, sin embargo, cuando se trata de armónicos el problema es más grave. No es suficiente el colocar un buen sistema de puesta a tierra pues tenemos que considerar todos los parámetros que influyen en el tendido eléctrico de media tensión más cuando ésta se encuentra en expansión y utilizan sistemas que modifican la señal de frecuencia que entrega la empresa distribuidora. La aplicación Matlab será presentada y expuesta como parte del trabajo con una introducción de todos los parámetros y funcionamientos del mismo. Se analizará un circuito con cargas no lineales por medio de esta aplicación, para así poder observar algunos de los armónicos existentes en los nodos del circuito para posteriormente dar alguna forma de protección contra ellos y el tipo de conexión de transformadores para mitigar sus efectos.</p>		
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	Teléfono:+593-93108661	E-mail: JL.Veintimilla@hotmail.com
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::</b>	Nombre: Montenegro Tejada, Raul, Msc	
	Teléfono: (04) 2 20933 ext 2007	
	e-mail: raulmontenegro@cu.ucsg.edu.ec	
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>		
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>		
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>		
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>		