ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERÍA

"LABORATORIO PARA LA INVESTIGACIÓN DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA"

LESLIE ELIZABETH CAJAS FLORES

SANGOLQUÍ – ECUADOR

2008

“LABORATORIO PARA LA INVESTIGACIÓN DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA”

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el trabajo titulado “LABORATORIO PARA LA INVESTIGACIÓN DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA”, realizado por la Srta. Leslie Elizabeth Cajas Flores, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el Reglamento de Estudiantes de la Escuela Politécnica del Ejército.

Ing. Wilson Yépez	Ing. Rodrigo Silva
DIRECTOR	**CODIRECTOR**

RESUMEN

El presente trabajo pretende hacer un análisis sobre las perturbaciones que degradan la calidad de la Energía Eléctrica, fundamentalmente debido al uso de la electrónica aplicada, que ha traído beneficios en la optimización de procesos, pero a su vez, ha realizado una drástica conversión en las características de las cargas conectadas a lo largo de la Red de Distribución.

Se plantea conceptualizar un laboratorio de experimentación y análisis de las perturbaciones introducidas por los sistemas eléctricos de aplicación industrial en las redes eléctricas, donde se podrá efectuar una serie de pruebas en una estación de trabajo, con adecuado equipamiento, permitiendo realizar las investigaciones e implementación de soluciones.

Para el equipamiento de la estación de trabajo se ha concebido equipos de última generación como analizadores de redes eléctricas, que muestran información completa acerca de estos disturbios, además de cargas lineales y no lineales que permitirán el estudio de las causas comunes de una deficiente calidad de la energía eléctrica, que permita aplicar las soluciones respectivas para el mejoramiento del desempeño de las redes y calidad de la energía eléctrica.

El conocimiento de las perturbaciones y la adecuada elección de soluciones permiten optimizar recursos; ya que se mejora la eficiencia general de los sistemas.

DEDICATORIA

El esfuerzo y dedicación que he puesto en este trabajo la dedico con mucho cariño a mis Padres por su apoyo moral, cariño, comprensión y económico, que me han llevado por el camino del bien, enseñándome el verdadero sentido de la responsabilidad y dedicación, a mis hermanos que han sido un aliciente durante todos estos años, y por ultimo y no menos importante a todos mis amigos que estuvieron a mi lado con su ayuda incondicional.

AGRADECIMIENTO

A Dios por ser guía y permitirme ver el camino correcto, a mis Padres y Hermanos por creer y confiar siempre en mí, apoyándome en todas las decisiones que he tomado, a los Señores Profesores de la Escuela Politécnica del Ejército quienes compartieron conmigo sus conocimientos, experiencias y supieron conducirme por la senda del saber durante mi formación profesional.

A mis compañeros de clase por toda la motivación y apoyo recibido, por compartir momentos agradables y momentos tristes, momentos que nos hacen crecer y valorar a las personas que nos rodean.

Gracias a todos los que hicieron posible un triunfo más en mi vida.

LESLIE CAJAS

PRÓLOGO

La mayoría de los equipos conectados a los largo de la Red de Distribución son capaces de operar satisfactoriamente con variaciones relativamente amplias en los parámetros de voltaje, corriente y frecuencia.

En los últimos años se han agregado al sistema eléctrico un elevado número de equipos menos tolerantes a estas variaciones, en su mayoría los controlados electrónicamente.

Es por esta razón que se debe analizar las perturbaciones que degradan la calidad de la energía eléctrica y ofrecer soluciones a ellas. Un laboratorio de pruebas es de importancia para el estudio de estos disturbios, donde se muestran resultados del comportamiento de la energía eléctrica ante cargas lineales y no lineales

En el capítulo 1 se detallan los objetivos y alcances del presente estudio, debidamente justificado.

El capítulo 2 expone algunos conceptos y parámetros normalizados por el Consejo Nacional de Electricidad del Ecuador (CONELEC) relacionados con la calidad de la energía eléctrica que implica: la calidad del producto, calidad del servicio técnico y la calidad del servicio comercial.

El capítulo 3 describe la industria eléctrica desde la generación misma hasta los procesos de ser distribuida hacia los usuarios finales.

El capítulo 4 indica los distintos tipos de perturbaciones comunes que afectan la calidad de la energía eléctrica, dando a conocer sus causas y efectos sobre la Red de Distribución.

El capítulo 5 señala algunos equipos eléctricos y electrónicos que al estar compuestos por elementos de estado sólido, se presentan como cargas no lineales afectando la calidad de la energía eléctrica.

El capítulo 6 presenta alternativas de solución para todas estas perturbaciones, la energía como producto, exige tener en consideración la calidad de suministro, continuidad y forma de onda.

El capítulo 7 propone un esquema básico de laboratorio de experimentación y análisis de las perturbaciones introducidas en los sistemas eléctricos por aplicaciones industriales.

El Capítulo 8 presenta modelos de prácticas de laboratorio donde se efectuará una serie de pruebas en la estación de trabajo.

Finalmente, se hace un recuento en las conclusiones y recomendaciones obtenidas a lo largo del presente estudio.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA ..... **V**
AGRADECIMIENTO ..... **VI**
PRÓLOGO ..... **VII**
ÍNDICE DE CONTENIDO ..... **IX**
ÍNDICE DE TABLAS ..... **XII**
ÍNDICE DE FIGURAS ..... **XII**
ÍNDICE DE ECUACIONES ..... **XIV**
GLOSARIO DE TÉRMINOS Y LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES ..... **XV**
GLOSARIO DE TÉRMINOS ..... **XVII**
CAPITULO 1 ..... **22**
GENERALIDADES **22**
1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO 22
1.1.1 Antecedentes *22*
1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA 23
1.3 ALCANCE DEL PROYECTO 23
1.4 OBJETIVOS 24
1.4.1 General *24*
1.4.2 Específicos *24*
CAPITULO 2 ..... **25**
MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL **25**
2.1 ENERGÍA ELÉCTRICA 25
2.2 CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA 26
2.2.1 Calidad del Producto *28*
2.2.2 Calidad del Servicio Técnico *38*
2.2.3 Calidad del Servicio Técnico *40*
2.3 MONITORIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA 42
CAPITULO 3 ..... **44**
INDUSTRIA ELÉCTRICA **44**
3.1 INTRODUCCIÓN 44
3.1.1 Generación de energía eléctrica *45*
3.1.2 Transporte de la energía eléctrica *45*
3.1.3 Distribución de la Energía Eléctrica *50*
3.2 COMPONENTES DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN 50
3.2.1 Transformador de Distribución *50*
3.2.2 Postes *55*
3.3 COSTOS DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA 56
3.4 USUARIOS DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA 57

3.5 PÉRDIDAS EN EL TRANSPORTE DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA 62

CAPITULO 4 64

PERTURBACIONES COMUNES DE LA RED ELÉCTRICA 64

4.1 INTRODUCCIÓN 64
4.1.1 Armónicos 65
4.1.2 Fluctuaciones de Voltaje 68
4.1.3 Flicker 69
4.1.4 Huecos de Tensión 70
4.1.5 Transitorios 73

CAPITULO 5 76

CARGAS NO LINEALES 76

5.1 CARGAS NO LINEALES DE USO INDUSTRIAL 76
5.2 RECTIFICADORES AC/DC 77
5.2.1 Rectificador de media onda 78
5.2.2 Rectificador de Onda Completa 80
5.2.3 Rectificadores trifásicos: 81
5.3 FUENTES CONMUTADAS (SWITCHING) 82
5.4 EQUIPOS DE ARCO ELÉCTRICO 84
5.4.1 Hornos de arco 84
5.4.2 Soldadores eléctricos 85
5.5 LÁMPARAS FLUORESCENTE 86
5.6 VARIADORES DE FRECUENCIA 88
5.6.1 Principio de Funcionamiento 89
5.6.2 Aplicaciones de procesos típicos que usan motores con variadores de frecuencia 92

CAPITULO 6 94

ANÁLISIS Y FORMULACIÓN DE SOLUCIONES 94

6.1 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN 94
6.2 FILTROS PASIVOS 95
6.2.1 Filtro pasabajos 95
6.2.2 Filtro pasivo serie 96
6.2.3 Filtros paralelo o de absorción 98
6.3 FILTROS ACTIVOS 99
6.4 FILTROS HÍBRIDOS (FILTROS PASIVOS Y ACTIVOS) 100
6.4.1 Filtro serie 100
6.4.2 Filtro paralelo 101
6.5 EQUIPOS COMERCIALES PARA ELIMINACIÓN DE ARMÓNICOS 102
6.5.1 Filtro de armónicos activo 102
6.5.2 Aplicación de filtros de absorción de corrientes armónicas 103
6.5.3 Aplicación de filtros de absorción de corrientes armónicas 104
6.6 TRANSFORMADOR PARA CARGAS CON ARMÓNICOS, FACTOR “K” 105
6.7 SISTEMA DE ENERGÍA ININTERRUMPIDA (UPS) 106
6.7.1 Tipos de UPS 107
6.8 SUPRESORES DE SOBREVOLTAJES TRANSITORIOS 109
6.8.1 Categorías de Ubicación 110
6.8.2 Instalación de los supresores de transitorios 112

6.9 REGULADOR DE VOLTAJE 113
6.10 SUPRESOR DE PICOS 114
6.11 TRANSFORMADORES DE AISLAMIENTO 115
6.12 PUESTAS A TIERRA 118
6.13 TIERRA ELÉCTRICAS 118
6.13.1 Electrodos Aislados 121

CAPITULO 7 122

DISEÑO DEL LABORATORIO 122

7.1 INTRODUCCIÓN 122
7.2 DIAGRAMAS 124
7.3 DISEÑO DEL BANCO DE TRABAJO 127
7.3.1 Descripción de Elementos 127
7.3.2 Cargas 129
7.3.3 Instrumentación 131
7.3.4 Cálculos 137
7.4 ESTIMACIÓN DE COSTO 140

CAPITULO 8 141

PRACTICAS DE LABORATORIO 141

8.1 PRACTICA DE LABORATORIO # 1 141
8.2 PRÁCTICA DE LABORATORIO # 2 153

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 163

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 166

ANEXO 171

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.2.1 “Limites de armónicos de voltaje” [2] 32
Tabla 2.2.2 “Límites del contenido armónico de corrientes”[3] 34
Tabla 2.2.3 “Limites de armónicos de distorsión armónica de voltaje” 35
Tabla 7.1.1 Parámetros a ser medidos 123
Tabla 7.3.1 Características de cargas lineales 130
Tabla 7.3.2 Características de cargas no lineales 131
Tabla 7.3.3. Especificaciones técnicas de analizadores de redes 135
Tabla 7.3.4. Especificaciones técnicas de un voltímetro 136
Tabla 7.3.5. Especificaciones técnicas de un amperímetro 137
Tabla 7.3.6 Especificaciones del Banco de Trabajo 139
Tabla 7.4.1. Costos estimados del laboratorio 140
Tabla 8.1.1. Tabla de valores con su respectiva carga 149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.2.1 Triangulo de Potencias 37
Figura 3.1.1 Generación, transporte y distribución eléctrica 44
Figura 3.1.2 Red de Transporte de energía eléctrica 46
Figura 3.1.3 Subestación 48
Figura 3.1.4 Transformador de potencia 49
Figura 3.1.5 Torre de Alta Tensión 49
Figura 3.2.1 Transformador de Distribución 51
Figura 3.2.2 Transformador de llenado integral 52
Figura 3.2.3 Transformador seco encapsulado en Resina Epoxi 53
Figura 3.2.4 Transformador rural 54
Figura 3.2.5 Transformador auto protegido 54
Figura 3.2.6 Postes de la cuidad 55
Figura 3.4.1 Resistencia en corriente alterna 57
Figura 3.4.2 Curva de la Resistencia en corriente alterna 58
Figura 3.4.3 Capacitor en corriente alterna 58
Figura 3.4.4 Curva del Capacitor en corriente alterna 60
Figura 3.4.5 Inductor en corriente alterna 60
Figura 3.4.6 Curva del Inductor en corriente alterna 61
Figura 4.1.1 Armónicos en la red 65
Figura 4.1.2 Flicker provocado por un horno de arco 69
Figura 4.1.3 Hueco de tensión 70
Figura 4.1.4 Punto de inicio y de recuperación de un Hueco de tensión 71
Figura 4.1.5 Sobretensiones 73
Figura 4.1.6 Transitorio impulsivo, por caída de un rayo 74
Figura 4.1.7 Transitoria Oscilatorio, energización de capacitores 75
Figura 5.1.1 Formas de Onda por causa de cargas no lineales 77
Figura 5.2.1 Diagrama en bloques de un rectificador 78
Figura 5.2.2 Rectificador de media onda 78

Figura 5.2.3 Forma de onda a la salida del rectificador..... 79
Figura 5.2.4 Rectificador de onda completa 80
Figura 5.2.5 Forma de onda a la salida del rectificador..... 80
Figura 5.2.6 Rectificador Trifásico 82
Figura 5.3.1 Fuente conmutada en bloques 82
Figura 5.3.2 Fuente de corriente monofásica tipo Conmutada..... 83
Figura 5.4.1 Horno de Arco..... 85
Figura 5.4.2 Forma de onda de un horno de arco eléctrico..... 85
Figura 5.4.3 Soldador eléctrico 86
Figura 5.5.1 Forma de onda de una lámpara fluorescente compacta..... 87
Figura 5.6.1 Diagrama en bloque del variador de frecuencia..... 89
Figura 5.6.2 Métodos de rectificación de las señales ac..... 90
Figura 5.6.3 Métodos de inversión de señales ac de 6 pasos..... 91
Figura 5.6.4 Métodos de inversión de señales ac por modulación PWM..... 91
Figura 6.2.1 Filtro de salida pasa bajos 95
Figura 6.2.2 Filtro pasivo serie..... 96
Figura 6.4.1 Filtro serie combinación de un filtro activo y un filtro pasivo 100
Figura 6.4.2 Filtro paralelo combinación de un filtro activo pasivo..... 101
Figura 6.5.1 Filtro de armónicos activo PQF cortesía de ABB 102
Figura 6.5.2 Filtro. Cortesía de COPOSA..... 103
Figura 6.5.3 Filtro. Cortesía de COPOSA..... 104
Figura 6.6.1 “Cargas con su factor K” 106
Figura 6.7.1 Esquema de un UPS 107
Figura 6.8.1 Sobre voltaje transitorio 109
Figura 6.8.2 Ubicación de los supresores de sobrevoltajes transitorios 110
Figura 6.8.3 Impedancia del alambrado actuando como supresor serie..... 112
Figura 6.10.1 Supresor de picos..... 114
Figura 6.11.1 Transformador de aislamiento monofásico 116
Figura 6.11.2 Transformador de aislamiento trifásico 117
Figura 6.12.1 Conexión a tierra correcta del equipo..... 118
Figura 6.13.1 Conductor puesto a tierra 119
Figura 6.13.2 Sistema de alimentación eléctrica 119
Figura 6.13.3 Sistema de Tierra Eléctrica..... 120
Figura 6.13.4 Electrodos aislados..... 121
Figura 7.2.1 Diagrama en Bloques del Banco de Trabajo..... 125
Figura 7.2.2 Diagrama unifilar del Banco de Trabajo 126
Figura 7.2.3 Diagrama multifilar del Banco de trabajo..... 126
Figura 7.3.1 Símbolo del transformador TC..... 127
Figura 7.3.2 Símbolo del transformador TP..... 127
Figura 7.3.3 Seccionador Monofásico 128
Figura 7.3.4 Relé térmico..... 129
Figura 7.3.5 Amperímetro analógico..... 132
Figura 7.3.6 Voltímetro Analógico..... 133
Figura 7.3.7 Analizadores de Redes Eléctricas..... 133
Figura 7.3.8 Instrumentación de potencia..... 134
Figura 8.1.1 Resistencia en corriente alterna 142
Figura 8.1.2 Capacitancia en corriente alterna..... 142
Figura 8.1.3 Capacitancia en corriente alterna..... 144
Figura 8.1.4. Diagrama unifilar. Práctica con cargas lineales..... 146
Figura 8.2.1 Variador de frecuencia..... 154

Figura 8.2.2 Motor jaula de ardilla trifásico 156
Figura 8.2.3. Diagrama unifilar. Práctica con cargas no lineales 156

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.2.1. Porcentaje de la variación de voltaje 29
Ecuación 2.2.2. Distorsión armónica total de voltaje 31
Ecuación 2.2.3. Distorsión armónica total de corriente 31
Ecuación 2.2.4. Distorsión armónica total de voltaje 32
Ecuación 2.2.5. Distorsión armónica total de corriente 33
Ecuación 2.2.6. Índice de severidad de Flicker de corta duración 36
Ecuación 2.2.7. Factor de Potencia 37
Ecuación 3.4.1. Reactancia capacitiva 59
Ecuación 3.4.2.Reactancia inductiva 60
Ecuación 3.5.1. Resistencia 62
Ecuación 4.1.1. Factor de distorsión armónica 66
Ecuación 4.1.2. Porcentaje de la distorsión armónica 66
Ecuación 4.1.3. Función de serie de Fourier 67
Ecuación 5.6.1. Velocidad del motor 88

GLOSARIO DE TÉRMINOS Y LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES

°**C:** Grados centígrados.

A: Amperios.

AC: Corriente Alterna.

C: Capacitor.

CONELEC: Consejo Nacional de Electricidad del Ecuador.

DC: Corriente Continua.

DSP: Procesador Digital de Señal.

F: Faradios.

Fp: Factor de potencia.

HP: Caballos de fuerza.

Hz: Hercios.

I: Corriente.

KHz: kilo hercios.

kV: kilovoltios.

Kva: Kilo voltio amperios.

Kw: Kilo vatio.

L: Inductor.

mA: Mili amperios.

mH: Micro henrios.

Min: Minutos.

Mohm: Mega ohmios.

mV: Mili voltios.

Ohm: Ohmios.

P: Potencia.

PWM: Modulación por ancho de pulso.

R: Resistencia.

RPM: Revoluciones por minuto.

TC: Transformador de corriente.

TDD: Factor de Distorsión Total de la Demanda

THD: Distorsión Armónica Total.

TP: Transformador de potencial.

uF: Micro faradios.

UPS: sistema de energía ininterrumpida.

US$: Dólares de los Estados Unidos de América

V: Voltios.

W: Vatios.

Z: Impedancia.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Amperímetro: Instrumento que sirve para medir la intensidad de corriente que circula por un circuito eléctrico.

Analizador de redes eléctricas: Equipos de última generación que proporcionan un completo análisis de los disturbios que degradan la calidad de la energía en redes eléctricas.

Arco eléctrico: Descarga eléctrica producida al establecerse una diferencia de potencial entre dos electrodos.

Armónicos: Señales eléctricas cuyas frecuencias son múltiplos de la fundamental.

Calidad de Energía Eléctrica: Energía dentro de parámetros normalizados como tensión, frecuencia y forma de onda.

Carga: Dispositivo que consume energía eléctrica.

Cargas lineales: Cargas que generan formas de onda en corriente y voltaje, que no afectan la calidad de la energía eléctrica

Cargas no lineales: Cargas que generan corrientes no senoidales, es decir, corrientes que además de la componente fundamental tienen otras señales

eléctricas con frecuencias múltiplos de la fundamental, conocidos como armónicos.

Centrales Eléctricas: Instalaciones que transforman alguna clase de energía (química, mecánica, termina, etc.), en energía eléctrica.

Diagrama esquemático eléctrico: Representación de los diferentes componentes de un circuito tomando en cuenta las conexiones que hay entre ellos, con el objetivo de lograr una visualización completa del sistema de forma sencilla.

Electricidad: Fenómeno físico originado por cargas eléctricas estáticas o en movimiento.

Estación de trabajo: Mesa o superficie con las dimensiones mínimas que permitan apoyar el circuito o equipo que se este analizando.

Factor de Potencia: Índice que permite evaluar la calidad de un determinado equipo, y esta definido como el cociente entre la potencia activa y la potencia aparente.

Factor K: Constante que indica la capacidad que posee un transformador para alimentar cargas no lineales sin exceder la temperatura de operación para la cual fue diseñado.

Filtro activo: Dispositivo formado por elementos pasivos (resistencias, capacitores, inductores) y elementos de estado sólido, que inyecta armónicos de la misma amplitud, pero en contra fase de la fuente de armónicos generada por cargas no lineales; siendo eliminados debido a la suma entre ellos, consiguiendo una onda senoidal casi pura.

Filtro pasivo: Dispositivo formados únicamente por elementos pasivos como: resistencias (R), condensadores (C) y/o inductores (L).

Filtro: Dispositivo que discrimina una determinada frecuencia o gama de frecuencias de una señal eléctrica que pasa a través de él.

Flicker: Variaciones rápidas de voltaje, de corta duración; efecto detectable por el ojo humano.

Fusible trifásico: Elementos que proporcionan una protección fase a fase, con un poder de corte muy elevado, estos pueden ser montados en portafusibles ó seccionadores.

Hornos de Arco: Dispositivos de alta potencia que son usados para la fabricación de acero a partir de chatarra, cuyo principio de funcionamiento es un arco voltaico de gran energía necesaria para fundir.

Línea de Baja tensión: Conductores que transportan energía eléctrica en valores inferiores a los 600[V], niveles de tensión adecuados para el consumo del usuario final.

Líneas de Alta tensión: Conductores que transportan energía eléctrica en niveles superiores a 40[KV].

Líneas de Media tensión: Conductores que transportan energía eléctrica entre valores de 600[V] y 40[KV].

Puesta a Tierra: Conexión que se utiliza para que circule la corriente no deseada o descargas eléctricas hacia tierra.

Rectificadores AC/DC: Dispositivos que convierten un voltaje de entrada alterno en uno directo.

Regulador de voltaje: Estabilizador de voltaje o acondicionador de voltaje, es un equipo eléctrico que acepta una tensión de voltaje variable a la entrada,

dentro de un parámetro predeterminado y mantiene a la salida una tensión regulada.

Relés térmicos: Dispositivos de protección contra sobrecargas, cuyo principio de funcionamiento se basa en la deformación de ciertos materiales (bimetales) bajo el efecto del calor.

Resistencia: Cociente entre la diferencia de potencial que existe en un conductor eléctrico y la intensidad que circula por él.

Seccionador eléctrico: Dispositivo mecánico capaz de mantener aislada una instalación eléctrica de su red de alimentación

Sobrevoltaje: Valor nominal mayor que el valor máximo previsto para el funcionamiento normal de los aparatos eléctricos

Subestaciones: Plantas transformadoras de tensión, que se localizan a los extremos de la red de transporte, siendo el elemento fundamental los transformadores de potencia.

Supresores de pico: Equipos que permiten eliminar variaciones rápidas llamadas picos.

Transformador: Maquina eléctrica, cuya función es aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo constante la frecuencia.

Transformadores de corriente: Transformadores donde su principal objetivo es la reducción de niveles de corriente a valores manejables para ser medidos

Transformadores de voltaje (TP): Transformadores que reducen los niveles de voltaje a valores manejables para poder ser medidos.

Variador de frecuencia: Dispositivo que permite el control de frecuencia de alimentación suministrada a la carga. Su principal uso es el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna.

Vida Útil: Duración estimada que un equipo puede tener cumpliendo correctamente con la función para la cual fue creado. Normalmente calculada en horas de duración.

Voltímetro: Instrumento utilizado para medir la diferencia de potencial o voltaje en un circuito.

CAPITULO 1

GENERALIDADES

1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

1.1.1 Antecedentes

Con el advenimiento de la Electrónica en los sistemas consumidores de energía, los sistemas eléctricos son afectados por perturbaciones que se ven reflejadas como: armónicos, variaciones de tensión, flicker, sobretensiones transitorias, entre otras; por lo cual, las empresas encargadas del suministro de energía se ven obligadas a mantener estándares de calidad óptimos, y a su vez generar procesos de solución, que en otros países con mayor consumo y exigencia en el mercado eléctrico están siendo realizadas.

1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

El presente estudio pretende conocer y analizar una serie de pruebas y prácticas de laboratorio, donde se reflejarán las causas comunes de una deficiente calidad de la energía eléctrica y generar una solución a las perturbaciones, siendo indispensable para el desarrollo de la sociedad ecuatoriana en sus quehaceres de la vida diaria, donde se requieren mejoras en la calidad de la energía para el beneficio de los equipos conectados a la red y que éstos no sean afectados en su vida útil.

La calidad energética constituye un esfuerzo por mejorar constantemente los procesos y las tecnologías involucradas para que los equipos utilizados en la industria sean más eficientes. Con un control adecuado de la red eléctrica se generará un ahorro tanto para la industria como para los usuarios en general.

1.3 ALCANCE DEL PROYECTO

El presente estudio pretende hacer un análisis de las principales perturbaciones existentes en la red eléctrica, ocasionadas por cargas no lineales consumidoras de energía y perturbaciones de origen atmosférico, así mismo, generar alternativas prácticas de solución; además la propuesta de un esquema básico de laboratorio de experimentación y análisis de las perturbaciones introducida por los sistemas eléctricos de aplicaciones industriales, sugerencias de prácticas de laboratorio básicas que generen mejores resultados a estos problemas

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 General

Diseño de un laboratorio para experimentación y análisis de las perturbaciones introducidas por los sistemas electrónicos de aplicación industrial en las redes eléctricas, la degradación de la calidad de la energía eléctrica y sus soluciones.

1.4.2 Específicos

- ✓ Analizar las características básicas de las redes eléctricas.
- ✓ Realizar un estudio de las perturbaciones eléctricas, identificar sus causas.
- ✓ Análisis de soluciones para el mejoramiento del desempeño de las redes eléctricas y la calidad de la energía eléctrica.
- ✓ Investigar y analizar las opciones existentes en equipos electrónicos para la visualización, medición y perturbaciones.
- ✓ Estudio de la infraestructura física del laboratorio, así como de la tecnología a ser utilizada.
- ✓ Sugerencia de prácticas básicas de laboratorio para un análisis de las causas y problemas de la calidad energética.
- ✓ Cotización de equipos empleados para dar solución a las perturbaciones

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 ENERGÍA ELÉCTRICA

Electricidad

La electricidad es un fenómeno físico originado por cargas eléctricas estáticas o en movimiento, cuando una carga se encuentra en reposo produce fuerzas sobre otras situadas en su entorno, y si las cargas se desplazan producen fuerzas magnéticas.

La electricidad como fuente de energía presenta facilidad para ser transportada y transformada en otros tipos de energía tales como: energía luminosa, energía mecánica y energía térmica.

La energía eléctrica es el resultado de una diferencia de potencial entre dos puntos con capacidad de originar una corriente eléctrica entre estos.

2.2 CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Los sistemas proveedores de energía eléctrica requieren garantizar los niveles de calidad con el objeto de avalar la confiabilidad del producto, mismo que debe mantenerse dentro de los parámetros establecidos por el órgano regulador, con la finalidad de ofrecer un nivel satisfactorio de servicio eléctrico para permitir el buen funcionamiento y desempeño de los equipos conectados a lo largo de la Red de Distribución.

En la actualidad, la calidad de la energía es un parámetro de singular importancia debido al incremento del número de cargas sensibles soportados por los sistemas de distribución, las cuales por sí solas, resultan ser causa de la degradación en la calidad de la energía eléctrica

Un suministro energético más fiable y de buena calidad genera una mayor demanda de todos los consumidores de energía eléctrica ya que se fortalecen e incrementan procesos industriales, servicios de comunicación, aplicaciones domóticas, etc.

Entre los tipos mas comunes de perturbaciones que pueden aparecer y afectar la calidad de la energía se tiene: armónicos, variaciones de tensión, flicker, sobretensiones transitorias, huecos de tensión y otros.

Con la demanda creciente del consumo eléctrico y la dinámica en el mercado mundial, la problemática que existe en la calidad de energía ha aumentado dramáticamente y con ello pérdidas significativas debido a la reducción de vida útil de los equipos.

Estos problemas han beneficiado al desarrollo tecnológico en equipos de protección eléctrica de alta fiabilidad, los cuales certifican a las empresas sistemas eléctricos totalmente confiables y garantías respectivas a los usuarios.

Entre los equipos que deben mantener un nivel óptimo de calidad de energía eléctrica se pueden destacar.

- Sistemas de Salud.
- Sistemas de información que utilizan equipo de cómputo.
- Departamentos de paramédicos y bomberos.
- Empresas públicas (Gas, agua, energía eléctrica).
- Aeropuertos, Bancos.

- **Beneficios de tener una buena calidad de Energía Eléctrica**

La buena calidad de la energía eléctrica representa un beneficio para los usuarios y empresas ya que evita:

- Un mal funcionamiento de equipos y maquinaria industrial
- Reducción de vida útil de equipos
- Incremento de tareas de mantenimiento
- Cuantiosas perdidas económicas por el mal funcionamiento de maquinaria
- Renovación repentina de equipos no planificada
- Calentamiento excesivo y ruido acústico en transformadores y motores
- Baja eficiencia de motores, bloqueo de programas de PLCs
- El colapso de sistemas de comunicación, con perdidas de información
- Costos adicionales para la empresa que debe reparar equipos dañados por la deficiente señal administrada
- Errores de mediciones
- Sobrecalentamiento de cables

Los problemas anteriormente mencionados producen malestar y perdidas a las empresas ya que deben aumentar presupuesto para reducir las perdidas no programadas de equipos sensibles a perturbaciones de la energía eléctrica. La calidad de la energía en la actualidad es un tema de gran importancia tanto para las compañías eléctricas como para los usuarios por las siguientes razones:

- La necesidad económica por parte de las empresas de aumentar la competitividad.
- La generalización del uso de equipos sensibles a las perturbaciones.
- La liberalización del mercado eléctrico

Los niveles de calidad de la energía eléctrica se clasifican según los siguientes parámetros:

- Calidad del producto
- Calidad del servicio técnico
- Calidad del servicio comercial

Estos parámetros están dimensionados de tal manera que garanticen niveles de satisfacción adecuados para los usuarios.

2.2.1 Calidad del Producto

En el sector ecuatoriano, la calidad del producto para las actividades de distribución, contempla los siguientes parámetros:

a) Nivel de voltaje
b) Perturbaciones
c) Factor de potencia

a) Niveles de voltaje

Voltaje: Tensión o diferencia de potencial, es la presión que ejerce una fuente de suministro de energía eléctrica sobre las cargas eléctricas (electrones), en un circuito eléctrico cerrado, para que se establezca el flujo de una corriente eléctrica. Mientras mayor sea esta presión ejercida sobre los electrones de un conductor, mayor será el voltaje en este.

En la Legislación Nacional los niveles de voltaje establecidos por el Consejo Nacional de Electricidad CONELEC[1] son:

- "Bajo voltaje: inferior a 0,6 kV,
- Medio voltaje: entre 0,6 y 40 kV.
- Alto voltaje: mayor a 40 kV " [1]

La calidad del nivel de voltaje define las variaciones de voltaje, que son incrementos o disminuciones de esta variable aplicado a las cargas de la Red de Distribución.

El control de calidad del voltaje se determina mediante un análisis estadístico del error relativo en referencia a sus valores nominales medidos cada 10 minutos, según la siguiente ecuación:

$$\Delta V_k(\%) = \frac{V_k - V_n}{V_n} * 100$$

Ecuación 2.2.1. Porcentaje de la variación de voltaje

[1] CONELEC Consejo Nacional de Electricidad del Ecuador, Reglamento Sustitutivo del Reglamento de Suministro de Electricidad R.O 150

Donde:

ΔV_k: variación de voltaje, en el punto de medición, en el intervalo k.
V_k : voltaje eficaz (rms) medido en cada intervalo de medición k.
V_n : voltaje nominal en el punto de medición.

b) Perturbaciones

Las perturbaciones en la red eléctrica ocasionan menor calidad en la señal de alimentación suministrada a los equipos; es por esta razón, que cuando se presentan es necesario conocer el tipo, magnitud y origen de la perturbación que afecta a la calidad de la energía eléctrica, si las perturbaciones existentes en la red eléctrica llegan a sobrepasar los niveles preestablecidos como máximos, el servicio deberá ser suspendido hasta eliminar estos inconvenientes.

Los niveles establecidos por las Regulaciones del CONELEC son los siguientes:

- Armónicos
- Flicker

El análisis de estas y otras perturbaciones se detallaran en el capitulo IV

- **ARMÓNICOS**

Los armónicos son señales eléctricas cuyas frecuencias son múltiplos de la fundamental. La distorsión armónica total, es una medida de la coincidencia de formas entre una onda y su componente fundamental.

La distorsión armónica total de voltaje es la relación del valor eficaz de la suma de todas las componentes armónicas de tensión (V_i), hasta un orden especificado (n), respecto al valor eficaz de la componente fundamental ($V_{n=1}$).

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{n} V_i^2}}{V_{n=1}}$$

Ecuación 2.2.2. Distorsión armónica total de voltaje

La distorsión armónica total de corriente es la relación del valor eficaz de la suma de todas las componentes armónicas de corriente (I_i), hasta un orden especificado (n), respecto al valor eficaz de la componente fundamental. ($I_{n=1}$)

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{n} I_i^2}}{I_{n=1}}$$

Ecuación 2.2.3. Distorsión armónica total de corriente

Las distorsiones armónicas presentes en los sistemas eléctricos se cuantifican principalmente por los siguientes factores:

1. Contenido armónico de voltaje
2. Contenido armónico de corriente

1. Contenido armónico de voltaje

"Se determina sobre la base de índices que consideran el porcentaje de contenido armónico individual y el valor de Distorsión Armónica Total de Voltaje (VTHD), en barras de los sistemas de transmisión que tengan puntos de conexión. Para efectos de esta Regulación, se consideran las armónicas comprendidas entre la 2° y la 40°, incluyendo las mismas." [2]

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{40} V_i^2}}{V_{n=1}}$$

Ecuación 2.2.4. Distorsión armónica total de voltaje

La siguiente tabla muestra los niveles límites con respecto a la distorsión armónica total de voltaje:

LÍMITES PARA CONTENIDO ARMÓNICO DE VOLTAJES (IEEE 519)		
Punto de común Acople	Contenido Armónico Individual (%)	VTHD Máximo (%)
Mayor o igual a 69 KV	3	5
69 KV hasta 161 KV	1.5	2.5
Mayor a 161 KV	1	1.5

Tabla 2.2.1 "Limites de armónicos de voltaje" [2]

[2] CONELEC Consejo Nacional de Electricidad del Ecuador, Regulación No. 003/08

2. Contenido armónico de corriente

"Se calcula sobre la base de índices que consideran el porcentaje de contenido armónico individual en la onda de corriente y el valor del TDD (Factor de Distorsión Total de la Demanda) de la carga conectada por los Agentes en los puntos de conexión. Para efectos de esta Regulación, se consideran las armónicas comprendidas entre la 2° y la 30°, incluyendo las mismas" [3]

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{30} I_i^2}}{I_{n=1}}$$

Ecuación 2.2.5. Distorsión armónica total de corriente

La siguiente tabla muestra los niveles límites con respecto a la distorsión armónica total de corriente:

SCR = Isc / Ic	h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	TDD
< 20	4.00	2.00	1.50	0.60	5.00
20 – 50	7.00	3.50	2.50	1.00	8.00
50 - 100	10.00	4.50	4.00	1.50	12.00
100 - 1000	12.00	5.50	5.00	2.00	15.00
> 1000	15.00	7.00	6.00	2.50	20.00
< 20	2.00	1.00	0.75	0.30	2.50
20 – 50	3.50	1.75	1.25	0.50	4.00
50 - 100	5.00	2.25	2.00	1.25	6.00

[3] CONELEC Consejo Nacional de Electricidad del Ecuador, Regulación No. 003/08

100 - 1000	6.00	2.75	2.50	1.00	7.50
> 1000	7.50	3.50	3.00	1.25	10.00
< 50	2.00	1.00	0.75	0.30	2.50
≥ 50	3.50	1.75	1.25	0.50	4.00

Tabla 2.2.2 "Límites del contenido armónico de corrientes"[3]

Donde:

- TDD: Factor de Distorsión Total de la Demanda.
- h: orden de la armónica.
- La relación de cortocircuito en el punto de conexión, definida como: la corriente de cortocircuito trifásico mínima calculada Isc, dividido para la corriente Ic promedio de las demandas máximas en el mes.
- Ih: límites de componentes armónicos individuales de corrientes indicados Para los componentes de armónicos pares, los límites son el 25% de los valores indicados en la tabla.

Dentro de los Límites los valores eficaces (rms) de los voltajes armónicos individuales (V_i') y los THD, expresados como porcentaje del voltaje nominal del punto de medición respectivo, no deben superar los valores límite (V_i´ y THD´)

ORDEN (n) DE LA ARMONICA Y THD	**TOLERANCIA $\|V_i'\|$ 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
Impares múltiplos de tres		
3	1.5	5.0
9	1.0	1.5
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
Mayores de 21	0.2	0.2
Pares		
2	1.5	2.0
4	1.0	1.0
6	0.5	0.5
8	0.2	0.5
10	0.2	0.5
12	0.2	0.2
Mayores a 12	0.2	0.5
THD	3	8

Tabla 2.2.3 "Limites de armónicos de distorsión armónica de voltaje"[4]

Estos límites permiten:

- Controlar la distorsión de corriente y tensión de un sistema eléctrico
- Ofrecer un servicio eléctrico de buena calidad
- Limitar el nivel de distorsión que un cliente puede introducir a la red
- Prevenir que un sistema eléctrico interfiera en la operación de otros sistemas de protección, medición, etc.

[4] CONELEC Consejo Nacional de Electricidad del Ecuador Regulación No. CONELEC 004/01

➢ FLICKER

Los Flicker son llamados tanbien parpadeos y son variaciones rápidas de voltaje, este efecto puede ser detectable por el ojo humano.

Índices de calidad de los Flicker

El índice de severidad del Flicker Pst (flicker de corta duración) debe ser igual a 1 es decir que no debe ser mayor que la unidad.

Cuando Pst = 1 es el limite de irritabilidad asociado a la fluctuación máxima de luminancia que puede soportar sin molestia el ojo humano, este valor es en cada punto de medición.

$$P_{st} = \sqrt{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.0657P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50}}$$

Ecuación 2.2.6. Índice de severidad de Flicker de corta duración

Donde:

- Pst: Índice de severidad de flicker de corta duración.
- P0.1, P1, P3, P10, P50: Niveles de efecto “flicker” que se sobrepasan durante el 0.1%, 1%, 3%, 10%, 50% del tiempo total del período de observación.

Plt (flicker de larga duración): esta duración es aproximadamente de 2 horas, siendo adecuada al ciclo de funcionamiento de la carga o duración mientras la cual un observador puede ser sensible al flicker de larga duración.

c) Factor de potencia

El factor de potencia es un índice que permite evaluar la calidad de un determinado equipo, y esta definida como el cociente entre la potencia activa y la potencia aparente, que es coincidente con el coseno del ángulo entre la tensión y la corriente cuando la forma de onda es sinusoidal pura.

$$Fp = \frac{P}{S}$$

Ecuación 2.2.7. Factor de Potencia

Es importante saber que si un consumidor final mantiene en su instalación un factor de potencia inferior al establecido por la Regulación de Calidad, tiene la obligación de corregirlo, de lo contrario el distribuidor establecerá cargos por este concepto.

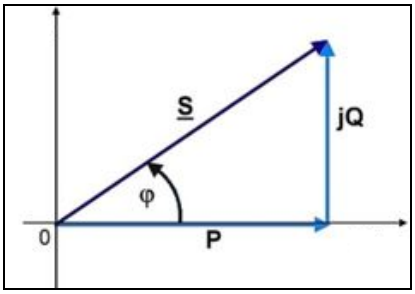


Figura 2.2.1 Triangulo de Potencias

Donde:

P: Potencia Activa $\Rightarrow$ $Cos\ \theta * S$

Q: Potencia Reactiva $\Rightarrow$ $Sen\ \theta * S$

S: Potencia Aparente $\Rightarrow$ $(P^2 + Q^2)^{1/2}$

2.2.2 Calidad del Servicio Técnico

Los distribuidores deben efectuar la recopilación de información relacionada con el registro de las interrupciones de servicio y la determinación de los indicadores de frecuencia y duración de interrupciones.

El registro de las interrupciones deberá efectuarse mediante un sistema cuya metodología deberá ser desarrollada hasta alcanzar los índices de calidad que se establezcan en las regulaciones pertinentes.

Entre los parámetros que se encuentran contemplados en la calidad del servicio técnico se tiene las interrupciones en frecuencia y duración, donde las interrupciones cortas o breves son menores o igual a los 3 minutos y las interrupciones largas mayores a los 3 minutos.

Otras interrupciones que se destacan en la calidad del servicio tenemos:

- ✓ **Interrupción no programada**

El término de interrupción no programada se aplica a los consumidores que no son comunicados con anterioridad acerca de la interrupción por parte de las empresas distribuidoras de la energía eléctrica. Esta puede ser de forma manual o automática.

- ✓ **Interrupción Programada**

Las interrupciones programadas por la empresa distribuidora se dan cuando se ha cumplido los requisitos de información, notificación y autorización previas, estas son necesarias para realizar labores de mantenimiento mayor en líneas y subestaciones, construcción de nuevos

circuitos, reemplazo de transformadores o interruptores, etc. Estas deben ser del menor tiempo posible para evitar molestias a los usuarios.

✓ **Interrupciones ocasionales**

Las interrupciones ocasionales son aquellas que no se producen con frecuencia pero a la vez son dañinas y costosas, tanto para la empresa de distribución eléctrica como para los consumidores, siendo causas comunes del aparecimiento las siguientes:

- **Robo de cables, transformadores, y otros:** Podría producir interrupciones prolongadas en el servicio eléctrico además de costos económicos.

- **Conexiones ilegales: pueden causar:**

  - Rotura de cables por falso contacto.
  - Sobrecarga y quema de transformadores.
  - Variaciones de voltaje por la mala conexión
  - Daño en los equipos de los vecinos.

- **Tormentas y fuertes lluvias:** El agua, humedad, descargas atmosféricas, rayos y deslaves causan cortocircuitos y destrucción en las redes de distribución.

- **Envejecimiento y deterioro de materiales y equipos:** Hay que poner atención a la culminación de la vida útil de materiales y equipos para evitar interrupciones y fallas.

- **Accidentes:** Choques de autos contra instalaciones eléctricas, árboles que caen sobre los cables de electricidad, animales sobre cables y/o equipos.

✓ **Interrupción temporal e instantánea**

Se denomina interrupción temporal cuando la falta de servicio es de larga duración podría ser mayor a los 30 minutos o más.

La interrupción instantánea es causada debido a fallas momentáneas producidas solo en segundos.

2.2.3 Calidad del Servicio Técnico

La importancia en la organización del área comercial de una empresa esta dada desde el punto de vista de la satisfacción de las necesidades de energía eléctrica a todos los usuarios. Razón por la cual los Distribuidores deben poner un mayor énfasis en la gestión comercial, la cual, debería estar orientada fundamentalmente a brindar una adecuada calidad de atención al cliente. En el ámbito de las relaciones comerciales, los servicios que el Distribuidor otorgará al consumidor son las siguientes actividades.

1. Atención a usuarios y facturación
2. Atención de acometida, medición, lecturas

El trabajo es en equipo y el compromiso de ofrecer un servicio eficiente como la facilidad que el usuario obtenga la información y la atención adecuada de parte del distribuidor.

1. Atención a usuarios y facturación

✓ Usuarios

Persona capaz de contratar, recibir o utilizar el servicio eléctrico debidamente autorizado por el distribuidor dentro de su área de concesión.

Es de importancia crear suficientes locales o puntos de atención dentro del área de concesión de la empresa eléctrica, para que el consumidor pueda solicitar o pagar los servicios a los que tiene derecho.

✓ Facturación

Las tarifas eléctricas son el medio por el cual las empresas suministradoras de energía eléctrica determinan el costo económico realizado por el consumo del producto por parte del usuario.

El consejo Nacional de Electricidad del Ecuador dice que esta debe ser realizada mensualmente, en función de lecturas directas de los medidores que correspondan a períodos de consumo no menores a 28 días ni mayores a 33 días, de no cancelar será suspendido el servicio, después de haber solucionado este problema el distribuidor procederá a restaurar el servicio.

2. Atención de acometida, medición, lecturas

✓ Acometidas

La acometida es la parte de la instalación de enlace que une la red de distribución de la empresa eléctrica hacia la vivienda. El distribuidor con su personal capacitado realizara las instalaciones, siendo estos quienes las mantengan o remuevan según sea el caso.

- ✓ **Medición**

La medición es un proceso que se realiza con la ayuda de equipos por parte del personal de las empresas de distribución. El costo de estos procesos tanto como instalaciones y sistemas de medición es responsabilidad el distribuidor.

- ✓ **Lecturas:**

Las lecturas son realizadas por los distribuidores con sus equipos de medición, en casos especiales podrá realizar mediciones a través de un equipo totalizador, siendo consumidores de bajo consumo, en sectores rurales, con la finalidad de disminuir los costos de comercialización.

Para edificios de uso múltiple, ya sea residencial o comercial, poseen medidores individuales instalados por el distribuidor.

2.3 MONITORIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA

La monitorización es un proceso que detecta las posibles interferencias que pudieran presentarse en el curso del análisis de la calidad de la energía dando lugar a corregir el procedimiento antes de llegar a un resultado final.

Se deben realizar mediciones periódicas para determinar si una instalación recibe y consume una señal eléctrica adecuada y de buena calidad para poder identificar las causas y soluciones a los posibles problemas que se puedan presentar en maquinas o equipos debido a una señal deficiente.

Para realizar este análisis se debe considerar lo siguiente:

- Conocimiento de las principales perturbaciones que afectan la red eléctrica.

- Causa de las perturbaciones: en la onda suministrada por la Compañía, en la propia instalación o en las cargas conectadas a dicha instalación.

- Analizadores para detectar y registrar las perturbaciones, saber donde colocarlos para realizar las respectivas mediciones.

- Interpretación de datos obtenidos por los distintos equipos.

- Concluir y brindar soluciones.

CAPITULO 3

INDUSTRIA ELÉCTRICA

3.1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo industrial ha incrementado la productividad utilizando complejos y sofisticados sistemas de producción automática, con el uso relevante de equipos eléctricos. Estas innovaciones tecnológicas han impactado el campo de la industria eléctrica, por lo que se evidencia la importancia de formar recursos humanos acordes con las necesidades actuales.

Los sistemas de energía eléctrica están formados por: centros de producción (generación), transporte (red de alta y media tensión), y distribución (red de baja tensión).

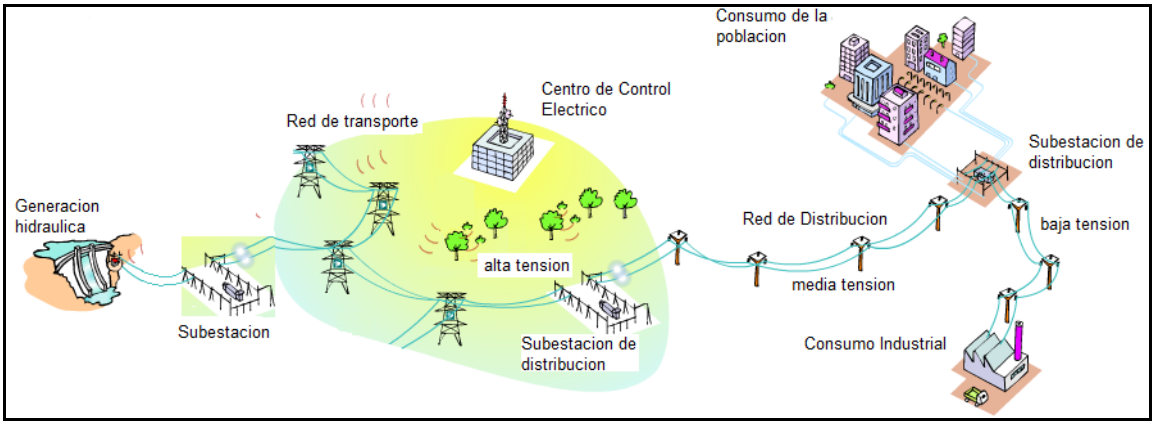


Figura 3.1.1 Generación, transporte y distribución eléctrica

Como se mencionó los componentes principales de un sistema de energía eléctrica son:

- Generación
- Transporte y
- Distribución

3.1.1 Generación de energía eléctrica

La electricidad se genera en centros de producción comúnmente llamados centrales eléctricas, estas se encargan de la transformación de alguna clase de energía (química, térmica, mecánica, luminosa, etc.), en energía eléctrica.

De acuerdo a la fuente de energía primaria utilizada, las centrales eléctricas generadoras se clasifican en:

- Termoeléctricas
- Hidroeléctricas
- Nucleares
- Eólicas
- Solares
- Mareomotrices
- Geotérmicas

3.1.2 Transporte de la energía eléctrica

La red de transporte es la encargada de conectar las centrales de generación con los puntos de distribución a los consumidores.

El objetivo de esta red es transportar grandes cantidades de energía a largas distancias a valores muy altos de tensión.

Figura 3.1.2 Red de Transporte de energía eléctrica

Entre los principales componentes de la red de transporte tenemos:

- líneas de transporte de la energía eléctrica
  - alta tensión
  - media tensión
- Subestación:
  - Transformador de potencia
  - Seccionador
  - Equipos de medición
- Torres de alta tension

- **Líneas de transporte de la energía eléctrica**

Las líneas de la red de transporte son cables de distintos materiales como el cobre o aluminio que descansan sobre grandes torres.

- ✓ **Línea de alta tensión:**

Las líneas de alta tensión transportan energía de valores de tensión muy altos, los cuales corresponden a "niveles superiores a 40[KV] para voltajes de alta tensión" [5] , establecidos por el CONELEC.

- ✓ **Líneas de media tensión:**

Estas líneas de media tensión son utilizadas especialmente para el suministro de la energía eléctrica a consumidores industriales.

El "CONELEC"[6] mantiene que los voltajes entre 600[V] y 40[KV] son considerados voltajes de media tensión.

- ✓ **Conductores**

Los conductores de las líneas aéreas de alta tensión se construyen con un núcleo de alambres de acero que contribuyen a la resistencia mecánica, rodeado por hilos de aleación de aluminio como conductor de energía.

- **Subestaciones eléctricas**

Las subestaciones eléctricas son plantas transformadoras de tensión que se localizan a los extremos de la red de transporte, siendo el elemento fundamental los transformadores de potencia.

[5] CONELEC, Consejo Nacional de Electricidad del Ecuador, Resolución 234-05 del 26 y 28 Oct.05
[6] CONELEC, Consejo Nacional de Electricidad del Ecuador, Resolución 234-05 del 26 y 28 Oct. 05

Las subestaciones elevadoras se ubican en las inmediaciones de las centrales eléctricas para aumentar la tensión de salida de las centrales generadoras, mientras que las subestaciones reductoras se localizan en las cercanías de las poblaciones y consumidores, con el objetivo de obtener niveles de tensión adecuados para el consumo del usuario final. Ej. Industria, domicilio etc.

Figura 3.1.3 Subestación

- ✓ **Transformadores de Potencia:**

Los transformadores son dispositivos de las redes de distribución que se encargan de transformar el voltaje de corriente alterna que tiene a su entrada en otro diferente que entrega a su salida.

Los transformadores de potencia son utilizados en las subestaciones de transmisión de energía eléctrica para elevar o reducir los niveles de tensión, aptos para el consumo de usuarios.

Figura 3.1.4 Transformador de potencia

- **Torres de Alta Tensión**

Las torres de alta tensión son grandes estructuras metálicas diseñadas para soportar el peso de cables gruesos, estas estructuras metálicas son protegidas contra oxidación.

La elección del tipo de torre se hace sobre la base de criterios económicos, distancia entre ellos, factores climáticos, situación geografía etc.

Figura 3.1.5 Torre de Alta Tensión

3.1.3 Distribución de la Energía Eléctrica

Las compañías suministradoras del servicio eléctrico, son los únicos pueden tener el control sobre el voltaje que es entregado a los equipos, la corriente dependerá de la carga conectada a la red eléctrica, además son responsables de la distribución de la energía eléctrica garantizando calidad de servicio acorde con la demanda de los usuarios, compensando las posibles incidencias y fallas producidas.

Las líneas de distribución son trazadas mediante calles, poblaciones etc. Este tipo de redes pueden ser aéreas o subterráneas según la ubicación y requerimientos del cliente.

- ✓ **Línea de baja tensión:**

  Estas líneas llevan energía eléctrica que puede ser utilizada por la población, el CONELEC[7] contempla valores inferiores a los 600[V] como voltajes de baja tensión.

3.2 COMPONENTES DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN

3.2.1 Transformador de Distribución

Los trasformadores de Distribución son maquina eléctricas, cuya función es aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo constante la frecuencia. Estos transformadores se usan en zonas urbanas, industrias, minería, explotaciones petroleras, grandes centros

[7] CONELEC es el Consejo Nacional de Electricidad, del Ecuador

comerciales y toda actividad que requiera la utilización intensiva de energía eléctrica.

Figura 3.2.1 Transformador de Distribución

Características:

1. Se construyen en otras tensiones primarias según especificaciones del cliente, generalmente las especificaciones responden a normalizaciones.

2. La variación de tensión, se realiza mediante un conmutador exterior de accionamiento sin carga.

Estos transformadores existen de varios tipos, de los cuales como principales pueden citarse los siguientes:

a. Transformadores Herméticos de llenado integral

Los transformadores Herméticos de llenado integral son muy útiles en lugares donde no existe mucho espacio, utilizado en zonas urbanas, industrias, minería, explotaciones petroleras, grandes centros comerciales.

Figura 3.2.2 Transformador de llenado integral

Características:

1. No necesita de mantenimiento porque no lleva tanque de expansión de aceite.
2. Construcción es más compacta que la tradicional.
3. Se fabrican en potencias y tensiones normalizadas.

b. Transformadores Secos Encapsulados en Resina Epoxi

Los transformadores secos encapsulados en resina epoxi son construidos para espacios reducidos y los requerimientos de seguridad, en caso de incendio imposibilitan la utilización de transformadores refrigerados en aceite.

Aplicaciones: grandes edificios, hospitales, industrias, minería, grandes centros comerciales y toda actividad que requiera la utilización intensiva de energía eléctrica.

Figura 3.2.3 Transformador seco encapsulado en Resina Epoxi

Características:

1. Se utiliza resina epoxi como medio de protección de los arrollamientos, es por esta razón que es innecesario su mantenimiento.
2. Fabricados en potencias y tensiones normalizadas.

c. Transformadores Rurales

Los transformadores rurales son diseñados para instalación monoposte en redes de electrificación suburbanas monofilares, bifilares y trifilares. En redes trifilares se pueden utilizar transformadores trifásicos o como alternativa 3 monofásicos.

Figura 3.2.4 Transformador rural

d. Transformadores auto protegidos

Los transformadores auto protegidos incorporan componentes para protección del sistema de distribución contra sobrecargas, corto-circuitos y fallas internas en el transformador, para esto esta constituido por fusibles de alta tensión y disyuntor de baja tensión, montados internamente en el tanque. Para protección contra sobretensiones el transformador está provisto de dispositivos para fijación de pararrayos externos en el tanque.

Figura 3.2.5 Transformador auto protegido

3.2.2 Postes

Los postes son un elemento indispensable en la construcción de las redes de distribución aéreas, estos pueden ser de hormigón armado, madera o hierro, esto dependerá de la importancia de la distribución.

Los postes de madera son más económicos pero de menor duración debido a factores climáticos.

Figura 3.2.6 Postes de la cuidad

Los accesorios de los potes son citados a continuación:

a. Conductor

Los conductores son materiales que permiten el paso de la corriente eléctrica, por lo que se utilizan como unión entre los distintos elementos del circuito.

Los materiales empleados para la construcción o fabricación de conductores para la distribución de energía eléctrica son el cobre y el aluminio.

El metal elegido dependerá de su capacidad para transportar la electricidad, resistencia al desgaste, maleabilidad, uso especifico y del costo, en este caso el cobre es el adecuado para la elaboración de las redes de distribución.

b. Aisladores

Los conductores se montan en los apoyos, por intermedio de aisladores de porcelana, cuando los cables están suspendidos de postes.

3.3 COSTOS DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA

Los costos que enfrentan las redes de distribución se detallan a continuación:

- Costo de inversion
- Costo de perdidas de energía
- Costo de mantenimiento

1. **Costos de inversión:** correspondientes al material, la mano de obra, la realización del proyecto, etc. Esta inversión se realiza en el momento de la puesta en servicio o que se amortiza a lo largo de toda la vida de la instalación.

2. **Costos de pérdidas de energía:** producidos a lo largo de todo el período en estudio y su valor es proporcional al cuadrado de la carga, la cual puede permanecer constante o variar.

3. **Costos de mantenimiento:** producidos durante todo el período en estudio y, en las líneas y cables se pueden considerar proporcionales a la dimensión de la red y función de los tipos de conductor empleados.

3.4 USUARIOS DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Los usuarios de la energía eléctrica son equipos destinados a producir trabajo como por ejemplo: maquinas eléctricas, televisores, licuadoras, lavadoras, computadoras etc, todos estos se presentan como cargas eléctricas lineales y sus combinaciones R, L, C (elementos pasivos).

a. Resistencia eléctrica

Cuando una resistencia se conecta a una fuente de energía a.c, produce la misma forma de onda manteniendo la corriente y tensión en fase.

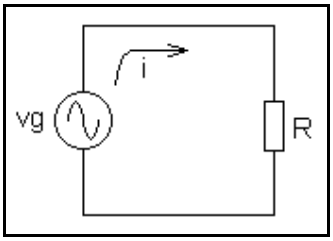


Figura 3.4.1 Resistencia en corriente alterna

$$vg = Vo \cdot sen(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$

La corriente (i):

$$i = \frac{vg}{Z} = \frac{Vo \cdot sen\,(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)}{R + j0} = \frac{Vo}{R}\ sen\,(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$

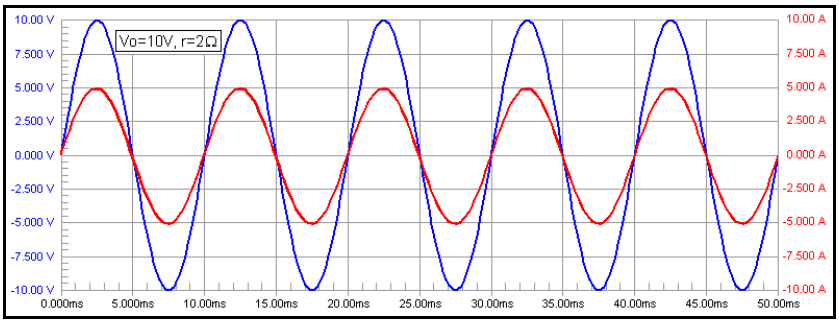


Figura 3.4.2 Curva de la Resistencia en corriente alterna

b. Condensador eléctrico

El capacitor o condensador es un elemento pasivo cuya función es almacenar energía eléctrica debido al campo electrostático que se establece entre sus placas. Cuando el capacitor se carga, recibe y almacena energía; pero no la disipa.

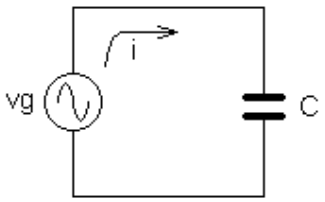


Figura 3.4.3 Capacitor en corriente alterna

El condensador presentará una oposición al paso de la corriente alterna. Dicha oposición se llama reactancia capacitiva. Cuando el condensador está totalmente descargado se comporta como un cortocircuito. Cuando está totalmente cargado como una resistencia de valor infinito.

El circuito presentará una impedancia al paso de la corriente alterna dada por:

$$Z = 0 - jXc$$

$$Xc = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

Ecuación 3.4.1. Reactancia capacitiva

Donde:

Xc es la reactancia capacitiva.

Como puede apreciarse, la impedancia que presenta un condensador sólo tiene componente imaginaria o reactiva.

$$V = \frac{q}{C}$$

$$vg = Vo \cdot \text{sen}\,(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) = \frac{q}{C}$$

$$Vo \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \cos\,(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) = \frac{i}{C}$$

$\cos \alpha = sen\ (\alpha + 90°)$:

$$i = \frac{Vo}{Xc} \cdot \text{sen}\,(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + 90°)$$

Cuando el condensador se conecta a una fuente de energía a.c, la corriente se adelanta 90º con respecto a la tensión, manteniendo la misma forma de onda.

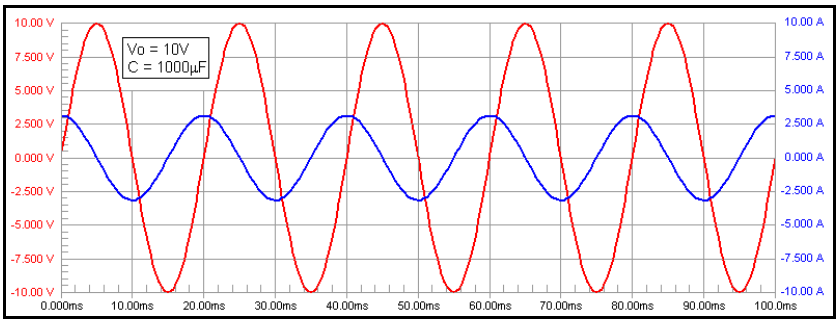


Figura 3.4.4 Curva del Capacitor en corriente alterna

c. Inductor en corriente alterna

Los inductores están diseñados para producir un campo magnético al pasar corriente sobre este.

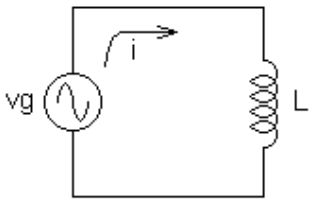


Figura 3.4.5 Inductor en corriente alterna

El inductor presentará oposición al paso de la corriente eléctrica y ésta será reactiva, de manera similar al caso capacitivo.

$$Xl = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

Ecuación 3.4.2.Reactancia inductiva

Donde:

XL es la reactancia inductiva de la bobina:

$$V = L \cdot \frac{di}{dt}$$

$$vg = Vo \cdot sen\,(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) = L \cdot \frac{di}{dt} \Rightarrow Vo \cdot sen\,(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \cdot dt = L \cdot di$$

Integrando los dos miembros:

$$i = \frac{Vo}{X_L} \cdot sen\,(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t - 90^o)$$

Cuando una inductancia se conecta a una fuente de energía a.c, las señales de tensión y corriente mantienen la misma forma de onda pero desfasadas 90º, la corriente se atrasa 90º con respecto a la tensión.

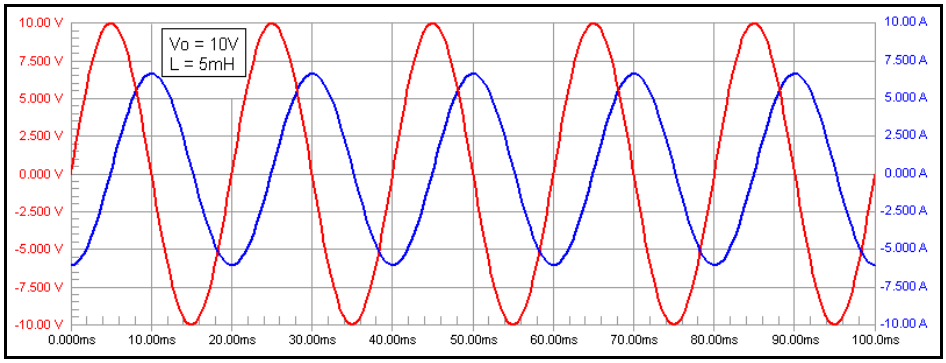


Figura 3.4.6 Curva del Inductor en corriente alterna

3.5 PÉRDIDAS EN EL TRANSPORTE DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

El sistema eléctrico puesto que no es ideal mantiene elementos distribuidos que durante la operación se presentan como cargas no visibles que producen pérdidas, entre las cuales se presentan a continuación:

- Resistividad
- Capacitancia

✓ **Resistividad:**

La resistividad es la resistencia que ofrece un material frente al paso de corriente eléctrica, dando origen a un buen o mal conductor.

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Ecuación 3.5.1. Resistencia

Donde: ρ es la resistividad del conductor (Ω·m), l su longitud y S la sección en mm^2.

La resistencia del cable depende de:

- **Diámetro o área de la sección transversal**: La conductividad disminuye al disminuir el grosor del cable.

- **Longitud:** La conductividad de un cable es inversamente proporcional a la longitud y la resistencia es directamente proporcional a la longitud.

- **Cambios de temperatura:** Al paso de la corriente, la resistividad se ve incrementada ligeramente al aumentar su temperatura.

✓ **Capacitancia:**

La capacitancia es la capacidad que tienen los conductores eléctricos de poder admitir cargas cuando son sometidos a un potencial.

A medida que se transfiera mas carga al conductor, el potencial del conductor se vuelve más alto, lo que hace más difícil transferirle mas carga, esto dependerá del tamaño del conductor.

CAPITULO 4

PERTURBACIONES COMUNES DE LA RED ELÉCTRICA

4.1 INTRODUCCIÓN

Con el advenimiento de la electrónica, ha traído beneficios en la optimización de procesos, proporcionando mayor comodidad y dependencia eléctrica, pero este hecho ha producido una conversión drástica de la característica de las cargas en las instalaciones modernas, esto se debe al incremento en la demanda de energía y la mayoría a estos nuevos equipos electrónicos que se presentan como cargas no lineales.

Entre las perturbaciones comunes que degradan la calida de la energía eléctrica se tiene:

- Armónicos
- Fluctuaciones de voltaje
- Flicker
- Huecos de tensión
- Transitorios

4.1.1 Armónicos

Los armónicos son señales eléctricas con frecuencias múltiplos de la fundamental, son distorsiones de las ondas senoidales de tensión o corriente de los sistemas eléctricos ocasionados por el uso de cargas no lineales a lo largo de la red de Distribución.

La presencia de armónicos en la red genera problemas como: perdidas de potencia activa, sobretensiones en los condensadores, errores de medición, mal funcionamiento de protecciones, deterioro de dieléctricos, disminución de la vida útil de los equipos, entre otros.

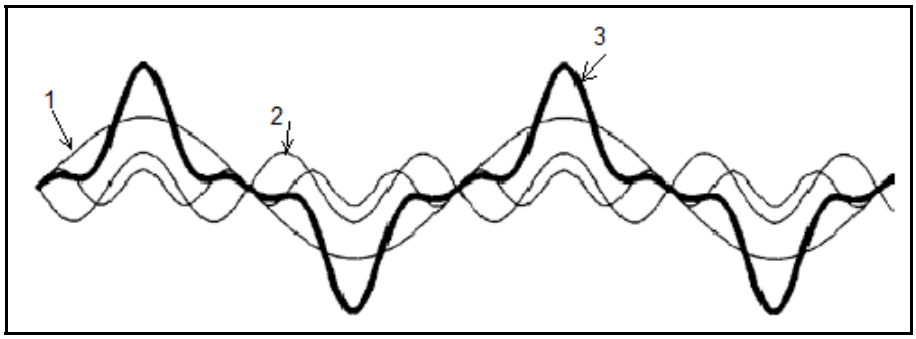


Figura 4.1.1 Armónicos en la red

Donde:

1: Componente Fundamental
2: Armónicos
3: Onda distorsionada fundamental mas armónicos

Para los armónicos se tiene:

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

Ecuación 4.1.1. Factor de distorsión armónica

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

Ecuación 4.1.2. Porcentaje de la distorsión armónica

Donde:

- V_i': factor de distorsión armónica individual de voltaje.
- THD: factor de distorsión total por armónicos, expresado en porcentaje
- V_i: valor eficaz (rms) del voltaje armónico "i" (para i = 2... 40) expresado en voltios.
- V_n: voltaje nominal del punto de medición expresado en voltios.

El Análisis matemático de los armónicos se realiza mediante series de Fourier como por ejemplo podemos citar: convertidores estáticos de frecuencia que presentan formas de onda del tipo no senoidal periódicas en sus señales de corriente y/o tensión, los que son representados por la ecuación matemática "Series Trigonométricas de Fourier" donde esta representa cualquier señal periódica como la suma o superposición de funciones senoidales.

Serie de Fourier de una función:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [\ a_n * \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + \ b_n * sen\left(\frac{2\pi nt}{T}\right)\ ]$$

Ecuación 4.1.3. Función de serie de Fourier

Donde:

- T: es el período de la función
- n: orden de la armónica
- a_0 : valor medio de la función
- a_n, b_n magnitudes de las armónicas o coeficientes de las series.

Vector armónico: $A_n < \phi_n = a_n + jb_n$

Magnitud y ángulo: $A_n = \sqrt{(a_n)^2 + (b_n)^2}$

$$\phi_n = \tan^{-1}\left(\frac{b_n}{a_n}\right)$$

Coeficientes de Fourier:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} x(wt) * d(wt)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} x(wt) * \cos(nwt) * d(wt)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} x(wt) * sen(nwt) * d(wt)$$

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$; ω es la frecuencia angular en rad/s.

4.1.2 Fluctuaciones de Voltaje

Las fluctuaciones de voltaje son una serie de cambios aleatorios en el voltaje. Estas perturbaciones son causadas por cargas que presentan variaciones continuas y rápidas de corriente, entre los equipos más comunes que provocan variaciones de voltaje en el sistema de transmisión y distribución son los soldadores y arcos de fundición.

Entre los disturbios mas comunes se contemplan los siguientes:

- Variaciones de voltaje de corta duración
- Variaciones de voltaje de larga duración

a) Variaciones de voltaje de corta duración

Las variaciones de voltaje de corta duración están consideradas como aquellas elevaciones o disminuciones de voltaje que tienen una duración de ½ ciclo por minuto.

b) Variaciones de voltaje de larga duración

Estas variaciones pueden ser mayores a 1 minuto de duración y se deben a la mala calidad de transformadores, mala conexión o desconexión de bancos de capacitores con el objetivo de compensar potencia reactiva, entre otros.

4.1.3 Flicker

Los Flicker son llamados también parpadeos y son variaciones rápidas de voltaje de corta duración, este efecto puede ser detectable por el ojo humano.

Los flicker son ocasionados por equipos instalados a lo largo de las instalaciones eléctricas, como por ej:

- hornos de arco, equipos de soldadura, motores de gran potencia, generadores eólicos, convertidores de frecuencia, bombas, compresores, grúas y otros equipos de cargas cíclicas.

- Cargas monofásicas: hornos microondas, impresoras láser, lámparas de descarga y cualquier electrodoméstico con regulación automática.

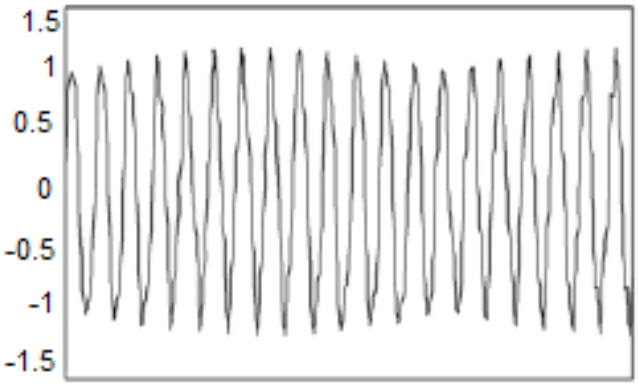


Figura 4.1.2 Flicker provocado por un horno de arco

4.1.4 Huecos de Tensión

El hueco de tensión es la reducción repentina y brusca de la tensión en una fase y posterior recuperación de la misma puede darse en milisegundos.

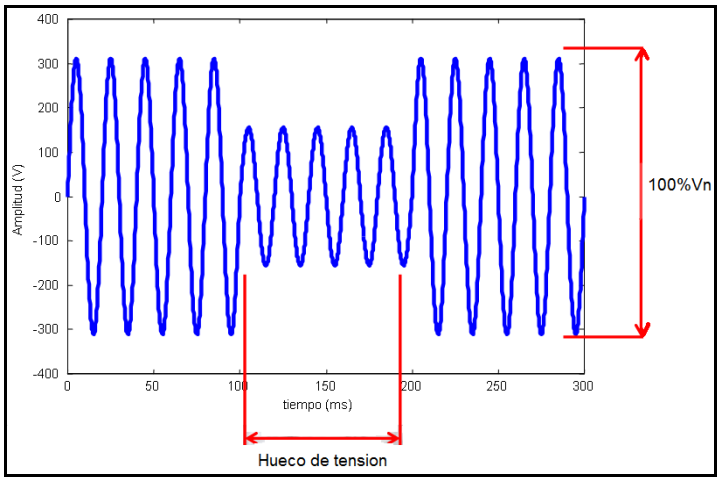


Figura 4.1.3 Hueco de tensión

Causas de la presencia de Huecos de tensión:

- Cortocircuitos en las líneas provocados por ramas de árboles, viento y otras causas naturales y/o artificiales.
- Arranque de grandes cargas

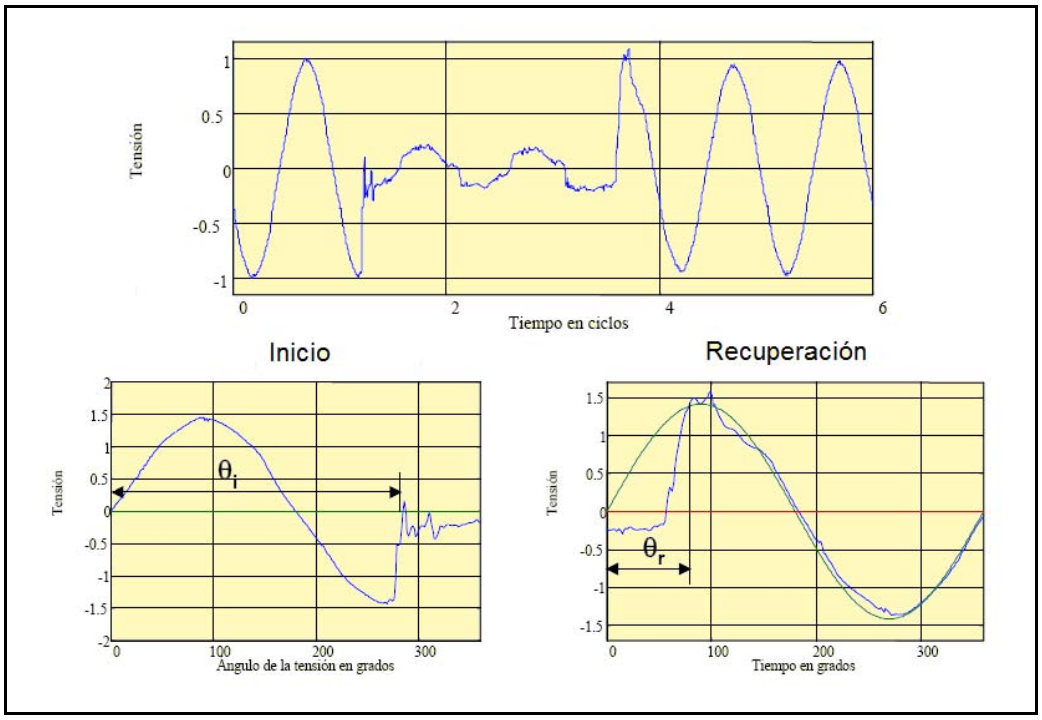


Figura 4.1.4 Punto de inicio y de recuperación de un Hueco de tensión

La seriedad de los huecos dependerá de: la impedancia y localización de la falla, conexiones de los transformadores, conexión de la carga, puesta a tierra del sistema, entre otros factores.

a. Sags de voltaje

Los sags son reducciones de voltaje de corta duración, y pueden causar interrupciones en equipos sensibles tales como: variadores de velocidad, relés y robots. Los sags son ocasionados a menudo por una operación del interruptor, el arranque de un motor o la conmutación de condensadores. Los sags de voltaje son los problemas de energía más comunes.

Causas más comunes de los sags

- Descargas atmosféricas.
- Cortocircuito.
- Arranque de cargas grandes

b. Subidas de tensión (swells)

Las subidas de tensión representan el fenómeno opuesto a los huecos, es decir, a la desconexión repentina de grandes máquinas o motores de la red. También pueden ser causados por la conexión de grandes condensadores.

Por lo general, son fenómenos menos frecuentes que los huecos y microcortes.

Causas más comunes de los swells

- Disminuciones repentinas de carga.
- Recuperaciones después de una falla.

c. Microcortes del voltaje

Los microcortes son caídas muy breves en el rango de los microsegundos o pocos milisegundos del suministro eléctrico.

Son causadas principalmente por maniobras de transferencia en las centrales de distribución de energía, inclusión de cargas muy grandes o cortocircuitos en la línea.

De todos los parámetros que influyen en la calidad de la onda de suministro, los huecos y microcortes son, sin duda, los responsables de la mayor parte de los problemas y averías sufridos por la industria.

4.1.5 Transitorios

Estas perturbaciones son generadas por cambios repentinos en la red eléctrica, donde el impulso es un cambio repentino de potencia a una frecuencia distinta de la fundamental, la causa más común son las descargas atmosféricas.

a. Sobretensiones transitorias

Las sobretensiones transitorias son variaciones bruscas del valor instantáneo de la amplitud de la tensión, esto quiere decir que pueden llevar a valores superiores al valor nominal de esta. La duración fluctúa entre los microsegundos.

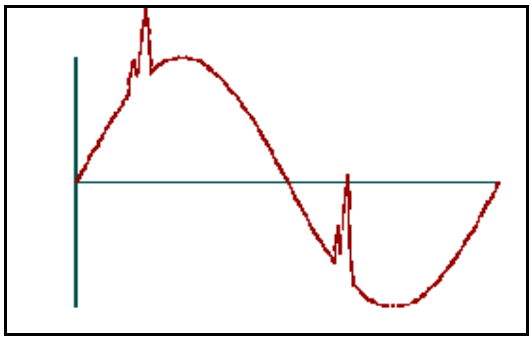


Figura 4.1.5 Sobretensiones

Causas de sobretensiones transitorias:

- **Impactos directos:** estos provocan que los conductores de la instalación se vean sometidos en breves períodos de tiempo a potenciales muy elevados ocasionando la destrucción instantánea de los equipos electrónicos conectados a la instalación

- **Impactos indirectos:** Los rayos caen lejos pero el funcionamiento de la instalación eléctrica pueden verse afectada.

b. Tipos de sobretensiones transitorias

Dentro de las sobretensiones transitorias se tiene: sobretensiones impulsivas y las sobretensiones oscilatorios, detalladas a continuación

✓ Sobretensiones impulsivas

Son aquellas perturbaciones unidireccionales causadas por descargas eléctricas, estas poseen una mayor magnitud pero baja energía. Se caracteriza por su tiempo de elevación y decaimiento lo que pueden ser dados a conocer por el contenido espectral transitorio.

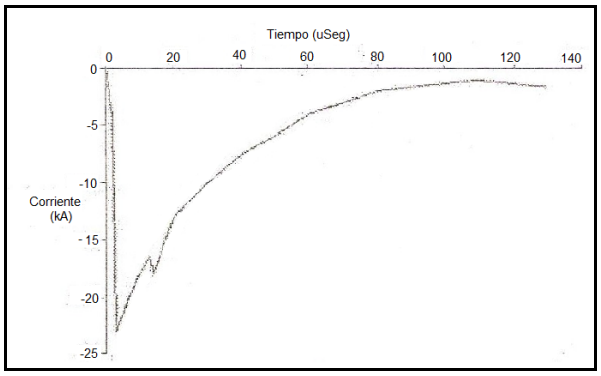


Figura 4.1.6 Transitorio impulsivo, por caída de un rayo

✓ Sobretensiones oscilatorias

Las sobretensiones oscilatorias consisten en un cambio muy rápido de polaridad del valor instantáneo de voltaje, estas sobretensiones son originadas por malas conexiones, desconexiones fuertes y otros.

En general las sobretensiones transitorias pueden afectar a todos los elementos del sistema eléctrico, dependiendo de la magnitud de la sobretensión.

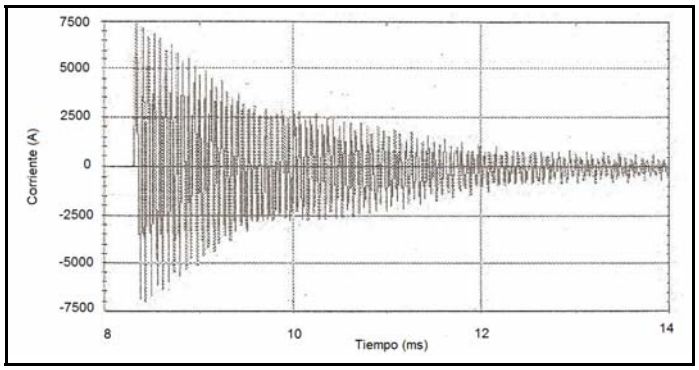


Figura 4.1.7 Transitoria Oscilatorio, energización de capacitores

CAPITULO 5

CARGAS NO LINEALES

5.1 CARGAS NO LINEALES DE USO INDUSTRIAL

Las cargas no lineales están definidas como aquellas que generan corrientes no senoidales, es decir, corrientes que además de la componente fundamental tienen otras señales eléctricas con frecuencias múltiplos de la fundamental, conocidas como armónicos, que degradan la calidad de la energía eléctrica, afectando la calidad del suministro.

La red necesita estar libre de esta distorsión armónica para prevenir el funcionamiento inadecuado de los equipos.

Las cargas no lineales tradicionales como: horno de arco y de inducción, sumado al desarrollo de la tecnología de control por medio de equipamiento electrónico de potencia controlado por elementos de estado sólido, ha llevado a un incremento significativo de la cantidad de cargas no lineales en el sistema.

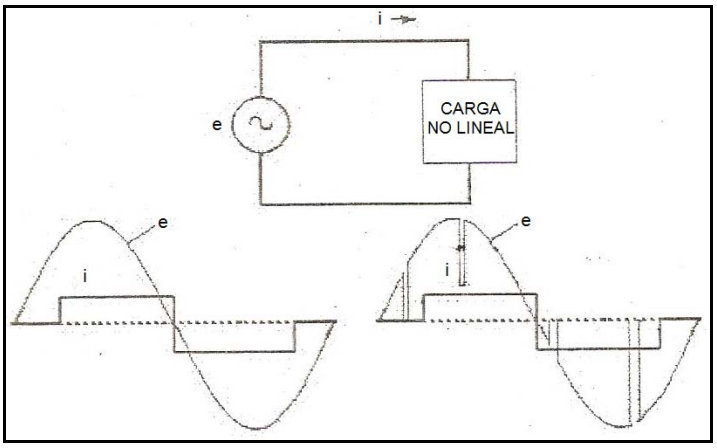


Figura 5.1.1 Formas de Onda por causa de cargas no lineales

Entre los principales equipos en la industria moderna que producen armónicos y otras perturbaciones se pueden citar entre otras las siguientes:

- Rectificadores AC/DC
- Fuentes switching
- Equipos de arco electrónico
- Lámparas fluorescentes
- Variadores de frecuencia

5.2 RECTIFICADORES AC/DC

Los Rectificadores ac/dc son dispositivos que convierten un voltaje de entrada alterno en uno directo. Estos se clasifican en:

- Rectificadores monofásicos de media onda
- Rectificadores monofásicos de onda completa

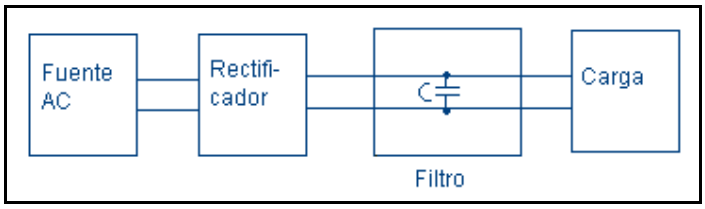


Figura 5.2.1 Diagrama en bloques de un rectificador

5.2.1 Rectificador de media onda

Este rectificador esta constituido básicamente por un diodo en serie con la carga (resistiva para este caso). En la entrada del circuito tenemos 60 Hz, este voltaje es transferido a la carga a través del diodo con la restricción que solo conducirá los semiciclos positivos y el voltaje a la salida será cero, mientras a la entrada del circuito existirán semiciclos negativos.

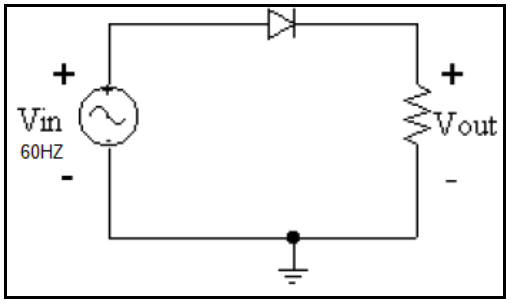


Figura 5.2.2 Rectificador de media onda

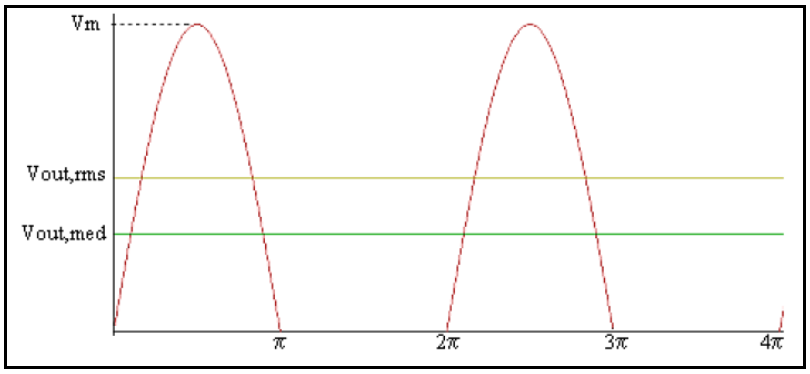


Figura 5.2.3 Forma de onda a la salida del rectificador

Voltaje rms a la salida:

$$Vout,rms = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} V_m{}^2 Sen^2(\omega t)\, d\omega t}$$

$$Vout,rms = \frac{Vm}{2}$$

Voltaje pico de la fuente de alimentación:

$$V_m = \sqrt{2} \cdot Vin,rms$$

$$V_{out,med} = \frac{V_m}{\pi}$$

$$i_{out,rms} = \frac{V_{out,rms}}{R}$$

$$F.P. = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

5.2.2 Rectificador de Onda Completa

El rectificador de onda completa es un circuito electrónico empleado para convertir una señal de corriente alterna de entrada (Vin) en corriente continua de salida (Vout) pulsante. A diferencia del rectificado de media onda, en este caso, la parte negativa de la señal se convierte en positiva.

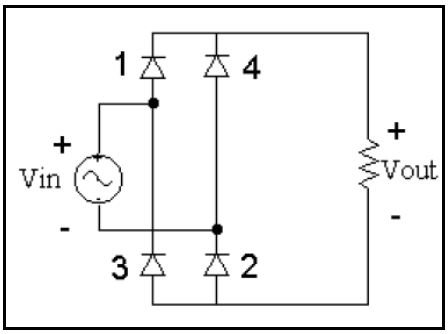


Figura 5.2.4 Rectificador de onda completa

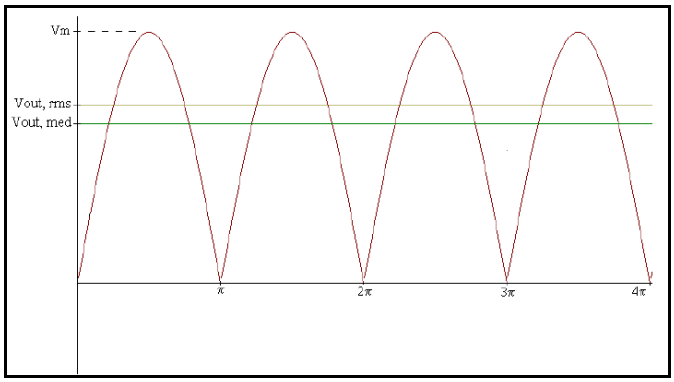


Figura 5.2.5 Forma de onda a la salida del rectificador

Voltaje de salida rms:

$$Vout, rms = \frac{Vm}{\sqrt{2}}.$$

$$V_m = \sqrt{2} \cdot Vin, rms$$

Potencia de la carga:

$$P = \frac{Vout,rms^2}{R}$$

Factor de potencia:

$$F.P. = \frac{Vout,rms \cdot Iout,rms}{Vin,rms \cdot Iin,rms}$$

5.2.3 Rectificadores trifásicos:

Los equipos más difundidos que incluyen rectificador trifásico son SAIs (Sistemas de Alimentación Interrumpida) y Variadores de Velocidad o Convertidores de Frecuencia.

Estos rectificadores inyectan armónicos de orden:

$$n = k \cdot p \pm 1$$

Donde:

- n = orden del armónico
- p = número de pulsos del rectificador
- k = entero positivo 1, 2, 3 ...

Las amplitudes de corrientes armónicas características son inversamente proporcionales al orden del armónico, al igual que en el rectificador monofásico.

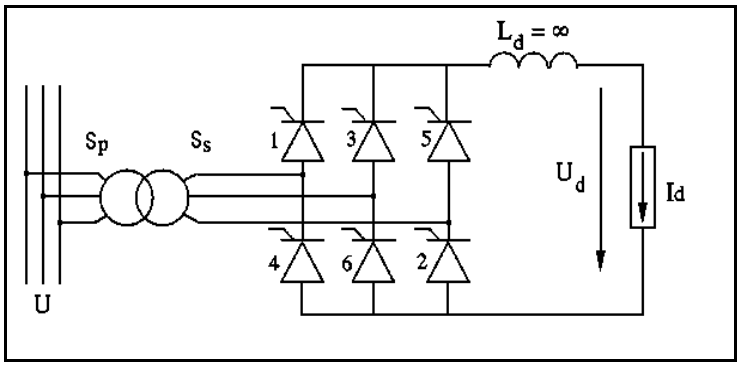


Figura 5.2.6 Rectificador Trifásico

5.3 FUENTES CONMUTADAS (SWITCHING)

Las fuentes de conmutación son dispositivos que utilizan control de fase como sistema regulador, sus conmutadores son elementos de estado sólidos como por ejemplo: triac, transistores, tiristores, actualmente se utilizan en muchas aplicaciones de la industria electrónica, gracias a su capacidad de entregar niveles en su salida de voltaje suficientemente estables.

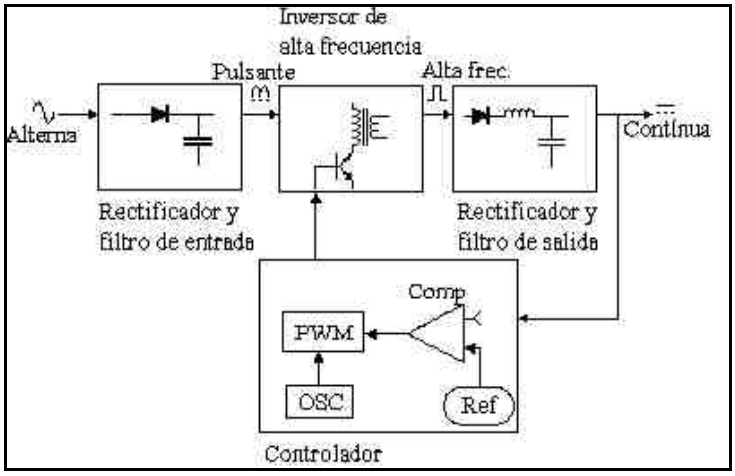


Figura 5.3.1 Fuente conmutada en bloques

En la figura 5.3.1, el primer bloque rectifica y filtra la tensión alterna de entrada convirtiéndola en una tensión continua pulsante.

El segundo bloque se encarga de convertir esa continua en una onda cuadrada de alta frecuencia la que es aplicada a una bobina o al primario de un transformador (tercer bloque).

Luego el segundo bloque rectifica y filtra la salida de alta frecuencia del bloque anterior, entregando así una continua pura.

El cuarto bloque se encarga de comandar la oscilación del segundo bloque. Este bloque consiste de un oscilador de frecuencia fija, una tensión de referencia, un comparador de tensión y un modulador de ancho de pulso (PWM).

El modulador recibe el pulso del oscilador y modifica su ciclo de trabajo según la señal del comparador, el cual entrega la tensión continua de salida del tercer bloque con la tensión de referencia.

La figura 5.3.2 muestra la forma de la corriente en una fuente monofásica tipo conmutada, donde la corriente está presente por cortos períodos por cada medio ciclo de la tensión fundamental.

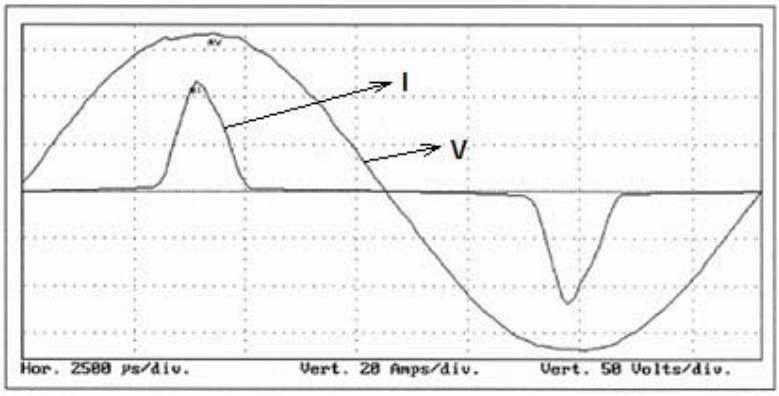


Figura 5.3.2 Fuente de corriente monofásica tipo Conmutada

- ✓ **Ventajas**

  - Una importante ventaja de estas fuentes conmutadas es su eficiencia que esta entre 70% a 90%, que comparado con las fuentes lineales, en el mejor de los casos alcanzan un 60% de eficiencia.
  - Volumen y costo menor a mayor potencia.

- ✓ **Desventajas**

  - La tecnología de conmutación es esencialmente ruidosa, produciendo rizado además de emisiones electromagnéticas o conducidas que pueden afectar equipos muy sensibles.
  - Las fuentes conmutadas presentan un costo elevado debido a su complejidad de diseño y a los componentes utilizados.

5.4 EQUIPOS DE ARCO ELÉCTRICO

5.4.1 Hornos de arco

Los hornos de arco son dispositivos de alta potencia que se usan para la fabricación de acero a partir de chatarra. Su método de funcionamiento consiste en la producción de un arco voltaico de gran energía necesaria para fundir.

Este tipo de horno es considerado como el mayor productor de fluctuaciones de tensión ya que posee un alto factor de carga y de potencia durante su operación. Otras perturbaciones introducidas son los armónicos, flicker y otros que afectan todo el sistema eléctrico.

Figura 5.4.1 Horno de Arco

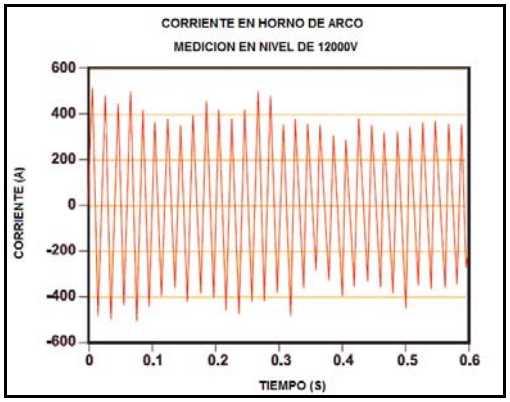


Figura 5.4.2 Forma de onda de un horno de arco eléctrico

5.4.2 Soldadores eléctricos

Las máquinas eléctricas de soldadura básicamente son equipos que permiten modificar la corriente de la red de distribución, en una corriente tanto alterna como continua de tensión más baja, ajustables a la intensidad necesaria según las características del trabajo a realizar.

Para unir dos metales de igual o parecida naturaleza mediante soldadura eléctrica al arco es necesario calor y material de aporte (electrodos). El calor se obtiene mediante el mantenimiento de un arco eléctrico entre el electrodo y la pieza a soldar.

Existe un problema cuando un transformador alimenta a muchos soldadores que trabajan al mismo tiempo, la caída de tensión en ese momento produce fluctuaciones de tensión y soldaduras frías (sueldas de mala calidad).

Figura 5.4.3 Soldador eléctrico

5.5 LÁMPARAS FLUORESCENTE

La luz es generada por medio de una descarga eléctrica entre dos electrodos, en el interior de un tubo lleno de gas. Una de ellas es la lámpara fluorescente.

Esta consta de un tubo de vidrio de diámetro y longitud variables según la potencia, recubierto internamente de una capa de sustancia fluorescente.

En los extremos del tubo se encuentran los electrodos (ó cátodos) de wolframio, recubiertos de una pasta emisora de electrones. Interiormente tiene gas argón a baja presión y una pequeña cantidad de mercurio.

Las lámparas fluorescentes son cargas no lineales por naturaleza por lo que la corriente absorbida por estos no es sinusoidal, siendo altamente no lineales y dan lugar a corrientes armónicas impares de magnitud importante, estas lámparas son utilizadas para la iluminación doméstica e industrial.

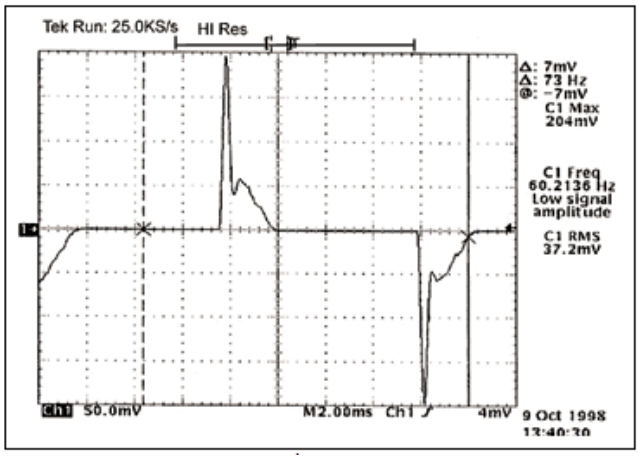


Figura 5.5.1 Forma de onda de una lámpara fluorescente compacta

5.6 VARIADORES DE FRECUENCIA

El variador de frecuencia es un dispositivo que permite controlar la frecuencia de alimentación suministrada a la carga.

Su principal uso es el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna ac, donde la velocidad del motor esta dada por:

$$N = \frac{120 * f}{P} \left(\frac{r}{\min}\right)$$

Ecuación 5.6.1. Velocidad del motor

Donde:

- *f*= frecuencia.
- *P*= número de polos.

Los principales factores a considerar para el diseño de un sistema de regulación de velocidad son:

- Límites o gama de regulación.
- Progresividad o flexibilidad de regulación.
- Estabilidad de funcionamiento a una velocidad dada.
- Aumento o disminución con respecto a la velocidad nominal.
- Tipo de carga admisible a las diferentes velocidades.
- Condiciones de arranque y frenado.

5.6.1 Principio de Funcionamiento

Los controladores de frecuencia variable de estado sólido están compuestos de un rectificador que convierte la corriente alterna de la línea de alimentación a corriente directa y de una segunda sección llamada inversor que convierte la corriente directa en una señal de corriente alterna de frecuencia ajustable que alimenta al motor.

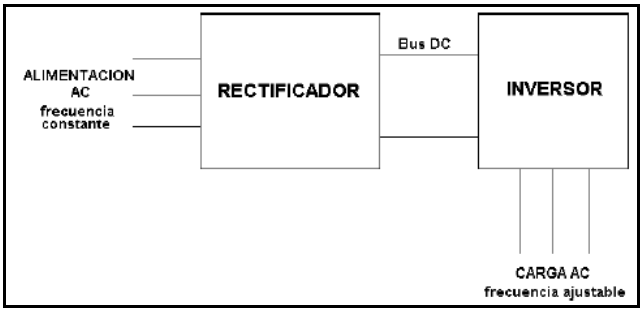


Figura 5.6.1 Diagrama en bloque del variador de frecuencia

a. Rectificador

La función del rectificador es convertir la señal de voltaje de alimentación de ac a dc y controlar el voltaje al inversor para mantener constante la relación Volts/Hz, siendo los siguientes métodos básicos los más usados:

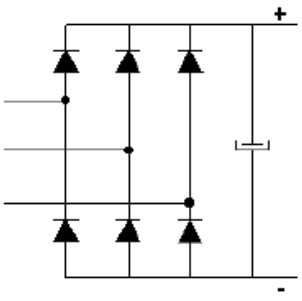
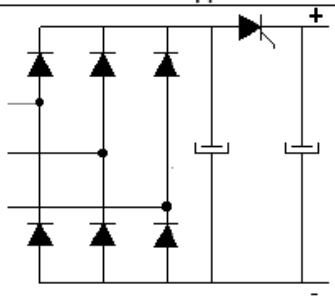
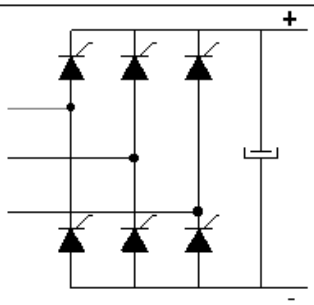
Diodos	DC Chopper	Tiristores
		
Control: No Voltaje CD: Constante Rizo CD: Bajo V/Hz: Se ajusta en Inversor Inversor: PWM FPd: Alto para todas las velocidades Armónicas: Alto Regeneración: No	Control: SCR, GTO, Transistor Voltaje CD: Variable Rizo CD: Varía V/Hz: Rectificador-Inversor Inversor: 6 pasos FPd: Se reduce con la velocidad Armónicas: Alto Regeneración: No	Control: SCR Voltaje DC: Variable Rizo CD: Varía V/Hz: Rectificador-Inversor Inversor: 6 pasos, PWM FPd: Se reduce con la velocidad Armónicas: Alto Regeneración: Sí

Figura 5.6.2 Métodos de rectificación de las señales ac

b. Inversor

El inversor utiliza dispositivos de potencia de estado sólido y dispositivos en configuración típicas como puentes que son controlados por microprocesador para conmutar el voltaje del bus de dc y producir una señal de ac de frecuencia ajustable que alimenta al motor.

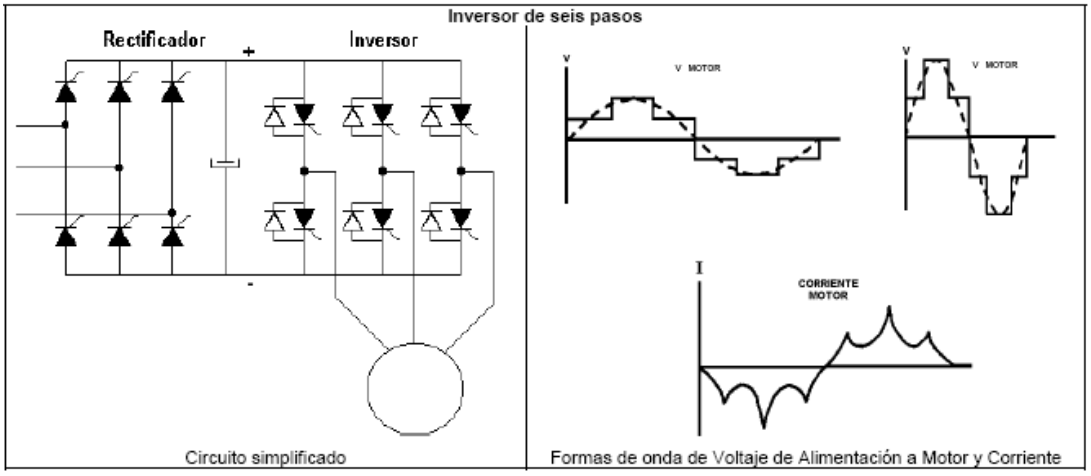


Figura 5.6.3 Métodos de inversión de señales ac de 6 pasos

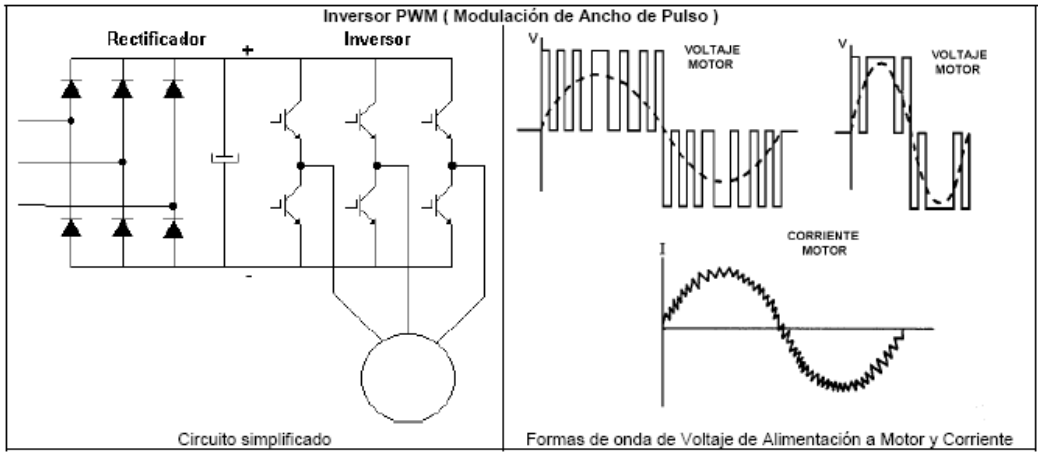


Figura 5.6.4 Métodos de inversión de señales ac por modulación PWM

Un inversor en puente, los SCR's o IGBT's se encienden y apagan en una secuencia tal que producen un voltaje en forma de pulsos cuadrados que se alimentan al motor.

Para variar la frecuencia del motor, el número de pulsos y su ancho se ajustan resultando en un tiempo de ciclo mayor para bajar la velocidad o tiempo de ciclo menor para subir la velocidad. Para cada

frecuencia específica hay un número óptimo de pulsos y anchos de los mismos que producen una menor distorsión armónica en la corriente.

El cambio de voltaje requerido para mantener la relación Volts-Hz constante conforme varía la frecuencia, se realiza por medio del microprocesador de propósito dedicado que controla el ancho de los pulsos y los demás parámetros para conseguir un adecuado funcionamiento.

5.6.2 Aplicaciones de procesos típicos que usan motores con variadores de frecuencia

- ✓ **Transportadoras.** Controlan y sincronizan la velocidad de producción de acuerdo al tipo de producto que se transporta, para dosificar, evitar ruidos y golpes en transporte de botellas y envases, arrancar suavemente y evitar la caída del producto que se transporta.

- ✓ **Bombas y ventiladores centrífugos.** Controlan el caudal, uso en sistemas de presión constante y volumen variable. En este caso se obtiene un gran ahorro de energía porque el consumo varía con el cubo de la velocidad, es decir que para la mitad de la velocidad, el consumo es la octava parte de la nominal.

- ✓ **Bombas de desplazamiento positivo.** Control de caudal y dosificación con precisión, controlando la velocidad. Por ejemplo en bombas de tornillo, bombas de engranajes. Para transporte de pulpa de fruta, pasta, concentrados mineros, aditivos químicos, chocolates, miel, barro, etc.

- ✓ **Ascensores y elevadores de carga.** Para arranque y parada suaves manteniendo el par del motor constante del motor constante, y diferentes velocidades para aplicaciones distintas.

- ✓ **Centrífugas.** Se consigue un arranque suave evitando picos de corriente y velocidades de resonancia.

- ✓ **Prensas mecánicas y balancines.** Se consiguen arranques suaves y se evitan los desperdicios de materiales mediante velocidades bajas en el inicio de la tarea.

- ✓ **Máquinas textiles.** Para distintos tipos de materiales, inclusive para telas que no tienen un tejido simétrico se pueden obtener velocidades del tipo aleatorio para conseguir telas especiales.

- ✓ **Compresores de aire.** Se obtienen arranques suaves con máximo par del motor y menor consumo de energía en el arranque.

- ✓ **Pozos petroleros.** Se usan para bombas de extracción con velocidades de acuerdo a las necesidades del pozo.

CAPITULO 6

ANÁLISIS Y FORMULACIÓN DE SOLUCIONES

6.1 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

El requisito primordial que debe cumplir todo sistema eléctrico es la fiabilidad del suministro. La energía eléctrica, como producto, exige tener en consideración la calidad, continuidad de suministro y la forma de onda.

Para lo cual se citaran recomendaciones para eliminar las perturbaciones de la red eléctrica.

- Uso de filtros : pasivos, activos, híbridos (pasivo-activo)
- Filtros de rechazo
- Transformadores de factor K
- Transformadores de aislamiento
- Supresores de voltaje
- Supresores de sobrevoltajes transitorios
- Reguladores de voltaje
- UPS
- Supresores de pico
- Puestas a tierra

Filtros:

Dispositivo que discrimina una determinada frecuencia o gama de frecuencias de una señal eléctrica que pasa a través de él.

6.2 FILTROS PASIVOS

Los filtros pasivos están formados únicamente por elementos pasivos como: resistencias (R), condensadores (C) y/o bobinas (L). Las reactancias inductivas aumentan su impedancia al aumentar la frecuencia, a la inversa que los condensadores.

Con el bloqueo que presentan las bobinas y las absorciones de los condensadores pueden eliminarse en gran manera las corrientes armónicas. Estos elementos forman redes que pueden estar conectadas en serie, paralelo o mixto.

6.2.1 Filtro pasabajos

Los filtros pasa bajos son dispositivos que permiten el paso de frecuencias bajas atenuando las altas.

La figura 6.2.1 presenta un LC con el objetivo de reducir los armónicos, para mantener a la instalación eléctrica libre de esta perturbación.

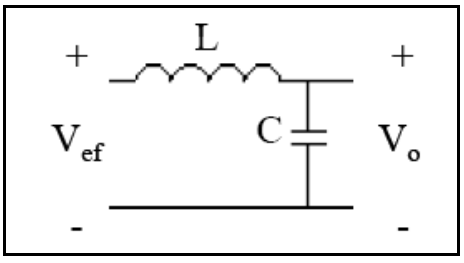


Figura 6.2.1 Filtro de salida pasa bajos

- ✓ **Ventajas:**

  - Amplio espectro y reducción de armónicos filtrados.

  - Mejora local del factor de potencia, en consecuencia reducción de corriente fundamental, las posibles resonancias con la instalación y modificaciones no se ven afectados estos filtros.

  - Pueden ser utilizados para una carga o un conjunto de ellas.

- ✓ **Desventaja:**

  - Caída de tensión que se ve compensada por los condensadores.

6.2.2 Filtro pasivo serie

El filtro pasivo serie se encuentra formado por bobinas conectadas en serie con la carga no lineal, su funcionamiento se basa en la impedancia opuesta por la bobina al paso de la corriente es creciente con la frecuencia, cuanto mayor sea el orden de un armónico, mayor será la impedancia que encuentre en la bobina.

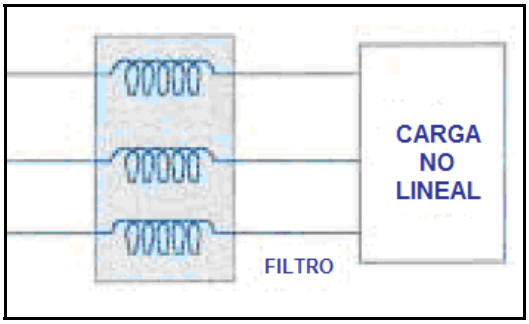


Figura 6.2.2 Filtro pasivo serie

El filtro sintonizado, se colocan condensadores en paralelo con las bobinas formando un circuito resonante paralelo a la frecuencia de un armónico para que quede atrapado

- ✓ **Ventajas:**

  - Bloquean las corrientes armónicas en los dos sentidos, esto es importante ya que se evita que la carga se vea afectada por armónicos procedentes de otro punto de la instalación y viceversa

  - Cuando el sistema incluye variadores de velocidad de c.a., un método sencillo de filtrado de los armónicos consiste en colocar una inductancia en cada fase de la línea de alimentación en serie con los conductores. Esto tiene el efecto de alisar los pulsos escarpados.

  - Protección de la carga contra variaciones bruscas de tensión y corriente que pueden afectar a equipos electrónicos.

- ✓ **Desventajas:**

  - Los elementos del filtro deben tener sección suficiente para soportar toda la corriente de la carga, además provocan caídas de tensión en la línea por la corriente de frecuencia fundamental.

  - Para su instalación y mantenimiento es necesario interrumpir la carga.

6.2.3 Filtros paralelo o de absorción

Este filtro se basa en la disminución de la impedancia de los condensadores con la frecuencia, este tipo de filtro “absorbe” las corrientes armónicas.

En su mayoría funcionan con ramas L-C en resonancia serie, sintonizados en la proximidad de la frecuencia armónica ha ser absorbida, su eficacia depende en gran medida de su factor de calidad.

- ✓ **Ventaja:**
  - Conexión sin interrupción de la carga.

- ✓ **Desventajas:**
  - Si se sintonizan se debe utilizar una batería para cada orden de armónico a cancelar.
  - En ciertas ocasiones absorben armónicos provenientes de otros puntos de la red, sobrecargándolo, ya que no esta diseñado para ese trabajo.
  - Tener en cuenta las variaciones de las frecuencias de resonancia al momento que se realice una modificación en las instalaciones.

6.3 FILTROS ACTIVOS

Los filtros activos son circuitos compuestos por resistencias, condensadores y amplificadores operacionales, que conectados junto a la carga no lineal es un inversor PWM (modulación por ancho de pulso) que inyecta armónicos de la misma amplitud, pero está en contrafase de la fuente de armónicos, siendo estos eliminados debido a su sumatoria, consiguiendo una onda sinusoidal de corriente casi pura.

Los filtros activos durante los últimos años han significado una solución para eliminar los problemas que causan los armónicos en las zonas industriales

- ✓ **Ventajas:**

  - Equilibran las fases.
  - Tratan cada fase por separado.
  - Reducción de los armónicos de corriente que circulen por la red.
  - Reducción de los armónicos de tensión en los puntos de conexión de las cargas.
  - Regulación de la tensión y reducción del Flicker.
  - Pueden compensar el factor de potencia, por lo cual también se les conoce como compensadores.
  - No interfieren con otros elementos de la instalación, lo que elimina posibles resonancias.
  - Se pueden conectar en cualquier punto de la red.
  - No necesitan ajustes tras la instalación.

- ✓ **Desventajas:**

  - Pueden fallar ante transitorios, como desconexión de condensadores.
  - Necesitan de algoritmos de control que implementan procesado digital de señal (DSP), con sensores de tensión y corriente, lo que puede llegar a disminuir su robustez y fiabilidad.
  - Su costo es elevado.

6.4 FILTROS HÍBRIDOS (FILTROS PASIVOS Y ACTIVOS)

Los filtros híbridos son combinaciones de filtros activos con filtros pasivos, para aumentar la potencia a manejar o disminuir los armónicos a tratar por el filtro activo.

La combinación de filtros activos y pasivos permite reducir el tamaño, y por lo tanto el coste de los filtros activos manteniendo las ventajas que presentan estos filtros activos frente a los filtros pasivos

6.4.1 Filtro serie

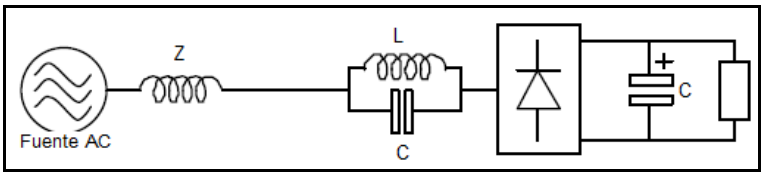


Figura 6.4.1 Filtro serie combinación de un filtro activo y un filtro pasivo

Se obtiene la reducción de:

- Armónicos de tensión en la carga
- Flicker y los microcortes de tensión, y
- Regulación de la tensión

6.4.2 Filtro paralelo

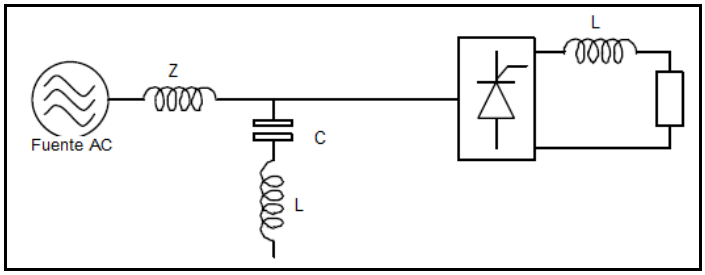


Figura 6.4.2 Filtro paralelo combinación de un filtro activo pasivo

Se obtiene:

- Reducción de armónicos de corriente
- Reducción de la corriente por el neutro, y
- Compensación del factor de potencia

6.5 EQUIPOS COMERCIALES PARA ELIMINACIÓN DE ARMÓNICOS

A continuación se dará características de algunos filtros comerciales.

6.5.1 Filtro de armónicos activo

El filtro para la calidad de la potencia desarrollado por ABB es un filtro activo que ofrece una capacidad sin precedentes para limpiar la red de armónicos. El filtro para la calidad de la potencia elimina los armónicos de una manera controlada. Es fácil de ampliar y de adaptar a los cambios en la red.

El filtro para la calidad de la potencia controla la corriente de línea en tiempo real y procesa los armónicos medidos como señales digitales en un DSP (Procesador Digital de Señal) de alta potencia.

Figura 6.5.1 Filtro de armónicos activo PQF cortesía de ABB

La salida del DSP controla los módulos de un PWM (Pulsos de Amplitud Modulada) que mediante reactancias de línea inyectan corrientes armónicas con exactamente la fase opuesta a aquellas que se deben filtrar.

Características:

- Filtra hasta 20 armónicos simultáneamente.
- Filtra hasta el armónico 50 ^{avo} .
- Filtra mediante control por bucle cerrado para una mejor precisión.
- No se puede sobrecargar.
- Dispone de un sistema de filtrado programable para la elección libre de armónicos.
- Puede filtrar sin generar potencia reactiva.
- Puede generar y controlar el factor de potencia.
- Tiene prioridad de funciones programables.
- No requiere transformadores de intensidad especiales.
- Es modular, fácil de ampliar.

6.5.2 Aplicación de filtros de absorción de corrientes armónicas

Figura 6.5.2 Filtro. Cortesía de COPOSA

Características:

- Reducción del 60% de la corriente armónica.
- Reducción de 7% de kwh por tonelada de producto.

- Incremento de la productividad de 10%. (Eliminación de disparos de plc´s).
- Elevación del factor de potencia de 0.79% a 0.97%.
- Secundario de los transformadores de 1000 y 750 KVA.

6.5.3 Aplicación de filtros de absorción de corrientes armónicas

Figura 6.5.3 Filtro. Cortesía de COPOSA

Características:

- Reducción de 12 % de kwh por tonelada de producto.
- Aumento de productividad de 15%.
- Elevación del factor de potencia de 0.90 a 0.98.
- Transformador sin filtro 2250 kw de carga y 80º C, transformador con filtro 2950 kw de carga y 50º C.

6.6 TRANSFORMADOR PARA CARGAS CON ARMÓNICOS, FACTOR "K"

El contenido de armónicos en un sistema de distribución es indicado por un número llamado Factor "K". Mientras este valor sea mas grande indicara la presencia de una grande cantidad de armónicos en la carga.

El factor "K" se define: "aquel valor numérico que representa los posibles efectos de calentamiento de una carga no lineal sobre el transformador" [9]

Este factor es un indicador de la capacidad del transformador para soportar contenido armónico, mientras se mantiene operando dentro de los límites de temperatura del sistema.

El factor K se indica en las placas de los transformadores donde se detalla la capacidad del transformador para alimentar cargas no lineales sin que este exceda su temperatura. Este es un factor importante a la hora de escoger un transformador adecuado.

$$K = \sum_{n} \left[I_h(pu)\right]^2 \; x \; h^2$$

Donde:

- *n:* orden del armónico
- *I* (pu) : corriente armónica en p.u

Ejemplos de tipos de carga con su factor K:

[9] Influencia de cargas no lineales en transformadores de Distribución

Carga	Factor K
Iluminación por descarga eléctrica.	K-4
UPS con filtrado de entrada opcional.	K-4
Máquinas de soldar.	K-4
Equipo de calefacción por inducción.	K-4
PLCs y controles de estado sólido (diferentes a variadores de velocidad).	K-4
Equipo de Telecomunicaciones (por ejemplo PBX).	K-13
UPS sin filtrado de entrada opcional.	K-13
Circuitos con receptáculo de varios cables en áreas de cuidado general de unidades de salud, salones de clase de escuelas, etc.	K-13
Circuitos con receptáculo de varios cables alimentando equipo de inspección o pruebas en una línea de ensamble o producción.	K-13
Cargas de computadoras Mainframe.	K-20
Variadores de velocidad de estado sólido	K-20
Circuitos con receptáculo de varios cables en áreas críticas de cuidado y en cuartos de operación/recuperación en hospitales.	K-20

Figura 6.6.1 "Cargas con su factor K" [10]

6.7 SISTEMA DE ENERGÍA ININTERRUMPIDA (UPS)

Los UPS (Uninterruptible Power Supply) son dispositivos que mejoran la calidad de la energía eléctrica que llega a las cargas, filtrando subidas y bajadas de tensión y la eliminación de perturbaciones de la red eléctrica.

Los UPS pueden eliminar:

- **Interferencias en la red eléctrica:** un corte de electricidad de un segundo puede provocar que el ordenador se reinicie.

[10] Importancia del "Factor K" en transformadores, Fasor, Power Quatity

- **Cortes de electricidad:** una interrupción en la fuente de alimentación por un tiempo determinado.

- **Sobrevoltaje**: un valor nominal mayor que el valor máximo previsto para el funcionamiento normal de los aparatos eléctricos.

- **Baja tensión**: un valor nominal menor al valor mínimo previsto para el funcionamiento normal de los aparatos eléctricos.

- **Picos de voltaje:** sobrevoltajes transitorios de corta duración, de amplitud alta. Estos picos ocurren cuando se apagan y se encienden dispositivos que demandan mucha alimentación, Esto causa daños a los elementos eléctricos de los equipos.

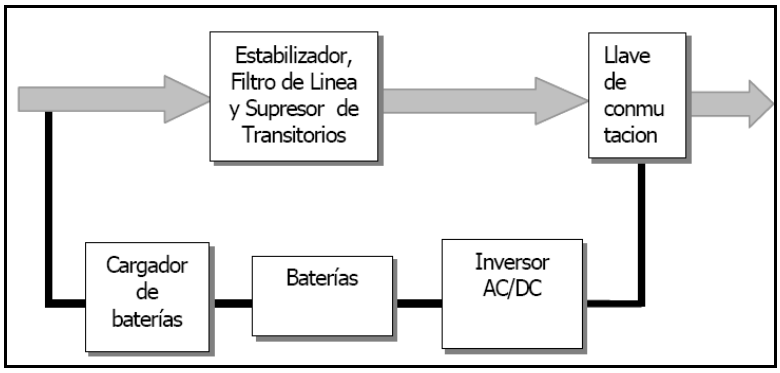


Figura 6.7.1 Esquema de un UPS

6.7.1 Tipos de UPS

- UPS off line
- UPS on line

a. UPS Off line

Los UPS Off line o llamados fuera de línea son aquellos que están esperando que suceda algún desperfecto en la línea de energía eléctrica para entrar en acción.

Pueden ser utilizados en sistemas de iluminación donde el intervalo de tiempo entre la perdida de energía y el funcionamiento del UPS no es crítico.

Estos UPS no son apropiados para la protección de equipos basados en microprocesadores, además de que este tipo de UPS no ofrece protección contra interferencias en la red eléctrica.

Ventajas:

- Altos niveles de eficiencia.
- Tamaño pequeño.
- Bajo costo.
- Estos UPS puede brindar funciones apropiadas de filtrado de ruido y eliminación de sobre tensiones hacia la carga.

b. UPS On line

Este tipo de UPS es aquel que actúa todo el tiempo como un acondicionador de energía, aislando a la carga independiente a los distribuidos en la línea de potencia.

Cuando ocurre una interrupción en el servicio, este tipo de UPS seguirá suministrando energía a la carga por un tiempo.

6.8 SUPRESORES DE SOBREVOLTAJES TRANSITORIOS

Los sobrevoltajes transitorios pueden ser el origen de conexión o desconexión, descargas atmosféricas y descargas electrostáticas, siendo los más severos los transitorios eléctricos producidos por las descargas atmosféricas causando daños al aislamiento de transformadores, motores, capacitores, cables y ocasionar fallas en líneas de transmisión por la ionización del aire.

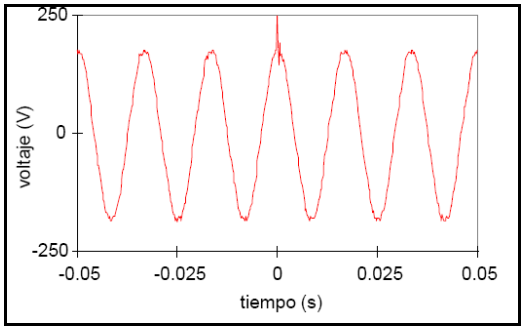


Figura 6.8.1 Sobre voltaje transitorio

Ejemplos:

- Energización de transformadores y de motores da lugar a sobrecorrientes transitorias.
- Desconexión de estas cargas inductivas también da lugar a sobrevoltajes transitorios.

Las cargas sensibles empleadas en centros de computo, hospitales y controles industriales son más susceptibles a estos disturbios, aquí se hace necesario los supresores de sobrevoltajes transitorios.

El equipo electromagnético tolera sobrevoltajes transitorios hasta que su aislamiento se perfora, pero, el equipo electrónico sensible puede dejar de operar o funcionar erráticamente antes de que ocurra daño visible.

6.8.1 Categorías de Ubicación

"IEEE Recommended Practice on Surge Voltages in Low-Voltage AC Power Circuits" 11 ofrece las siguientes categorías:

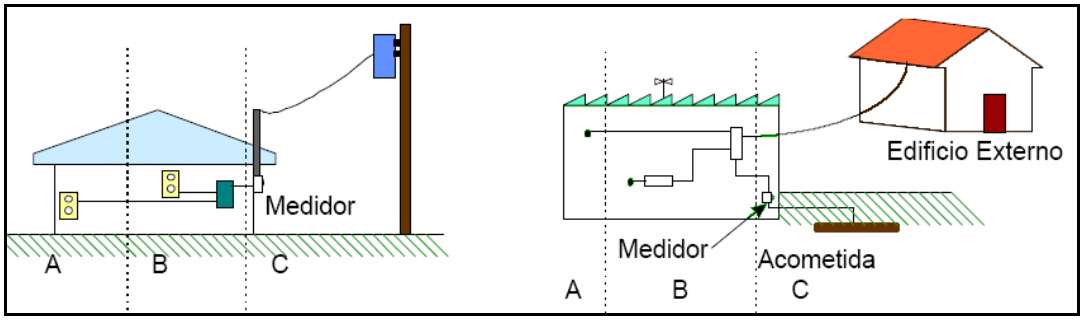


Figura 6.8.2 Ubicación de los supresores de sobrevoltajes transitorios

Categoría C:

- Instalación exterior y acometida.
- Circuitos que van del medidor.
- Al medio de desconexión principal.
- Cables del poste al medidor.
- Líneas aéreas a edificios externos y
- Líneas subterráneas para bombas.

Categoría B:

- Alimentadores y circuitos derivados cortos.
- Tableros de distribución.
- Alimentadores en plantas industriales.

[11] IEEE C62.41-1991, IEEE Recommended Practice on Surge Voltages in Low-Voltage AC Power Circuits

- Tomacorrientes para aparatos grandes con cableados cercanos a la cometida.
- Sistemas de iluminación en edificios comerciales.

Categoría A:

- Tomacorrientes y circuitos derivados largos.
- Todos los tomacorrientes que estén a más de 10 m de categoría B con hilos #14 - #10,
- Todos los tomacorrientes que estén a más de 20 m de categoría C con hilos #14 - #10.

Es recomendable que los protectores de categoría C sean capaces de tolerar mayores corrientes que los de categoría A y B, mientras que el B debe soportar mayores corrientes que los de categoría A, debido a que los de categoría C son más robustos y más costosos.

Los de categoría A deben tener un voltaje de sujeción menor, debido a que la clase B y C se encargan de manejar altas energías y los de categoría A se encargan de restringir las excursiones del sobrevoltaje transitorio para evitar disturbios en la operación del equipo sensible.

6.8.2 Instalación de los supresores de transitorios.

- El supresor de transitorios debe estar cerca de la carga a proteger. En caso de que el supresor esté retirado de la carga y se presente un transitorio con frente de onda muy pronunciado es posible que llegue al equipo sensible.

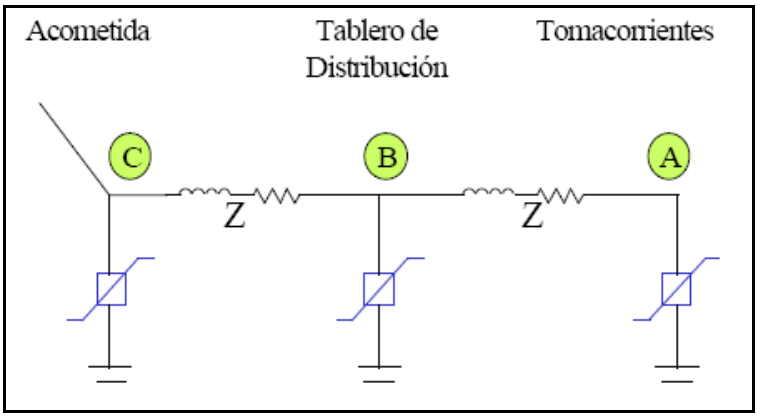


Figura 6.8.3 Impedancia del alambrado actuando como supresor serie

- Es necesario respetar las Categorías de Ubicación para los supresores de transitorios en circuitos de alimentación de baja tensión. Ej. la acometida debe emplear un supresor de Categoría C.

- Es primordial que los supresores cuenten con protección en modo diferencial y en modo común. La protección de modo diferencial es indispensable pero no es suficiente; se requiere la protección de modo común.

- Queriendo evitar distancias eléctricas importantes es necesario que los supresores de transitorios se conecten con conductores tan cortos como sea posible, sin lazos, sin trenzados y sin curvas pronunciadas.

- Los supresores de transitorios no realizarán su función si no se instalan en forma adecuada. Ej. no podrán proteger contra disturbios de modo común si no están conectados a un conductor de puesta a tierra.
- Instalar supresores categoría B a la entrada de un UPS y a la entrada de los circuitos asociados de “bypass”, no es necesario ya que los UPS no resuelven los problemas de calidad de energía en su totalidad.

- Instalación de supresores en las líneas de datos que entran y salen del edificio es de mucha importancia. Los supresores deben ser de acuerdo a la línea de datos a proteger; uno para RS-232, Ethernet y uno especial para Token-Ring.

6.9 REGULADOR DE VOLTAJE

Estabilizador de voltaje o acondicionador de voltaje, es un equipo eléctrico que acepta una tensión de voltaje variable a la entrada, dentro de un parámetro predeterminado y mantiene a la salida una tensión regulada.

Este dispositivo esta encargado de proteger a equipos sensibles a descargas eléctricas, ruido y variaciones de diferencia de potencial existentes en la corriente alterna de la distribución eléctrica, compensando variaciones lentas de voltaje.

Un regulador de voltaje protege los equipos de bajas tensiones y sobretensiones. Los reguladores de buena calidad incluyen supresor de picos y filtros que eliminan la interferencia electromagnética.

6.10 SUPRESOR DE PICOS

Los supresores de pico son dispositivos que truncan variaciones rápidas llamados picos y sus contaminantes para que la línea sea estable. El objetivo de estos dispositivos es proteger a equipos electrónicos sensibles a daños generados por picos de voltaje

Estas perturbaciones pueden dañar al equipo electrónico de tal forma drástica.

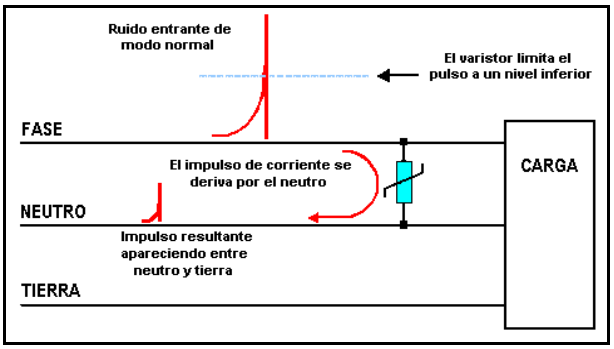


Figura 6.10.1 Supresor de picos

Existen protectores y supresores de picos para atenuar los problemas causados por el ruido común. Estos componentes son conectados entre los conductores de fase y neutro en el tomacorriente de salida de algunos equipos como estabilizadores y UPS.

La mayoría de los supresores de picos contienen un elemento de estado sólido llamado varistor. El varistor es un componente cuya resistencia interna depende de la tensión aplicada entre sus terminales.

Una alta tensión que atraviese un varistor será limitada a un valor específico, y la corriente resultante será derivada por el varistor impidiendo que circule por los sensibles circuitos electrónicos.

Los supresores de picos pueden crear sin embargo un problema, la corriente que se deriva a través del conductor de neutro puede crear un ruido de modo común.

La tensión de pico del ruido común depende de la impedancia de los cables, la magnitud de la corriente original y la capacidad de disipación del supresor de picos.

6.11 TRANSFORMADORES DE AISLAMIENTO

"Un transformador de aislamiento es un dispositivo que cuenta con devanados primario (entrada) y secundario (salida) separados (no tienen relación eléctrica).

Un autotransformador no tiene devanados separados, por lo tanto, no es un transformador de aislamiento.

La relación de transformación esta de acuerdo a su instalación. Un transformador de aislamiento apropiado para equipo electrónico sensible debe contar con al menos un blindaje electrostático (blindaje Faraday) para disminuir la intercapacitancia entre los devanados. Un transformador de aislamiento con blindaje Faraday reduce el ruido de modo común, mas no reduce el ruido de modo diferencial" [12]

[12] IEEE, Emerald Book, IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding of Sensitive Electronic Equipment

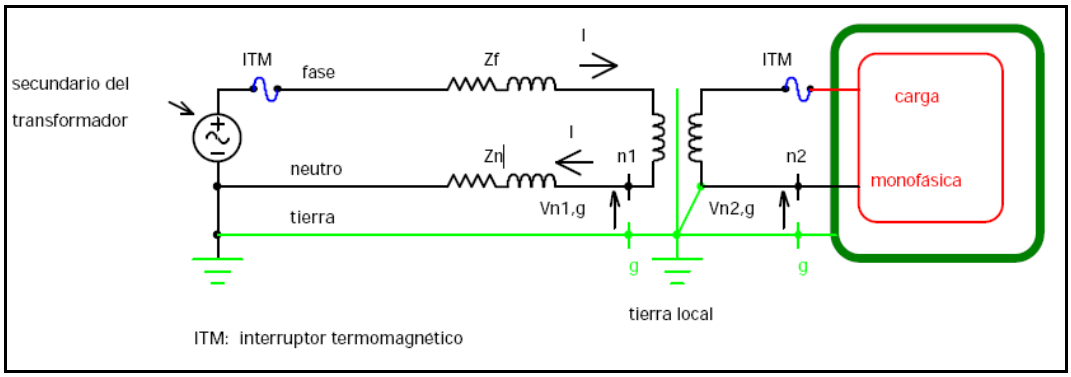


Figura 6.11.1 Transformador de aislamiento monofásico

Se observa en la Figura 6.11.1, la conexión apropiada de un transformador de aislamiento. Aparece un voltaje de neutro a tierra en el primario del transformador dado por:

$$V_{N1,G} = Z_N \times I_N$$

El voltaje de neutro a tierra en terminales de la carga es cero (si la carga y el transformador de aislamiento están muy alejados puede aparecer un voltaje Vn2, g.)

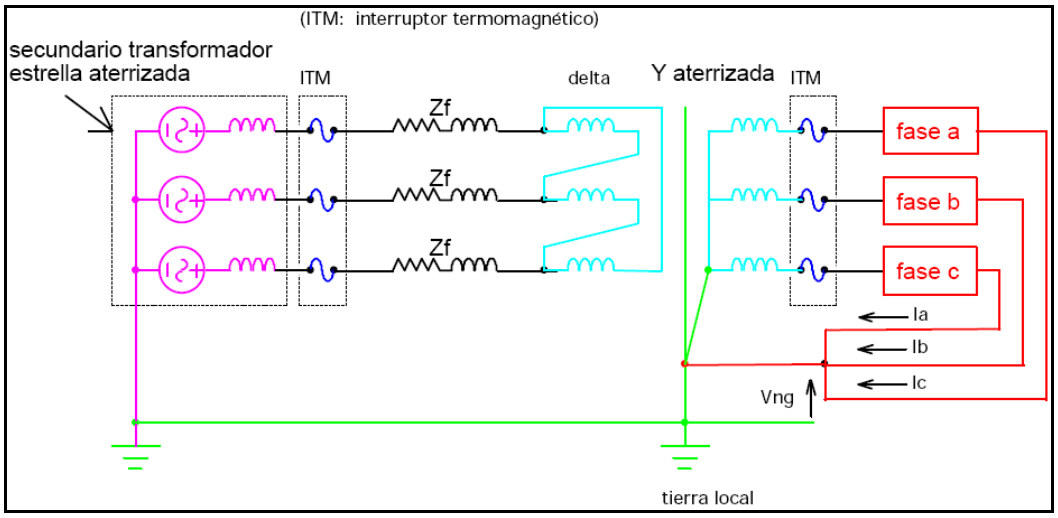


Figura 6.11.2 Transformador de aislamiento trifásico

En la figura 6.11.2 el voltaje de alimentación al transformador de aislamiento puede tener valores de voltaje de entrada según su instalación.

Los transformadores de aislamiento pueden ser monofásicos o trifásicos, en este caso no es necesario llevar cinco hilos desde el primer transformador a la carga si se usa un transformador de aislamiento ΔY solo se llevan cuatro hilos y estos son tres de fase y uno de neutro.

6.12 PUESTAS A TIERRA

La puesta a tierra es una conexión que se utiliza para que circule la corriente no deseada o descargas eléctricas hacia tierra

Partes de un sistema de puesta a tierra:

- Tomas de tierra.
- Líneas principales de tierra.
- Derivaciones de las líneas principales de tierra.
- Conductores de protección.

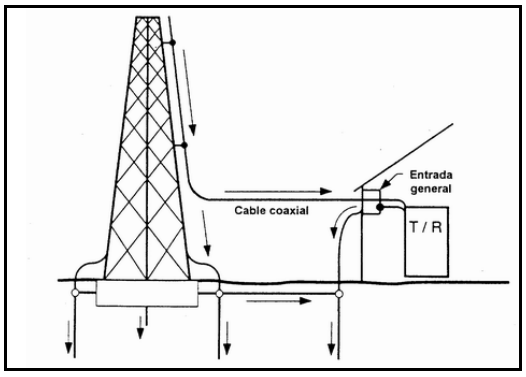


Figura 6.12.1 Conexión a tierra correcta del equipo

6.13 TIERRA ELÉCTRICAS

a) Tierra eléctrica: Conexión conductora, entre un circuito o equipo eléctrico y la Tierra.

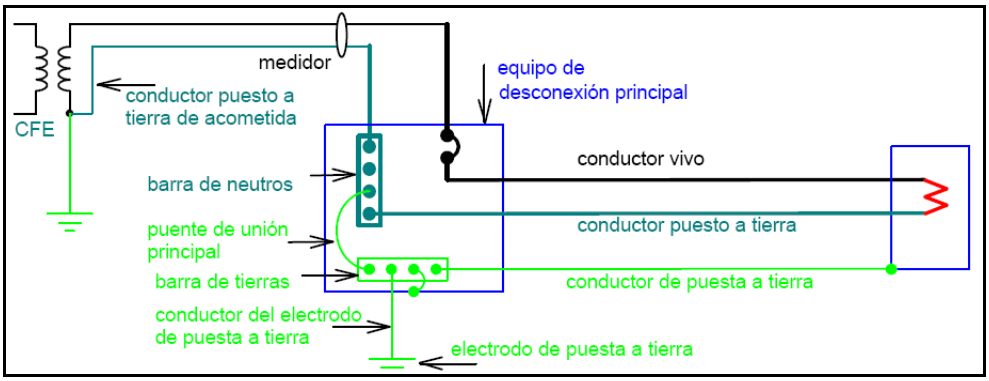


Figura 6.13.1 Conductor puesto a tierra

b) Conductor de puesta a tierra de equipo: Conductor que conecta las partes metálicas no destinadas a transportar corriente (carcazas, gabinetes, charolas y tuberías) con el conductor puesto a tierra.

c) Puente de Unión Principal: unión o conexión del conductor puesto a tierra con el conductor de puesta a tierra en el equipo de desconexión principal.

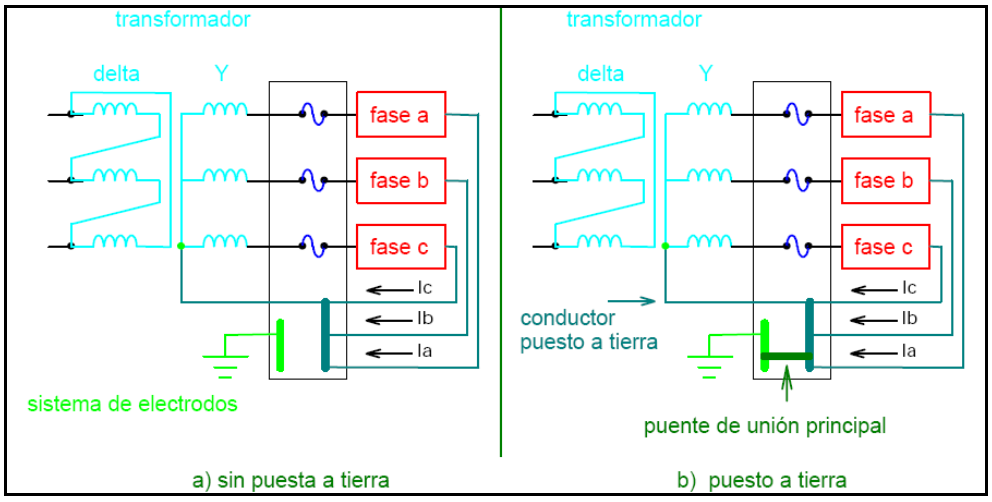


Figura 6.13.2 Sistema de alimentación eléctrica

d) Puesta a tierra del sistema de alimentación eléctrica: Es realizado cuando se une al sistema de electrodos uno de los conductores de la acometida o uno de los conductores que salen del secundario de un transformador

En la figura 6.13.2, se observa:

- un sistema de alimentación no puesto a tierra.

- Un sistema de alimentación eléctrica puesto a tierra. El puente de unión principal estabiliza la diferencia de potencial entre el sistema de alimentación y tierra.

"El conductor de puesta a tierra tiene un voltaje cero o de unos cuantos voltios con respecto a tierra y esa es precisamente la función de la puesta a tierra del sistema de alimentación" [13]

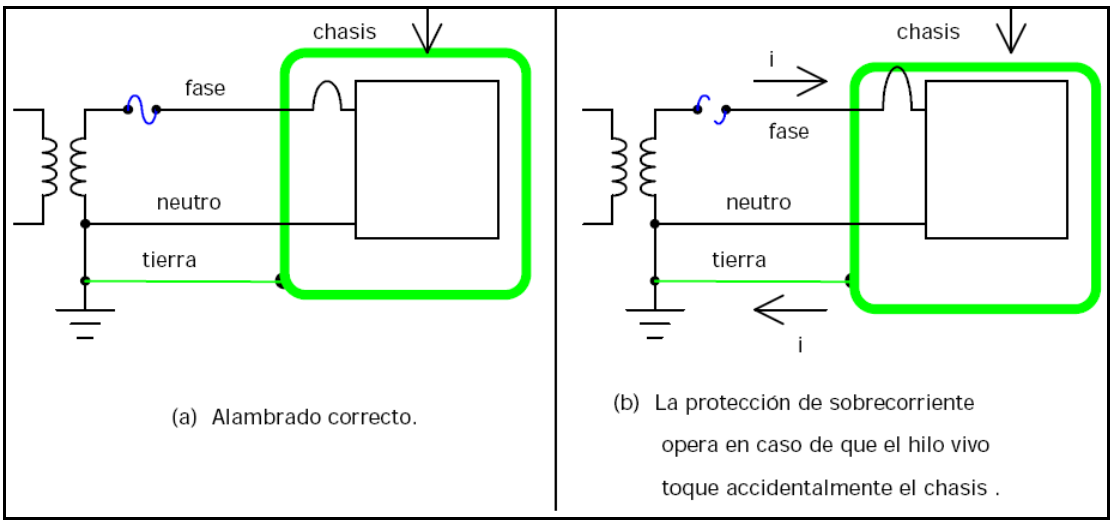


Figura 6.13.3 Sistema de Tierra Eléctrica

[13] Tierras eléctricas

6.13.1 Electrodos Aislados

La Figura 6.13.4 tiene una “alimentación eléctrica 1 la cual abastece a las cargas A y B, la fuente 2 alimenta a la carga C, los electrodos del sistema 1 y 2 están aislados, mientras que las cargas A, B y C están unidas por medio de cables de comunicación.

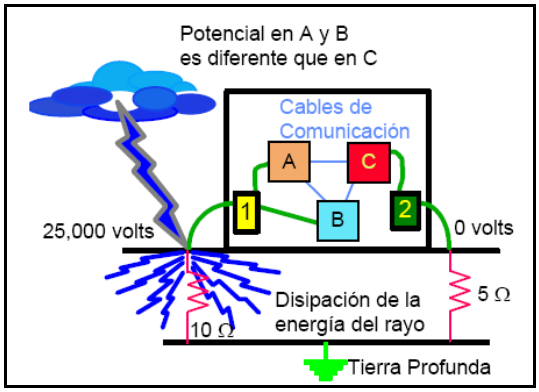


Figura 6.13.4 Electrodos aislados

Una descarga atmosférica ocasionaría que los gabinetes A y B se elevaran adquiriendo una diferencia de potencial de miles de voltios con respecto al gabinete C, esta diferencia de potencial es considerada peligrosa.

En caso de que una descarga atmosférica cayera en el pararrayos, se tendría un potencial elevado de todo el equipo metálico unido al conductor de bajada del pararrayos. Mientras que las partes metálicas puestas a tierra del sistema de alimentación eléctrica, quedarían a potencial de tierra” [14]

[14] Problemas ocasionados por el uso de electrodos aislados

CAPITULO 7

DISEÑO DEL LABORATORIO

7.1 INTRODUCCIÓN

Una estación de trabajo (Banco de trabajo) de un laboratorio relacionado con el estudio de la energía eléctrica requiere disponer de un banco, mesa, o superficie con las dimensiones mínimas que permitan apoyar el circuito o equipo que se está analizando.

Además deberá disponer un mínimo de instrumentos de medida y herramientas específicas para las que se debe preveer un lugar adecuado, de forma que éstas resulten accesibles a todas las operaciones de conexión, desconexión, manipulación de los diferentes controles, instalación de un sistema de medida determinado, etc.

Un adecuado equipamiento de la estación de trabajo evitará imprevistos, pérdidas de tiempo o riesgos de sobrecargas accidentales que puedan poner en peligro la seguridad de las personas o de los equipos bajo prueba.

En definitiva, el operador tendrá disponible un laboratorio de pruebas para sistemas eléctricos adaptado a sus necesidades, donde se podrán desarrollar sin problemas cualquier actividad de montaje, ajuste o mantenimiento.

Objetivo General del Laboratorio:

Diseño de un laboratorio para experimentación y análisis de las perturbaciones introducidas por los sistemas electrónicos de aplicación industrial en las redes eléctricas.

Objetivos específicos

- Implementar una estación de trabajo para la experimentación y análisis de las perturbaciones introducidas a la energía eléctrica ante la presencia de cargas lineales y no lineales.

- Usar equipos de última generación para la visualización y medición de las perturbaciones causadas por cargas no lineales

- Realizar la estimación de costos de equipos y cargas de prueba para el laboratorio.

En el laboratorio se podrá medir y analizar los siguientes parámetros eléctricos:

TIPO DE CARGA	**PARÁMETROS ELÉCTRICOS**
Cargas Lineales	✓ Voltaje ✓ Corriente ✓ Impedancia
Cargas No Lineales	✓ Distorsión armónica de corriente y voltaje ✓ Potencia activa, reactiva ✓ Análisis de graficas

Tabla 7.1.1 Parámetros a ser medidos

7.2 DIAGRAMAS

Un diagrama representa todas las partes que componen un sistema, tomando en cuenta las conexiones que hay entre ellos, con el objetivo de lograr una visualización sencilla y completa del sistema.

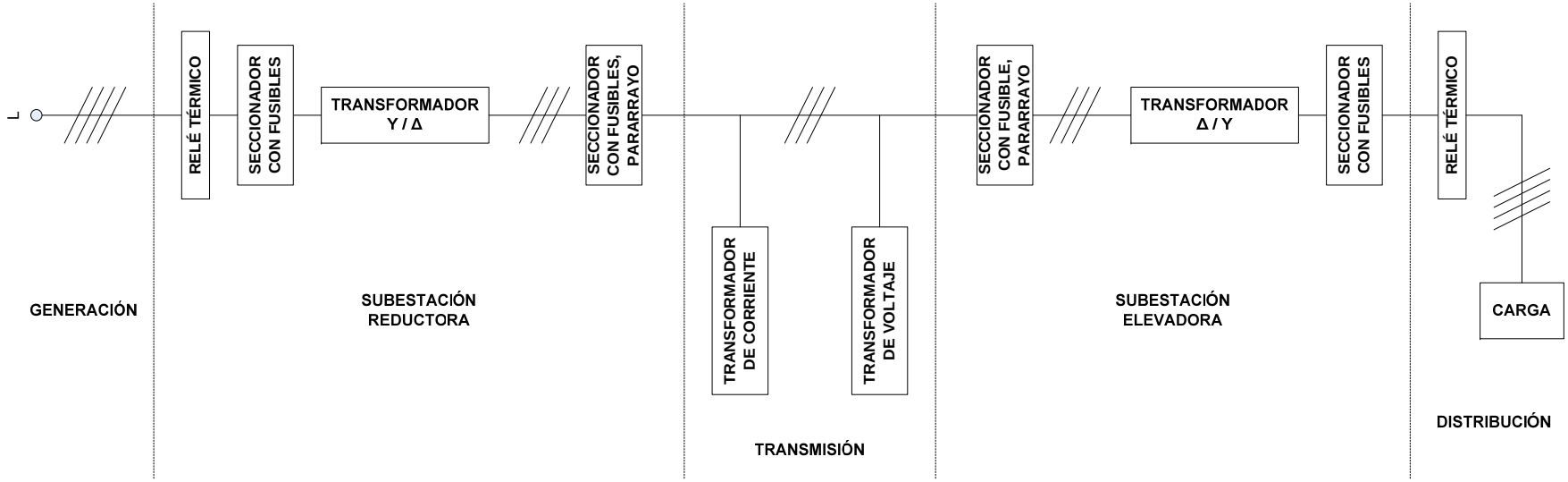


Figura 7.2.1 Diagrama en Bloques del Banco de Trabajo

GENERACIÓN	**SUBESTACIÓN REDUCTORA**	**TRANSMISIÓN**	**SUBESTACIÓN ELEVADORA**	**DISTRIBUCIÓN**
	✓ Transformador Trifásico Y/Δ ✓ Protecciones: Relé térmico, Seccionador con fusible ✓ Pararrayos	✓ Transformador de corriente ✓ Transformador de voltaje	✓ Transformador trifásico Δ/Y ✓ Protecciones: Seccionador con fusibles. ✓ Pararrayos	✓ Carga ✓ Protecciones: Relé térmico

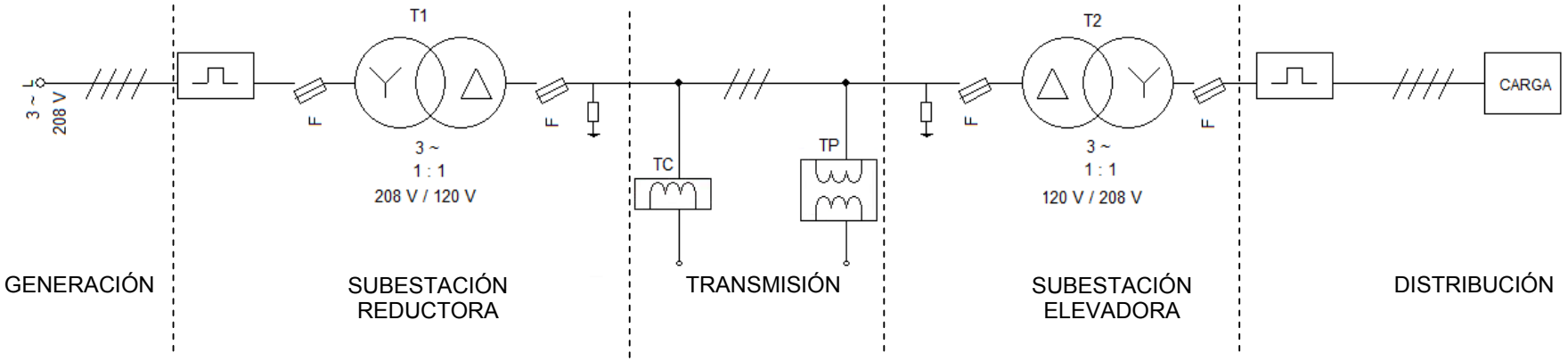


Figura 7.2.2 Diagrama unifilar del Banco de Trabajo

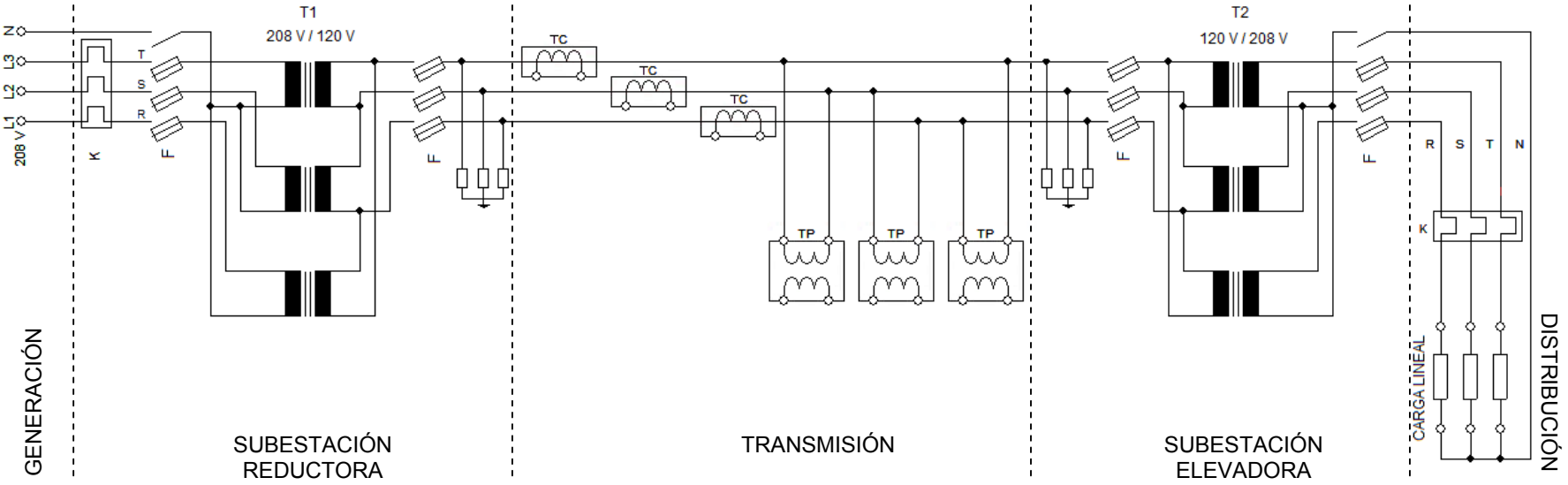


Figura 7.2.3 Diagrama Multifilar del Banco de trabajo

7.3 DISEÑO DEL BANCO DE TRABAJO

7.3.1 Descripción de Elementos

a. Transformador de Corriente (TC)

Los transformadores de corriente (TC) son transformadores utilizados como transformador de medida o como transformador de protección, su objetivo principal es bajar los niveles de corriente a valores normalizados para poder ser medidos por el operario.

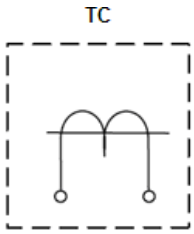


Figura 7.3.1 Símbolo del transformador TC

b. Transformador de Potencial (voltaje) (TP)

Los TP son transformadores de voltaje cuyo objetivo es reducir los niveles de voltaje a valores normalizados y manejables para poder conectar un instrumento y realizar mediciones.

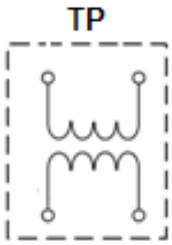


Figura 7.3.2 Símbolo del transformador TP

c. Fusibles

Los fusibles proporcionan una protección fase a fase, con un poder de corte muy elevado, estos pueden ser montados en porta fusibles ó seccionadores. Los fusibles protegen a los circuitos de cortocircuitos.

Figura 7.3.3 Seccionador Monofásico

d. Seccionador

El seccionador eléctrico es un dispositivo mecánico capaz de mantener aislada una instalación eléctrica de su red de alimentación. La velocidad de cierre y apertura depende de la rapidez del operario (maniobra manual).

Este dispositivo, por sus características, debe ser utilizado siempre sin carga o en vacío. Es decir, el proceso de desconexión debe seguir necesariamente este orden.

e. Relés Térmicos

Los relés térmicos son relés de protección trípolares de láminas bimetálicas y con características de respuesta de tiempo dependiente del valor de sobrecarga de corriente.

Fabricados con materiales de alta estabilidad en resistencia respecto de la temperatura y sometidos a estrictos controles de calidad, representan una solución sencilla y confiable para la protección contra sobrecargas y fallas de fase de motores eléctricos.

Figura 7.3.4 Relé térmico

7.3.2 Cargas

CARGAS LINEALES	CARACTERISTICAS
Modulo de capacitancia	✓ 120/208 V ✓ 3 KVA ✓ 0 – 4,5 A ✓ Frecuenta de 60 Hz ✓ Modulo variables : 15 uf, 30 uf, 45 uf, 60 uf, 75 uf, 90 uf, 105 uf
Modulo de Inductancia	✓ 120/208 V ✓ 3 KVA ✓ 0 – 5 A

	✓ Frecuenta de 60 Hz ✓ Modulo variables : 300 mH, 150 mH, 70mH, 60 mH, 50 mH
Modulo de resistencia	✓ 3,3 KW ✓ Frecuencia 60 Hz ✓ Y 3x220V 0,5 – 5 A ✓ Δ 3x220V 2,3 – 5 A

Tabla 7.3.1 Características de cargas lineales

CARGAS NO LINEALES	**CARACTERISTICAS**
Variador de Frecuencia	- Potencia: 4 KW - Trifásico - Corriente de Entrada 19.7 A - Corriente de Salida: 17.5 A - Voltaje de entrada : 220VAC - Voltaje de salida/ máxima : 240V - Voltaje de salida /mínima: 0V - Factor de potencia 0.95 - Rendimiento eta: 96 % - Condiciones ambientales: -10ºC a +50ºC - Panel de programación estándar

Motor	✓ Potencia: 1100 W ✓ Y 208 (V) ✓ Δ 120 (V) ✓ Y 5,4 (A) ✓ Δ 9,4 (A) ✓ Frecuencia 60 Hz ✓ Fp: 0,77 ✓ Velocidad: 1750 rpm

Tabla 7.3.2 Características de cargas no lineales

7.3.3 Instrumentación

Un constante y adecuado control de la Red de Distribución permitirá tener una mayor información acerca de la calidad de suministro de Energía Eléctrica.

Para ello se tiene equipos de medición que son la herramienta adecuada para lograr un completo análisis de las perturbaciones que degradan la calidad de la energía eléctrica.

Para realizar las mediciones tenemos:

- Equipos básicos
- Registradores

a. Equipos Básicos

➢ Amperímetro

El amperímetro es un instrumento que sirve para medir la intensidad de corriente que atraviesa por un circuito eléctrico. Para efectuar la medida de la intensidad de la corriente circulante el amperímetro debe ser colocado en serie.

Los primeros amperímetros eran analógicos, y constaban de un galvanómetro cuya resistencia era muy pequeña, con el fin de interferir lo menos posible en el propio circuito que se deseaba medir. Los modernos amperímetros digitales tienen una resistencia interna prácticamente despreciable, lo cual permite medir corrientes muy pequeñas sin modificar las características del circuito en prueba.

Figura 7.3.5 Amperímetro analógico

➢ Voltímetro

El voltímetro es un instrumento para medir la diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito eléctrico. Consta esencialmente de un galvanómetro, de escala graduada en voltios, conectado en serie a una resistencia elevada. Todo el conjunto se conecta en paralelo al circuito,

de modo que la intensidad de corriente que circula por él es pequeña y proporcional a la diferencia de potencial.

Figura 7.3.6 Voltímetro Analógico

b. Registradores

➢ Analizadores de Redes Eléctricas

Los Analizadores de Redes Eléctricas de última generación son instrumentos capaces de detectar y registrar todos los detalles de las perturbaciones eléctricas, realizar análisis de tendencias y verificar la calidad del suministro eléctrico.

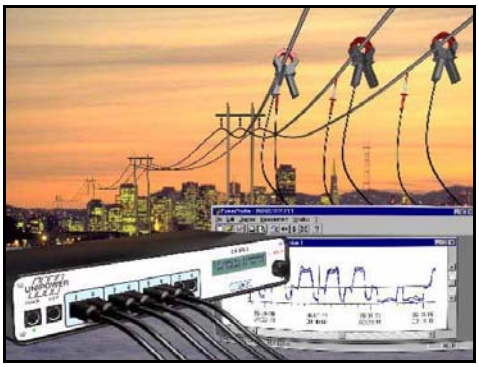


Figura 7.3.7 Analizadores de Redes Eléctricas

Hay dos tipos principales de analizadores de redes:

- **SNA (Scalar Network Analyzer):** Analizador de redes escalar, mide propiedades de amplitud solamente.

- **VNA (Vector Network Analyzer):** Analizador de redes vectoriales, mide propiedades de amplitud y fase, también llamado Medidor de Ganancia y Fase o Analizador de Redes Automático, siendo los más comunes.

➢ Instrumentos de Potencia

Son instrumentos multifunción que miden con precisión corriente continua, corriente alterna, intensidad de corriente DC, la intensidad de corriente AC y la potencia en vatios. El resultado de la medición de la potencia AC se considera como el valor real.

Figura 7.3.8 Instrumentación de potencia

Durante la medición de potencia la polaridad cambia automáticamente, si se producen valores de medición negativos aparecerá un símbolo menos en el indicador de los medidores de potencia.

A la hora de analizar los medidores de potencia cuentan también con muchas propiedades (entrada de corriente aislada, medición de armónicos, intensidad de conexión, medición de potencia).

EQUIPOS DE MEDICIÓN	**CARACTERÍSTICAS**
Analizador de Redes	– Frecuencia de operación: 60Hz- 400Hz – Alimentación 50 …….220Vac – Software para graficar formas de onda de corriente y voltaje compatible con Windows. – Medición de la distorsión armónica de corriente y voltaje hasta la 50th frecuencia armónica o menor. – Corriente de 5…… 2000A. – Voltaje de 0…. 600V. – Potencia: activa, reactiva, inductiva, capacitiva: +/- (1%) – EL equipo debe incluir: display para observar parámetros, gráficas.

Tabla 7.3.3. Especificaciones técnicas de analizadores de redes

VOLTÍMETRO	- Corriente alterna hasta 3000 A AC. - Tensión alterna hasta 600 V AC. - Pantalla LCD. - Selección de rango automática.

	- Indicador de frecuencia.
Especificaciones técnicas	
ACA (rms)	Rangos: 300 A / 1000 A / 3000 A. Resolución: 0,1 A / 0,1 A / 1 A. Precisión: ± 1 % del rango de medición.
ACV (rms)	Rango: 4,0… 600 V. Resolución: 0,1 V. Precisión: ± 0,5 % ± 5 dígitos.
Frecuencia	Rango: 45 … 65 Hz. Resolución: 0,1 Hz. Precisión: ± 0,2 Hz.

Tabla 7.3.4. Especificaciones técnicas de un voltímetro

AMPERÍMETRO	- Pantalla LCD. - Mantenimiento de valores. - Corriente alterna hasta 1000 A. - Medición de tensión hasta 600 V AC/DC. - Función de medición de resistencia, frecuencia. - Prueba de diodos y control de tránsito. - Selección de rango automática y manual. - Desconexión automática.

Especificaciones técnicas	
DCV	400 mV / 4 / 40 / 400 / 600 V ± 0,8 % + 3 St. – 100 µV
ACV	400 mV /4 / 40 /400 / 600 V ± 1,8 % + 5 St. – 100 µV
ACA	40 / 400 / 1000 A ± 2,5 % + 5 St. – 10 mA
Frecuencia	5 / 50 / 500 Hz/ 5 / 50 / 500 kHz / 5 / 10 MHz ± 1,2 % + 2 St. – 1 mHz

Tabla 7.3.5. Especificaciones técnicas de un amperímetro

7.3.4 Cálculos

a. Transformador T1

$$Y/\Delta \quad 1:1$$

$$V_{L(entrada)} = 208 \ Vac$$

$$\frac{V_{L(\ entrada\ )}}{V_{L(\ salida\ )}} = n\sqrt{3}$$

$$V_{L(salida)} = \frac{V_{L(entrada)}}{n\sqrt{3}} = \frac{208}{1*\sqrt{3}} = \ 120Vac$$

b. Transformador T2

$$\Delta / Y \qquad 1:1$$

$$\frac{V_{L(\ entrada\ )}}{V_{L(\ salida\ )}} = \frac{n}{\sqrt{3}}$$

$$V_{L(\ salida\ )} = \frac{\sqrt{3}\ V_{L(entrada)}}{n} = \frac{\sqrt{3} * 120}{1} = 208 Vac$$

c. Potencia nominal del Banco de Trabajo

$$Potencia\ \ Aparente\ \ = I_L * \sqrt{3} * V_L$$

$$S = 35(A) * \sqrt{3}\ * 120(V)$$

$$S = 7{,}3 KVA$$

CONDICIONES DE LOS ELEMENTOS DEL BANCO DE TRABAJO	**ESPECIFICACIONES**
Transformador (T1)	✓ Trifásico ✓ Conexiones: Δ / Δ, Δ / Y, Y / Δ, Y / Y Relación de transformación: 1:1 ✓ 208V/120V

Transformador (T2)	✓ Trifásico ✓ Conexiones: Δ/Δ, Δ/Y, Y/Δ, Y/Y Relación de transformación: 1:1 ✓ 120V/208
Corriente nominal Banco de trabajo (I_L)	✓ 35 A
Potencia nominal Banco de trabajo (S)	✓ 7,3 KVA
Entrada	✓ 208 Vac Y
Salida	✓ 208 Vac Y
Línea de Transmisión	✓ En tres hilos

Tabla 7.3.6 Especificaciones del Banco de Trabajo

7.4 ESTIMACIÓN DE COSTO

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	P. UNITARIO	P. TOTAL
1	Modulo de resistencias	$ 1800	$ 1800
1	Modulo de capacitancias	$ 100	$ 100
1	Modulo de inductancias	$ 120	$ 120
2	Transformadores trifásicos	$ 1700	$ 3400
12	Seccionadores con fusible	$ 95	$ 1140
2	pararrayos	$ 97	$ 194
2	Racks de montaje	$ 55	$ 110
2	Analizador de redes eléctricas	$ 4000	$ 8000
1	Amperímetro	$ 100	$ 100
1	Voltímetro	$ 100	$ 100
1	Variador de frecuencia	$ 600	$ 600
1	Motor ac	$ 300	$ 300
1	Filtro	$ 8500	$8500
	Accesorios Varios (tornillos, cable,)	$1500	$1500
			25964
		IVA 12%	$ 3115,68
		TOTAL	**$ 29079,68**

Tabla 7.4.1. Costos estimados del laboratorio

CAPITULO 8

PRACTICAS DE LABORATORIO

8.1 PRACTICA DE LABORATORIO # 1

Tema: ANÁLISIS DE LA RED ELÉCTRICA CON CARGAS LINEALES

Objetivos:

- Conocer el comportamiento de la red eléctrica ante cargas lineal (R-L-C y combinaciones).
- Familiarizarse con el concepto de parámetros de medición eléctricos.

Introducción:

Los componentes pasivos son aquellos que no realizan ninguna función que produzca amplificación, entre los cuales tenemos:

- Resistencias
- Capacitores
- Inductancias

- **Resistencias**

Cuando una resistencia se conecta a una fuente de energía a.c, produce la misma forma de onda manteniendo la corriente y tensión en fase.

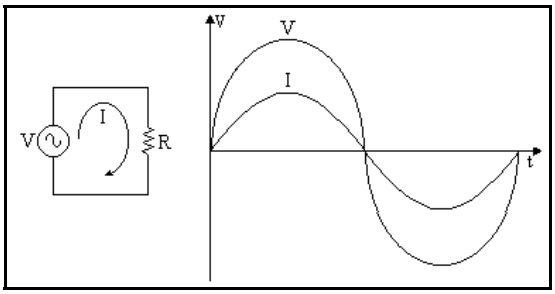


Figura 8.1.1 Resistencia en corriente alterna

- **Capacitores**

Es un elemento pasivo que realiza la función de almacenar energía eléctrica debido al campo electrostático que se establece entre sus placas. Cuando el capacitor se carga, recibe y almacena energía; pero no la disipa. Al descargarse la energía almacenada se librera hasta que el voltaje aplicado al capacitor se reduce a cero.

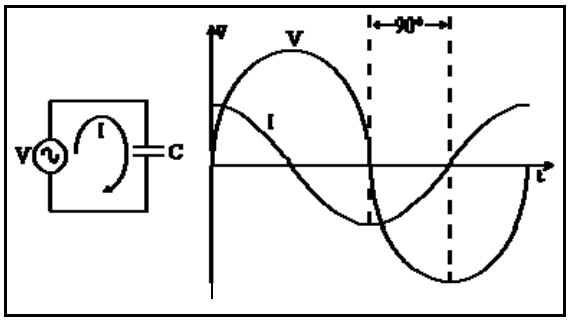


Figura 8.1.2 Capacitancia en corriente alterna

Cuando el capacitor se conecta a una fuente de energía a.c, la corriente se adelanta 90º con respecto a la tensión, manteniendo la misma forma de onda.

La Reactancia capacitiva (X_C), esta definida como la resistencia al flujo de corriente alterna, debido a la presencia de una capacitancia en el circuito. La reactancia depende también de la frecuencia y la capacitancia en faradios.

$$Xc = \frac{1}{2\pi f C}$$

Xc= reactancia capacitiva en ohm
C= capacitancia en faradios
f= frecuencia en ciclos por segundo (Hz)
2π = 6,28

- **Inductores**

Los inductores son diseñados para producir un campo magnético al pasar corriente sobre este.

Toda industria gira alrededor de inductores encontrados en motores, generadores y varios dispositivos eléctricos.

Cuando un inductor se conecta a una fuente de energía a.c, las señales de tensión y corriente mantienen la misma forma de onda pero desfasadas 90º, la corriente se atrasa 90º con respecto a la tensión.

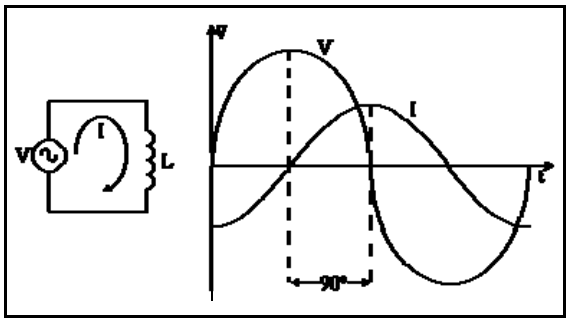


Figura 8.1.3 Capacitancia en corriente alterna

La reactancia inductiva X_L, es la resistencia ofrecida al flujo de una corriente alterna, debido a la presencia de una inductancia en el circuito

$$X_L = 2\pi f L$$

XL= reactancia inductiva en ohm

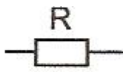
L= inductancia en henrios

f= frecuencia en ciclos por segundo (Hz)

2π = 6,28

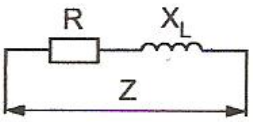
Circuitos de resistencias y reactancias

- Carga resistiva pura



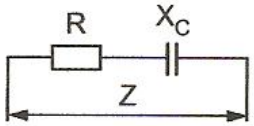
$Z = R$

- Carga RL serie



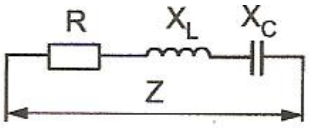
$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

- Carga RC serie



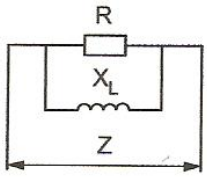
$$Z = \sqrt{R^2 + X_C{}^2}$$

- Carga RLC serie



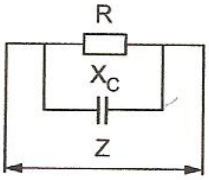
$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

- Carga RL paralelo



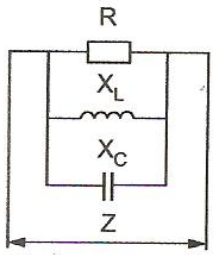
$$Z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_L}\right)^2}} = \frac{R \cdot X_L}{\sqrt{R^2 + X_L{}^2}}$$

- Carga RC paralelo



$$Z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_C}\right)^2}} = \frac{R \cdot X_C}{\sqrt{R^2 + X_C{}^2}}$$

- Carga RLC paralelo



$$Z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C}\right)^2}} = \frac{R \cdot X_L \cdot X_C}{\sqrt{X_L^2 \cdot X_C^2 + R^2 (X_L - X_C)^2}}$$

Diagrama unifilar del Banco de trabajo para la presente práctica

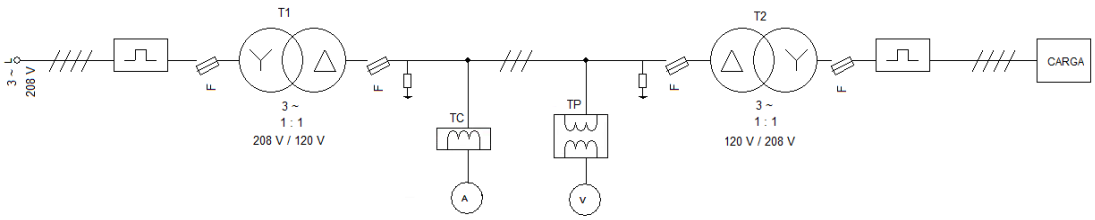


Figura 8.1.4. Diagrama unifilar. Práctica con cargas lineales

Instrumentos y equipo

- Modulo Capacitivo
- Modulo Inductivo
- Modulo Resistivo
- Transformador T1 y T2
- Voltímetro
- Amperímetro
- Cables de conexión

¡ADVERTENCIA!..... **Conectar el circuito como sistema pasivo (fuentes apagadas)**

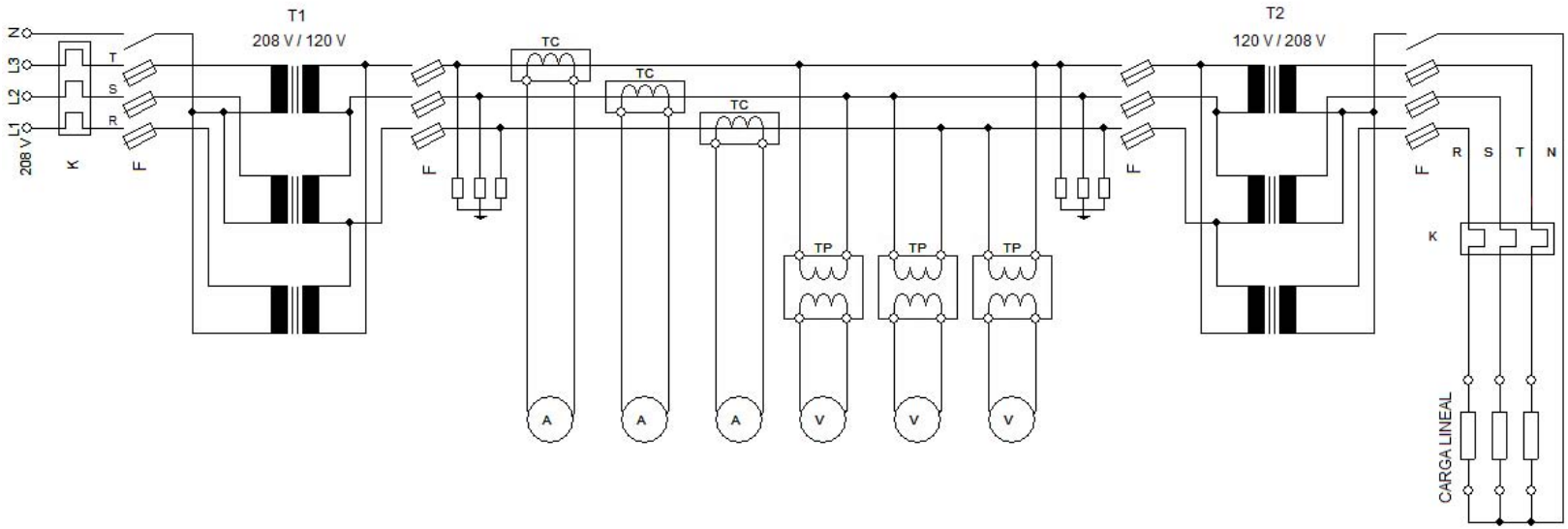
Para efectuar la medida de la intensidad de la corriente el amperímetro ha de colocarse en serie, para efectuar la medida de la diferencia de potencial el voltímetro ha de colocarse en paralelo.

Procedimiento

1. Asegúrese de tener todos los instrumentos, equipos y módulos para realizar la práctica.

2. Arme el circuito mostrado en la figura.

(Ver página siguiente)



EQUIPOS Y CARGAS LINEALES

- ✓ 1 voltímetro
- ✓ 1 amperímetro
- ✓ Cargas lineales: R-L-C y combinaciones

PROYECTO DE GRADO	ESCUELA POLITECNICA DEL EJÉRCITO	**Hoja:** 1/1
Realizado por: LESLIE CAJAS	**Titulo:** PRACTICAS DE LABORATORIO CON CARGAS LINEALES	**Fecha:** 05 de junio

3. Para las siguientes cargas (Z): R, RL serie, RC serie, RLC serie, RL paralelo, RC paralelo, RLC paralelo:

a. Mida el flujo de corriente en cada línea.
b. Mida la tensión entre líneas.
c. Adjuntar los datos obtenidos en la tabla de valores dada

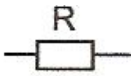
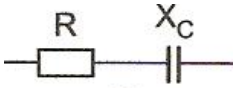
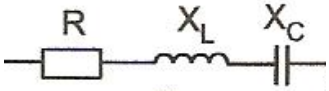
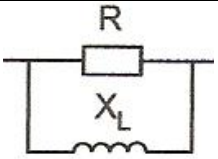
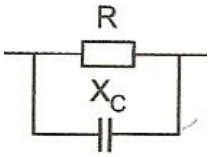
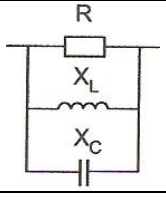
CARGA	**E (V) Línea**	**I (A) Línea**	**W Línea**	**Z(Ω) Línea**
				
				
				
				
				
				

Tabla 8.1.1. Tabla de valores con su respectiva carga

4. Apagar las fuentes de alimentación conectadas al circuito

Cuestionario

1. En la legislación nacional, ¿cuáles son los niveles bajo, medio y alto voltaje para la transmisión eléctrica, establecidos por el CONELEC?

……

……

2. ¿Qué parámetros presentan las líneas de transmisión al paso de la corriente eléctrica y cuáles son sus efectos?

……

……

3. ¿Cuál es el comportamiento de los parámetros anteriores en líneas de baja, media y alta tensión y longitud?

……

4. ¿En qué consiste la regulación de tensión y cuáles son sus métodos más usuales?

……

……

5. A una línea de transmisión trifásica que tiene una reactancia de 120Ω por fase, se le conecta en estrella una carga cuya resistencia es de 160Ω por fase. Si el voltaje de línea es de 70 kV, calcular:

a) El voltaje línea a neutro, por fase.

……

……

b) La corriente de línea, por fase.

……

……

c) La potencia activa y reactiva suministrada a la carga.

……

……

d) La potencia activa y reactiva absorbida por la línea.

……

……

e) El voltaje de línea en la carga.

……

……

f) La caída de voltaje por fase en la línea de transmisión.

……

……

g) La potencia aparente total suministrada por la fuente.

……...

……

Conclusiones

……...

……

……...

……

Recomendaciones

……...

……

……...

……

Bibliografía

……...

……

……...

……

8.2 PRÁCTICA DE LABORATORIO # 2

Tema: ANÁLISIS DE LA RED ELÉCTRICA CON CARGAS NO LINEALES

Objetivos:

- Conocer el comportamiento de la red eléctrica al introducir en ella una carga no lineal (variador de frecuencia, fuente de alimentación conmutada).
- Familiarizarse con los conceptos de los parámetros de medición eléctricos.

Introducción:

El uso de equipo electrónico moderno ha cambiado nuestras vidas, pero ha cambiado también la característica de carga de las instalaciones modernas. A estas cargas electrónicas se las conoce como cargas no lineales, debido a que originan una respuesta periódica que se aparta de la forma senoidal pura.

Algunos de los efectos adversos de cargas no lineales concentradas sobre una compañía de electricidad son:

- Distorsión de voltaje dentro de instalaciones
- Corrientes excedentes por el neutro.
- Altos niveles voltaje de neutro a tierra.
- Recalentamiento en transformadores.
- Los grandes campos magnéticos que emanan desde transformadores.
- La reducción en la capacidad de distribución.

VARIADOR DE FRECUENCIA

El motor de corriente alterna, a pesar de ser un motor robusto, de poco mantenimiento, liviano e ideal para la mayoría de las aplicaciones industriales, tiene el inconveniente de ser un motor rígido en cuanto a su velocidad. La velocidad del motor asincrónico depende de la forma constructiva del motor y de la frecuencia de alimentación.

Como la frecuencia de alimentación que entregan las Compañías de electricidad es constante, la velocidad de los motores asincrónicos es constante, salvo que se varíe el número de polos, el resbalamiento o la frecuencia.

El método más eficiente de controlar la velocidad de un motor eléctrico es por medio de un variador electrónico de frecuencia.

El variador de frecuencia regula la frecuencia del voltaje aplicado al motor, logrando modificar su velocidad. Sin embargo, simultáneamente con el cambio de frecuencia, debe variarse el voltaje aplicado al motor para evitar la saturación del flujo magnético con una elevación de la corriente que dañaría el motor.

Figura 8.2.1 Variador de frecuencia

Los variadores de frecuencia están compuestos por:

- **Etapa Rectificadora.** Convierte la tensión alterna en continua mediante rectificadores de diodos, tiristores, etc.

- **Etapa intermedia.** Filtro para suavizar la tensión rectificada y reducir la emisión de armónicos.

- **Inversor o "Inverter".** Convierte la tensión continua en otra de tensión y frecuencia variable mediante la generación de pulsos. Actualmente se emplean IGBTs (Isolated Gate Bipolar Transistors) para generar los pulsos controlados de tensión. Los equipos más modernos utilizan IGBT´s inteligentes que incorporan un microprocesador con todas las protecciones por sobrecorriente, sobretensión, baja tensión, cortocircuitos, puesta a masa del motor, sobretemperaturas, etc.

- **Etapa de control.** Esta etapa controla los IGBT para generar los pulsos variables de tensión y frecuencia. Y además controla los parámetros externos en general, etc.

Los variadores mas utilizados utilizan modulación PWM (Modulación de Ancho de Pulsos) y usan en la etapa rectificadora puente de diodos rectificadores. En la etapa intermedia se usan condensadores y bobinas para disminuir las armónicas y mejorar el factor de potencia. Los fabricantes que utilizan bobinas en la línea en lugar del circuito intermedio, tienen la desventaja de ocupar más espacio y disminuir la eficiencia del variador.

MOTOR DE JAULA DE ARDILLA

Los motores de inducción de jaula de ardilla son maquinas utilizadas con mayor frecuencia en el sector industrial. Si bien el control de velocidad, torque o posición de estas máquinas, es más complejo que el de los motores de corriente continua, la electrónica de potencia ha ayudado a solucionar estos problemas y ha posicionado a este motor como el de menor precio y mayor robustez, además de su casi nulo mantenimiento.

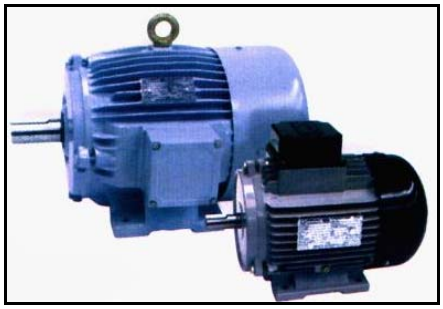


Figura 8.2.2 Motor jaula de ardilla trifásico

Diagrama unifilar del Banco de trabajo para la presente practica

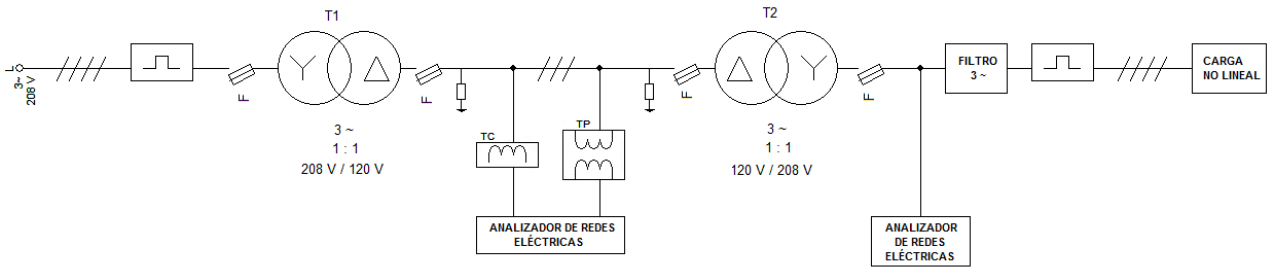


Figura 8.2.3. Diagrama unifilar. Práctica con cargas no lineales

Equipos de medición y carga

- Transformador T1 y T2.
- Analizador de redes eléctricas A1 y A2.
- Variador de frecuencia.
- Motor de jaula de ardilla.
- Cables de conexión.

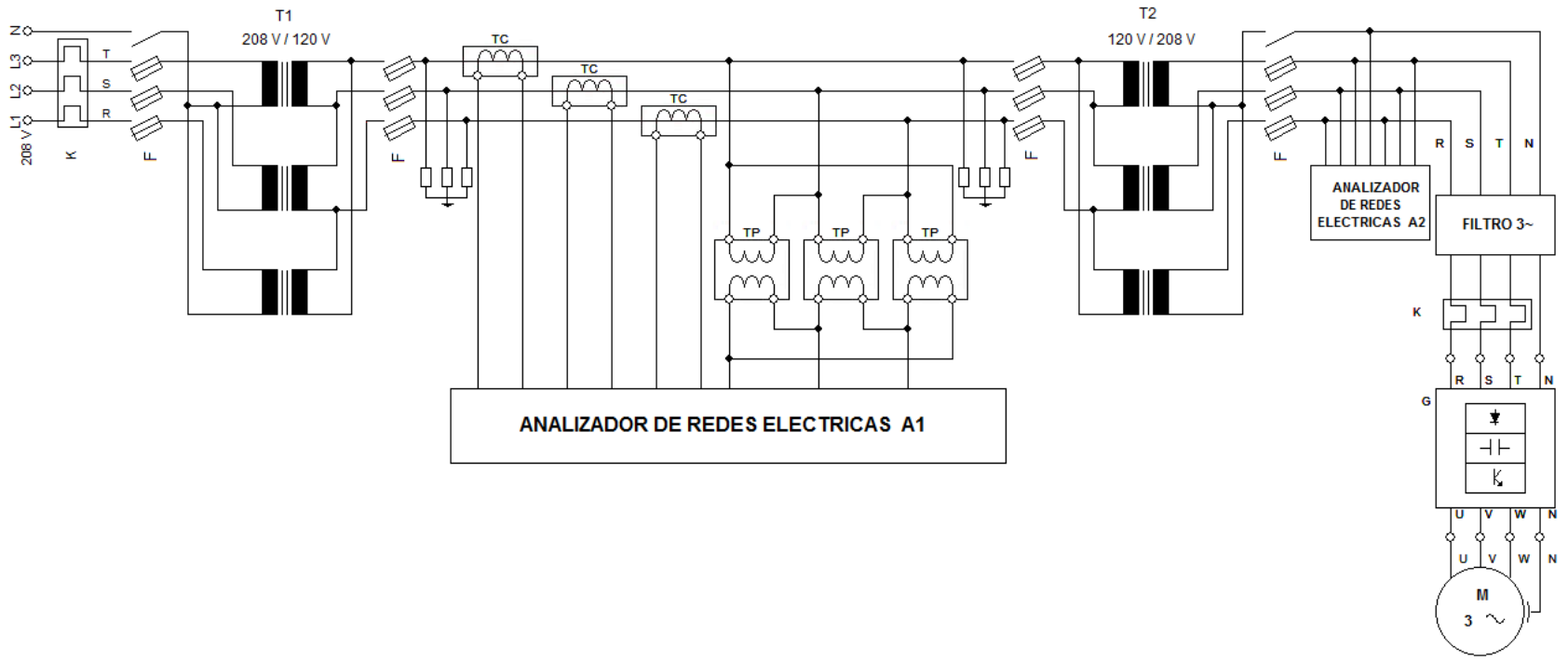
***¡ADVERTENCIA!.....*Conectar el circuito como sistema pasivo (fuentes apagadas)**

Procedimiento

1. Asegúrese de tener todos los instrumentos y equipos para realizar la práctica.

2. Arme el circuito mostrado en la figura.

(Ver página siguiente)



EQUIPOS Y CARGAS NO LINEALES

- ✓ 2 Analizador de Redes Eléctricas
- ✓ 1 Filtro Trifásico
- ✓ 1 Variador de frecuencia
- ✓ 1 Motor ac

PROYECTO DE GRADO	ESCUELA POLITECNICA DEL EJÉRCITO	**Hoja:** 1/1
Realizado por: LESLIE CAJAS	**Titulo:** PRACTICAS DE LABORATORIO CON CARGAS NO LINEALES	**Fecha:** 10 de junio 2008

3. En el analizador A2, obtener las curvas de respuesta de los siguientes parámetros: tensión, corriente, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente y frecuencia; y describir en cada uno el comportamiento de los valores pico, el nivel de equilibrio de las cargas y los intervalos de tiempo de mayor y menor variación de cada una de estas magnitudes.

4. En el analizador A2, obtener los parámetros de los armónicos presentes en la red y su distorsión armónica total (%THD), y determinar cuáles generan mayor distorsión en cada una de las fases.

5. Obtener las curvas de respuesta en el analizador A2 al variar los parámetros de funcionamiento del variador de frecuencia y realizar el análisis respectivo.

6. En el analizador A1, obtener las curvas de respuesta de los siguientes parámetros: tensión, corriente, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente y frecuencia; y describir en cada uno el comportamiento de los valores pico, el nivel de equilibrio de las cargas y los intervalos de tiempo de mayor y menor variación de cada una de estas magnitudes.

7. En el analizador A1, obtener los parámetros de los armónicos presentes en la red y su distorsión armónica total (%THD), y comparar con los registrados en el analizador A2. Realizar el análisis respectivo.

8. Apagar las fuentes de alimentación y los analizadores de red conectados al circuito.

Cuestionario

1. En las mediciones realizadas, ¿por qué no se presentan armónicos cuya frecuencia sea un múltiplo par de la frecuencia de la onda fundamental?

……

……

2. En las últimas décadas, ¿por qué se ha producido un aumento en el nivel de distorsión armónica en las redes eléctricas?

……

……

3. ¿Qué alteraciones produce la presencia de armónicos en el factor de potencia total de una instalación eléctrica?

……

……

4. ¿Cuáles son los métodos más usuales para la mitigación de los efectos de los armónicos?

……

……

5. En los transformadores, ¿qué se define como factor k y cuáles son sus implicaciones en el dimensionamiento e instalación de las redes eléctricas?

……

……

6. Indicar las aplicaciones más comunes de las cargas no lineales en los sistemas electrónicos de potencia

……

……

7. ¿Cuáles deberían ser las características a considerar para que el filtro implementado convierta al variador de frecuencia en una carga lineal?

……

……

Conclusiones

……

……

……

……

Recomendaciones

……

……

……

……

Bibliografía

.....

.....

.....

.....

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- ✓ Dentro de la Calidad de Servicio Eléctrico es importante conocer los conceptos, propósitos y estándares relacionados con la Calidad del Producto establecidos por el Consejo Nacional de Electricidad del Ecuador, CONELEC

- ✓ El tener una buena calidad de la energía eléctrica implica mantener las variables eléctricas de tensión, frecuencias y forma de onda dentro de parámetros normalizados.

- ✓ El trabajo realizado ha permitido desarrollar un estudio las perturbaciones que degradan la calidad de la energía eléctrica, sus causas y efectos.

- ✓ La Calidad en el Suministro de la Energía Eléctrica es un tema de vital importancia para todos los sectores, desde su generación hasta los procesos de distribución para el uso de los consumidores finales

- ✓ El advenimiento de la Electrónica, ha traído beneficios en la optimización de procesos, pero esto implica una drástica conversión en las características voltoamperimétricas de las cargas conectadas a lo largo de la Red de Distribución.

- ✓ Las cargas lineales son aquellas que al ser alimentadas con una tensión senoidal da lugar a una corriente de igual forma, auque puede existir un desfase entre la tensión y la corriente como es el caso de elementos reactivos

- ✓ Las cargas no lineales son aquellas que generan corrientes no senoidales, es decir, corrientes que además de la componente fundamental tienen otras señales eléctricas con frecuencias múltiplos de la fundamental, conocidos como armónicos.

- ✓ Los armónicos son perturbaciones de consideración, que afectan la calidad de la energía eléctrica, estos suelen ser responsables de sobrecalentamiento de transformadores y líneas de distribución, además provocar el funcionamiento errático de equipos conectados a lo largo de la Red de Distribución.

- ✓ El conocimiento de las perturbaciones y la adecuada elección de soluciones permiten optimizar recursos; ya que se mejora la eficiencia general de los sistemas

- ✓ El laboratorio de experimentación permitirá un análisis completo del comportamiento de la energía eléctrica ante perturbaciones producidas por cargas no lineales.

- ✓ Los equipos de última generación como analizadores de redes eléctricas proporcionan un completo análisis de los disturbios que degradan la calidad de la energía eléctrica de las redes.

RECOMENDACIONES

- ✓ Todas las instituciones deben respetar y mantener funcionando sus equipos dentro de los parámetros normalizados por el CONELEC

- ✓ Las consecuencias de los problemas ocasionados por las perturbaciones eléctricas en la red pueden producir grandes pérdidas económicas en instalaciones industriales, por lo que se recomienda que los equipos estén debidamente protegidos.

- ✓ Realizar de manera correcta las conexiones para evitar daños en el sistema y equipos de laboratorio.

- ✓ Se recomienda que el laboratorio guarde normas y estándares de seguridad

- ✓ Siendo este campo es fundamental la implementar el Laboratorio en el Departamento de Eléctrica y Electrónica

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ✓ Consejo Nacional de Electricidad del Ecuador, Reglamentos, http://www.conelec.gov.ec/

- ✓ Transformador De Potencia, http://patricioconcha.ubb.cl/transformadores/tipos.htm transformadores

- ✓ http://www.terra.es/personal2/equipos2/rlc.htm r,l,c

- ✓ Reglamento De Calidad De Servicio De Distribución De Energía Eléctrica, http://www.ute.com.uy/servicios_cliente/docs/REGLAMENTO/REGLAMENTO%20DE%20CALIDAD_INFORMACION%20COMPLEMENTARIA.pdf,

- ✓ García Álvarez, José Antonio, Factor de Potencia, http://www.asifunciona.com/electrotecnia/ke_factor_potencia/ke_factor_potencia_4.htm

- ✓ Ministerio de Industria, Turismo y Comercio España, Medida de la Continuidad del Suministro, http://www.mityc.es/Electricidad/Seccion/Calidad/Suministro/Medida/.

- ✓ Vázquez, Jaime, Causas de Interrupción en el servicio eléctrico, http://jaimevp.tripod.com/Elect_Vzla/al_suscriptor2.HTM

- ✓ Red de Distribución de Energía Eléctrica, http://www.babylon.com/definition/Red_de_distribuci%C3%B3n_de_energ%C3%ADa_el%C3%A9ctrica/Spanish

- ✓ [1] Reglamento Sustitutivo del Reglamento de Suministro de Electricidad, http://www.conelec.gov.ec/normativa_detalles.php?cod=145&idiom=1&menu=2&submenu1=15&submenu2=6

- ✓ Redes de Distribución de Energía Eléctrica, http://www.uns.edu.pe/civil/bv/descarga/reglamentos/red_elec.htm

- ✓ Líneas Aéreas de Alta Tensión, http://www.textoscientificos.com/fisica/transmision-energia/lineas-alta-tension

- ✓ Electricidad Generación y Transporte, http://www.terra.es/personal/lermon/cat/articles/evin0178.htm

- ✓ Cálculo de Redes de Distribución y Conductores en BT, http://www.uco.es/~el1bumad/docencia/minas/ie06t6.pdf.

- ✓ La Electricidad, http://www.electricidaddoncel.com/noticias/?p=7

- ✓ Pérdidas de Energía, http://www.hoy.com.ec/Suplemen/blan163/ negro2.htm.

- ✓ Suárez, J.A, Cargas no Lineales Residenciales, http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718- 07642005000300009&script= sci_arttext.

- ✓ Acevedo Donoso, Francisco, Componentes Armónicas em redes de Distribución Eléctricas, http://www.revistamarina.cl/revistas/2001/5 /Acevedo.pdf.

- ✓ Convertidores de Potencia, http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/mendez_s_j/capitulo

- ✓ Fuentes conmutadas (switching), http://www.taringa.net/posts/info/819308/Fuentes-switching-(conmutadas).html.

- ✓ Fuentes Switching, http://rudius.net/oz2m/ericsson_rectifier_spanish.htm.
- ✓ Convertidor DC a DC, http://es.wikipedia.org/wiki/Convertidor_DC_a_DC

- ✓ Armónicos, http://jaimevp.tripod.com/Electricidad/armonico519_pag2.htm.

- ✓ Zamora, A.J, Equipo Limitador de la Distorsión Armónica, http://www.aeipro.com/congresos/2001_1/CD1/INGENIERIA%20DE%20PRODUCTOS/BB32.htm.
- ✓ Irene, Franco, Motor de Corriente Alterna, http://www.monografias.com/trabajos23/motores-corriente-alterna/motores-corriente-alterna.shtml.

- ✓ Armónicas, http://images.google.com.ec/imgres?imgurl=http://www.procobreperu.org/Imagenes/Armonicas_Fig2.jpg&imgrefurl=http://www.procobreperu.org/pub_ala_arm%25C3%25B3nicas.htm&h=141&w=256&sz=14&hl=es&start=10&um=1&tbnid=m5IHGSLfrc0SmM:&tbnh=61&tbnw=111&prev=/images%3Fq%3Dhornos%2Bde%2Barco%2Barmonicos%26um%3D1%26hl%3Des%26sa%3DN.

- ✓ Problema de Armónicos, http://prodiesa.com.mx/faqssolucionarmonicos.htm.

- ✓ González, Sagredo, Filtros pasivos para eliminación de Armónicos, http://www.usuarios.lycos.es/arquinstal03/publicaciones/otras/bib788_filtros_pasivos_para_la_eliminacion_de_armonicos.pdf filtros.

- ✓ Bancos de Capacitores, http://www.fasor.com.sv/schneider_productos.html

- ✓ Fuente de Alimentación Ininterrumpible (UPS), http://es.kioskea.net/protect/onduleur.php3

- ✓ Supresor de Picos, http://www.lowes.com/lowes/lkn?action=noNavProcessor&p=spanish/BuyGuide/SurgeProtectorGuide.html&sec=esp

- ✓ Supresor de Picos, http://www.ipl.com.co/supresores.htm, 17 de Junio 2008
- ✓ Reguladores de Voltaje , http://www.ipl.com.co/reguladores.htm

- ✓ Transformadores de Aislamiento, http://www.mty.itesm.mx/etie/deptos/ie/profesores/allamas/cursos/CEE/articulos/03_TrafoAis.pdf

- ✓ Constitución de una puesta a tierra, http://www.consumer.es/web/es/bricolaje/electricidad/2002/02/06/37698.php

- ✓ De los Reyes, Jorge, Tierras Eléctricas, http://www.mty.itesm.mx/etie/deptos/ie/profesores/allamas/cursos/CEE/articulos/04_tierras.pdf

- ✓ Filtros de Armónicos para Medida de Tensión, http://www.leyden.com.ar/esp/pdf/filtros_de_armonicas_media_tension.pdf cargas no lineales.

- ✓ Medición de una Fuente de Conmutación, http://iteso.mx/~erayas/documents/cad_course/final_projects/convertidor_buck.pdf.

- ✓ Analizadores de redes, http://www.amperis.com/productos/analizadores-redes/.

- ✓ Multímetro Digital, http://www.levistronic.es/spain/manualdetaller/lotester.html

- ✓ Analizador de redes, http://es.wikipedia.org/wiki/Analizador_de_redes_(electr%C3%B3nica) analizadores

- ✓ Parámetros de la Corriente Alterna, http://www.electronicafacil.net/tutoriales/Parametros-corriente-alterna.html para las practicas

- ✓ Controladores de Frecuencia Variable, http://www.watergymex.org/contenidos/rtecnicos/Curso%20basico%20de%20Variadores%20de%20Frecuencia.pdf

- ✓ Relés Térmicos, http://www.f-haroldo-pinelli.com.ar/Pagvarias/Reles.htm

- ✓ Seleccionador Eléctrico, http://www.nichese.com/seccionador.html

- ✓ Enríquez Harper, Gilberto, *Elementaos de Diseño de subestaciones Eléctricas*, 1ra edición, Limusa S.A, México, 1983.

- ✓ Zoppetti Judez, Gaudencio, *Centrales Hidroeléctricas,* 1ra edición, Gustavo Gili S.A, Barcelona, 1974.

- ✓ Raúll Martín, Juan, *Diseño de Subestaciones Eléctricas,* Mc Graw-Hill, México, 1987.

- ✓ Harper, Enríquez, *El ABC de la Calidad de la Energía Eléctrica,* 1ra edición, Limsa S.A, México, 2003.

- ✓ Torres, Horancio, *Energía Eléctrica un producto con calidad*, 2da edición, Icontec, Bogota, 1985.

- ✓ J. Goñi, Miguel, *Biblioteca Básica de Electrónica – Diccionario de términos*, tomo 14, 1ra edición, Publicidad y Ediciones S.A, Chile, 1986.

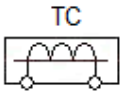
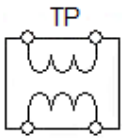
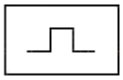
- ✓ J. Goñi, Miguel, *Biblioteca Básica de Electrónica – Laboratorio Básico*, tomo 1, 1ra edición, Publicidad y Ediciones S.A, Chile, 1986.

- ✓ J. Goñi, Miguel, *Biblioteca Básica de Electrónica – Instrumentos de Medida*, tomo 8, 1ra edición, Publicidad y Ediciones S.A, Chile, 1986.

- ✓ Wildi, Theodore, Electric Power Transmission System, 1ra edición, Buck Engineering Co, Quebec Canadá , 1974.

- ✓ Wildi, Theodore, Experimentos de Equipo Eléctrico, 1ra edición, Limusa, Quebec Canadá, 1975.

ANEXO

ELEMENTOS	SIMBOLO
Transformador de corriente (TC)	
Transformador voltaje (TP)	
Relé térmico	
Seccionador con fusible	
Pararrayos	