DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÒDULO PARA EL ESTUDIO DE CALIDAD DE LA POTENCIA DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

DIEGO ALEJANDRO ARISTIZÁBAL CHACÓN

CARLOS ORLANDO REYES MAHECHA

UNIVERSIDAD DE LA SALLE

FACULTAD DE INGENIERÌA ELÈCTRICA

BOGOTÁ D.C.

2007

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÒDULO PARA EL ESTUDIO DE CALIDAD DE LA POTENCIA DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

DIEGO ALEJANDRO ARISTIZÁBAL CHACÓN

CARLOS ORLANDO REYES MAHECHA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA.

OSCAR DAVID FLOREZ CEDIEL

INGENIERO ELECTRICISTA

DIRECTOR DE TESIS

UNIVERSIDAD DE LA SALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRICA

BOGOTÁ D.C.

2007

Nota de aceptación

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Firma del director de proyecto de grado

ING. OSCAR DAVID FLOREZ CEDIEL

_____

Firma del jurado

ING. GUSTAVO ARCINIEGAS

_____

Firma del jurado

ING. JHON JAIRO PÉREZ

A mis padres y hermano por el apoyo incondicional que me han brindado a lo largo de mi vida, con su ejemplo y enseñanzas han hecho de mí un hombre de bien. A mi novia Adriana, por su cariño, comprensión y ayuda incondicional durante estos últimos años.

Carlos Orlando Reyes Mahecha.

A mis padres Carlos Alberto y Margarita por que son las personas más importantes en mi vida ya que se han esmerado en educarme como una persona de bien, con valores morales y éticos a parte de todo el amor, cariño que me han brindado durante todos los años de mi vida, por esta razón este logro hace también parte de ellos; Adicionalmente a mi hermano Carlos Andrés que es mi compañero y amigo a mi hermano Juan Carlos que ha sido mi ángel de la guardia desde el cielo y a mi novia Andrea por todo su cariño y amor.

Diego Alejandro Aristizábal Chacón.

AGRADECIMIENTO

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Ing. Oscar David Florez Cediel, Director del proyecto, por sus aportes para el desarrollo de este proyecto.

Ing. Gustavo Arciniegas, por su valiosa orientación para la realización de este proyecto.

Tecnólogo Avaro J. Gómez Hernández, Coordinador de laboratorios de la facultad Ing. Eléctrica, por su valiosa colaboración y acompañamiento en las prácticas de laboratorio.

A la facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de la Salle y todo su cuerpo docente y a las personas que de una u otra forma colaboraron para alcanzar los objetivos de este proyecto.

GLOSARIO

ARMÓNICO: Componente sinusoidal de una onda periódica que tiene una frecuencia que es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental. Se puede caracterizar por tres valores: la magnitud, el ángulo de fase y la frecuencia.

CARGA: La potencia eléctrica requerida para el funcionamiento de uno o varios equipos eléctricos o la potencia que transporta un circuito.

CARGAS NO LINEALES: Una carga se dice no lineal cuando la corriente que ella absorbe no es de la misma forma que la tensión que la alimenta. Esta corriente es rica en componentes armónicos donde su espectro será función de la naturaleza de la carga.

CALIDAD: Es la totalidad de las características de un ente que el confiere la aptitud para satisfacer necesidades explicitas e implícitas. Es un conjunto de cualidades o atributos, como disponibilidad, precio, confiabilidad, durabilidad, seguridad, continuidad, consistencia, respaldo y percepción.

CORRIENTE ELECTRICA: Es el movimiento de electrones entre dos puntos que no se hallan al mismo potencial.

FRECUENCIA: Número de periodos por segundo de una onda. Se mide en hertz o ciclos por segundo.

ILUMINANCIA: Es el flujo luminoso que incide sobre una superficie. Su unidad, el lux, equivale al flujo luminoso de un lumen que incide homogéneamente sobre una superficie de un metro cuadrado.

LUMINANCIA: Es el flujo reflejado por los cuerpos, o el flujo emitido si un objeto se considera fuente de luz. También llamado brillo fotométrico, su unidad es la candela o lúmenes por metro cuadrado.

MULTIMETRO: Instrumento eléctrico designado para medir dos o más magnitudes eléctricas (Voltios, Amperios, Continuidad, Ohmios).

NEUTRO: Conductor activo conectado intencionalmente a una puesta a tierra, bien solidamente o a través de una impedancia limitadora.

PUNTO NEUTRO: Es el nodo o punto de un sistema eléctrico, que para las condiciones de funcionamiento previstas, presenta la misma diferencia de potencial con la relación a cada una de las fases.

TENSION NOMINAL: Valor convencional de la tensión con el cual se designa un sistema, instalación o equipo y para el que ha sido previsto su funcionamiento y aislamiento.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN…….1

OBJETIVOS…….3

OBJETIVO GENERAL…….3

OBJETIVOS ESPECÍFICOS……..3

1. MARCO CONCEPTUAL……4

1.1 CALIDAD DE LA ENERGÍA……..……8

1.2 TRASITORIOS……..9

1.2.1 Transitorios de Impulso……9

1.2.2 Transitorios Oscilatorios……10

1.3 VARIACIONES DE CORTA DURACIÒN……10

1.3.1 Interrupciones……...10

1.3.2 Sags……...10

1.3.3 Swells……12

1.4 VARIACIONES DE LARGA DURACIÒN……...13

1.4.1 Interrupciòn sostenida……13

1.4.2 Sobretensiòn……14

1.4.2 Subtensiòn……14

1.5.DESBALANCE DE VOLTAJE…….....15

1.6 DISTORCIONES DE LA FORMA DE ONDA……15

1.6.1 Inserciòn de corriente continua (DC Offset)……16

1.6.2 Armònicas……16

1.6.3 Distorsiones Inter-armònicas……17

1.6.4 Notching……17

1.6.5 Ruido de lìnea……..18

1.7 FLUCTUACIONES DE VOLTAJE (Flicker)……19

1.8. VARIACIONES EN LA FRECUENCIA DE LA RED……21

1.9 DISTORSION ARMÒNICA TOTAL (THD)……22

2. ENSAYOS REALIZADOS……...24

2.1 DESARROLLO DEL MÓDULO……24

2.1.1 Prueba No. 1 (carga RL)……24

2.1.2 Prueba No. 2 (Montaje plano electrónico 1 con 2N2646 basado en osciladores de relajación). Se utilizó el siguiente montaje para realizar las pruebas de laboratorio con el fin de determinar que comportamiento genera en la red de baja tensión en condiciones controladas en laboratorio……29

2.1.3 Prueba No. 3 (Montaje plano electrónico 1 con 2N2646, más, toroide en R3)……35

2.1.4 Desarrollo del plano final para el módulo ……36

3. PROCEDIMIENTO PARA EL MANEJO DEL MÓDULO……43

4. PRACTICAS DE LABORATORIO……..46

4.1 PRACTICA 1. R……...46

4.1.1 Esquema eléctrico……...46

4.2 PRACTICA 2. R y RL EN SERIE……48

4.2.1 Esquema eléctrico R en serie……48

4.2.2 Esquema eléctrico R en serie……51

4.3 PRACTICA 3. RL EN PARALELO……53

4.3.1 Esquema elèctrico RL en paraleo……...53

4.4 PRACTICA 4. RLC EN PARALELO Y EN SERIE……55

4.4.1 Esquema elèctrico RLC serie……56

4.4.2 Esquema elèctrico RLC paralelo……..……57

CONCLUSIONES……59

RECOMENDACIONES……61

BIBLIOGRAFIA……63

ANEXOS……65

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1.categorías y características de fenómenos electromagnéticos en sistemas de potencia…… 4

Tabla 2. Límites de corriente armónica (*Ih /I1*)(%) establecidos en el IEEE 519-1992…… 23

Tabla 3. Límites de tensión armónica (V*h /V1*)(%) para Productores de Energía establecidos en el estándar IEEE 519-1992……23

Tabla 4.Comportamiento armónico de la onda de tensión prueba No. 1. (Carga RL.)……..26

Tabla 5. Comportamiento armónico de la onda de corriente prueba No. 1. (Carga RL.)……..29

Tabla 6. Comportamiento armónico de la onda de tensión prueba No.2 (Montaje plano electrónico 1 con 2N2646)…… 33

Tabla 7. Comportamiento armónico de la onda de corriente prueba No.2 (Montaje plano electrónico 1 con 2N2646)……..……..35

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura No1.
Circuito con cargas lineales……..7

Figura No 2.
Circuito con cargas no lineales. …….....7

Figura No 3.
Onda senosoidal pura……9

Figura No 4.
Deformación de Potencia (sag)……..11

Figura No 5.
Elevaciones de tensión (swells)……12

Figura No 6.
Interrupciones De Energía……13

Figura No 7.
Sobretensión……..14

Figura No 8.
Subtensión……15

Figura No 9.
Distorsión armónica……17

Figura No 10.
Muesca (Notch)……..18

Figura No 11.
Ruido de línea……19

Figura No 12.
Efecto flicker……20

Figura No 13.
Definiciones de eventos de magnitud de voltaje como los usados en la IEEE Std-1159 de 1995……..21

Pág.

Figura No 14.
Comportamiento Corriente y tensión prueba No. 1 (Carga RL)……..……25

Figura No 15.
Comportamiento armónico de la onda de tensión prueba No. 1. (Carga RL)……...……..……25

Figura No 16.
Onda de corriente prueba No. 1. (Carga RL)……..……..……27

Figura No 17.
Comportamiento armónico de la onda de corriente prueba No. 1. (Carga RL) ……..……28

Figura No 18.
Plano electrónico No.1 basado en 2N2646……..……30

Figura No 19.
Onda de tensión prueba No. 2 (Montaje plano electrónico 1 con 2N2646)……..……..31

Figura No 20.
Comportamiento armónico de la onda de tensión prueba No. 2 (Montaje plano electrónico 1 con 2N2646)……32

Figura No 21.
Onda de corriente prueba No. 2 (Montaje plano electrónico 1 con 2N2646)……..……..34

Figura No 22.
Comportamiento armónico de la onda de corriente prueba No.2 (Montaje plano electrónico 1 con 2N2646)……34

Figura No 23.
Plano electrónico 1 basado en 2N2646 más toroide……36

Pág.

Figura No 24.
Plano electrónico tarjeta Módulo para el estudio de la calidad de la potencia de la energía eléctrica……..…38

Figura No25.
Montaje plano final con cargas resistivas bombillas……....39

Figura No 26.
Medición de corriente que transporta el conductor conectado a la carga....39

Figura No 27.
Carga conectada al módulo……...40

Figura No 28
Señal de los puntos de la conexión de entrada de la carga……40

Figura No 29.
Montaje plano final con cargas inductivas (transformador de tensión de 3 kVA) y resistivas (banco de resistencias))……41

Figura No 30.
Conexión en serie de las resistencias del banco de Lorenzo en el tap uno……...……42

Figura No 31.
Señal de los bornes secundarios del transformador……..……42

Figura No 32.
Esquema eléctrico práctica R……...……47

Figura No 33.
Esquema eléctrico R en serie……50

Figura No 34.
Esquema eléctrico práctica RL en serie……52

Figura No 35.
Esquema eléctrico RL en paralelo……54

Pág.

Figura No 36.
Esquema eléctrico RLC serie…….56

Figura No 37.
Esquema eléctrico RLC paralelo……57

LISTA DE ANEXOS

Pág.

Anexo A. Fluke serie 190, osciloscopio……..…65

Anexo B. Pinzas amperimétricas……66

Anexo C. Analizador de red AMC 3945……67

Anexo D. Multímetro……....68

INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico se desenvuelve en una época en que los progresos se realizan cada vez más rápido y perceptible a los problemas de la humanidad. Ahora bien, en las industrias y empresas del sector eléctrico, se busca optimizar los procesos y servicios en pro de una excelente calidad de energía tendiendo a suministrar un mejor servicio. El término *"calidad de energía eléctrica"* se emplea para describir la variación de la tensión, corriente, y frecuencia en el sistema eléctrico.

En los últimos años la importancia dada a la calidad de la energía ha ido en aumento, debido a que cada día las cargas son más sensitivas a las variaciones de ciertos parámetros del suministro de energía eléctrica. En la actualidad se encuentran cargas tanto industriales, comerciales como residenciales, las cuales hacen uso intensivo de controladores basados en microprocesadores. Además de esto, cada día hay una presencia mayor de la electrónica de potencia, que se usa en distintas aplicaciones. Históricamente, la mayoría de los equipos son capaces de operar satisfactoriamente con variaciones relativamente amplias de estos tres parámetros. Sin embargo, en los últimos veinte años se han agregado al sistema eléctrico un elevado número de equipos, no tan tolerantes a estas variaciones, incluyendo a los controlados electrónicamente.

El control de algunos elementos se hace directamente a través de electrónica de conversión de potencia, como son los variadores de velocidad de AC, DC, y fuentes de energía conmutadas, además del equipo electrónico que está en los controles periféricos, como computadores y controladores lógicos programables (PLC's). Con la disponibilidad de estos complejos controles, se desarrolló un control de proceso más preciso, y un sistema de protección más sensitivo; lo que hace a éstos aún susceptibles a los efectos de los disturbios en el sistema eléctrico.

Las perturbaciones armónicas en sistemas eléctricos han sido considerados normales durante muchos años, ahora éstos pueden llegar a causar perturbaciones y daños severos en los sistemas eléctricos generando fallas en equipos tanto para uso industrial como residencial, con la consecuente pérdida de

producción. Adicionalmente, deben tomarse en cuenta nuevas medidas para desarrollar un sistema eléctrico confiable.

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

Con este estudio se pretende desarrollar un módulo para el estudio de la calidad de la energía eléctrica, que permita comprender de una manera clara y didáctica los diferentes tipos de perturbaciones eléctricas en un sistema y así poder dar soluciones a los problemas ocasionados por estas. Este módulo permitirá generar y visualizar las diferentes perturbaciones armónicas en la red de baja tensión en condiciones controladas (laboratorio) con el fin de determinar las características de cada una de ellas haciendo uso de osciloscopios y analizadores de red.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Construir un módulo que en forma práctica afecte un sistema eléctrico en las características de las ondas de tensión y corriente de la red de baja tensión, en condiciones controladas (laboratorio), para que permita al alumno observar las diferentes perturbaciones eléctricas y a la vez encuentre soluciones en su vida laboral para mejorar la calidad de la energía.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir una herramienta de trabajo que permita al alumno observar las diferentes perturbaciones eléctricas en baja tensión como (Eventos transitorios, variaciones de corta duración, variaciones de larga duración, fluctuaciones de tensión)
- Generar la documentación básica en una guía para el manejo del módulo.
- Plantear en forma práctica un sistema eléctrico que afecte las características de las ondas de tensión y corriente de la red.

1. MARCO CONCEPTUAL

Actualmente en la infraestructura de laboratorios de prueba es difícil observar el comportamiento de las perturbaciones o deformaciones de las ondas de tensión y corriente originadas por equipos conectados a la red de baja tensión, con el fin tener elementos de consulta y de definición la IEEE en su norma IEEE 1159 de 1995, proporciona descripciones detalladas de las variaciones de la calidad de la energía presentada en la tabla 1

Tabla 1.categorías y características de fenómenos electromagnéticos en sistemas de potencia.

Categoría	Contenido Típico Espectral	Duración Típica	Magnitud Típica del Voltaje
1.0 Transitorios			
1.1Impulsos			
1.1.1 Nanosegundos	5 ns de elevación	<50 ns	
1.1.2 Microsegundos	1 µs de elevación	50 ns - 1 ms	
1.1.3 Milisegundos	0.1 ms de elevación	> 1 ms	
1.2 Oscilatorios			
1.2.1 Baja Frecuencia	< 5kHz	0.3 - 50 ms	0 - 4 pu
1.2.2 Frecuencia Media	5 - 500 kHz	20 µs	0 - 8 pu
1.2.3 Alta Frecuencia	0.5 - 5MHz	5 µs	0 - 4 pu
2.0 Variaciones de Corta duración			
2.1 Instantáneas			
2.1.1 Sag		0.5 - 30 ciclos	0.1 -0.9 pu
2.1.2 Swell		0.5 - 30 ciclos	1.1 - 1.8 pu
2.2 Momentáneas			
2.2.1 Interrupción		0.5 ciclos - 3 seg	< 0.1 pu
2.2.2 Sag		30 ciclos - 3 seg	0.1 -0.9 pu
2.2.3 Swell		30 ciclos - 3 seg	1.1 - 1.4 pu
2.3 Temporal			
2.3.1 Interrupción		3 seg - 1 min	< 0.1 pu
2.3.2 Sag		3 seg - 1 min	0.1 -0.9 pu
2.3.3 Swell		3 seg - 1 min	1.1 - 1.2 pu
3.0 Variaciones de larga duración			
3.1 Interrupción sostenida		> 1 min	0.0 pu
3.2 Bajo voltaje		> 1 min	0.8 -0.9 pu
3.3 Sobrevoltaje		> 1 min	1.1 - 1.2 pu
4.0 Desbalance en voltaje		Estado Estable	0.5 - 2%
5.0 Distorsión de Forma de Onda			
5.1 Componente de directa		Estado Estable	0 - 0.1%
5.2 Contenido armónico	0 -100th H	Estado Estable	0 - 20%
5.3 Interarmónicas	0 - 6 kHz	Estado Estable	0 - 2%
5.4 Muescas en el voltaje		Estado Estable	
5.5 Ruido	Banda amplia	Estado Estable	0 - 1%
6.0 Fluctuaciones de Voltaje	< 25 Hz	Intermitente	0.1 - 7%
7.0 Variaciones en la Frecuencia		<10 seg	

Fuente IEEE 1159, 1995 **[2]**

A las categorías de perturbaciones se les ha dado nombres y definiciones diversos, según el país o el área de la industria de que se trate. Un grupo de trabajo de la IEEE [14] (tabla 1), desarrolló un conjunto consistente de definiciones que son las que habitualmente se emplean para la coordinación de las mediciones. Las razones principales de desarrollar las categorías de fenómenos electromagnéticos es que existe diversas maneras de solucionar los problemas de la calidad de la energía dependiendo de la variación particular de la onda; debido a esto se las definiciones de las principales perturbaciones son:

- **Transitorios** (transients)
  - ✓ Transitorios de Impulso (Nanosegundos, Microsegundos y Milisegundos)
  - ✓ Transitorios oscilatorios (Nanosegundos, Microsegundos y Milisegundos)

- **Variaciones de corta duración**
  - ✓ Sags (Instantáneos, Momentáneos y Temporales)
  - ✓ Swells (Instantáneos, Momentáneos y Temporales)
  - ✓ Interrupciones (Momentáneos y Temporales)

- **Variaciones de larga duración**
  - ✓ Interrupciones sostenidas
  - ✓ Sobretensión
  - ✓ Subtensión

- **Desbalance de voltaje** (Voltge unbalance)

- **Distorsiones de la Forma de onda** (waveform distortion)
  - ✓ Inserción de corriente continua (DC Offset)
  - ✓ Armónicas (Harmonics)
  - ✓ Inter-Armónicas (Interharmonics)
  - ✓ Notching
  - ✓ Ruido eletrico (Noise)

- **Fluctuaciones de voltaje** (Flicker)

- **Variaciones en la frecuencia de la red**

Las perturbaciones o deformaciones de onda pueden ser generadas por varias causas, una de las cuales es la conexión a la red de energía eléctrica de ciertos tipos de cargas (cargas perturbadoras) como:

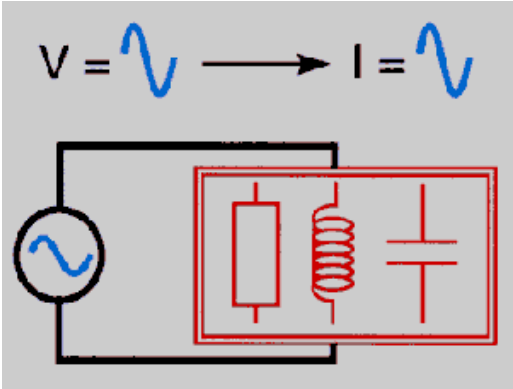
- Grandes cargas con elevada frecuencia de conexión y desconexión.
- Hornos de arco y de punto.
- Soldadura por arco eléctrico.
- Grandes motores de cargas variables.
- Molinos de trituración.
- Conmutación frecuente de los escalones de compensación de potencia reactiva.
- Equipos de electrónica de potencia:
    - Rectificadores controlados
    - Variadores de frecuencia
    - Convertidores en general
- Reguladores electrónicos de cargas.
- Equipos ferromagnéticos saturados.

Los cuales pueden ser de posible utilización por los usuarios.

En general las cargas eléctricas se pueden clasificar en lineales y no lineales. Una carga lineal (figura 1) tomará una corriente proporcional a la tensión de alimentación. Mientras que las cargas no lineales (figura 2) distorsionan la corriente consumida, causando caídas de tensión armónicas y por tanto tensiones de barra distorsionadas [2].

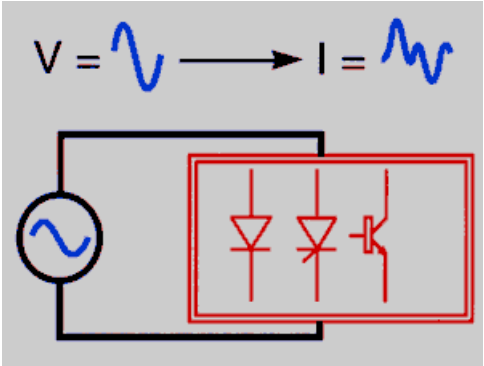
Una de las perturbaciones más nombrada son las componentes armónicas en los sistemas de distribución eléctrica. Si más de una carga lineal está conectada al sistema de distribución de energía, las corrientes armónicas generadas en las cargas no lineales pueden circular en diferentes direcciones: hacia la carga lineal, hacia la impedancia de entrada y/o hacia la otra carga no lineal.

Figura No1. Circuito con cargas lineales.



Fuente:http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/EMC/trabajos_02_03/interf_red_y_ctos_elec/cem/paginas/causas_y_efectos_de_los_armonico.htm. Fecha de consulta15/11/2006.

Figura No 2. Circuito con cargas no lineales.



Fuente:http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/EMC/trabajos_02_03/interf_red_y_ctos_elec/cem/paginas/causas_y_efectos_de_los_armonico.htm. Fecha de consulta15/11/2006.

Los armónicos de corriente que produce un rectificador o cualquier carga de naturaleza no lineal representan otro gran inconveniente para la red eléctrica debido a que producen perturbaciones en la forma de onda de tensión. Se han planteado varias soluciones que van desde mejorar la calidad en las líneas de

transmisión, reduciendo la impedancia de la red, hasta la instalación de equipos acondicionadores de tensión.

1.1 CALIDAD DE LA ENERGÍA.

Calidad de energía, es el concepto de alimentación y de puesta a tierra de equipo electrónico sensible en una manera que sea adecuado para su operación [9]. Según R.C. Dugan y otros [6], establecen que la calidad del suministro es igual a la calidad en el voltaje de alimentación. De tal manera que un voltaje de buena calidad tiene amplitud estable, frecuencia constante, poca distorsión armónica, no tiene ruido, no presenta muescas y/o transitorios y en el caso de voltajes trifásicos no hay desbalance. (Figura 3)

Para clasificar los disturbios de acuerdo a su impacto en la calidad de la energía, pueden servir como referencia cuatro parámetros:

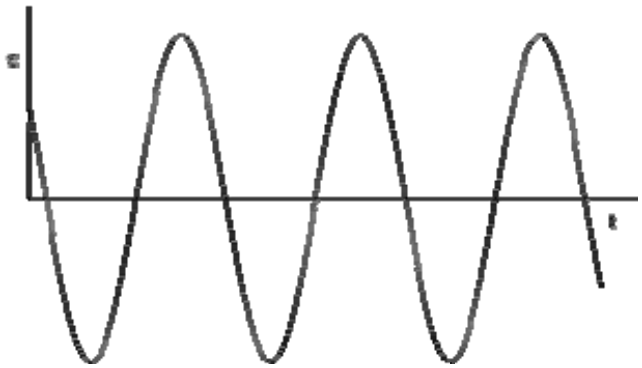
- Variaciones de frecuencia que raramente ocurren en sistemas alimentados por las compañías suministradoras, siendo más común que se encuentren en sistemas aislados de motor-generador en los que las variaciones de carga provocan variaciones de frecuencia.

- Variaciones de amplitud pueden ocurrir en diferentes formas y rangos de duración que van desde transitorios de muy corta duración hasta condiciones de estado estable.

- Variaciones en la forma de onda de voltaje o corriente producidos por cargas no lineales, denominada distorsión armónica, siendo una condición de estado estable.

- Desbalanceo entre las fases de un sistema polifásico causado principalmente por la operación de cargas monofásicas desiguales que afectan principalmente a máquinas rotatorias y circuitos rectificadores trifásicos.

Figura No 3. Onda senosoidal pura.



Fuente: http://www.ustpower.com, Fecha de consulta: 15-Feb-2006

1.2 TRANSITORIOS.

El término Transitorios ha sido usado en el análisis de variaciones de sistema de energía durante un largo rato. Su nombre inmediatamente evoca la noción de un acontecimiento que es indeseable, pero momentáneo. También se considera como el cambio de una variable que desaparece durante la transición de una condición de funcionamiento fija a otra. Su duración puede ser en nanosegundos, microsegundos o milisegundos. [11]

.

1.2.1 Transitorio de Impulso.

Un Transitorio de impulso es un cambio de la frecuencia en las condiciones de estado estacionario del voltaje, corriente, o ambas, siendo unidireccional en polaridad (sobre todo positivo o negativo) [11].

.

1.2.2 Transitorios oscilatorios.

Un Transitorio oscilatorio consiste en un voltaje o corriente cuyo valor instantáneo cambia la polaridad rápidamente. Es descrito por su contenido espectral (frecuencia predominante), duración, y magnitud. [11]

1.3 VARIACIONES DE CORTA DURACIÓN.

Las variaciones de voltaje de corta duración, casi siempre son causadas por condiciones de activación o desactivación de grandes cargas que requieren corrientes iniciales altas, o uniones intermitentemente sueltas en el alambrado de energía. Según la posición de la falla y las condiciones de sistema, la falla puede causar subidas de voltaje temporales (SWELLS), bajones de voltaje (SAGS), o una pérdida completa de voltaje (interrupciones) y se presentan de acuerdo a su duración (momentáneas o temporales) [11].
.

1.3.1 Interrupciones.

Las interrupciones son la ausencia momentánea del suministro eléctrico y pueden ser el resultado de fallas de la red eléctrica, daños de equipo, controladores defectuosos y operación de protecciones. Las interrupciones son medidas por su duración ya que la magnitud de voltaje es siempre menos del 10 % de nominal [11].
.

1.3.2 Sags.

Es una disminución del valor eficaz (rms) de tensión entre un 10 y el 90 % del valor de tensión nominal de operación de la red de distribución. Por lo general tienen que ver con fallas del sistema eléctrico, pero también pueden ser causados al conmutar cargas grandes o al arrancar grandes motores. Estas causas generan corrientes que se rezagan produciendo una caída de voltaje a través de la impedancia del sistema dando una disminución o reducción en el valor efectivo del

voltaje de alimentación con duración de medio ciclo a 3600 ciclos (de 8.333 ms a 60 s). (Figura 9) [11].

Figura No 4. Deformación de Potencia (sag).

Fuente: http://www.ustpower.com, Fecha de consulta: 15-Feb-2006

Las características de los huecos de tensión o sags son [13]:

- *Magnitud del hueco de tensión*: Es la tensión eficaz existente durante el hueco de tensión en por unidad (p.u.) con respecto a la tensión pre-hueco (UH). (En caso de huecos no rectangulares, esta magnitud es función del tiempo).

- *Caída de tensión*: Es la diferencia entre la tensión eficaz pre-hueco y la tensión eficaz durante el hueco (ΔU). (En caso de huecos no rectangulares, también es función del tiempo).

- *Duración del hueco de tensión*: Tiempo durante el cual la tensión eficaz es inferior al 0,9 p.u. y superior 0,1 p.u. de la tensión nominal (Δt).

- *Punto de inicio del hueco*: Ángulo de fase de la tensión fundamental en el momento en que se inicia el hueco (θi). Corresponde al ángulo de fase en el instante que ocurre una falla.

- *Punto de recuperación del hueco*: Ángulo de fase de la tensión fundamental en el momento en que se recupera la tensión (θr).

Corresponde al ángulo de fase en el instante que se elimina la falla.

- *Hueco no rectangular*: Un hueco de tensión en el cual la magnitud del hueco no es constante con el tiempo.

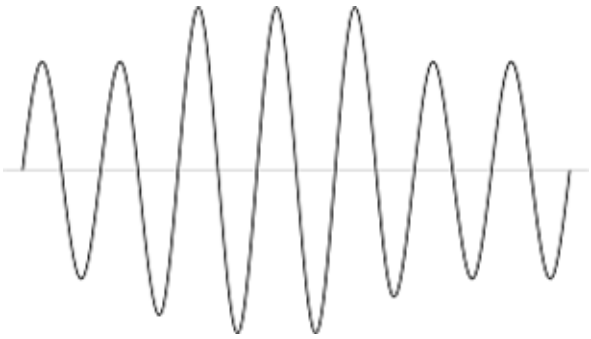
Otras de las causas son el arranque o reinicio de cargas eléctricas muy grandes (motores de inducción, motores eléctricos industriales con picos de arranque del 150% o más), por cableado eléctrico defectuoso (falsos contactos en bornes de conexión), o por cortes repentinos de energía o cortocircuitos en la red eléctrica pública o la red eléctrica interna del edificio entre otras.

1.3.3 Swells.

Es un aumento del valor eficaz (rms) de tensión entre un 10 y un 80 % del valor de tensión nominal a la frecuencia fundamental de la red de distribución, con una duración entre medio ciclo y un minuto. Se asocian con condiciones de falla del sistema, con maniobras de apertura de grandes cargas o la falta de sistemas de puesta a tierra, estos pueden causar mal funcionamiento y acelerar el desgaste del material aislante [11].

Los Swells son caracterizados por su magnitud (valor eficaz) y duración.

Figura No 5. Elevaciones de tensión (swells).



Fuente: http://www.ustpower.com, Fecha de consulta: 15-Feb-2006

1.4 VARIACIONES DE LARGA DURACIÓN.

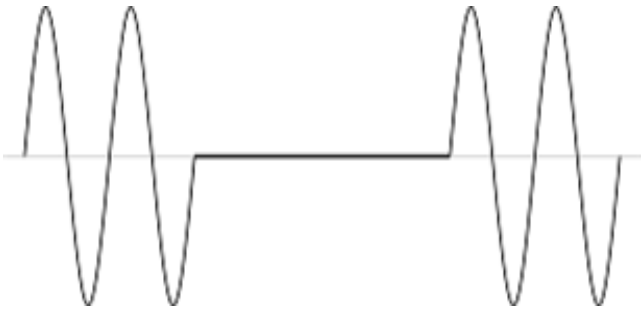
Las variaciones de largas duración abarcan desviaciones rms para frecuencias de energía más largas que 1 minuto.

Las variaciones de largas duración pueden ser sobretensión, subtensión o interrupciones sostenidas según la causa de la variación. Los sobretensión y los subtensión generalmente no son el resultado de fallas del sistema. Ellos son causados por las variaciones de la carga en las operaciones de conmutación del sistema, en cambio las interrupciones sostenidas si son por fallas del sistema o desconexión total, pueden ser causadas por la apertura de las protecciones si posibilidad de recierre [11].
.

1.4.1 Interrupción sostenida.

Las interrupciones del suministro eléctrico para periodos de tiempo superiores a 1 minuto se consideran como interrupciones sostenidas haciendo que el voltaje llegue a cero. Las interrupciones de voltaje más largas que 1 minuto son a menudo permanentes y requieren la intervención manual para su restauración (Figura 8). Suelen presentarse en tormenta eléctrica, desconexión de las líneas eléctricas, aumento desproporcionado de demanda eléctrica, desastres naturales, ó accidentes.

Figura No 6. Interrupciones De Energía



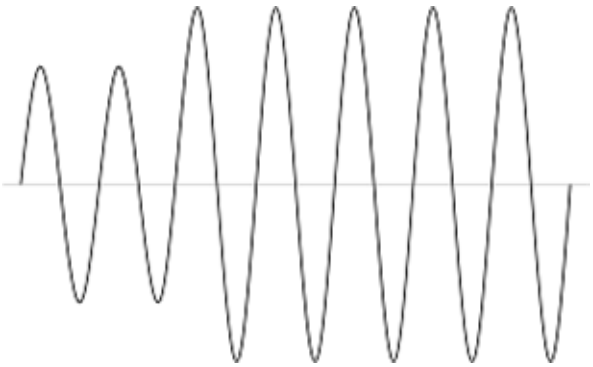
Fuente: http://www.ustpower.com, Fecha de consulta: 15-Feb-2006

1.4.2 Sobretensión.

Las sobretensión pueden ser el resultado de la apagado de carga o variaciones de los reactivos de compensación en el sistema como bancos de condensadores.

Las sobretensiones de larga duración (>1min) son conocidos comúnmente como sobretensiones. (figura 12)

Figura No 7. Sobretensión.

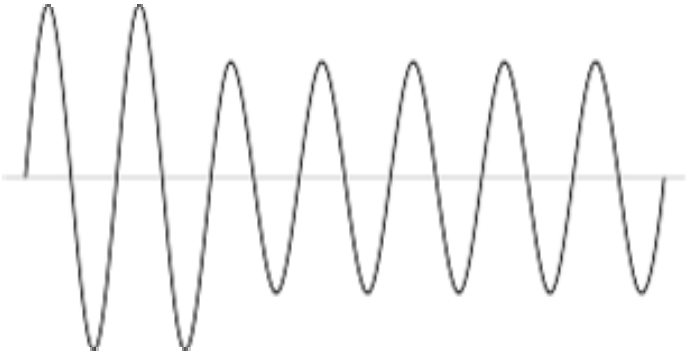


Fuente: http://www.ustpower.com, Fecha de consulta: 15-Feb-2006

1.4.3 Subtensión.

Los Subtensión son el resultado del encendimiento de cargas, o un apagamiento de un banco de condensador, también lo puede causar un equipo de regulación de voltaje en el sistema, ya que puede devolver el voltaje dentro de la tolerancia [11].

Figura No 8. Subtensión.



Fuente: http://www.ustpower.com, Fecha de consulta: 15-Feb-2006

1.5 DESBALANCE DE VOLTAJE.

El desequilibrio de voltaje es definido como la proporción del componente de secuencia negativo o cero el componente de secuencia positivo. Los voltajes de secuencia negativos o cero en una red eléctrica generalmente resultan de cargas desequilibradas que causan corrientes de secuencia negativas o cero.

El desequilibrio puede ser estimado como la desviación máxima del promedio de los voltajes de tres fases o corrientes, dividido en el promedio de los voltajes de tres fases o corrientes, expresadas en por ciento. En forma de ecuación.

El desequilibrio de voltaje también puede ser el resultado de anomalías en los bancos de condensadores, como un fusible abierto en una fase de un banco de tres fases. El desequilibrio de voltaje severo se da cuando el desbalance es mayor que el 5 %.

1.6 DISTORSIONES DE LA FORMA DE ONDA.

La deformación de forma de onda es una desviación estable de una onda sinusoidal ideal de la frecuencia de poder principalmente caracterizada por el contenido espectral de la desviación [11].

.

1.6.1 Inserción de corriente continua (DC Offset).

La presencia de un voltaje dc o corriente en una red eléctrica ac es llamada la compensación de dc. Este fenómeno puede ocurrir como el resultado de una perturbación geomagnética o debido al efecto de media onda rectificada. La corriente directa en redes de corriente alterna puede ser perjudicial debido a un aumento de saturación de transformador, acentuación adicional de aislamiento, y otros efectos adversos [11].
.

1.6.2 Armónicas.

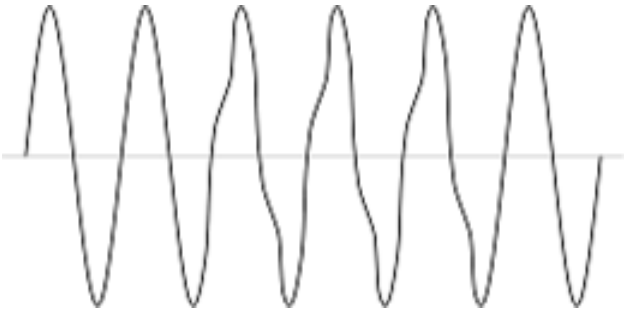
Las Armónicas son tensiones o corrientes sinusoidales con frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia a la que está diseñada para operar el sistema de alimentación (llamada frecuencia fundamental). La frecuencia de una tensión Armónica es un múltiplo de la frecuencia original. Por ejemplo, en un sistema de 60 hertz, la segunda Armónica será de 120 hertz, la tercera de 180 hertz, y así sucesivamente. (figura 6)

La secuencia de las Armónicas puede ser positiva (insertan corrientes en sentido de las agujas del reloj), negativa (insertan corrientes en sentido contrario a las agujas del reloj) o las llamadas de secuencia cero (no tienen sentido de rotación pero se suman en el neutro). Ello significa que si la forma de onda es simétrica las armónicas pares desaparecen (se cancelan entre sí).

Entre los efectos ocasionados por la secuencia de las Armónicas podemos mencionar:

- Positiva: calentamiento de conductores, apertura de interruptores, etc.
- Negativa: calentamiento de conductores, problemas en los motores (se frenan), etc.
- Cero: calentamiento de conductores, se suman corrientes en el neutro en sistemas tetrafilares.

Figura No 9. Distorsión armónica.



Fuente: http://www.ustpower.com, Fecha de consulta: 15-Feb-2006

1.6.3 Distorsiones Inter- armónicas.

Las tensiones o corrientes con componentes de frecuencias que no son múltiplos enteros de la frecuencia a la que el sistema está diseñado para operar se llaman inter - armónicas. Estas pueden aparecer como frecuencias discretas o como un espectro en la banda de frecuencias [15].

Los efectos de las *inter - armónicas* no están bien conocidos. Ellos pueden afectar tanto a las líneas de potencia, a las de señales o bien pueden inducir efectos visuales (flicker).

Las fuentes principales de la deformación de forma de onda interarmónica son convertidores de frecuencia estáticos, cyclo-convertidores, motores de inducción, y dispositivos que forman un arco.

1.6.4 Notching.

El Notching es una perturbación periódica de tensión causada por la operación normal de los dispositivos electrónicos cuando la corriente se conmuta de una fase a otra. Los componentes de frecuencia asociados con los casos de notching pueden ser bastante altos y no pueden ser caracterizados con los dispositivos empleados normalmente para el análisis de Armónicas.

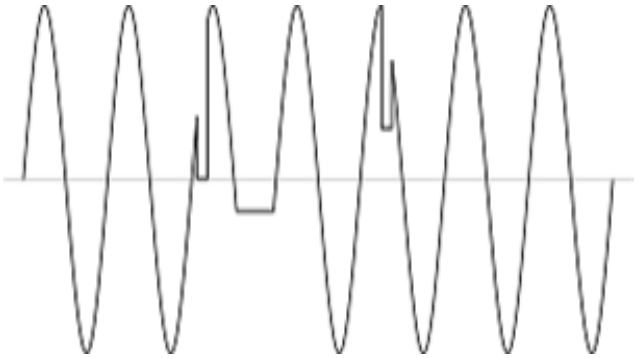
En la Figura 4, se muestra un ejemplo de forma de onda de tensión con presencia de notching, originado cuando se conmuta la corriente de una fase a otra en un convertidor trifásico. Se observa que la duración del fenómeno tiene una duración del orden de μseg. Durante este periodo existe un cortocircuito momentáneo entre dos fases que tiende a llevar la tensión lo mas cercano a cero que la impedancia del sistema lo permite.

La profundidad del "notch" es proporcional a la impedancia del sistema desde el punto hacia la fuente de potencia. El ancho del "notch" es el ángulo de conmutación.

Si los circuitos de encendido no operan simétricamente, de tal manera que la conmutación de cada dispositivo no es la correcta, se producen armónicos no característicos, los cuales normalmente son pequeños.

Frecuentemente una de las causas es por los conmutadores electrónicos o acondicionadores de energía eléctrica que no funcionan correctamente generando errores en procesamientos, de pérdidas de información y tableros de circuitos quemados.

Figura No 10. Muesca (Notch).



Fuente: http://www.ustpower.com, Fecha de consulta: 15-Feb-2006

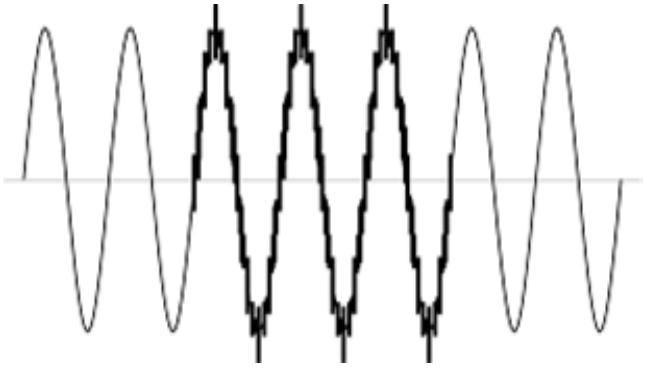
1.6.5 Ruido de línea

El ruido son señales eléctricas no deseadas ya que su contenido espectral es más abajo que 200 kilohercios, sobrepuestos sobre el voltaje de red eléctrica o

corriente en conductores de fase, o encontrado en conductores de neutros. El ruido en redes eléctricas puede ser causado por dispositivos electrónicos, recorrido de control, equipo que forma un arco, cargas con rectificadores y suministros de energía de conmutación. Básicamente, el ruido consiste en cualquier deformación no deseada de la señal de energía que no puede ser clasificada como deformación armónica o transitoria [11].

La variación de frecuencia y el nivel de magnitud del ruido dependen de la fuente, que produce el ruido y de las características de sistema. Una magnitud típica del ruido es menos del 1 % de la magnitud de voltaje. El ruido molesta dispositivos electrónicos como microordenador y reguladores programables. El problema puede ser mitigado por usando filtros, transformadores de aislamiento, y algunos acondicionadores de línea [11].

Figura No 11. Ruido de línea



Fuente: http://www.ustpower.com, Fecha de consulta: 15-Feb-2006

1.7 FLUCTUACIONES DE VOLTAJE (Flicker)

La fluctuación de voltaje “Flicker”, es un tipo de efecto o titilación luminosa, el cual es subjetivo, asociado a la perceptibilidad del ojo humano a las variaciones de intensidad luminosa, como consecuencia de las fluctuaciones de tensión aplicadas al filamento de las lámparas. Tales variaciones son observables por el ojo

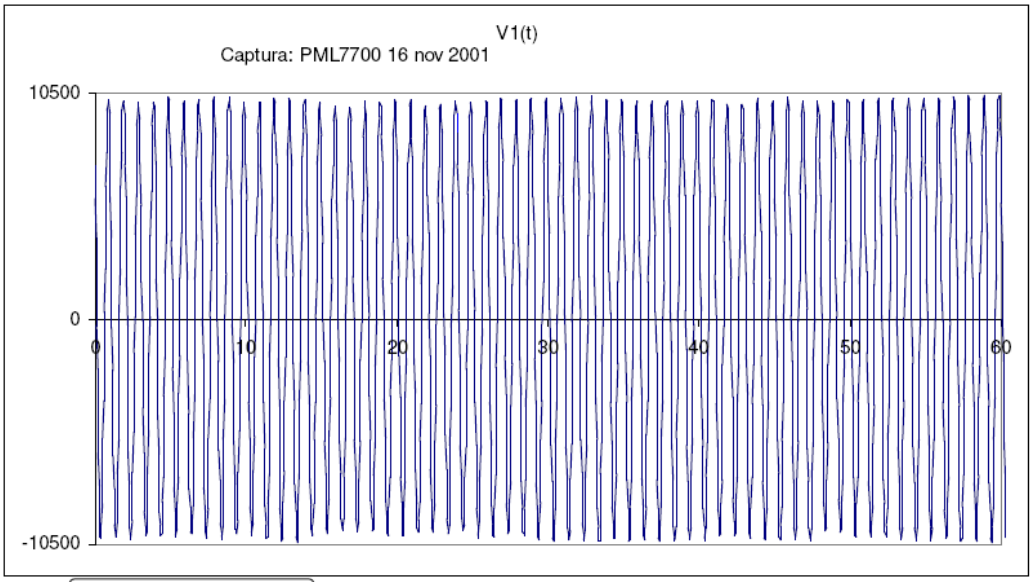
humano cuando ocurren en la franja de frecuencias comprendida entre 0 y 30 Hz (figura 7). Una fuente de parpadeo ("flicker") es la operación de hornos de arco eléctrico, ya que toman gran corriente de manera pulsante lo que ocasiona caída de voltaje pulsante.

La medición del flicker está relacionada con la cantidad de variación de tensión del sistema y la frecuencia a la que se presenta la variación. Fuentes de flicker en sistemas de distribución industriales pueden ser los hornos de arco, los arranques y paradas de motores de ascensores, etc.

La intensidad del flicker esta determinada por la impedancia de la fuente del sistema de potencia y los requerimientos de potencia de la carga pico.

La técnica más simple y efectiva de compensación para el flicker es tener una fuente de potencia fuerte, de forma que los efectos sean despreciables. Con el fin de emular dicha fuente se utilizan métodos de compensación como condensadores serie, conmutación de bobinas por tiristores con condensadores shunt, bobinas shunt saturables y conmutación de condensadores por tiristores.

Figura No 12. Efecto flicker

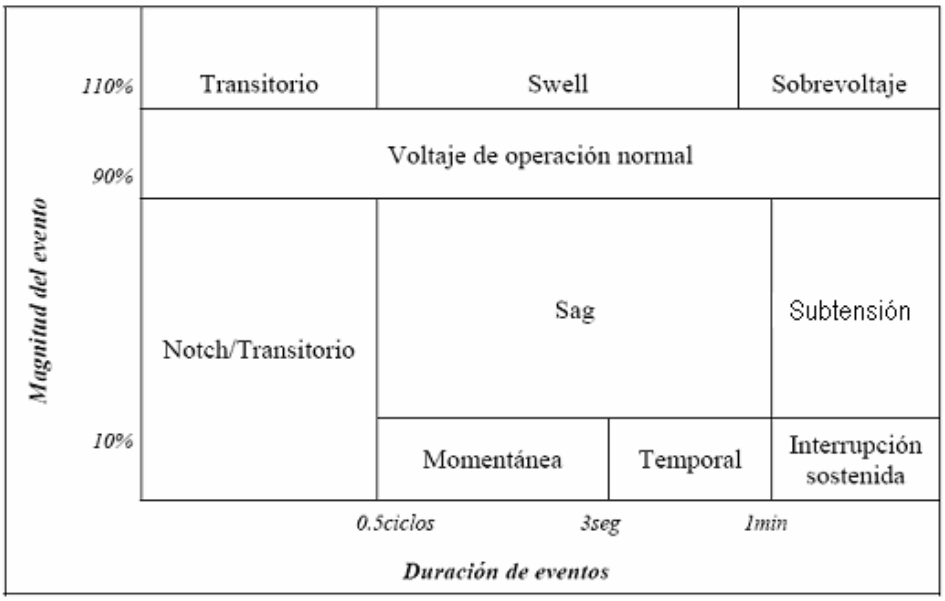


Fuente: Centro de Estudios de Energía

1.8 VARIACIONES EN LA FRECUENCIA DE LA RED.

Consiste de cambios en el valor de la frecuencia fundamental (frecuencia nominal 60 Hz). Ocurren con frecuencia en donde el fluido eléctrico es suplido por generadores eléctricos pequeños o portátiles, o en donde existan sistemas de cogeneración eléctrica, o por fallas en los transformadores de distribución en la red eléctrica pública. Suelen causar funcionamiento errático, pérdida de datos, daños severos en los equipos, o la caída del sistema eléctrico.

Figura No 13. Definiciones de eventos de magnitud de voltaje como los usados en la IEEE Std-1159 de 1995



Fuente: Proyecto SECSE

1.9 DISTORSION ARMONICA TOTAL (THD)

La distorsión armónica de una forma de onda representa el contenido en armónicos que tiene esa señal. La cantidad de distorsión que presenta una forma de onda de tensión o corriente se cuantifica mediante un índice llamado *distorsión armónica total* (THD), definido para tensiones y corrientes por la ecuación, donde *V1* y *I1* son las componentes fundamentales de tensión y corriente respectivamente, y *Vh* y *Ih* los armónicos *h*. Todos en términos eficaces.

$$\mathrm{THD_v} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \text{ X 100\%}$$

$$\mathrm{THD_i} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \text{ X 100\%}$$

El factor de potencia (FP) se puede definir como el producto del factor de potencia de desplazamiento (FPD) y del ratio *I1/Is*.

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{I_1}{I_s} \cdot FPD$$

Donde *FPD* = cosφ , siendo φ el ángulo de desfase entre tensión y corriente. El factor de potencia está íntimamente ligado a la distorsión armónica. A mayor distorsión armónica mayor es la corriente total *Is* respecto su componente fundamental *I1* (ya que el resto son armónicos), de modo que el factor de potencia disminuye. Por lo tanto, la presencia de armónicos en la corriente tiene un efecto muy negativo sobre la eficiencia con la que el equipo proporciona potencia a la red y es un aspecto muy importante a controlar, no sólo a nivel de seguridad sino también de efectividad.

En EEUU ya está vigente la normativa IEEE 519-1992 que limita la cantidad de corriente armónica inyectada a la red general, y responsabiliza al cliente por la misma. El estándar IEEE 519-1992 recomienda prácticas y requisitos para el control de armónicos tanto a nivel de usuario como de redes. (Tablas 2 y 3)

Tabla 2. Límites de corriente armónica (*Ih /I1*)(%) establecidos en el IEEE 519-1992

I_{SC}/I_1	Orden de armónicos impares h					THD (%)
	h < 11	11≤ h<17	17≤ h< 23	23≤ h< 35	35≤ h	
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20-50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50-100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100-1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Nota: Límites armónicos de corriente para carga no lineal conectada a la red pública en el punto de conexión (PCC) con otras cargas a las tensiones de 2.4-69 kV. I_{SC} es la corriente de cortocircuito máxima en el PCC. I_1 es la corriente fundamental máxima en el PCC. Los armónicos pares están limitados al 25% de los límites para armónicos impares.

Tabla 3. Límites de tensión armónica (V*h /V1*)(%) para Productores de Energía establecidos en el estándar IEEE 519-1992.

	2.3-69 kV	69-138 kV	> 138 kV
(V_h/V_1)(%)	3,0	1,5	1,0
THD (%)	5,0	2,5	1,5

Nota: Esta tabla recoge la calidad de la tensión que los productores eléctricos deben proporcionar a los usuarios. Se basa en el nivel de tensión suministrado al usuario.

2. ENSAYOS REALIZADOS

2.1 DESARROLLO DEL MÓDULO

Verificando los conceptos y especificaciones de los elementos por los cuales se generan las perturbaciones o deformaciones de onda, se procede a diseñar un circuito electrónico basado en osciladores de relajación los cuales afecten directamente la onda tanto en la parte positiva como la parte negativa de esta.

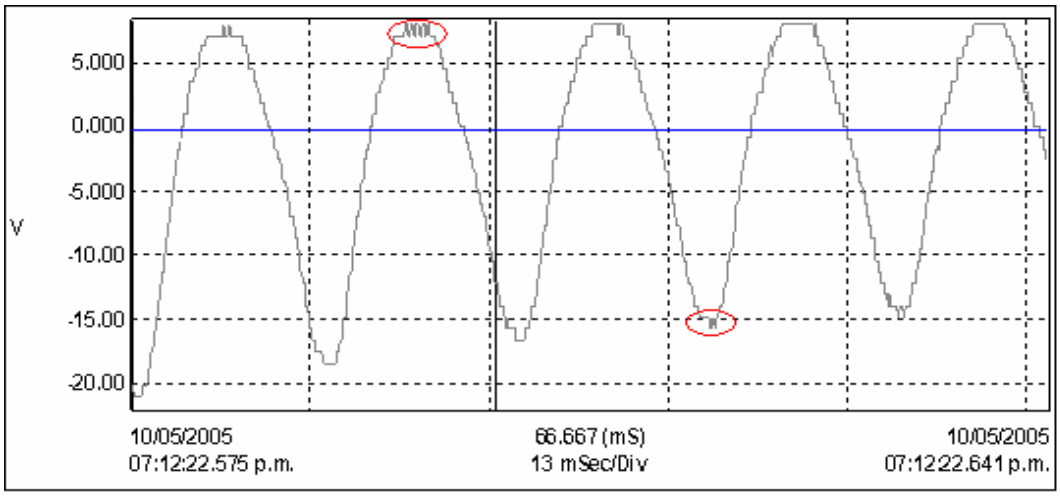
El desarrollo del módulo generador de perturbaciones o deformaciones de onda se planifico realizarlo en dos partes, una primera para distorsionar la parte positiva de onda senosoidal y la segunda para distorsionar la parte negativa de la onda, por medio de electrónica de potencia.

2.1.1 Prueba No. 1 (cargas RL).

Para la construcción del módulo, primero se realizan pruebas conectando a la red de baja tensión, elementos de uso común en el campo residencial. El motor de una licuadora, la resistencia de la plancha, la resistencia de una estufa y el motor de un ventilador, la prueba realizada tubo una conexión en serie de estos cuatro elementos con el fin de obtener una corriente mayor de 9 amperios, debido a que el analizador de red AEMC modelo 3945 maneja el rango de corriente a partir de ésta, como los elementos utilizados son cargas demasiado pequeñas, las distorsiones que se obtuvieron en la onda de corriente y tensión se produjeron en los momentos de arranque del motor generando picos de corriente; por este motivo estos elementos no se consideran útiles para ser parte del módulo adicionalmente como se conectaron los elementos a una misma toma, se presento calentamiento se el conductor.

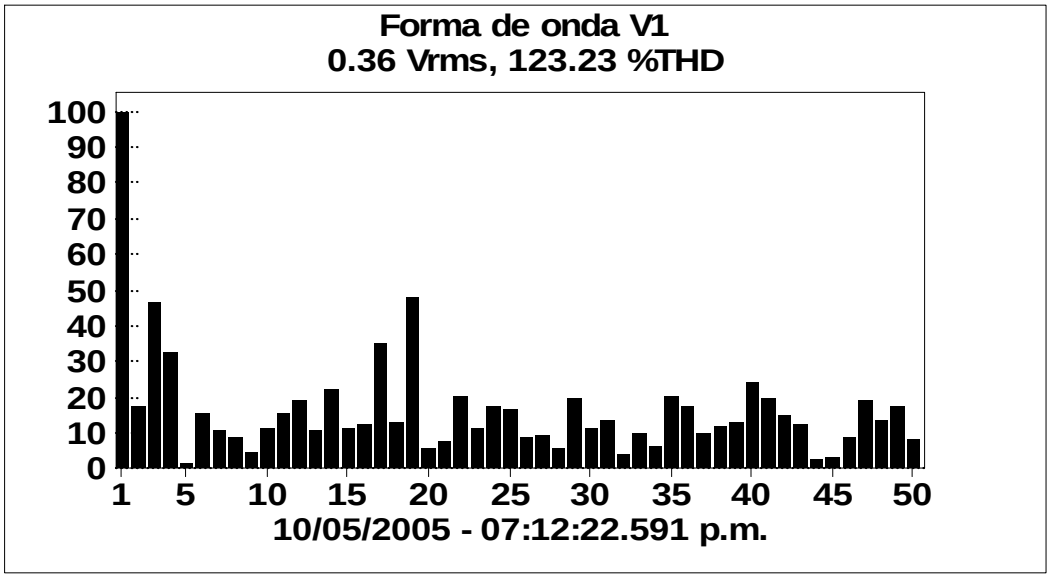
En la figura 15 se aprecia la forma de onda de tensión afectada por el arranque del motor monofásico de la licuadora en los primeros ciclos de onda, al realizar variaciones de consumo por parte de la carga, aumentando el nivel de la velocidad del motor del ventilador y de la licuadora de esta manera se obtuvo picos de corriente que son mas notorios en las crestas de la onda tanto en la parte positiva como en la negativa.

Figura No 14. Comportamiento Corriente y tensión prueba No. 1 (cargas RL)



Fuente: DataView Professional (Programa de analizador de red AEMC 3945)

Figura No 15. Comportamiento armónico de la onda de tensión prueba No. 1. (Cargas RL)



Fuente: DataView Professional (Programa de analizador de red AEMC 3945)

En la Figura 16 se observa el espectro armónico del THD de tensión de arrojado por el analizador de red AEMC 3945 en el en la prueba No 1, la cual muestra un THDv de 123.23% a una tensión 0.36 Vrms en la onda; adicionalmente se observa

que en los armónicos 3 y 19 una elevación cercana al 50 % la cual se da en el momento de arranque o variación de velocidad de los motores.

Tabla 4. Comportamiento armónico de la onda de tensión prueba No. 1. (Cargas RL)

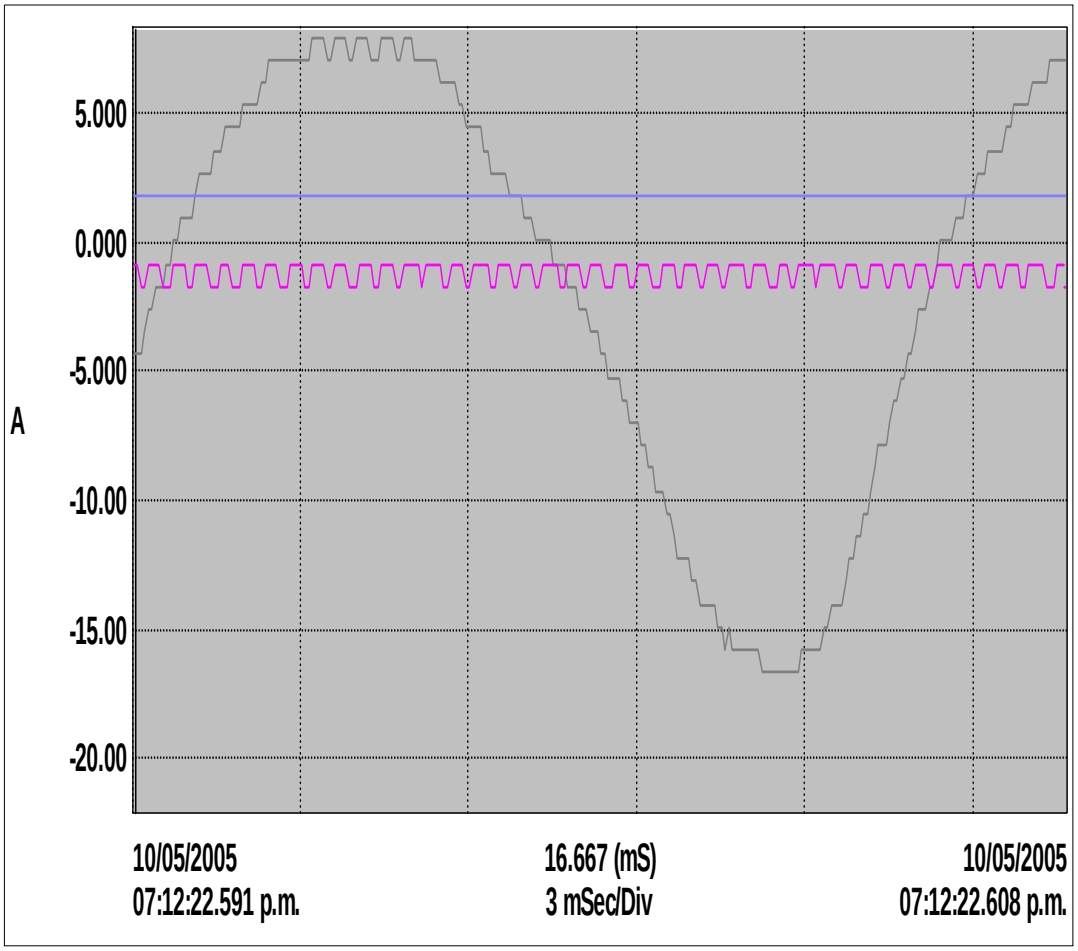
Forma de onda V1

	(%)		(%)		(%)
H01	100.0	H18	12.9	H35	20.4
H02	17.6	H19	47.9	H36	17.6
H03	47.0	H20	6.0	H37	10.3
H04	32.6	H21	7.9	H38	11.7
H05	1.7	H22	20.2	H39	13.4
H06	15.3	H23	11.3	H40	24.2
H07	10.8	H24	17.3	H41	19.7
H08	8.8	H25	17.0	H42	14.9
H09	4.7	H26	9.1	H43	12.4
H10	11.0	H27	9.4	H44	2.8
H11	15.5	H28	5.5	H45	3.1
H12	18.9	H29	20.1	H46	8.6
H13	10.8	H30	11.3	H47	19.4
H14	22.1	H31	14.0	H48	13.7
H15	11.2	H32	4.0	H49	17.5
H16	12.4	H33	10.3	H50	8.4
H17	35.3	H34	6.2		

Fuente: DataView Professional (Programa de analizador de red AEMC 3945)

En la tabla No 4 esta descrito numéricamente el espectro armónico de la Figura No. 16.

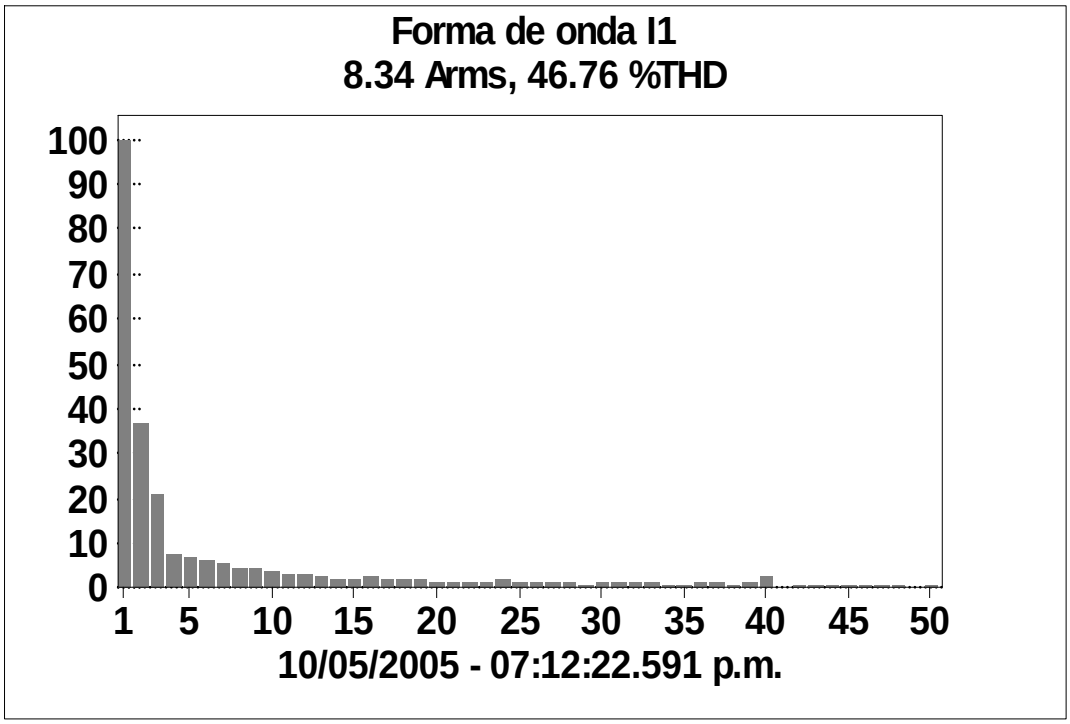
Figura No 16. Onda de corriente prueba No. 1. (cargas RL)



Fuente: DataView Professional (Programa de analizador de red AEMC 3945)

En la Figura 17 se observa la forma de onda de corriente en color rojo y también el ruido eléctrico que se aporta a la red de baja tensión.

Figura No 17. Comportamiento armónico de la onda de corriente prueba No. 1. (Cargas RL).



Fuente: DataView Professional (Programa de analizador de red AEMC 3945)

En la figura 17 se aprecia el espectro de armónicos para la onda de corriente en donde los THD de corriente no son muy representativos debido a que el muestreo que realiza el analizador de red AEMC 3935 debe estar con corrientes mayores a 9 amperios.

Tabla 5. Comportamiento armónico de la onda de corriente prueba No. 1. (Cargas RL)

Forma de onda I1

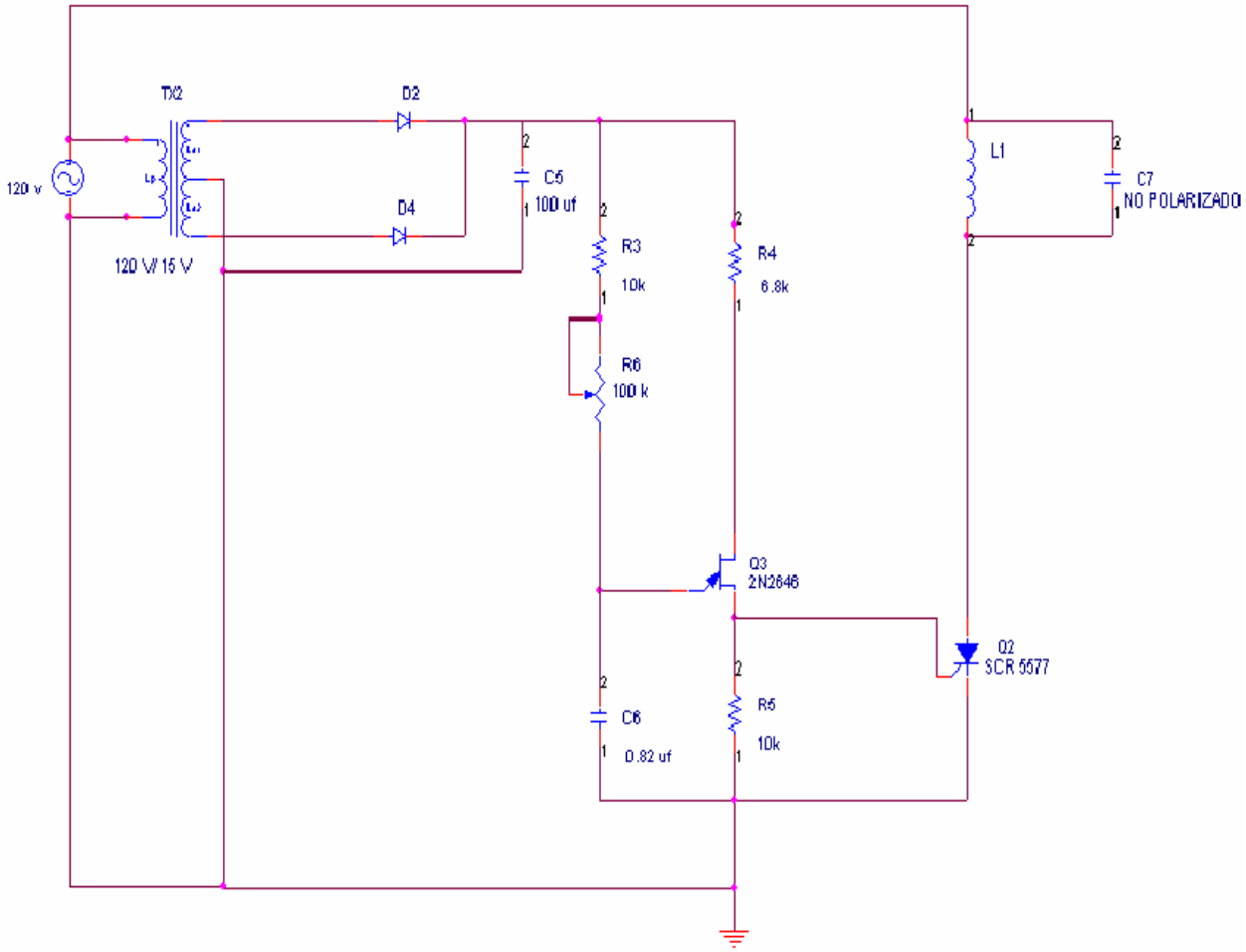
	(%)		(%)		(%)
H01	100.0	H18	2.2	H35	1.1
H02	37.2	H19	2.3	H36	1.5
H03	21.1	H20	1.6	H37	1.2
H04	7.5	H21	1.6	H38	1.0
H05	7.1	H22	1.6	H39	1.4
H06	6.5	H23	1.6	H40	2.8
H07	5.6	H24	2.2	H41	0.3
H08	4.9	H25	1.7	H42	0.7
H09	4.4	H26	1.7	H43	1.0
H10	3.9	H27	1.3	H44	0.7
H11	3.5	H28	1.5	H45	1.0
H12	3.6	H29	1.2	H46	0.8
H13	2.7	H30	1.2	H47	0.9
H14	2.4	H31	1.3	H48	0.8
H15	2.1	H32	1.3	H49	0.5
H16	2.6	H33	1.3	H50	0.7
H17	2.3	H34	1.2		

Fuente: DataView Professional (Programa de analizador de red AEMC 3945)

2.1.2 Prueba No. 2 (Montaje plano electrónico 1 con 2N2646 basado en osciladores de relajación). Se utilizó el siguiente montaje para realizar las pruebas de laboratorio con el fin de determinar que comportamiento genera en la red de baja tensión en condiciones controladas en laboratorio.

En un primer desarrollo del montaje se conecto una carga no lineal (RELUCTANCIA) de luminaria de sodio de 70 W, como la corriente es muy baja el analizador de red AMC 3945 no registraba el valor, se procedió a conectar otra carga no lineal (auto transformador de marca ACME) el cual aumento la carga produciendo resultados pero a su vez hizo que la resistencia R3 se quemara.

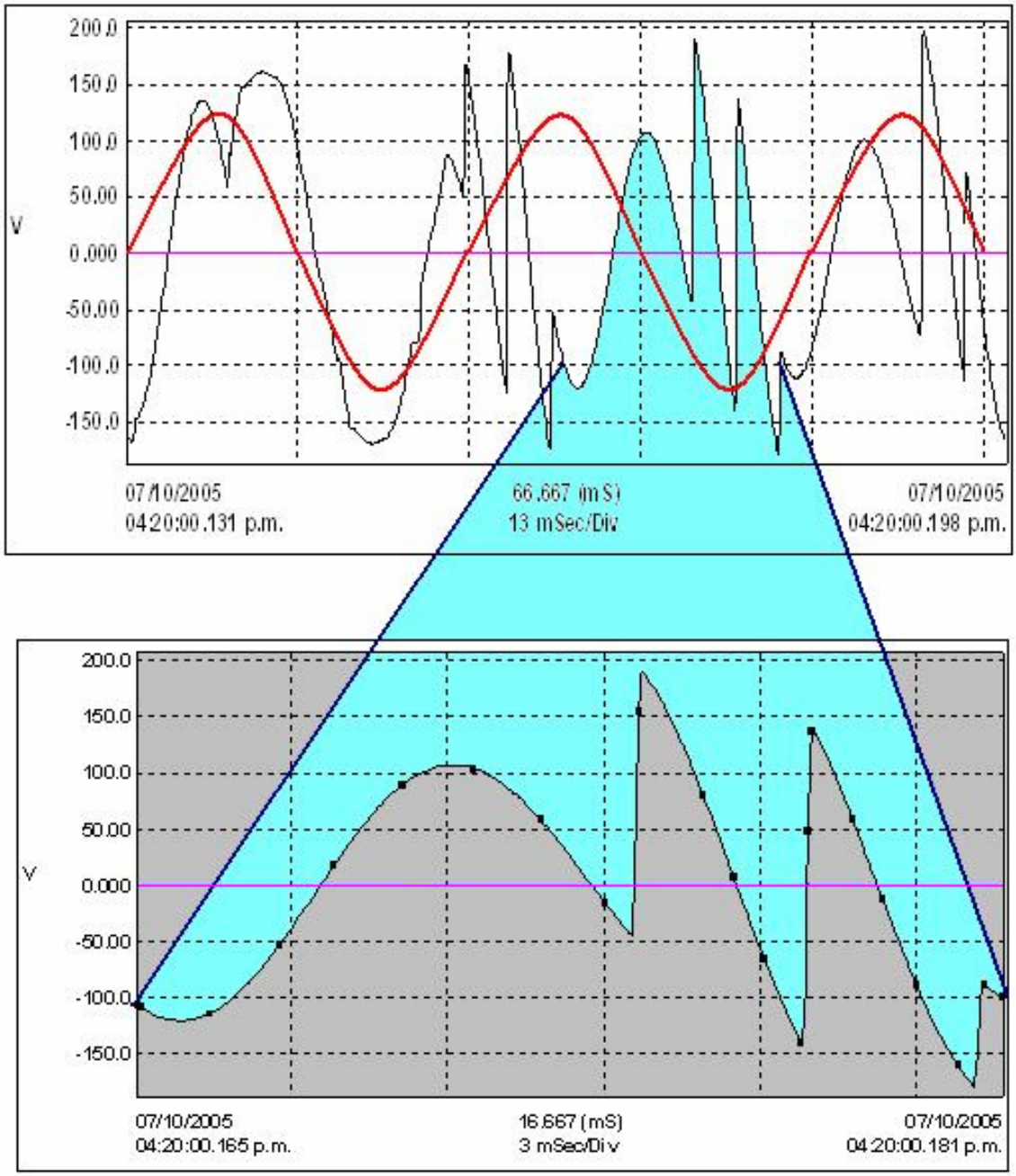
Figura No 18. Plano electrónico No.1 basado en 2N2646.



Fuente: Autores.

Con el diagrama anterior se pretende generar los transitorios y otros efectos secundarios propios del comportamiento de sistemas reactivos no oscilantes en el momento de su conexión y desconexión. El UJT (Transistor UniJuntura) referencia 2N2646 esta en disposición de un disparo típico aleatorio para el ángulo de desfase para el tiristor (SCR) referencia 5577. Este circuito permite generar transientes y ruidos similares a la conexión y desconexión de artefactos

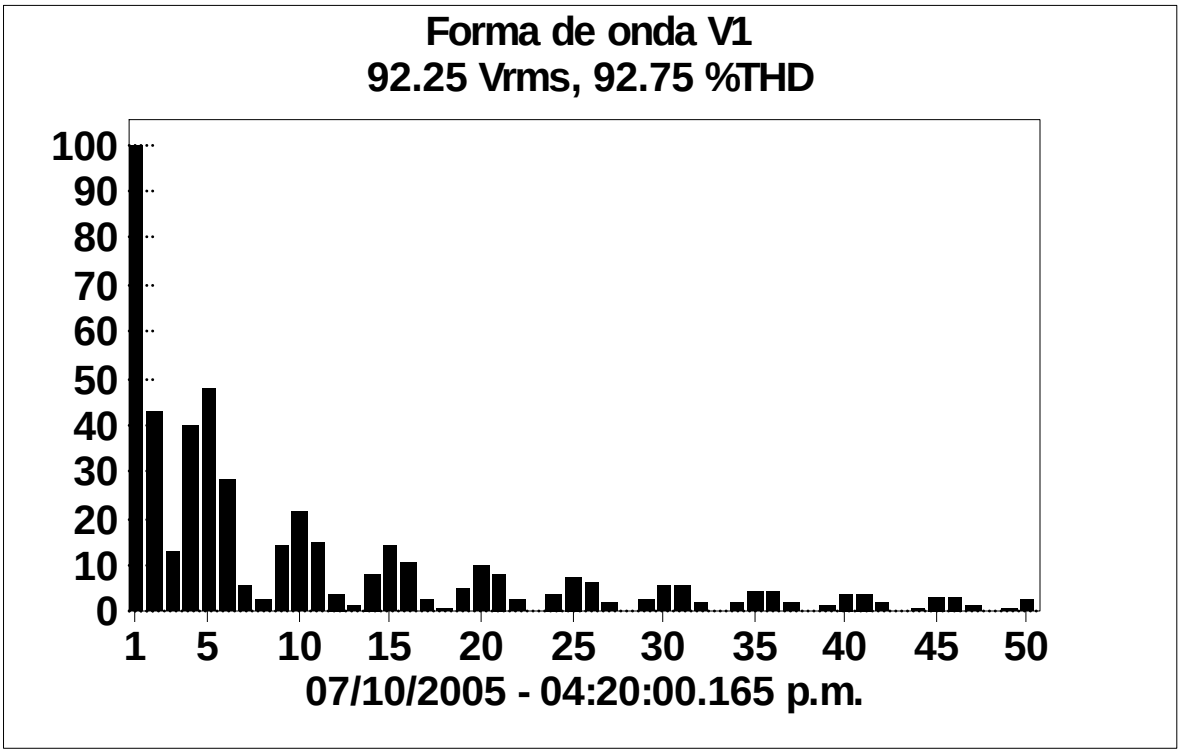
Figura No 19. Onda de tensión prueba No. 2 (Montaje plano electrónico 1 con 2N2646)



Fuente: DataView Professional (Programa de analizador de red AMC 3945)

En la Figura No 20 se observan sobre tensiones transitorias las cuales son generadas por impulsos, pero al ser los impulsos de corta duración no es muy perceptible visualmente su existencia; los impulsos pueden tener su origen en maniobras de interruptores y al conectar o desconectar capacitores.

Figura No 20. Comportamiento armónico de la onda de tensión prueba No. 2 (Montaje plano electrónico 1 con 2N2646)



Fuente: DataView Professional (Programa de analizador de red AMC 3945)

En el espectro de armónicos de la figura 20 se observa la distorsión total armónica es muy cercana al 100% con un voltaje de 92.25 Vrms, en el cual las componentes armónicas predominantes son el 1 y los múltiplos de 5, teniendo en cuenta que el uno de los más dañinos es el armónico quinto que se sitúa en el 48% y tiene frecuencia 5 veces mayor que la frecuencia fundamental. Los THDv se generan de una corriente bastante distorsionada.

Tabla 6. Comportamiento armónico de la onda de tensión prueba No.2 (Montaje plano electrónico 1 con 2N2646)

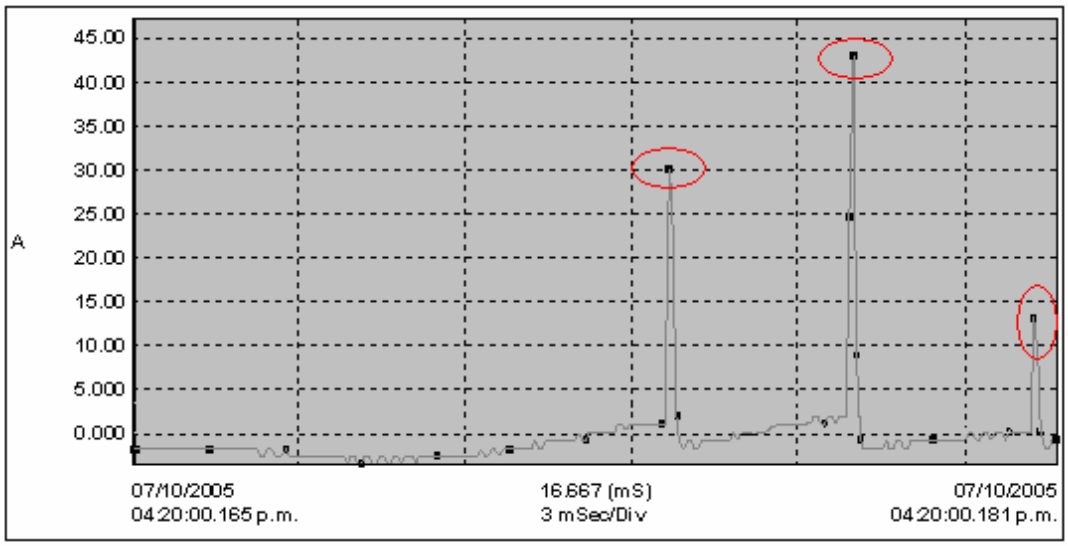
Forma de onda V1

	(%)		(%)		(%)
H01	100.0	H18	0.8	H35	4.8
H02	43.2	H19	5.4	H36	4.8
H03	13.0	H20	10.1	H37	2.1
H04	39.8	H21	8.2	H38	0.4
H05	48.0	H22	2.7	H39	1.5
H06	28.2	H23	0.6	H40	3.9
H07	5.7	H24	3.8	H41	4.2
H08	2.9	H25	7.7	H42	2.0
H09	14.2	H26	6.7	H43	0.4
H10	21.8	H27	2.4	H44	1.0
H11	15.2	H28	0.5	H45	3.2
H12	3.8	H29	2.7	H46	3.6
H13	1.4	H30	6.1	H47	1.8
H14	8.1	H31	5.6	H48	0.4
H15	14.0	H32	2.3	H49	0.7
H16	10.6	H33	0.4	H50	2.6
H17	3.0	H34	2.0		

Fuente: DataView Professional (Programa de analizador de red AEMC 3945)

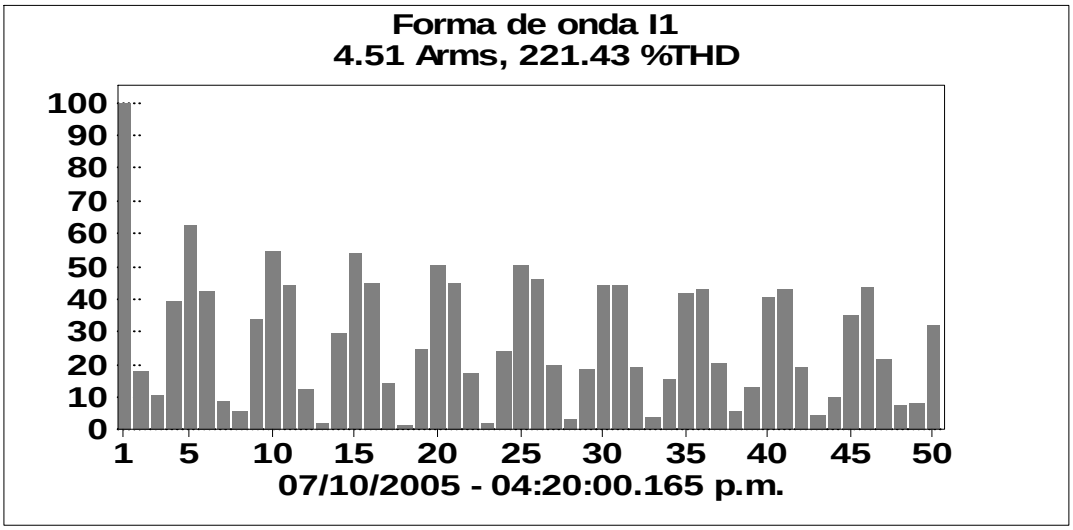
En la tabla No 6 esta descrito numéricamente el espectro armónico y comportamiento porcentual de la Figura No. 20.

Figura No 21. Onda de corriente prueba No. 2 (Montaje plano electrónico 1 con 2N2646)



Fuente: DataView Professional (Programa de analizador de red AEMC 3945)

Figura No 22. Comportamiento armónico de la onda de corriente prueba No.2 (Montaje plano electrónico 1 con 2N2646)



Fuente: DataView Professional (Programa de analizador de red AEMC 3945)

En la figura 21 se observa un pico de corriente de 43 amperios, estos picos de corriente produce armónicos de 5, 10 y 15 (figura 22), de acuerdo a los resultados de la tabla No 7, se observa que el armónico quinto es de un 62%, teniendo en cuenta que el quinto es de los más perjudiciales.

Tabla 7. Comportamiento armónico de la onda de corriente prueba No.2 (Montaje plano electrónico 1 con 2N2646)

Forma de onda I1

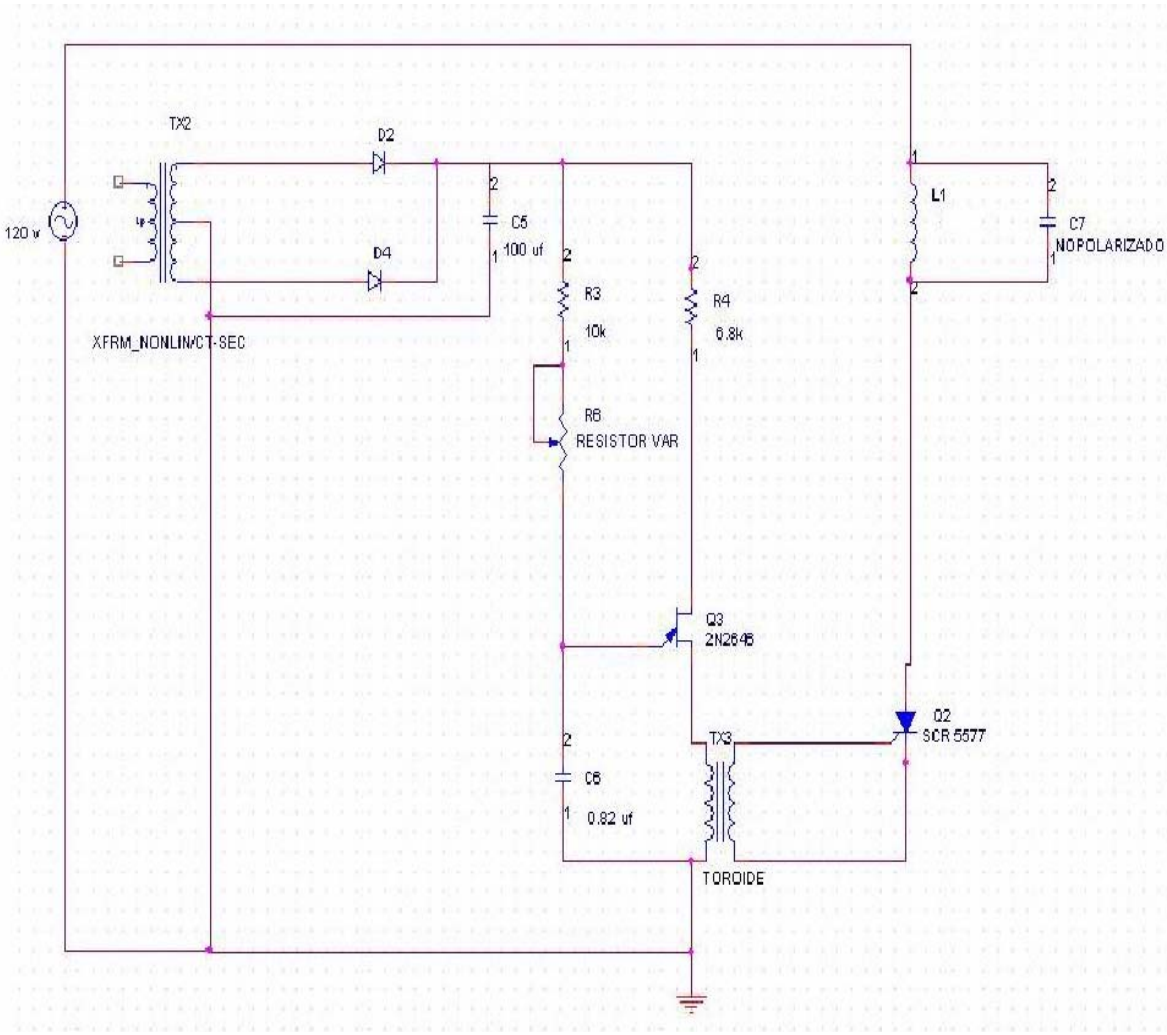
	(%)		(%)		(%)
H01	100.0	H18	1.5	H35	41.8
H02	18.3	H19	24.9	H36	42.8
H03	10.5	H20	50.1	H37	20.7
H04	39.5	H21	44.6	H38	5.9
H05	62.3	H22	17.3	H39	13.3
H06	42.5	H23	2.1	H40	40.3
H07	8.8	H24	24.2	H41	43.3
H08	5.5	H25	50.5	H42	19.2
H09	33.6	H26	46.2	H43	4.6
H10	54.5	H27	19.7	H44	10.0
H11	44.0	H28	3.3	H45	35.4
H12	12.4	H29	18.8	H46	43.5
H13	1.9	H30	44.2	H47	21.8
H14	29.7	H31	44.5	H48	7.8
H15	54.1	H32	19.4	H49	8.4
H16	44.8	H33	3.9	H50	32.1
H17	14.4	H34	15.3		

Fuente: DataView Professional (Programa de analizador de red AEMC 3945)

2.1.3 Prueba No. 3 (Montaje plano electrónico 1 con 2N2646, más, toroide en R3). Se realizo el mismo montaje anterior, pero la resistencia R3, se cambio por un toroide de un diámetro de 2,5 cm. y con una bobina en el primario de 25 vueltas de alambre AWG de calibre 26 y la bobina del secundario fue de 50 vueltas de alambre AWG de calibre 22. Para este montaje se hizo una prueba con una bombilla, para observar que el SCR, tenga paso de corriente, al confirmar esto; se conecto una carga no lineal conformada por una reductancia para luminaria de sodio de 70 W, pero no aumento la corriente, por esto se procedió a hacer el montaje de un auto transformador ACME, para aumentar la carga y así obtener mayor corriente, al realizarse esta prueba no aumento la corriente; después de esto se procedió a montar un transformador trifásico de 3 KVA, conectando el devanado primario de la fase A y en el secundario se conecta un banco de resistencias de 3,4 KΩ, con esto tampoco se logro un aumento en la corriente.

Para este plano no se obtuvieron resultados del analizador de red AMC 3945, porque no se obtuvo corrientes superiores a 9 amperios.

Figura No 23. Plano electrónico 1 basado en 2N2646 más toroide



Fuente: Autores.

2.1.4 Desarrollo del plano final para el módulo. En el laboratorio, se realizo el montaje de diferentes planos electrónicos, para obtener un modelo que satisfaga los objetivos de la presente investigación. En cada uno de estos planos se realizaron pruebas eléctricas para observar las perturbaciones que se le producían a la red de baja tensión.

A partir de los montajes y pruebas realizadas en el laboratorio, se consolido un diseño final el cual unifica los circuitos y dispositivos utilizados en las pruebas anteriores con la finalidad de poder perturbar la onda senosoidal tanto en la parte positiva de la onda como en la parte negativa, con esta consolidación se realizo un premontaje (en protoboard) de todos los elementos y dispositivos expuestos en el diseño del módulo, al tener el premontaje se procedió a realizar diferentes pruebas con cargas que superan el consumo de 9 amperios.

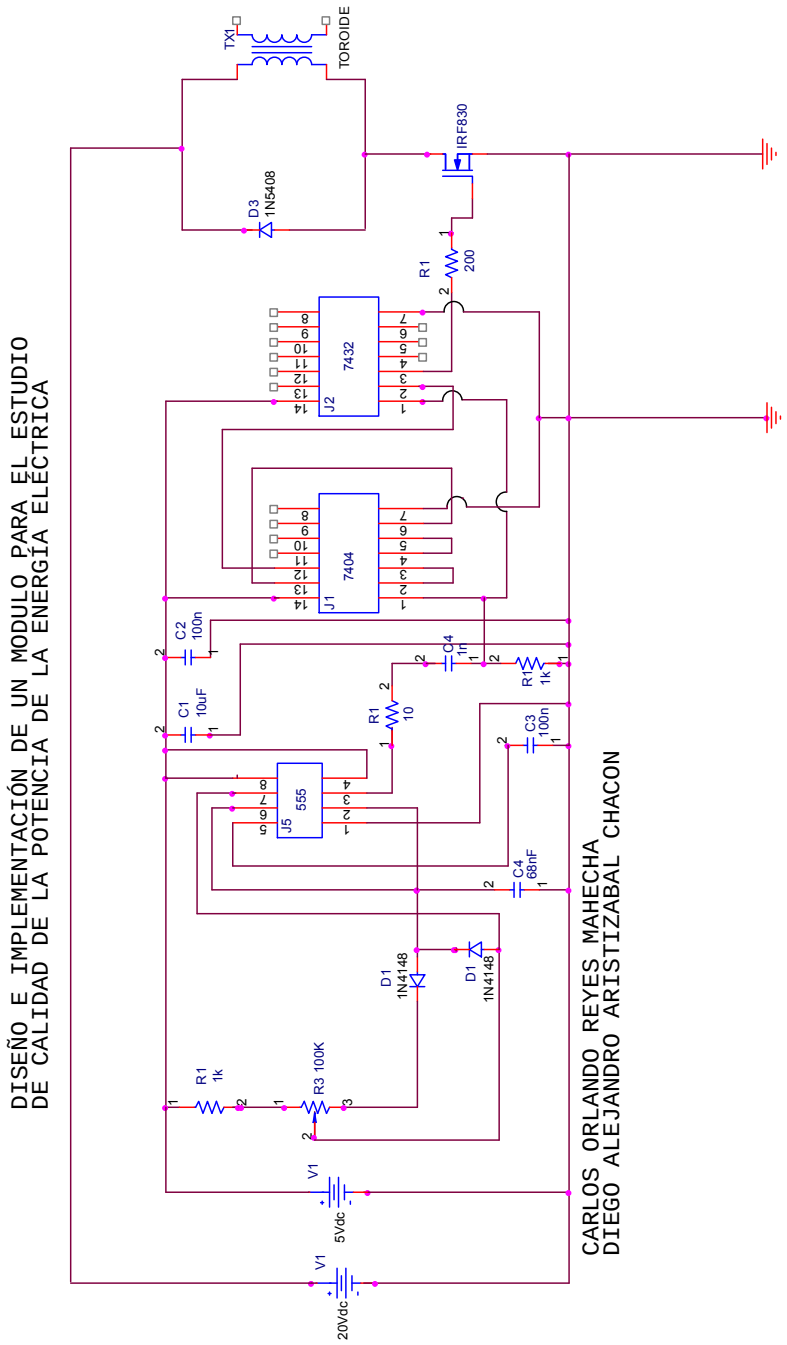
2.1.4.1 Prueba No. 4 (Montaje plano final con cargas resistivas (bombillas))

Verificando el buen funcionamiento de los elementos se procede a conectar el módulo en serie en la línea de alimentación de tensión y a su vez a esta línea se le conectan una serie de cargas resistivas (bombillas) en paralelo, las cuales se van adicionando al sistema una a una para poder tener control sobre la corriente consumida por la carga, adicionalmente se conectan los equipos de medida como osciloscopio, pinza amperimetrica y analizador de red AMC 3945 (figura 27 y 28), en los cuales se verifica el comportamiento tanto de la corriente como la forma de onda y también las componentes armónicas que puede llegar a generar el módulo.

El módulo requiere tener una alimentación con tensión DC una de 5V y otra de 20V para alimentar los circuitos eléctricos de electrónica de potencia que tiene el módulo y que a su vez son los que generar la perturbación de onda.

Al operar los potenciómetros del módulo se puede observar a primera vista perturbaciones como los SOBRETENSION, NOCH y FLIKERS o parpadeos los cuales se pueden intensificar dependiendo de la variación de frecuencia que se le haga al módulo. En la figura 25 se observa la carga completa que se le coloca al módulo y el contraste de luminancia con el montaje de la figura 25. La señal de tensión (figura 28), se observa el recorte de la señal de corriente, producida por los SCRs del módulo.

Figura No 24. Plano electrónico tarjeta Módulo para el estudio de la calidad de la potencia de la energía eléctrica.



Fuente: Autores.

Figura No 25. Montaje plano final con cargas resistivas bombillas

Fuente: Autores.

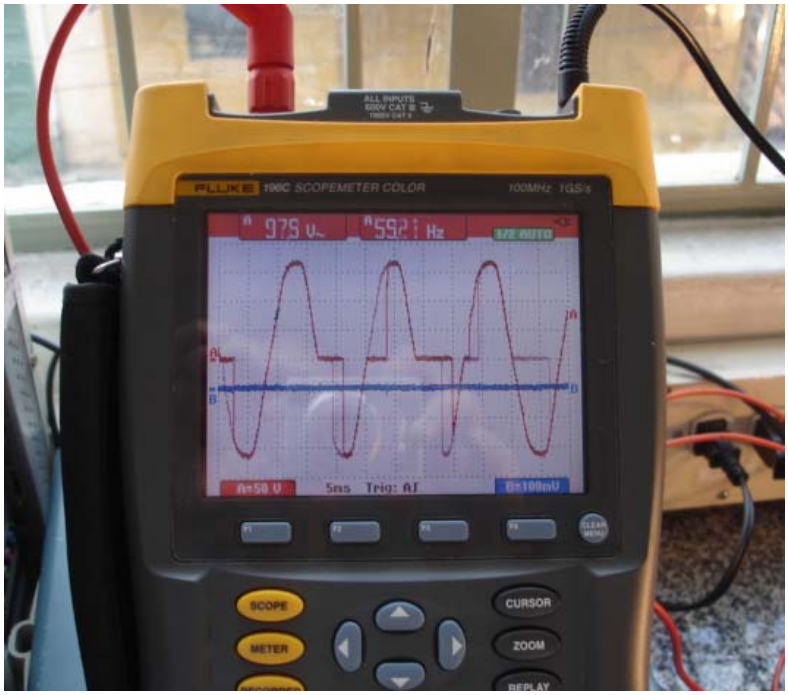
Figura No 26. Medición de corriente que transporta el conductor conectado a la carga

Fuente: Autores

Figura No 27. Carga conectada al módulo

Fuente: Autores.

Figura No 28. Señal de los puntos de la conexión de entrada de la carga



Fuente: Autores.

Al manipular los potenciómetros se varía la frecuencia de los osciladores de relajación y se pude limitar a que parte de la onda afectar.

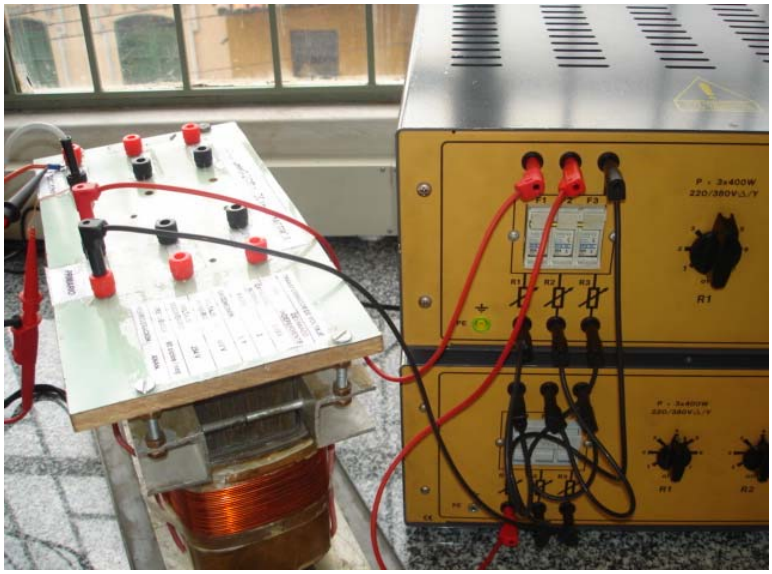
2.1.4.2 Prueba No. 5 (Montaje plano final con cargas inductivas (transformador de tensión de 3 KVA) y resistivas (banco de resistencias))

Con esta prueba se busco aumentar el consumo de corriente por parte de la carga, se mantuvo la conexión de alimentación del módulo y los equipos de medida de la prueba No 4 y vario la carga resistiva (bombillas) por una carga inductiva y resistiva (figura 29). Las resistencias del banco de Lorenzo las conectamos en serie, como se observa en la figura 31.

Al realizar la prueba se presento un fenómeno de resonancia entre la frecuencia generada por el módulo y el transformador de tensión presentando un ruido intermitente, el cual puede llegar a generar desgaste en las partes eléctricas.

Adicionalmente, la súbita elevación de tensión ocasiono una ausencia total de tensión ya que se sobrepaso el nivel de corriente de 30 amperios permitida por el totalizador.

Figura No 29. Montaje plano final con cargas inductivas (transformador de tensión de 3 KVA) y resistivas (banco de resistencias))



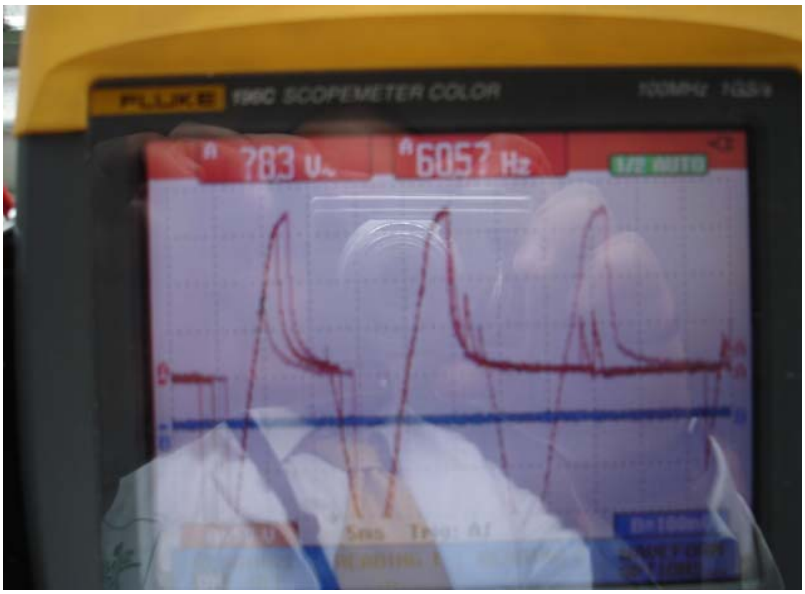
Fuente: Autores

Figura No 30. Conexión en serie de las resistencias del banco de Lorenzo en el tap uno.

Fuente: Autores

La señal de alimentación de tensión, medida a la entrada del transformador es la que se observa en la figura 31, la cual se forma por el paso del módulo y la variación de los potenciómetros que se encuentran en este.

Figura No 31. Señal de los bornes secundarios del transformador



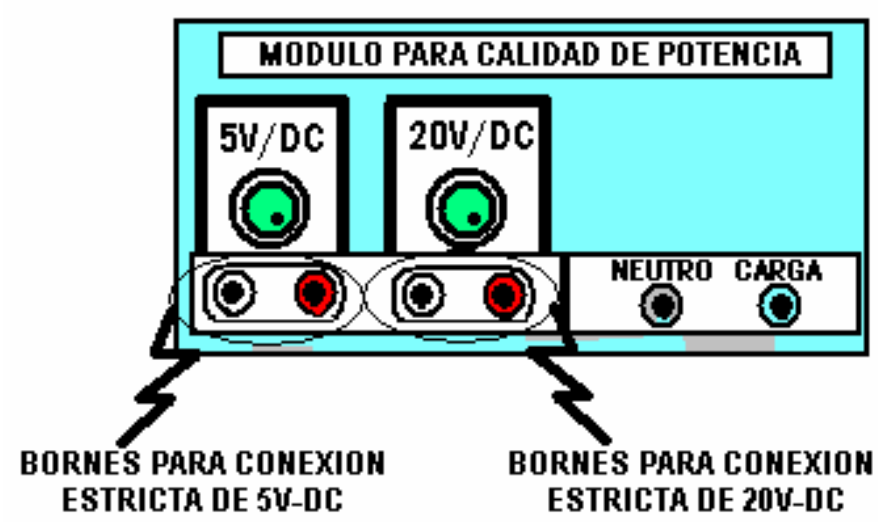
Fuente: Autores

3. PROCEDIMIENTO PARA EL MANEJO DEL MÓDULO

El módulo esta compuesto por:

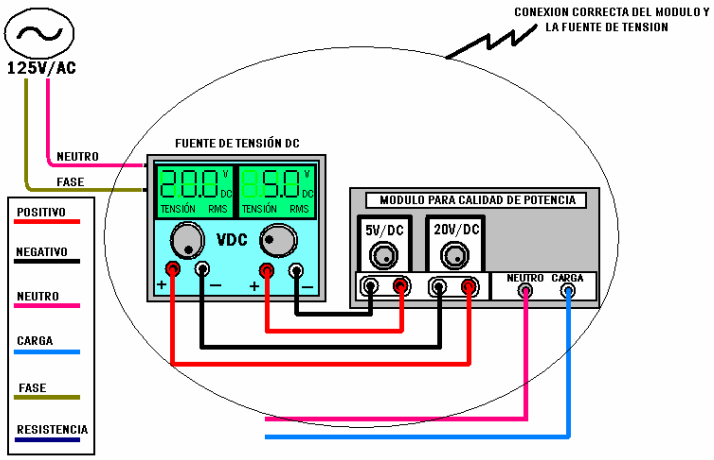
- Dos tarjetas electrónicas cada una contiene un controlador PWM, un detector de flanco de subida y de bajada y un acople para la parte de potencia.
- Dos resistencias variables, las que utilizamos para variar el disparo típico aleatorio.
- Dos entradas de alimentación, corriente directa
- Dos borneras una que va de la conexión del neutro de la red, a la entrada del neutro del modulo y la otra que va de la salida del modulo al entrada de la carga, quedándonos una conexión en serie entre el modulo y la carga.

⇒ Este dispositivo esta configurado para un funcionamiento estrictamente a 20 voltios y 5 voltios en corriente directa, es importante energizar correctamente, e identificar en el módulo los respectivos bornes,

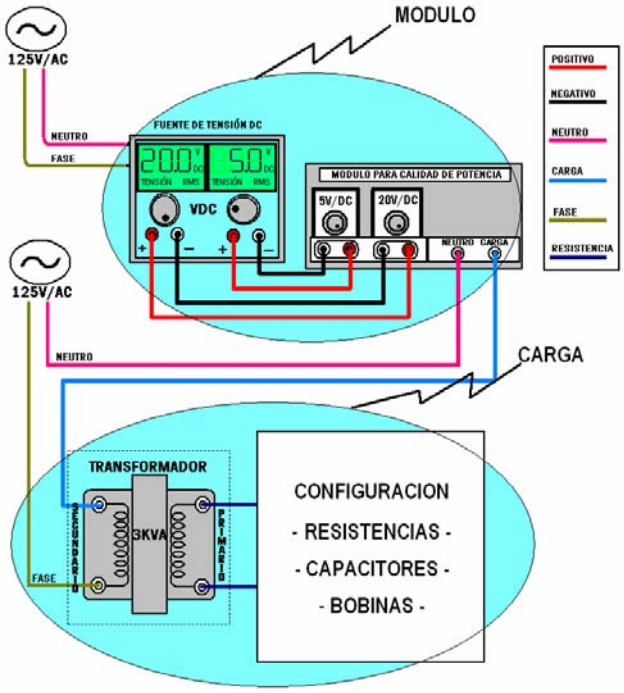


⇒ Una vez identificada las borneras de 20V y 5V en corriente directa se procede a realizar la conexión sin energizar el módulo, primero se realiza la

conexión, posterior a esto se rectifica la topología con la ayuda del profesor o encargado del laboratorio, y por ultimo se energiza el módulo.



⇒ Identificamos el módulo y la carga, realizando una conexión desde el módulo (neutro-carga) hacia la carga (transformador-capacitor-bobinas-resistencias), la conexión del módulo no depende de la carga, es decir para cualquier configuración de las cargas, siempre será constante la conexión del módulo.



⇒ Para observar las diferentes distorsiones se debe conectar el analizador de red AMC 3945 según sus especificaciones y el osciloscopio fluke serie 190.

⇒ Una vez conectado el dispositivo de medición, se procede a variar los potenciómetros del módulo, obteniendo una serie de lecturas mostradas por el osciloscopio, estos datos serán tomados para cada una de las practicas con las diferentes configuraciones de resistencia-capacitores-bobinas.

⇒ Los datos generados por las prácticas serán decisivos para determinar la calidad y cantidad de distorsión o presencia de armónicos que pueden generar las diferentes configuraciones de la carga.

4. PRACTICAS DE LABORATORIO

4.1 PRACTICA 1. R

El objetivo de esta práctica es observar la onda de la red antes del equipo y luego en la carga, además de la observación de armónicos de tensión.

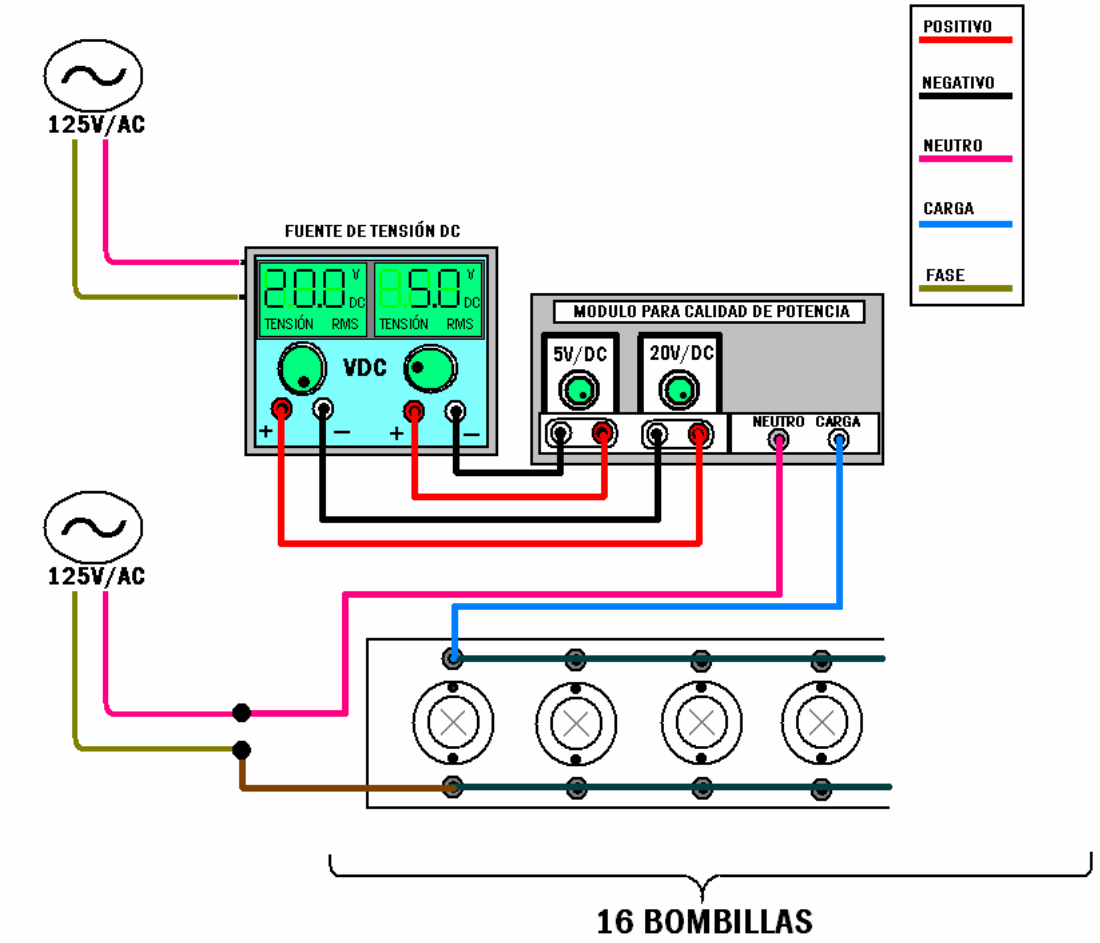
Los materiales necesarios para el desarrollo de esta práctica son:

- ✓ Cuatro tablas de bombillas
- ✓ Cables de conexión
- ✓ Fuente de corriente DC
- ✓ Clavija de poder
- ✓ Analizador de red AMC 3945
- ✓ Fluke serie 190
- ✓ Pinzas amperimétricas
- ✓ Voltímetro
- ✓ 16 bombillas

4.1.1 Esquema eléctrico

En la figura 33, se muestra el montaje eléctrico para el desarrollo de la presente práctica.

Figura No 32. Esquema eléctrico práctica R



Fuente: Autores

4.1.1.1 Procedimiento

1. Se verifica que la fuente DC se encuentre en los parámetros de 20V y 5V, luego se conecta por medio de las bananas al módulo.

2. Se conectan las bombillas en paralelo.

3. El neutro de la toma de corriente alterna de 120 V, se conecta a la regleta de neutro que se encuentra en la parte posterior del módulo, ahí mismo se encuentra la regleta de carga, la cual va conectada a una banana de las bombillas que están conectadas en paralelo.

4. Se conecta la fase de 120 V de la toma de corriente a la otra banana de las bombillas.

5. Para poner en marcha, primero se debe encender la fuente DC, para que el módulo este cebado, para evitar el choque térmico. Después se conecta la clavija que va a la toma de 120V de CA. Seguido esto, se empieza a aumentar la carga encendiendo las bombillas una por una, hasta llegar al máximo de carga. En esta práctica la las distorsiones se observan de manera directa.

4.2 PRACTICA 2. R y RL EN SERIE

El objetivo de esta práctica es observar la influencia del factor de potencia en contenidos armónicos del tipo 3, 5, 7 y 9.

Los materiales ha emplear en esta práctica son:

- ✓ Cables de conexión
- ✓ Fuente de corriente DC
- ✓ Clavija de poder
- ✓ Analizador de red AMC 3945
- ✓ fluke serie 190
- ✓ Pinzas amperimétricas
- ✓ Voltímetro
- ✓ Banco de resistencias y bobinas de Lorenzo

4.2.1 Esquema eléctrico R en serie

En la figura 34 se presenta el esquema eléctrico, para el desarrollo de la práctica R en serie con el banco de Lorenzo.

4.2.1.1 Procedimiento

1. Se verifica que la fuente DC se encuentre en los parámetros de 20V y 5V, luego se conecta por medio de las bananas al módulo.

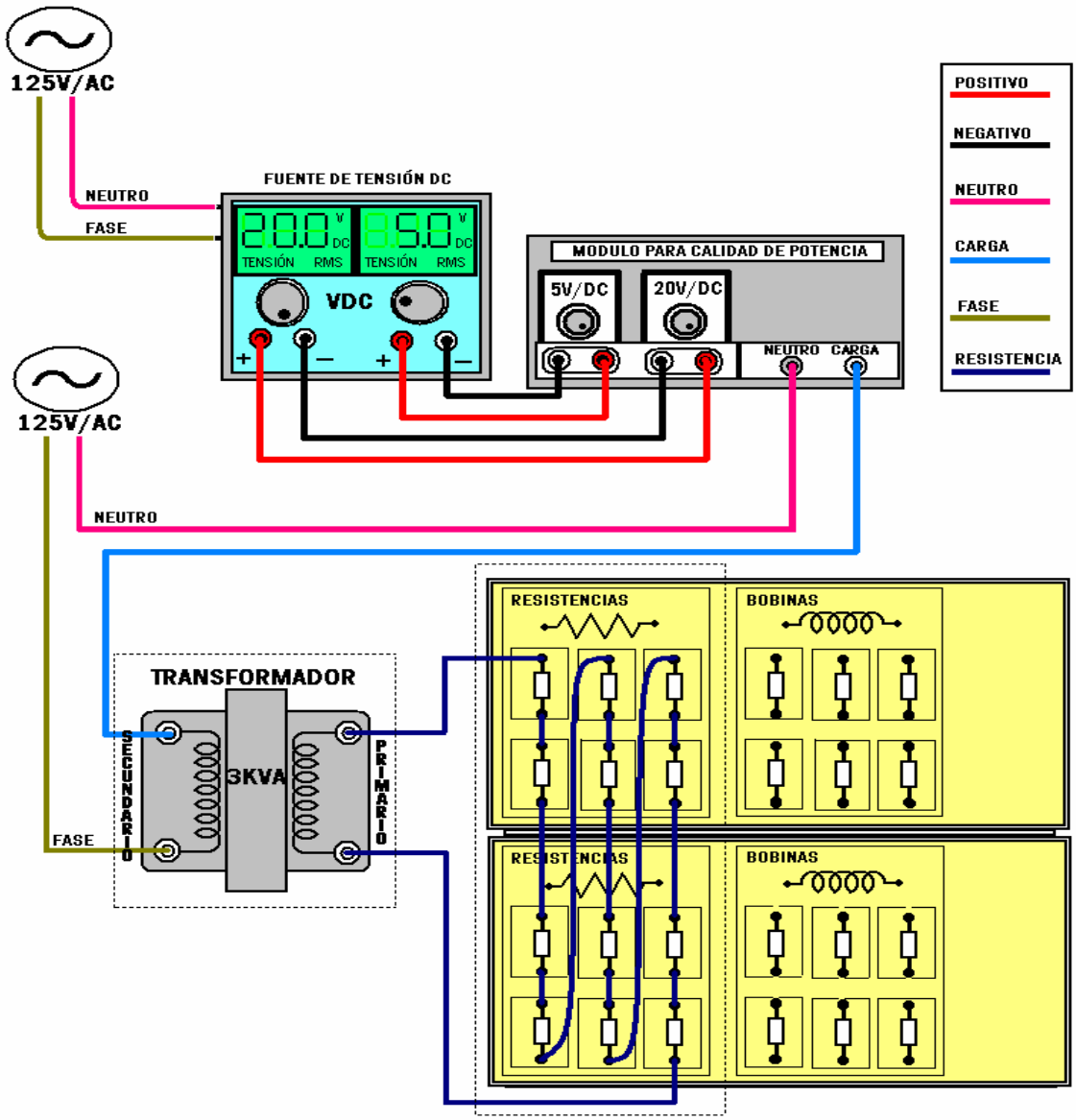
2. Se conecta el neutro de la toma de corriente alterna de 120 V a la regleta del módulo, la cual se encuentra en la parte posterior de este; la regleta de carga va conectada a la banana negra del transformador de 3 kVA por la parte del bobinado secundario.

3. La fase se conecta a la banana roja del transformador por la parte del bobinado secundario.

4. Realizado este proceso, se conecta el banco de Lorenzo, las cargas resistivas en serie, colocándolas en el tap número uno a la bobina primaria del transformador, de esta manera se logra aumentar la corriente.
5. Para poner en marcha, primero se debe encender la fuente DC, para que el módulo este cebado, para evitar el choque térmico. Después se conecta la clavija que va a la toma de 120V de CA. Antes de poner en funcionamiento el módulo las conexiones deben ser revisadas por el profesor o por el encargado de laboratorio, para evitar cortos circuitos, por malas conexiones.

6. Para observar las distorsiones armónicas, se utiliza el analizador de red AMC 3945. El analizador se configura en los parámetros de: análisis armónicos, en conexión monofásica y en configuración dos.

Figura No 33. Esquema eléctrico R en serie



Fuente: Autores

4.2.2 Esquema eléctrico RL en serie

Para el desarrollo de la práctica RL en serie, se empleara el Esquema eléctrico que se muestra en la figura 35.

4.2.2.1 Procedimiento.

1. Se verifica que la fuente DC se encuentre en los parámetros de 20V y 5V, luego se conecta por medio de las bananas al módulo.

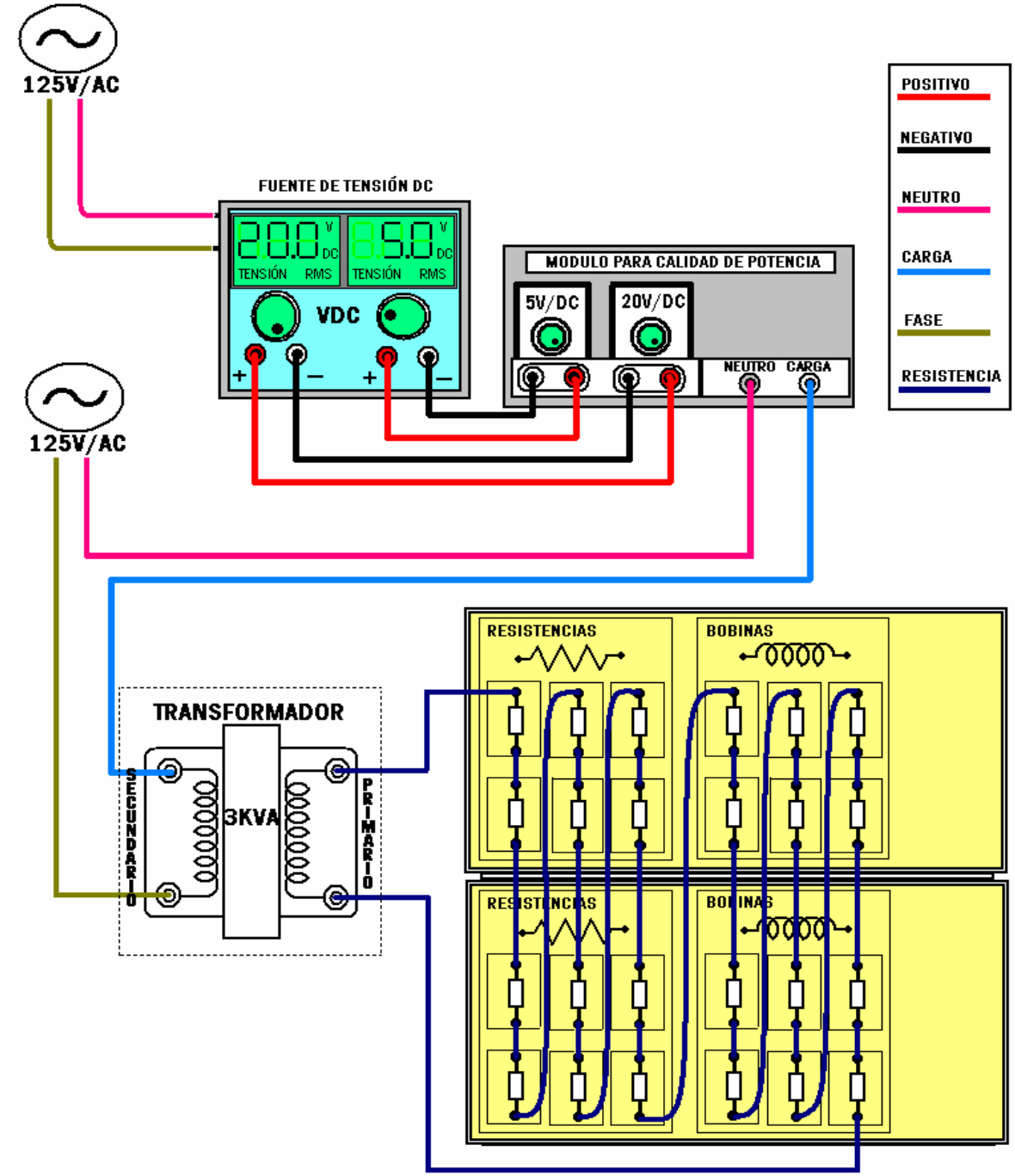
2. Se conecta el transformador de 3kVA a la toma de corriente alterna; el neutro va conectado al barraje de neutro del módulo y de ahí sale por el barraje de carga hacia el transformador hacia barraje secundario de este (conector de color negro).

3. La fase de la toma de corriente alterna se conecta al transformador (conector rojo).

4. Por el primario se conectan las bobinas y resistencias de los bancos de Lorenzo, las cuales se encuentran en conexión en serie.

5. Para observar las distorsiones armónicas, se utiliza el analizador de red AMC 3945. El analizador se configura en los parámetros de: análisis armónicos, en conexión monofásica y en configuración dos.

Figura No 34. Esquema eléctrico práctica RL en serie



Fuente: Autores

4.3 PRACTICA 3. RL EN PARALELO

El objetivo de esta práctica es observar las corrientes armónicas desde la red o hacia la red.

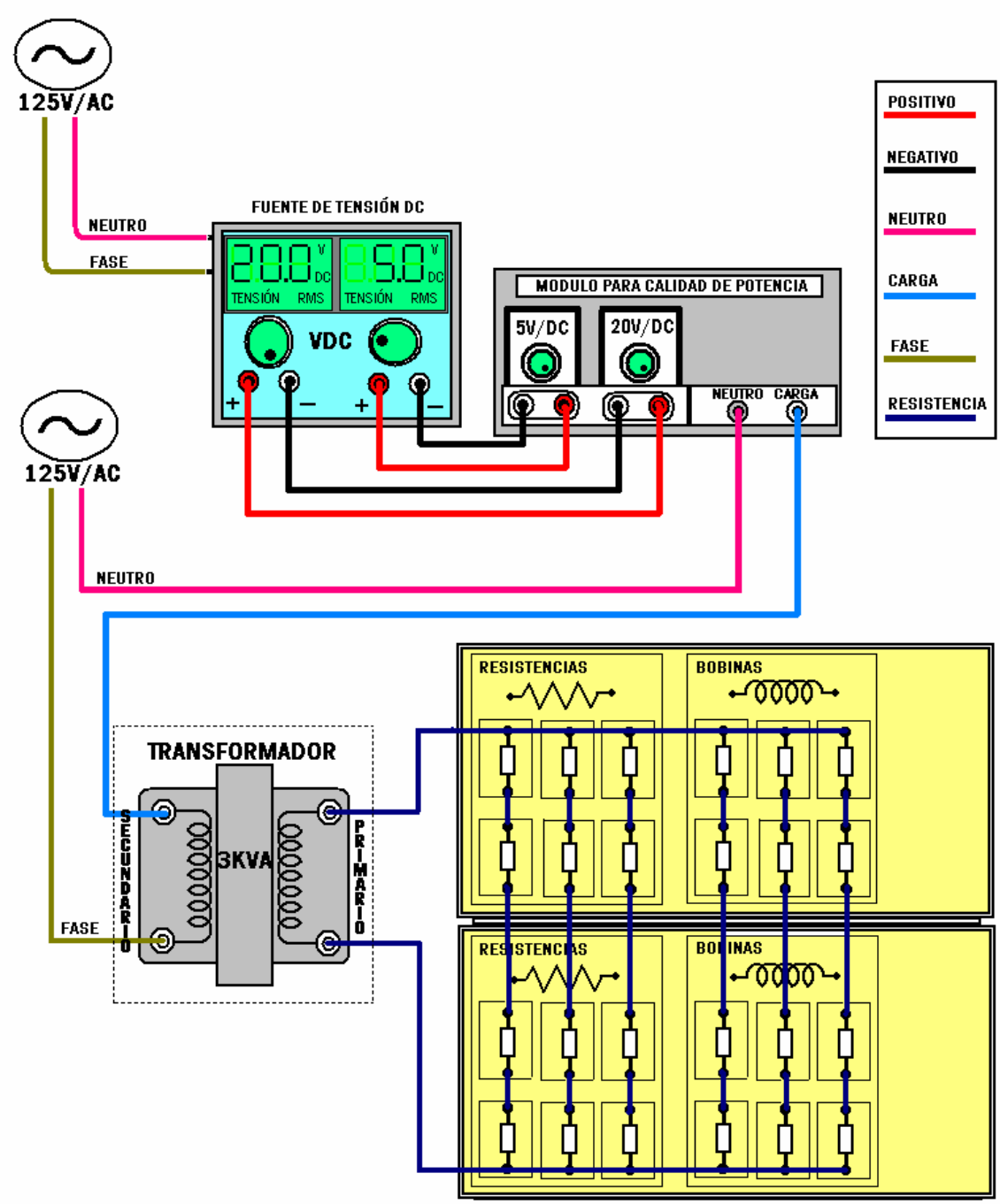
Los materiales para esta práctica son:

- ✓ Cables de conexión
- ✓ Fuente de corriente DC
- ✓ Clavija de poder
- ✓ Analizador de red AMC 3945
- ✓ Fluke serie 190
- ✓ Pinzas amperimétricas
- ✓ Voltímetro
- ✓ Banco de resistencias y bobinas de Lorenzo

4.3.1 Esquema Eléctrico

Para el desarrollo de la práctica RL en paralelo, se conecta como se muestra en la figura 36.

Figura No 35. Esquema eléctrico RL en paralelo



Fuente: Autores

4.3.1.1 Procedimiento

1. Se verifica que la fuente DC se encuentre en los parámetros de 20V y 5V, luego se conecta por medio de las bananas al módulo.

2. Después de esto se conecta el neutro de la toma de corriente alterna de 120 V a la regleta del módulo, la cual se encuentra en la parte posterior de este; la regleta de carga va conectada a la banana negra del transformador de 3 kVA por la parte del bobinado secundario. La fase se conecta a la banana roja del transformador por la parte del bobinado secundario. Realizado este proceso, se conecta el banco de Lorenzo, las cargas resistivas y las inductivas en paralelo, colocándolas en el tap número uno a la bobina primaria del transformador.

Para poner en marcha, primero se debe encender la fuente DC, para que el módulo este cebado, para evitar el choque térmico. Después se conecta la clavija que va a la toma de 120V de CA. Antes de poner en funcionamiento el módulo las conexiones deben ser revisadas por el profesor o por el encargado de laboratorio, para evitar cortos circuitos, por malas conexiones.

Para observar las distorsiones armónicas, se utiliza el analizador de red AMC 3945. El analizador se configura en los parámetros de: análisis armónicos, en conexión monofásica y en configuración dos.

4.4 PRACTICA 4. RLC EN PARALELO Y EN SERIE

El objetivo de esta es observar la resonancia en paralelo y en serie.

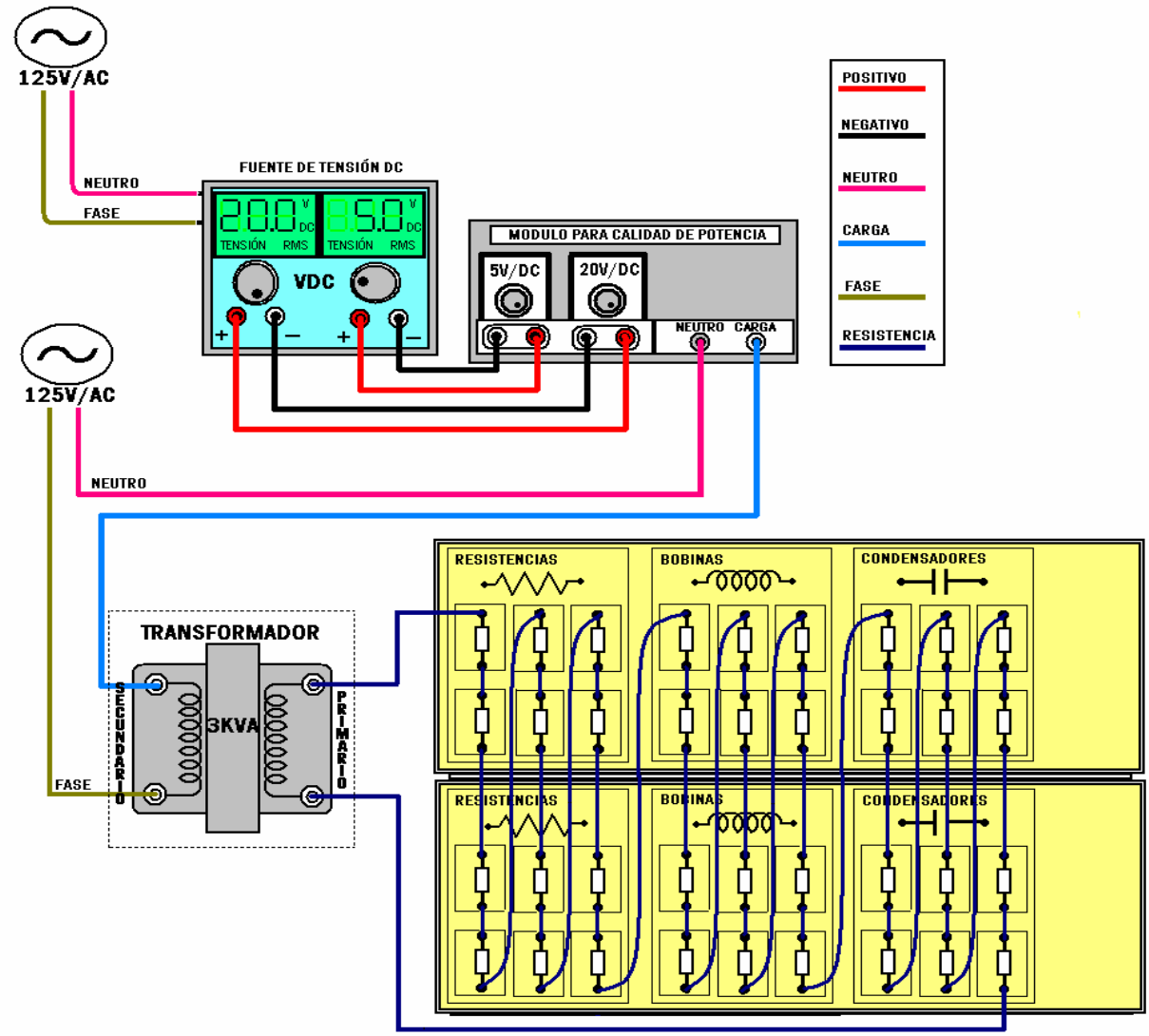
Los materiales a emplear son:

- ✓ Cables de conexión
- ✓ Fuente de corriente DC
- ✓ Clavija de poder
- ✓ Analizador de red AMC 3945
- ✓ Fluke serie 190
- ✓ Pinzas amperimétricas
- ✓ Voltímetro
- ✓ Banco de resistencias, bobinas y condensadores de Lorenzo

4.4.1 Esquema eléctrico RLC serie

La figura 37 muestra el esquema eléctrico a utilizar para el desarrollo de esta práctica.

Figura No 36. Esquema eléctrico RLC serie

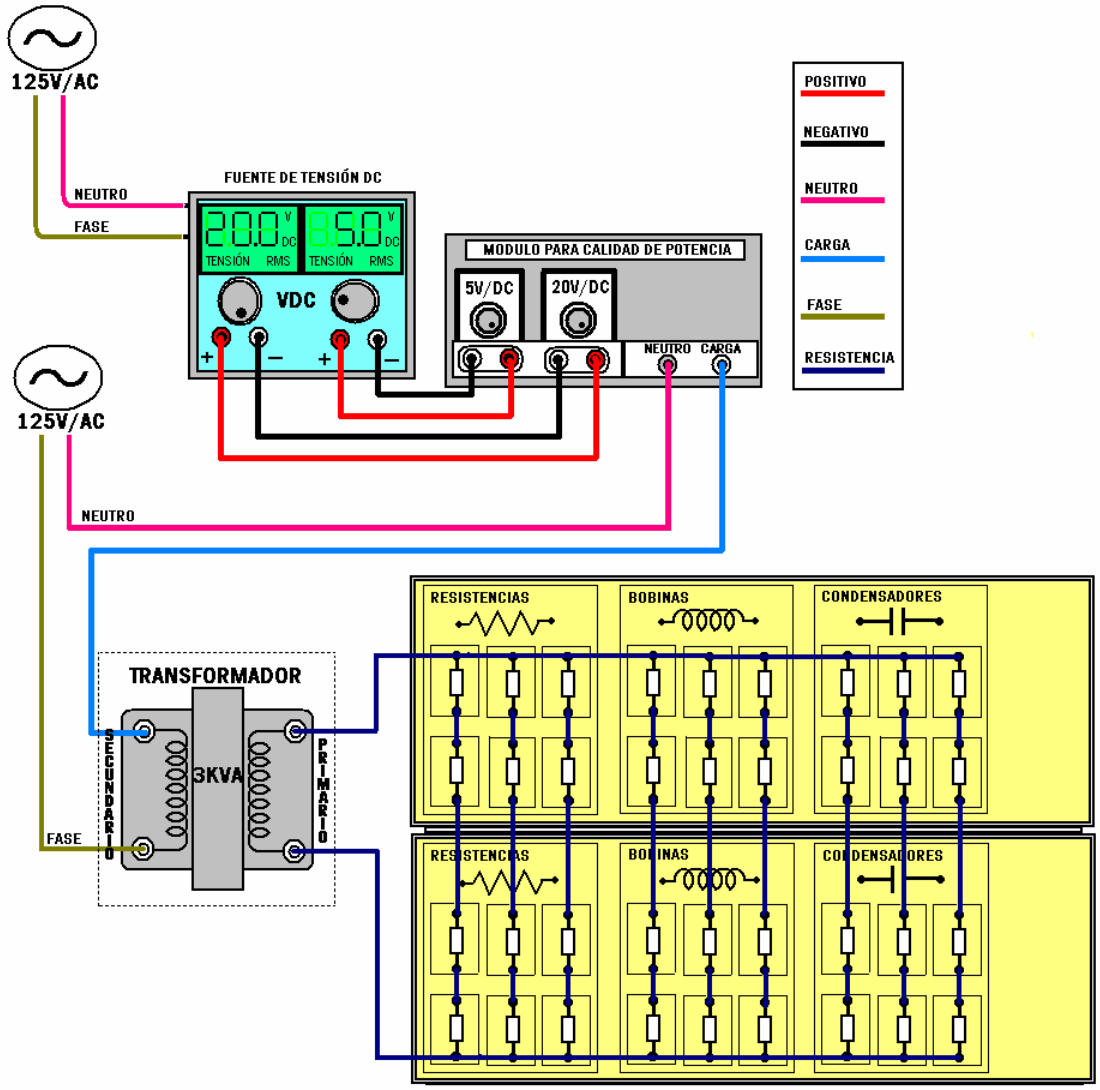


Fuente: Autores

4.4.2 Esquema eléctrico RLC paralelo

La figura 38 muestra el esquema eléctrico a utilizar para el desarrollo de la práctica RLC paralelo.

Figura No 37. Esquema eléctrico RLC paralelo



Fuente: Autores

4.4.2.1 Procedimiento

1. Se verifica que la fuente DC se encuentre en los parámetros de 20V y 5V, luego se conecta por medio de las bananas al módulo.

2. Después de esto se conecta el neutro de la toma de corriente alterna de 120 V a la regleta del módulo, la cual se encuentra en la parte posterior de este; la regleta de carga va conectada a la banana negra del transformador de 3 kVA por la parte del bobinado secundario.

3. La fase se conecta a la banana roja del transformador por la parte del bobinado secundario.

4. Realizado este proceso, se conecta el banco de Lorenzo, las cargas resistivas, inductivas y capacitivas en serie y paralelo, colocándolas en el tap número uno a la bobina primaria del transformador.

5. Para poner en marcha, primero se debe encender la fuente DC, para que el módulo este cebado, para evitar el choque térmico. Después se conecta la clavija que va a la toma de 120V de CA.

6. Antes de poner en funcionamiento el módulo las conexiones deben ser revisadas por el profesor o por el encargado de laboratorio, para evitar cortos circuitos, por malas conexiones.

7. Para observar las distorsiones armónicas, se utiliza el analizador de red AMC 3945. El analizador se configura en los parámetros de: análisis armónicos, en conexión monofásica y en configuración dos.

CONCLUSIONES

- En los montajes de tipo industrial se recomienda analizar muy detalladamente las conexiones de tierra en casos particulares, esta conexión se deja flotante debido a las corrientes inducidas por los toroides (si están presentes), las cuales originan daños en los sistemas detectores de potencia.

- Se comprobó que la presencia de armónicos de orden impar (3, 5, 7, etc.) generan calentamiento excesivo en determinados tipos de transformadores de potencia, conllevando al disparo en las protecciones de los circuitos de distribución de energía.

- Con el empleo de este módulo, los estudiantes, docentes e investigadores de ingeniería eléctrica de la Universidad de la Salle, pueden observar, manipular y distinguir los diferentes tipos de distorsiones, ya que hasta el momento no se contaba con una herramienta de estas características. El empleo de este módulo en las prácticas de laboratorio, permitirá que los alumnos formen un concepto más claro de las diferentes distorsiones, logrando encontrar soluciones a los problemas presentados en el campo laboral.

- Este dispositivo es tan nocivo para una red residencial e industrial, ya que es capaz "dependiendo de la configuración y el nivel que se exija" de afectar un sistema de protecciones y exigir el aislamiento de un transformador y sus protecciones, por tal motivo aseveramos que este dispositivo seria útil a una fabrica de transformadores, ya que experimental mente y de una forma controlada se podrían realizar pruebas a los transformadores, para determinar niveles de aislamiento de devanado y tiempo de ruptura de los dieléctricos del mismo.

- Se comprobó que los circuitos osciladores que controlan los semiconductores de potencia ocasionan grandes problemas en la calidad de potencia tales como: el calentamiento del embobinado de los transformadores, calentamiento en las partes de conexiones. Los

elementos de protección de las instalaciones también se ven afectados por estos fenómenos.

- El modulo en funcionamiento afecta las protecciones de las celdas del laboratorio cuando se intenta realizar un montaje de un circuito de fuerza y de cargas no lineales.

RECOMENDACIONES

- Desarrollar una interfase (módulo-computador) conformado por hardware y software que permita generar el pulso en HMI (interfase hombre-máquina) para el control del módulo.

- Para efectos de prácticas de laboratorio, y para no causar daños en las instalaciones de la red y su respectiva subestación se recomienda no exceder la capacidad del transformador determinado en este trabajo de grado.

- Implementar el uso del módulo en las asignaturas correspondientes a la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de la Salle.

- Se notaron las falencias de la red de baja tensión del laboratorio de Ingeniería eléctrica de la Universidad de la Salle.

- Esta práctica debe realizarse en un laboratorio dotado de elementos de protecciones en buen estado.

- Las prácticas con el módulo, deben realizarse como única práctica de momento en el laboratorio, es decir cualquier práctica realizada simultáneamente en el laboratorio podría sufrir una serie de variaciones en la calidad de la potencia, y por consecuencia les arrojara problemas en el desarrollo de las mismas.

- Los equipos de medición deben conectarse estrictamente como se determina en los manuales de los mismos, cualquier modificación en la topología de conexión podría causar deterioro en la medida o daños a los equipos.

- Para futuros proyectos de investigación o de grado se recomienda buscar patrocinio sea por parte de la universidad o por parte de la empresa privada debido a los altos costos de los elementos utilizados en este tipo de proyectos, adicionalmente este tipo de módulos pueden ser muy útiles a las industrias.

- Para la escogencia de un futuro tema de proyecto de grado se considera importante ver las necesidades actuales de las empresas del sector eléctrico.

BIBLIOGRAFIA

[1] ANIBA M., Bradley K., HURFF S., Mercedes F. “Industry- Sponsored Student Projects to Promote Power Quality Education ". IEEE Transactions on Power Systems. Vol 7, N° 4. November, 1992.

[2] ANSI, IEEE Std 519- 1992 “IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”.

[3] BENAVENT – ABELLAN – FIGUERES. Electrónica de Potencia: teoría y aplicaciones. Alfaomega. 1996.

[4] CHAPMAN, Stephen J. Máquinas eléctricas. Mc Graw Hill, 1992.

[5] COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. Resolución 024 de 2005.

[6] DUGAN, R. C., MCGRANAGHAN, M.F. and BEATY, H.W., “Electrical Power Systems in 8 Industry”, McGraw-Hill, 1996.

[7] ENRÍQUEZ, Gilberto. El ABC de la Calidad de la Energía Eléctrica. Noriega Limusa, 1999.

[8] GWYTHER, H. F. G Potencia eléctrica y electrónica de potencia. México. Alfa y Omega. 1993.

[9] HUMPHRIES, James. Electrónica Industrial. Madrid. Paraninfo. 1996.

[10] IEEE Std 1100-1992, "IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment, (IEEE Emerald Book)," 1992.

[11] IEEE Std 1159-1995. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. 1995.

[12] IEEE SM 519-1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. 1992.

[13] ORDOÑEZ, Gabriel. Perturbaciones en la onda de tensión: huecos y sobretensiones. Universidad Industrial de Santander. 2002.

[14] PEREZ, Ángel. La Amenaza de los Armónicos y sus Soluciones. Paraninfo, 2000.

[15] PIRELLI. SIKA. Manual de la calidad de la energía. Argentina, 2001. 357p.

[16] RETIE. Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas. Resolución número 180398 del 7 de abril de 2004.

[17] TELLEZ, Eugenio. Calidad de la Energía. Automatización, productividad y calidad s.a. de c.v. México. 25 p.

ANEXOS

Anexo A. Fluke serie 190, osciloscopio.

Anexo B. Pinzas amperimétricas

Anexo C. Analizador de red AMC 3945

Anexo D. Multímetro