



**UNIVERSIDAD NACIONAL
“PEDRO RUIZ GALLO”
ESCUELA DE POSTGRADO**



**MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELÉCTRICA CON MENCIÓN EN ENERGÍA**

**“SELECCIÓN DE UN SISTEMA DE FILTROS DE ARMÓNICOS
PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA
ELÉCTRICA EN LA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELÉCTRICA–UNPRG”**

TESIS

Presentada para optar el Grado Académico de Maestro en
Ciencias de la INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA con
mención en ENERGÍA.

PRESENTADA POR:

CARLOS YUPANQUI RODRIGUEZ

ASESORADO POR: DR ING. CARLOS AUGUSTO CHAMBERGO LARREA

**LAMBAYEQUE - PERÚ
JULIO 2021**

**“SELECCIÓN DE UN SISTEMA DE FILTROS DE ARMÓNICOS PARA EL
MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA FACULTAD
DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA–UNPRG”**

CARLOS YUPANQUI RODRIGUEZ
AUTOR

Dr. ING. CARLOS AUGUSTO CHAMBERGO LARREA
ASESOR

Presentada a la Escuela de Postgrado de la Universidad Nacional Pedro Ruíz Gallo.
Para optar el Grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA CON
MENCIÓN EN ENERGÍA**

APROBADO POR:

M.Sc. ING. ANTONIO TUMIALAN HINOSTROZA
PRESIDENTE DEL JURADO

Dr. ING. DANIEL CARRANZA MONTENEGRO
SECRETARIO DEL JURADO

M.Sc. ING. FREDDY DÁVILA HURTADO
VOCAL DEL JURADO

MAYO, 2021

DEDICATORIA

A DIOS NUESTRO DIVINO HACEDOR QUE TODO LO PUEDE Y TODO LO
VE Y QUE NOS MOSTRO SU INMENSA BONDAD EN ESTOS TIEMPOS DE
PANDEMIA VERDADERAMENTE DUROS

A MIS PADRES CUYA MEMORIA ALCANZA LAS PROFUNDIDADES DE
MI SER

A MI ESPOSA, HIJOS Y NIETOS MIS GRANDES Y VERDADEROS
AMORES.

AL INFINITO DONDE ESTA EL AMOR PURO DE MI HERMOSA BB, MI
CARITO, Y EL DE MIS HERMANITAS LINA Y MARTA.

AGRADECIMIENTOS

A TODOS MIS AMIGOS CUYAS MUESTRAS DE AMISTAD Y APRECIO GUARDO CON SENSIBLE RECONOCIMIENTO.

INDICE

Resumen
Abstract
Introducción

CAP. I ANÁLISIS DEL OBJETO DE ESTUDIO	10
1.1 Ubicación	11
1.2 El problema: Causas y efectos	14
1.2.1 Antecedentes	
1.2.2 Problema	
1.2.3 Formulación del problema	
1.2.4 Objetivos	
 CAP. II MARCO TEÓRICO	 23
2.1 Antecedentes de la investigación	
2.2 Corrientes Armónicas	
2.2.1 Conceptos técnicos	
2.2.2 Calidad de la energía Eléctrica	
2.2.3 Deformación de Onda	
2.2.4 Armónicos	
2.2.5 Secuencia de los armónicos	
2.2.6 Espectro armónico	
2.2.7 Distorsión armónica	
2.2.8 Definición de punto común PCC	
2.2.9 Tipos de Carga	
2.3 Origen de las perturbaciones armónicas	

- 2.4 Principales efectos de las perturbaciones en las instalaciones
- 2.5 Solución al problema de armónicos

CAP. III MARCO LEGAL

- 3.1 Marco legal y normativo
- 3.2 Normatividad en el Perú

CAP. IV ANÁLISIS EXPERIMENTAL – MEDICIONES EFECTUADAS 35

CAP. V ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS-PROPUESTA TEÓRICA 35

- 5.1 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS 48
- 5.2 PROPUESTA TEÓRICA 54

CONCLUSIONES 63

RECOMENDACIONES 65

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 66

ANEXO 1 67

RESUMEN

OBJETIVOS: Seleccionar un sistema de filtros que mitiguen el efecto de los armónicos y mejoren la calidad de la Energía Eléctrica de la FIME-UNPRG.

Materiales y métodos. Se realizaron mediciones de los diferentes magnitudes como voltajes y corrientes, de fase y de línea, potencia y de armónicos en los tableros de distribución eléctrica del CEPROSE-FIME, laboratorio de Máquinas eléctricas, así como en el moderno Centro de Impresiones como zona de influencia a las redes eléctricas de la FIME-UNPRG que resultan ser tableros gravitantes y soporte de la carga eléctrica del sector.

Estas mediciones fueron hechas con un analizador de redes Power Quality Analyzer MI 2192 en una primera etapa y un analizador Analyst 3P LEM posteriormente, ambos de alta confiabilidad.

Hecho el analisis de cargas en los diferentes tableros se ha llegado a establecer el uso de Filtros para Armónicos recogidos de los catálogos de fabricantes como Schneider y otros del ambito nacional.

ABSTRACT

OBJECTIVES: Select a filter system that mitigates the effect of harmonics and improves the quality of the Electric Power of the FIME-UNPRG.

Materials and methods. Measurements of the different magnitudes such as voltages and currents, phase and line, power and harmonics were made in the electrical distribution boards of the CEPROSE-FIME, Electrical Machines Laboratory, as well as in the Modern Printing Center as an area of influence. To the electrical networks of the FIME-UNPRG that turn out to be gravitating boards and support of the electrical load of the sector.

These measurements were made with a Power Quality Analyzer MI 2192 network analyzer in a first stage and a Analyst 3P LEM analyzer later, both of high reliability.

After analyzing the loads in the different boards, the use of Harmonic Filters collected from the catalogs of manufacturers such as Schneider and others from the national scope has been established.

INTRODUCCIÓN

Por la presencia de cargas no lineales, como resultado de la difusión de la electrónica de potencia, que distorsionan la onda de tensión senoidal, se presentan situaciones anómalas tales como: sobrecalentamiento de transformadores, neutro, y conductores de fase, disparo intempestivo de los interruptores, motores cuyos bobinados se queman sin razón; esto no es más que consecuencia de la presencia de fenómenos importantes como imperceptibles como es el caso de los armónicos.

La FIME-UNPRG realiza, como aspecto fundamental, el desarrollo académico con miras a la formación de los ingenieros que la sociedad demanda. Estas labores se desarrollan en laboratorios y talleres dotadas de equipos como computadoras, tornos fresadoras y sobre todo soldadoras y otros que introducen una serie de armónicos que deforman la onda senoidal y que, como consecuencia, causan trastornos en la actuación de los elementos de protección y otros componentes con el consiguiente deterioro de la calidad de las redes eléctricas.

Nos encontramos por lo tanto frente a una interrogante propia del estado de deterioro de las redes eléctricas. ¿Qué hacer para optimizar las redes eléctricas y mejorar en términos de calidad la Energía Eléctrica en la FIME-UNPRG?

¿La solución?, no la única, pero sí muy importante, el uso de filtros armónicos cuya selección y utilidad es materia de la presente tesis.

El estudio de cargas no lineales, ósea, de forma no continuas en el transcurso del tiempo, ha tomado un interés especial en los estudios de flujo de cargas armónicas ya que se requieren de conocimientos especializados para establecer los armónicos inyectados por las cargas no lineales al sistema, de tal manera que no se involucre el periodo de cálculo y la convergencia. Si bien han coexistido los armónicos en las redes eléctricas, los efectos han comenzado a tener mucha importancia a medida que la sociedad va mejorando, agregando cada vez más cargas eléctricas y electrónicas; este fenómeno ya no es tan nuevo e involucra a todas las redes eléctricas de los sectores del mercado eléctrico peruano.

CAPITULO I

ANÁLISIS DEL OBJETO DE ESTUDIO

1.1 Ubicación

Es hasta el 17 de marzo del año 1970 que coexistieron en la Región Lambayeque, dos importantes universidades; la Agraria del Norte, con sede en Lambayeque y La Universidad Nacional de Lambayeque con sede en Chiclayo, en esta fecha mediante el Decreto Ley N° 18179, se fusionaron las dos casas superiores de estudio en el norte del país, para crear una nueva, considerando darle el nombre de un reconocido e ilustres personajes de esta parte del país, el sobresaliente precursor, héroe nacional e inventor, el Teniente Coronel Pedro Ruiz Gallo.

Es por el año 80 que se crea la FIME, como uno de los pilares académicos de la UNPRG y cuyas necesidades académicas proponen la existencia de Laboratorios y Talleres que permitan una formación integral de sus profesionales. He aquí nuestro objeto de estudio y en el que se desarrolla la presente tesis.

1.2 El problema: Causas y efectos

1.2.1 Antecedentes

Se observaron por los años de 1890 ciertos fenómenos en los sistemas de potencia no comprendidos y que posteriormente tras varios estudios demostraron la existencia de armónicos cuando se identificaron que las bobinas de los transformadores, motores eléctricos, electrónica de potencia, entre otros, como los factores incidentes en la desconfiguración de las formas de onda de voltaje y corriente.

En 1893, Charles P. Steinmetz y Hartford Conn, aportaron a la ciencia variados estudios para solucionar los problemas por efecto Joule que implican sobrecalentamiento que presentaba un motor eléctrico, utilizando el análisis

armónico particular, con el apoyo de un instrumento, al que llamó “medidor de ondas”.

Este instrumento es adecuado para la obtención de la forma de onda de voltaje en ciertos puntos de una instalación eléctrica. Encontrada la forma de onda que producía la máquina, Steinmetz, estudiaba la señal por medio de las ecuaciones de Fourier. Por aquellos años, la malformación armónica en los sistemas eléctricos de corriente alterna, se logró reducir por medio de mejoras en los nuevos diseños, tanto de generadores como de transformadores.

En la actualidad, el uso frecuente de circuitos electrónicos, arrancadores estáticos y variadores de velocidad entre otros y, dado el gran desarrollo del acero, la industria de los servicios, la manufactura y otras más, se hace de suma importancia mejorar calidad de energía en sistemas eléctricos.

Para todas estas mejoras tecnológicas, de avanzada es necesario mejorar de alguna manera la calidad de energía y las nuevas formas de transformarla, que a su vez trae nuevos problemas en las redes eléctricas y cambios a resolver por los ingenieros, donde uno de los retos es tomar medidas de control, medición y reducción de los problemas vinculados a la Calidad de la Energía y proliferación de Armónicos.

1.2.2 Problema

La FIME - UNPRG realiza, como aspecto fundamental, el desarrollo académico con miras a la formación de los ingenieros que la sociedad demanda. Estas labores se desarrollan en laboratorios y talleres dotados de equipos, entre otros, tornos, esmeriles y, sobre todo, soldadoras y otros que introducen una serie de armónicas que deforman la onda senoidal y que, como consecuencia, causan trastornos en la actuación de los elementos de protección y otros componentes con el consiguiente deterioro de la calidad y eficiencia de las redes eléctricas.

1.2.3 Formulación del problema

El estudio de cargas no lineales, ha generado especial interés en el análisis de flujo de carga armónico, debido a que se requieren de métodos matemáticos

para medir los armónicos inyectados por las cargas no lineales al sistema eléctrico, de tal manera que no se incremente el tiempo de procesamiento de datos y manejo de la información.

Los efectos de los armónicos introducidos por cargas no lineales, tiene especial importancia a medida que las fábricas se han venido automatizando, al incorporar cada día más elementos eléctricos y especialmente electrónicos. Estas anomalías se presentan en todas las redes eléctricas de los sectores eléctricos tales como doméstico, industrial y comercial.

Sobrecarga de condensadores, mal aprovechamiento de la instalación, aumento de pérdidas en la misma, disparo intempestivo de los dispositivos de protección, parpadeo del alumbrado y sobre todo averías frecuentes y mal funcionamiento aparatos electrónicos son algunas de las consecuencias de los armónicos. Haciendo la evaluación de los componentes de la instalación, podríamos empezar a dar soluciones prácticas que beneficiarían la economía de las redes eléctricas, el buen marcha y eficiencia de máquinas, y lo más importante, evitar accidentes de personas.

1.2.4 Objetivos

Objetivo General

El objetivo de la tesis es seleccionar un sistema de filtros que mitiguen el efecto de los armónicos y mejoren la calidad de la Energía usada en los servicios de electricidad de la FIME-UNPRG

Objetivos Específicos

- Analizar el estado actual del sistema eléctrico y los niveles de la contaminación armónica, mediante mediciones específicas por Tablero Eléctrico según las áreas de trabajo de la Facultad
- Diagnosticar con los datos obtenidos del análisis, cuáles son los puntos críticos que merecen mayor énfasis en la solución y selección de filtros.

- Seleccionar un sistema de filtros para reducir la contaminación armónica y evitar los problemas generados por armónicos, teniendo en cuenta el punto de vista técnico.

CAPÍTULO. II

MARCO TEÓRICO

II MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la Investigación

Los problemas de los sistemas eléctricos vinculados con los armónicos se conocen a partir de la década de los 70, cuando dos hechos desarrollados independientemente tuvieron lugar en la era contemporánea. En primer lugar, un incremento incesante del uso de la energía eléctrica por parte del sector industrial que motivo la necesidad de establecer normas referidas al ahorro de energía; Esto conllevó a las empresas a instalar en sus plantas bancos de condensadores para mejorar del factor de potencia. Estos condensadores permiten la reducción de los MVA del sistema eléctrico, y así, suministrar la potencia reactiva necesaria según un estudio técnico con las ventajas que se conocen para una bien calculada estimación del uso de condensadores en el sistema de potencia.

Otro problema se da con la aparición tiristores en bajo voltaje los que en los años 1960 fueron usados para motores en DC y luego en los años de 1970 utilizados en el control de la velocidad de los motores AC y sin atenuadores de armónicos

Un incremento en el uso de convertidores estáticos, en equipos de control de fábricas e industrias sumado al creciente uso de los condensadores, para el mejoramiento del factor de potencia., han traído dificultades cada vez más acentuadas y que debido a su crecimiento ha sido necesario la aplicación de técnicas adecuadas para el control de armónicos.

2.2 Corrientes Armónicas.

2.2.1 Conceptos Técnicos.

Respecto a la Calidad de Suministro Eléctrico, implica lograr una de manera continua una forma de onda sin malformación sinusoidal, de amplitud y

frecuencia estables. El uso de dispositivos electrónicos que actualmente se encuentran en los sectores residencial, comercial e industrial que motivan la rectificación monofásica tales como como las PC de escritorio, laptops, tabletas, celulares, artefactos eléctricos, iluminación y otros de esa índole causan deformación de la onda sinusoidal básicamente de la corriente. Todos estos artefactos con características no lineales van a producir perturbaciones armónicas de orden poco típico y una frecuencia múltiplo de la componente principal que afectan la marcha normal de otras cargas.

El estudio de estas ondas no sinusoidales requiere del uso herramientas matemáticas para su modelamiento siendo la más usada la Serie Fourier. Esta herramienta de cálculo, modela mediante ecuaciones matemáticas la onda deformada la que se descompone en una sucesión de componentes de diferentes amplitudes y frecuencias y así se realiza una evaluación por separado de las señales sinusoidales que causa la onda deformante, en base a una frecuencia primordial. Cada componente que se origina tiene su orden y un número representativo su frecuencia y secuencia respectivas. Estas señales se analizan y grafican en lo que se llama el Espectro de Frecuencia,

2.2.2 Calidad de la Energía Eléctrica

Las empresas de distribución como ENEL, ENSA, Luz del Sur entre otras a nivel nacional suministran una onda de tensión constante siendo el consumidor quien impone una onda de corriente. Es sabido que la energía eléctrica desde su generación tiene cuatro parámetros característicos de tensión sinusoidal y permiten medir su calidad, estas son: Forma, frecuencia, Amplitud y Simetría.

Desde la generación, pasando por la transmisión y de la energía eléctrica la señal sinusoidal va a sufrir alteraciones de sus valores de origen lo que afecta el estado normal de algunas cargas conectadas a la red. La calidad de la energía eléctrica que suministran las empresas debe estar dentro del estándar normalizado de voltaje, frecuencia y forma de onda

TABLA 1 ASPECTOS DE CALIDAD DE ENERGÍA

Como Producto	Como Suministro	Servicio Comercial
Voltaje constante	Frecuencia de Interrupciones (SAIFI)	Tarifas claras y sin errores
Desviaciones de Frecuencia (problemas desde generación)	Duración de las interrupciones (SAIDI)	Minimizar e informar cortes de energía
Deformaciones de onda (armónicas o perturbaciones)	Número de interrupciones	Reposición oportuna de energía

Fuente: Según datos obtenidos de la Empresa Distriluz y sus Gerencias Regionales (ENSA y Otras)

2.2.3 Deformaciones de Onda

Las tensiones en los sistemas de transporte de corriente eléctrica en alta tensión, presentan una distorsión de onda menor a 1%. Este porcentaje de malformación de la onda sinusoidal (THDV), se incrementa en la medida de un mayor acercamiento los usuarios finales, debido a que la tensión se reduce y la corriente aumenta, pudiendo llegar como máximo normalizado o aceptable de un 5% como nivel normal. Estas deformaciones de la onda sinusoidal tienen su origen en la corriente de las cargas eléctricas conectadas al sistema de naturaleza no lineal.

ALTERACIÓN DE LA AMPLITUD/FREC

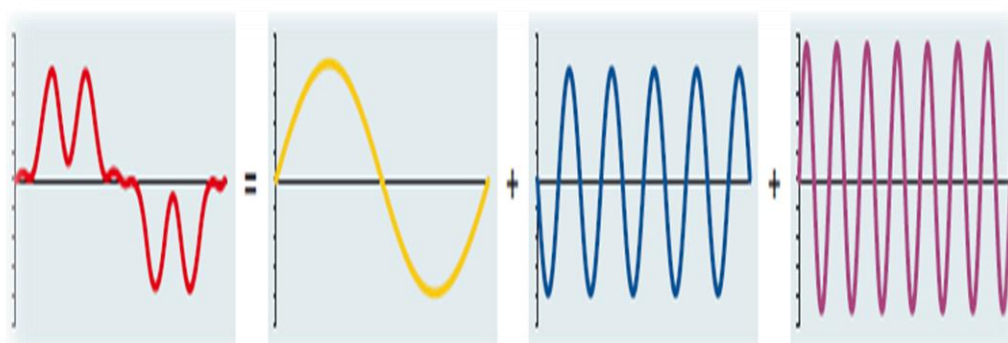


Fig. 1: Se muestra deformaciones de onda Sinusoidal.

Se visualiza que las ondas de tensión son periódicas y simétricas, las ondas de corriente conservan la condición anterior y son las que muestran la mayor deformación la que es posible analizar mediante Fourier

2.2.4 Armónicos

Cada componente de la serie con sus coeficientes y frecuencias recibe el nombre de armónicas:

$$f(t) = A_0 + A_1' \cos wt + A_3' \cos 3wt + A_5' \cos 5wt + \dots + A_1'' \sin wt + A_3'' \sin 3wt + A_5'' \sin 5wt + \dots +$$

Se distingue que las armónicas son ondas distorsionadas de corrientes y tensión no sinusoidales de diferentes amplitudes y frecuencias múltiplo de la componente fundamental Las armónicas no son una magnitud física por lo que no tienen unidades y que se pueden registrar en la actualidad con el instrumento denominado Analizador de Redes En instalaciones eléctricas residenciales, comerciales e industriales se encuentran componentes armónicas impares dada la simetría de la señal.

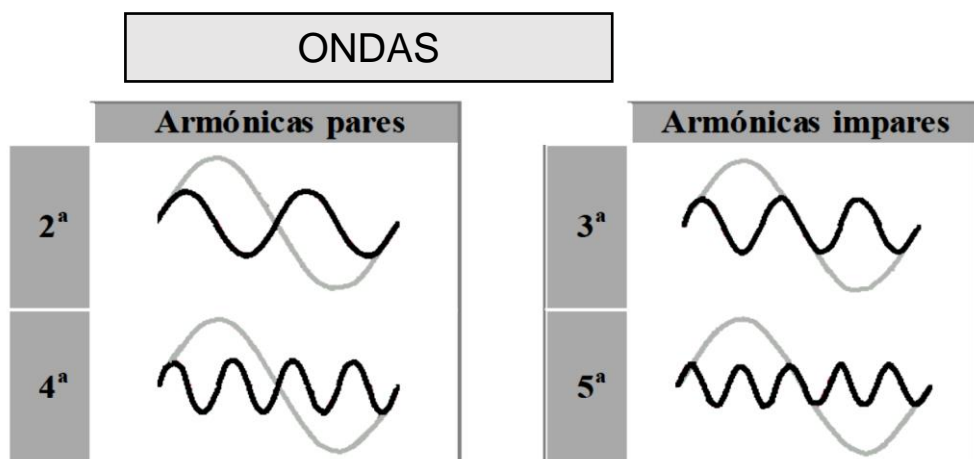


Fig. 2 Ondas Armónicas

2.2.5 Secuencia de los armónicos

Los tensiones 3Ø balanceadas, presentan un desfase de 120° entre si y para las corrientes un ángulo igual al de la impedancia de fase en atraso o en adelante; Mientras que en presencia de armónicos cada una de las fases presenta un ángulo diferente por lo que se puede mostrar diferentes secuencias

TABLA 2 SECUENCIA DE LOS ARMÓNICOS

Voltaje/fase	Armónica	Secuencia	Efecto producido
$V_{ah} = V_h \angle \phi_h$	$h = 3n$	CERO	No giran pero incrementa corriente del neutro
$V_{bh} = V_h \angle \phi_h - \frac{120h}{h}$	$h = 3n + 1$	POSITIVA	Giran al mismo sentido de la fundamental
$V_{bh} = V_h \angle \phi_h + \frac{120h}{h}$	$h = 3n - 1$	NEGATIVA	Giran al sentido contrario de la fundamental

TABLA 3. SECUENCIA DE LOS ARMÓNICOS

Orden armónico	1	3	5	7	9
Frecuencia[Hz]	60	180	300	420	540
Secuencia	+	0	-	+	0

2.2.6 Espectro Armónico

Es una representación de armónicos individuales como porcentaje de la cantidad fundamental (Fig. 3), esta la que resulta de suma importancia para el estudio de los distintos sistemas de distribución y transmisión. Esta tabla de armónicos individuales nos muestra del valor armónico en el dominio de la frecuencia lo que es perfectamente observable en un analizador de redes.

La grafica muestra cada barra que representa el orden de armónico y su valor porcentual respecto de la onda fundamental existiendo armónicos impares por la forma simétrica de la onda común.

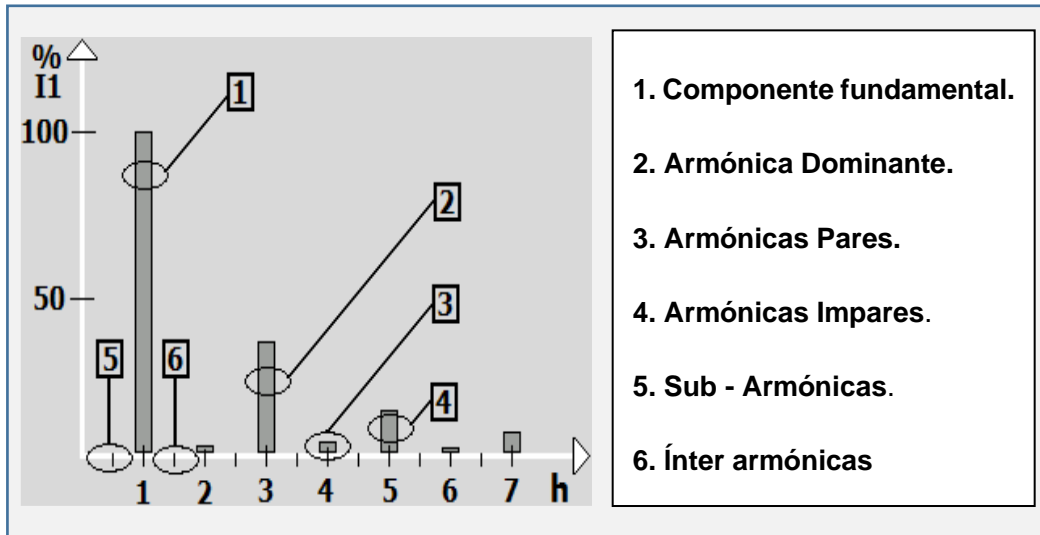


Fig. 3 Aspectos del Espectro Armónico (Electronics Handbook)

El número de componentes armónicos puede ser infinito y por lo tanto para su estudio se puede fijar en un valor máximo de 50 puesto que por arriba de estos armónicos el valor representativo es despreciable sea cual fuere la instalación.

2.2.7 DISTORSIÓN :

Nos mide el nivel de deformacion del voltaje o corriente respecto a la onda sinusoidal de un sistema eléctrico. Puede deberse a distintos fenómenos anómalos transitorios, como por ejemplo, el continuo arranque de motores eléctricos, conmutación de capacitores, fallas por cortocircuito entre otras.

- **DISTORSION ARMONICA TOTAL (THD) :** Esta dada por la relación entre el contenido armónico de la señal y la primera armónica o fundamental.

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots}}{V_1} \cdot 100\% \quad \dots\dots$$

Donde:

V_1 : voltaje o corriente fundamental

V_2, V_3, \dots, V_n : armónica de voltaje o corriente presente en la señal medida.

La fórmula de THD de Corriente es la siguiente:

$$THDi = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots}}{I_1} \cdot 100\%$$

La descripción es análoga al THD de Voltaje.

La norma que establece los límites permisibles del porcentaje de distorsión ya sea de Tensión o, lo que es más notable, de corriente es la estándar que la norma internacional IEEE 519-2014.

2.2.8 Definición de Punto Común (IEEE-519)

En las redes eléctricas de BT y MT, pueden presentarse distintas perturbaciones armónicas las que en un caso pueden ser motivadas por el mismo usuario o por usuarios vecinos a la red materia del estudio

Es la norma Estándar internacional IEEE – 519 la que recomienda concretar un punto común PCC (Fig. 4), al estudiar la capacidad de la red eléctrica al paso de M.T. a B.T., para absorber las deformaciones armónicas, mediante una técnica de reconocimiento del valor de la impedancia equivalente Z_{cc} . Este punto común puede estar ubicado en el primario bien en el secundario del transformador que alimenta la red materia del estudio.

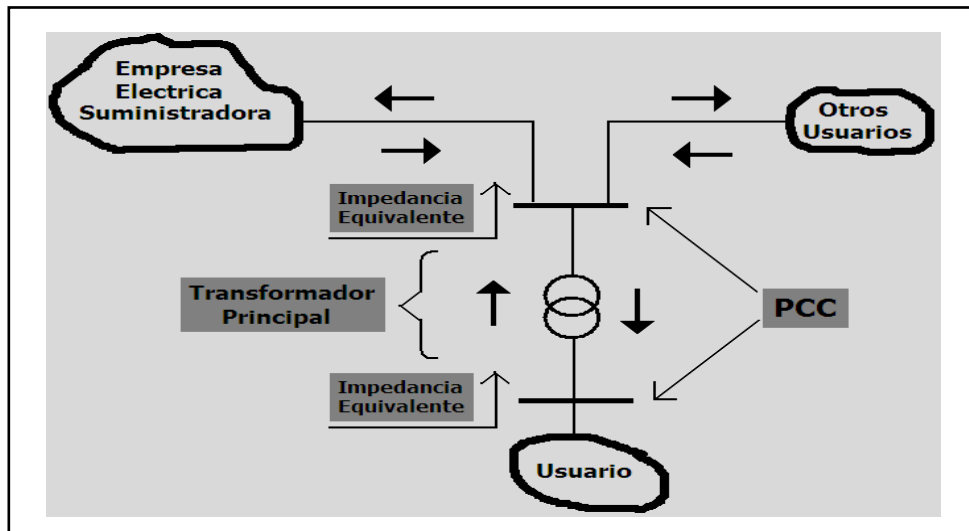


Fig. 4 Perturbaciones Eléctricas En Red Eléctrica

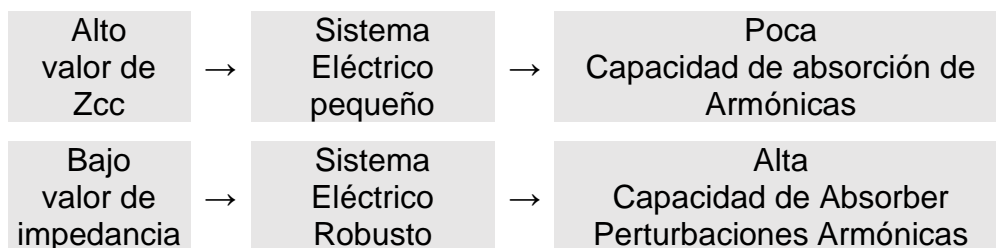


Fig. 5: Niveles de Impedancia equivalente.

2.2.9 Tipos de cargas

Un buen estudio de análisis de cargas, incluyendo armónicos, pasa por establecer claramente las diferencias puntuales entre las cargas lineales y no lineales conectadas lo que evidentemente se remite al reconocimiento de la naturaleza del equipo que se conecta.

A continuación se detallan algunos equipos típicos comprometidos con la deformación de las señales sinusoidales existentes en el mercado:

- Soldadoras y hornos de arco.
- Equipos que emplean dispositivos semiconductores.
- Convertidores de potencia.
- Equipos informáticos en sectores residenciales e industrial.

Los contaminantes de armónicos abundan principalmente en las fábricas, y su alteración de onda armónica se distribuye por todo el sistema eléctrico llegando incluso a las instalaciones domiciliarias.

Cargas Lineales

Se denomina carga lineal aquella que, al ser alimentada con una tensión sinusoidal origina una corriente también del tipo sinusoidal. De esta forma existe siempre una relación directamente proporcional entre la tensión y la corriente.

Estas situaciones se localizan en aparatos como ventiladores, lámparas incandescentes, celulares, o cualquier dispositivo eléctrico de carácter resistivos.

Cargas No Lineales

Con el auge de la electrónica aparece un gran número de cargas de naturaleza no lineal al ser alimentada por una tensión sinusoidal produce corrientes no sinusoidales y con características no lineales entre tensión y corriente.

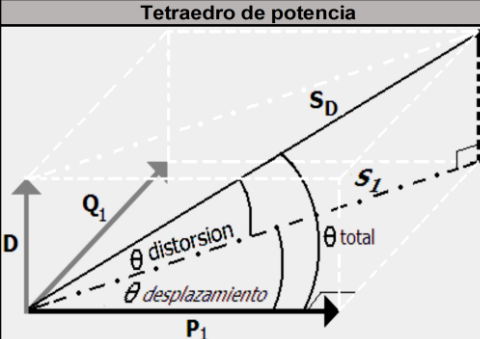
Son ejemplos típicos de cargas no lineales más usadas:

- Variadores de velocidad.
- Hornos eléctricos.
- Inversores.
- Drivers de CA.
- Drivers de CD.
- UPS.
- Hornos de inducción.

Cuando tratamos formas de onda distorsionadas, aplicar la definición de factor de potencia no resulta recomendable dado que el factor de potencia en sistemas eléctricos, con este tipo de ondas distorsionadas, depende de dos factores, que se denomina factores de Distorsión y Desplazamiento.

Con ondas malformadas por efecto de armónicas no es aplicable el concepto de triángulo de potencia aplica como alternativa un tetraedro de potencia para conseguir los valores del CosΦ tanto de desplazamiento como de distorsión según se puede observar en los cuadros siguientes:

Factor de potencia total	
$FP = \cos (\varnothing_{TOTAL}) = FP_{DISTORSION} \times FP_{DESPLAZAMIENTO}$	

$FP_{DESPLAZAMIENTO} = \cos \varnothing (\text{DESPLAZAMIENTO}) = \frac{P_1}{S_1}$	
$FP_{DISTORSION} = \cos \varnothing (\text{DISTORSION}) = \frac{1}{\sqrt{1 + (THDI^2)}}$	

La componente D en eje de ordenadas es una potencia no activa que incrementa la potencia reactiva, produciendo en consecuencia un efecto de calentamiento y potencia con distorsión.

$$D = \sqrt{(SD^2 - S1^2)}$$

2.3 Origen de las distorsiones armónicas.

2.3.1 Rectificación Monofásica

Resulta ser la principal fuente de distorsión, halladas en nuestras redes eléctricas, causando formas de corriente distorsionadas. Si el sistema es trifásico 3Ø la ocurrencia es en cada fase, es decir cada fase de la red, entrega una corriente de baja magnitud, pero en el conjunto de las 3 fases produce un considerable crecimiento de corriente por el neutro del sistema.

2.3.2 Rectificación Trifásica

En las instalaciones industriales es la principal fuente de alteración armónica para potencias que van hasta 100 MVA

2.3.3 Instalación de Condensadores

En los sistemas eléctricos se localiza con instrumentos perturbaciones armónicas, así como, un bajo factor de potencia que es necesario compensar con la instalación de bancos de condensadores, con el fin de tener un sistema eléctrico más estable.

Una instalación de banco de condensadores va a propiciar un fenómeno de resonancia que amplifica el efecto de las armónicas que trae como consecuencia una actuación excesiva de fusibles por efecto Joule debido al calentamiento de transformadores, ruptura del aislamiento en cables y sobretensión.

2.4 Principales efectos de los armónicos en las instalaciones

La distorsión armónica en redes eléctricas se observa en dos aspectos: la distorsión de tensión y la de corriente.

Para sistemas electrónicos de control se tiene a los capacitores y los motores eléctricos como los más afectados por la distorsión de tensión. Los controles eléctricos son significativamente los elementos puesto que muchos de estos controles se basan en una forma de onda estrictamente senoidal para un adecuado control. Los bancos de capacitores también se ven afectados por los picos propios de la forma de onda. En general se recomienda buscar que la distorsión armónica de tensión se ajuste al 5%.

Las corrientes armónicas tienen un efecto en la interferencia de comunicaciones y generan un aumento significativo de las pérdidas en líneas y transformadores así también causan respuestas no deseadas de relays.

Los efectos más comunes suscitados por la presencia de armónicas en los sistemas eléctricos son:

2.4.1 Disparo intempestivo de interruptores

Por la presencia de resonancia en los sistemas eléctricos, los niveles de corriente se incrementan y generan el disparo de interruptores y fusibles con la consecuente interrupción del proceso productivo por los retrasos y pérdidas de programación.

2.4.2 Sobrecarga de los transformadores

Es conocido que en los núcleos de los transformadores se presentan pérdidas por histéresis y Foucault que dependen, en ambos casos, de la frecuencia. Y dado que las frecuencias se incrementan las pérdidas aumentan causando un calentamiento adicional al transformador.

2.4.3 Sobrecarga de Capacitores

La corriente en condensadores se determina de la siguiente forma.

$$I = \frac{V}{X_C}$$

Donde: $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$ (Reactancia Capacitiva)

La reactancia capacitiva disminuye con la frecuencia por lo que las más pequeñas variaciones de tensiones armónicas causan elevadas corrientes que dañan a los capacitores.

2.4.4 Pérdidas en equipos de media tensión.

La presencia de las ondas armónicas en estos equipos de media causa pérdidas añadidas en los cables, fusibles y barras de distribución.

2.4.5 Elevada corriente en el Neutro

Para cargas balanceadas sin armónicas las corrientes de fase se cancelan en el neutro; dando una corriente de neutro nula. Sin embargo, para un sistema eléctrico de 4 hilos con cargas 1Ø no lineales los múltiplos impares de la 3°

armónica no se cancelan, sino por el contrario, se suman en el conductor de neutro.

En sistemas con gran cantidad de cargas no lineales 1Ø, las corrientes de neutro alcanzan niveles excesivos y sumamente peligrosos que deviene en un elevado calentamiento conocido comúnmente como efecto Joule, del conductor de neutro, debido a que no se instalan interruptores en la fase de neutro similares a los instalados en las fases.

2.4.6 Inconvenientes en los Equipos de Control y PCs

Estos equipos electrónicos y PC requieren de una buena calidad de energía para una operación confiable y puesto que las armónicas causan malformaciones en la onda sinusoidal tanto de tensión como corriente éstos se ven afectados en su operación

2.4.7 Desviaciones en los instrumentos de medición.

Las armónicas alteran la precisión y exactitud de los instrumentos por lo que se producen desviaciones en las lecturas con la consecuente pérdida de la confiabilidad. Los instrumentos de medición en general introducen un nivel adicional al error propio del diseño con la presencia de armónicos en la red

2.4.8 Efectos sobre los conductores

Si bien es cierto que en corriente continua no tenemos efecto de armónicas, es claro que precisemos que en corriente alterna y en presencia de armónicos, el recorrido de la corriente a través del conductor pierde uniformidad en la distribución la misma que se incrementa con el incremento de la frecuencia.

Cabe señalar que en corriente alterna y a altas frecuencias se hace más evidente el efecto superficial o efecto skin (*piel*).

De otro lado la reactancia del conductor se ve afectada por la frecuencia toda vez que se sabe que esta reactancia es $X = 2 \pi f L$.

2.5 Soluciones al problema de Armónicos.

Actualmente, con el avance de los estudios y la tecnología, podemos encontrar varias formas de atenuación de los Armónicos dentro de los que cabe resaltar:

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

En los sistemas eléctricos, notamos que, las perturbaciones armónicas generalmente van en aumento a medida que se reduce la potencia de cortocircuito. Si despreciamos todos los criterios y efectos económicos, se recomienda conectar cargas no lineales, en lo posible bajo criterios técnicos lo más aguas arriba viable.

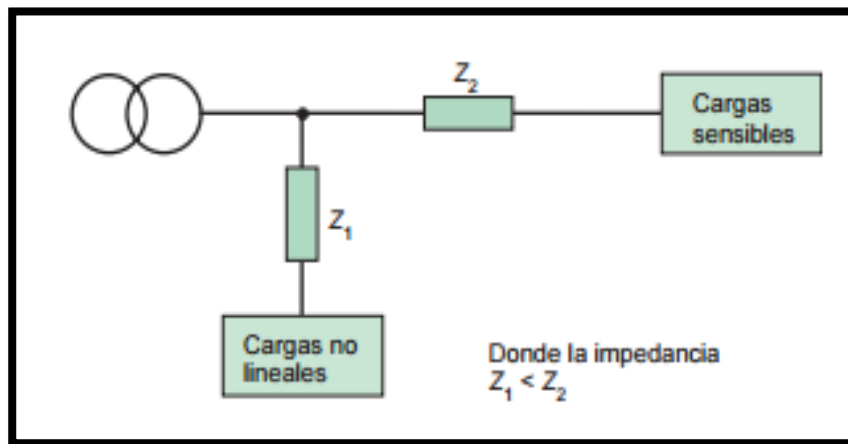


FIG. 6 CARGAS NO LINEALES COLOCADAS AGUAS ARRIBA.

2.5.2 Agrupación de cargas no lineales.

Realizando o diseñando un diagrama unifilar de la instalación o montaje de los dispositivos no lineales, se recomienda por estudios realizados en redes eléctricas que los generadores de armónicos deben estar separados del resto.

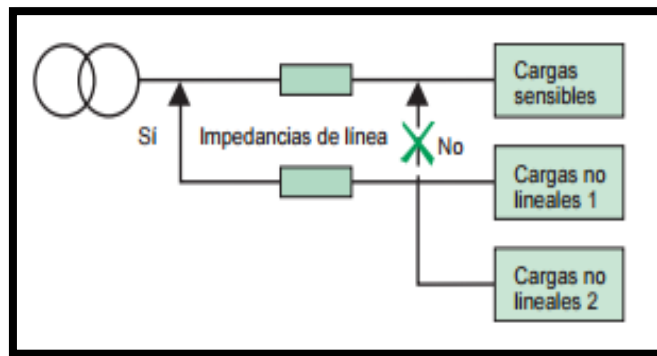


Fig.7 AGRUPACIÓN DE CARGAS NO LINEALES

2.5.3 Alimentación con fuentes separadas.

Con la clara intención de limitar los armónicos, con el fin de atenuar su efecto, se va a obtener una mejora adicional alimentando estas cargas desde una fuente adicional e independiente al resto de cargas lo que como es obvio produce un incremento en los costos de la instalación.

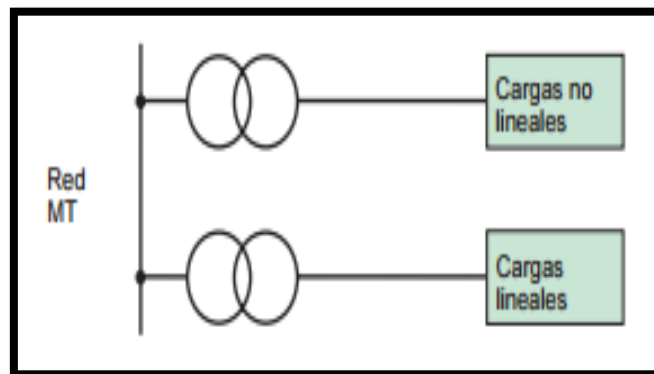


FIG. 8 ALIMENTACIÓN EN FORMA INDEPENDIENTE

2.5.4 Transformadores con conexiones especiales.

De acuerdo a la experimentación, se pueden realizar en campo determinadas conexiones de los transformadores, a fin de eliminar algunos rangos de ondas armónicas, tal como por ejemplo es el caso de las conexiones Dyd y Dy que elimina los armónicos 5° y 7° y 3° respectivamente y una conexión Dz5 atenuadora del tercer armónico.

2.5.5 Instalación de inductancias.

El uso de variadores de velocidad como cualquier equipo con componentes electrónicos produce armónicos por ello resulta necesario atenuar la corriente, esto se logra instalando reactancias del tipo inductivo pues al subir la impedancia los armónicos se ven limitados.

2.5.6 Filtros de armónicos.

En los sistemas eléctricos en los que se comprueba la presencia de armónicos cuyos efectos se han descrito, será necesario usar unos filtros para reducir o eliminar armónicas para permitir una instalación donde los equipos trabajen en condiciones de eficiencia y calidad. Estos filtros pueden ser:

2.5.6.1 Filtros Pasivos.

Un filtro de esta naturaleza, vienen a ser acomodados de filtros LC, para amortiguar señales de tensión o corriente. Por lo tanto, el acomodo de bobinas y condensadores se desarrollan filtros para radiofrecuencia, atenuando ruidos mayores a 1 MHz, principalmente los de muy corta duración y de poca amplitud. Atenúan ruidos en modo diferencial y en modo común. En casos de sistemas eléctricos, de una mayor potencia, los filtros LC se emplean para reducir las corrientes armónicas en cargas eléctricas no lineales. En consecuencia, tenemos que las componentes armónicas más típicas presentes son la 5ta, 7ma y 11ava

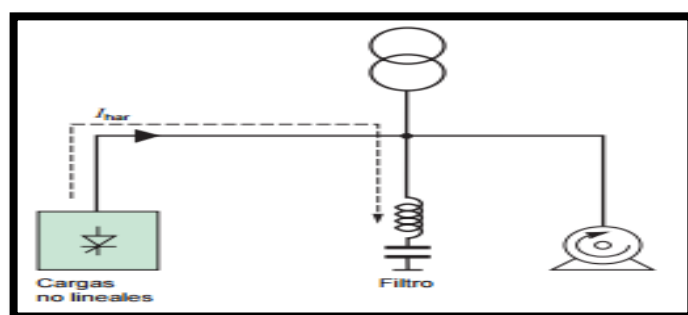


FIG 9 CIRCUITO TÍPICO DE UN FILTRO PASIVO

Aplicaciones típicas:

- En instalaciones eléctricas industriales con cargas no lineales arriba de 200 KVA como es el caso de los variadores de velocidad, rectificadores y otros
- Instalaciones eléctricas con bajo factor de potencia
- Casos en los hay alteración de tensión por lo que debe atenuarse para evitar perturbar las cargas sensibles.
- Instalaciones eléctricas en las que la distorsión de corriente debe atenuarse para evitar sobrecargas

2.5.6.2 Filtros Activos.

Estos tipos de filtros activos, son representaciones establecidos en convertidores de electrónica de potencia, en donde la meta es cancelar los armónicos de tensión, y las propias corrientes armónicas; además de otras funciones como corregir el factor de potencia y alimentar energía a una carga eléctrica crítica durante cortos intervalos de tiempo. Otros nombres, con el que, los filtros activos suelen ser llamados en los libros de especialización son: acondicionadores de red, acondicionadores de línea o simplemente acondicionadores. Tales equipos eléctricos presentan un nivel levemente inferior en cuanto a la calidad entregada por equipos como SAI, pero asimismo una disminución considerable en costo.

El estudio de estos equipos electrónicos, en sus nociones básicas, fueron formulados en la década de los setenta. El tipo de estructuras considerados manifiesta la necesidad, de llevar a cabo la compensación de la variable eléctrica esperada, en tiempos menores al ciclo de tensión de la red, lo que, unido al lógico requerimiento de no introducir armónicos adicionales, lleva al miramiento exclusiva de convertidores electrónicos conmutados, en elevada frecuencia y con control mediante pulsos modulados. Existen comercialmente distintas estructuras, para conexiones 1Ø como 3Ø.

En un inicial acercamiento para el análisis de los filtros activos, esta se realiza a partir de la variable eléctrica compensada: filtros activos universales, filtros activos de corriente y filtros de tensión.

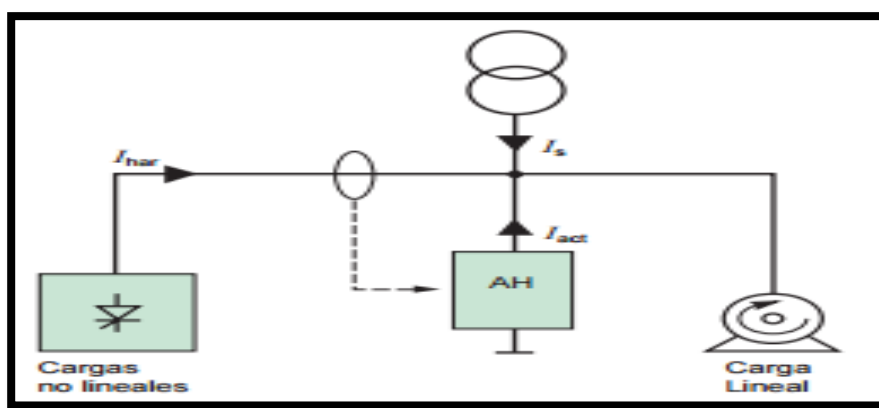


FIG. 10: CIRCUITO TÍPICO DE UN FILTRO ACTIVO.

- En instalaciones eléctricas industriales con cargas no lineales arriba de 200 KVA como es el caso de los variadores de velocidad, rectificadores y otros
- Instalaciones eléctricas con bajo factor de potencia
- Casos en los hay alteración de tensión por lo que debe atenuarse para evitar perturbar las cargas sensibles.
- Instalaciones eléctricas en las que la distorsión de corriente debe atenuarse para evitar sobrecargas

2.5.6.3 Filtros Híbridos.

Este tipo de filtros híbridos, resultan de la mixtura de un filtro pasivo y un filtro activo; esta mezcla permite minimizar el tamaño y por lo tanto el precio de los filtros con parte activa conservando las ventajas frente a los filtros pasivos.

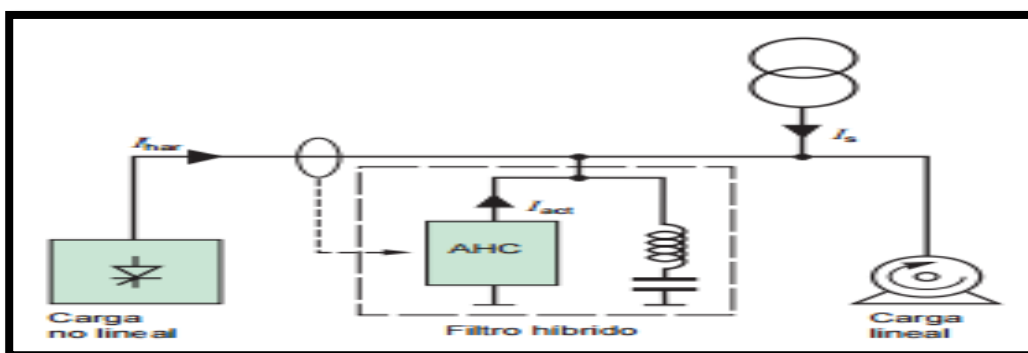


FIG. 11 CIRCUITO TÍPICO DE UN FILTRO HIBRIDO

Aplicaciones típicas ubicadas en el mercado:

- En instalaciones eléctricas industriales cargas no lineales arriba de 200 KVA como es el caso de los variadores de velocidad, rectificadores y otros
- Instalaciones eléctricas con bajo factor de potencia
- Casos en los hay alteración de tensión por lo que debe atenuarse para evitar perturbar las cargas sensibles.
- Instalaciones eléctricas en las que la distorsión de corriente debe atenuarse para evitar sobrecargas

CAPITULO III

MARCO LEGAL

3.1 Marco Legal y Normativo

Algunos países tienen normas técnicas donde definen tolerancias en cuanto a la variación de frecuencia y voltaje, pero también existen normas que limitan los porcentajes de armónicas tanto de tensión como, de manera muy enfática, las de corriente así también fluctuaciones de tensión y duraciones de interrupciones de suministros. Controlar estos parámetros eléctricos significa definir terminologías relacionadas al control de la calidad de energía eléctrica y a los fenómenos que se generan a causa de estas.

Las razones más importantes para elaborar una Norma de Calidad de la energía son:

- a. Definir escenarios nominales de los equipos del sistema eléctrico: Un ejemplo para definir las condiciones nominales podría ser: “La tensión debe ser senoidal con una frecuencia de 60 Hz y un valor rms de 220 V” esta definición no es muy práctica ya que técnicamente no se puede mantener la magnitud de voltaje y frecuencia exactamente constante. En consecuencia, existen definiciones que usan términos como “tensión nominal” o “tensión de contacto”. “La frecuencia nominal será 60 Hz y la tensión nominal será 220 V”
- b. Delimitar una terminología nueva: las perturbaciones eléctricas hacen que cada vez sea más evidente la generación y propagación de armónicos en el sistema eléctrico, por razones del aumento incontrolable de uso de equipos con características no lineales como lo son los del tipo electrónico que constituyen fuentes de armónicos y pueden ser afectado por ellos.
Es por ello que surge la necesidad de tener una terminología especial para analizar los problemas generados por las perturbaciones eléctricas.

- c. Definir límites a los inconvenientes de calidad de la energía: definir tolerancias de parámetros eléctricos los cuales son dañinos para el sistema eléctrico y así evitar pérdidas económicas.

3.2 Normatividad en el Perú

En el Perú tenemos la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (NTCSE), para el sector urbano; la cual fue admitida mediante el DS No020-97-EM, el 09-10-1997 que tiene la finalidad de certificar formalmente a los usuarios, unos suministros eléctricos continuos, adecuados, confiables y oportunos.

La calidad toma en cuenta los parámetros básicos como voltaje, frecuencia, flicker y armónicas de voltaje como de corriente. De otro lado también incorpora la tolerancia posible para eficacia de suministros (interrupciones), calidad de la prestación comercial, relaciones con usuarios y eficacia de alumbrado público. Se fijan las tolerancias y las penalidades correspondientes

Así mismo los usuarios según normas aprobadas por Osinergmin, es responsable directo ante el distribuidor, por aquellas perturbaciones que introduzca directa o indirectamente al sistema eléctrico que estén por encima de los aspectos normados para estos casos.

Las penalidades según la normativa vigente, guardan relación directa potencia contratada o energía que se suministra al cliente, así como, por el distribuidor en escenarios de mala calidad.

La NTCSE ha pasado por cambios mediante normas como los D.S. 099-99-EM del 10 de abril de 1999, 013-2000-EM del 27 de julio del 2000 y 017-2000-EM del 18 de septiembre del 2000 y 040-2001-EM.

Es importante señalar que otro instrumento de orden normativo vigente en el Perú es la Norma internacional IEEE-519- 2014, de gran influencia en nuestro mercado nacional, la cual es tomada en cuenta para establecer los

porcentajes máximos de distorsión, así como la fijación del punto de común de acoplamiento de prueba PCC

Por otro lado es preciso señalar que la norma IEEE 519-2014 sirve como guía tanto a consumidores como a distribuidores de energía eléctrica.

Donde existan problemas, a causa de la inyección excesiva de corriente armónica o distorsión del voltaje, es obligatorio para el distribuidor y el consumidor, resolver estos problemas.

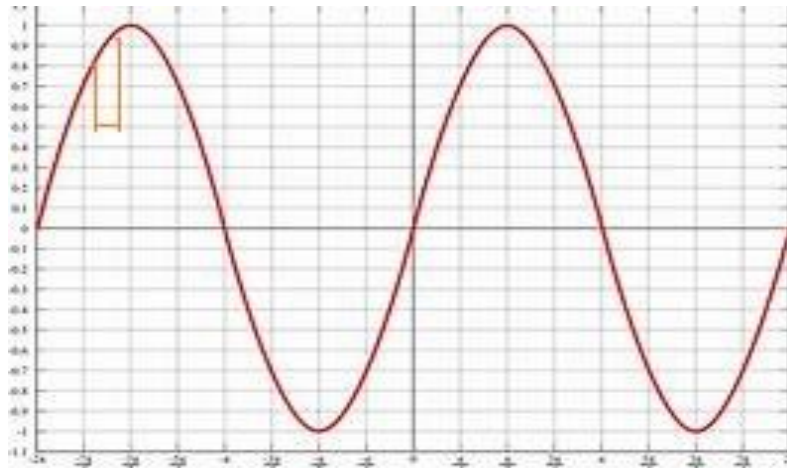
La finalidad de la norma IEEE 519-2014, es la de establecer límites en la distorsión armónica, según los criterios a continuación:

1. En la normativa, tenemos una limitación tolerable, sobre la magnitud de corriente armónica que un consumidor introduce en la red de distribución eléctrica. (Tabla 3.1).
2. Se fija el nivel de voltaje armónico que una empresa de Distribución eléctrica puede suministrar al usuario.

Límites de Distorsión de la Corriente

Límites de Corriente Armónica para Carga no lineal en el Punto Común de acoplamiento con Otras Cargas, para voltajes entre 120 - 69,000 volts.						
Máxima Distorsión Armónica Impar de la Corriente, en % del Armónico fundamental						
ISC/IL	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
<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
Donde ISC = corriente Máxima de cortocircuito en el punto de acoplamiento común.						
IL = Máxima demanda de la corriente de carga (a frecuencia fundamental) en el punto de acoplamiento común.						
TDD = Distorsión total de la demanda (RSS) en % de la demanda máxima.						

Tabla 3.1 de la Norma IEEE- 519 -2014



Mella

Diversos convertidores estáticos, mellan el voltaje (Figura de mella). Por esto, los lineamientos se dan en función al tipo de cliente y la profundidad de la muesca, la distorsión de la onda de voltaje y el ancho de la muesca (Tabla 3.2). Este es aplicable en el PCC para sistemas de pequeño de voltaje.

	Aplicación Especial	Sistema General	Sistema Dedicado
Profundidad de la muesca	10%	20%	50%
THD (Voltaje)	3%	5%	10%
Area de la muesca*	16,400	22,800	36,500
* en volt-microsegundos a valores de V & I			

Tabla 3.2. Sistema de bajo Voltaje y límites de Distorsión.

Otro grupo de criterios recomendados por la norma IEEE 519, están dirigidos a los términos de distorsión de la onda voltaje.

Estos factores como se puede apreciar regulan el valor de la distorsión permisible en el voltaje, que suministran las empresas de distribución, en el punto común acoplamiento de los usuarios del sistema eléctrico.

En otro aspecto debemos indicar que los límites armónicos para el voltaje se basa en niveles lo bastante pequeños como para avalar que el equipo de los clientes en las diferentes tarifas eléctricas, opere satisfactoriamente.

Voltaje de barra en el punto de acoplamiento común	Distorsión individual de Voltaje (%)	Distorsión total del voltaje THD (%)
Hasta 69 KV	3.0	5.0
De 69 KV a 137.9 KV	1.5	2.5
Nota: Los sistemas de alto voltaje pueden llegar hasta un 2.0% del THD cuando lo que causa es un alto voltaje terminal DC, el cual podría ser atenuado.		

Tabla 3.3 Limites de Distorsión de voltaje IEEE-. 519

CAPITULO IV

ANALISIS EXPERIMENTAL – MEDICIONES EFECTUADAS

4.1 GENERALIDADES

Las mediciones se han realizado en los tableros de las cargas que presentan un mayor grado de influencia en los efectos de armónicos de las Instalaciones de Eléctricas FIME; En tal sentido nos hemos remitido al Centro de Producción-FIME, donde destacan las maquinas MIG,TIG OXICORTE . cuya naturaleza perturbadora se ha de probar a través de las mediciones propias del estudio.

Otra carga estudiada es la del moderno Centro de impresiones de la Universidad situado en un área vecina cuya influencia puede tener gravitación en lo referente a armónicos

Es el proposito establecer y cuantificar los principales problemas existentes en la instalación.

4.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS INSTRUMENTOS

Debemos señalar la necesidad del uso de dos tipos de instrumentos dada la situacion en el tiempo y deterioro posterior de uno de los instrumentos

Nombre	: Power Quality Analyzer MI 2192
Categoría de Sobrevoltaje	: CAT III 600 V
Rango de Voltaje de Entrada	: 10-550 Vrms
Voltaje de Sobrecarga Permisible	: 600 V
Resolución	: 0.1 V
Precisión	: +/- 0.5 % de lectura +/- 2 Dígitos

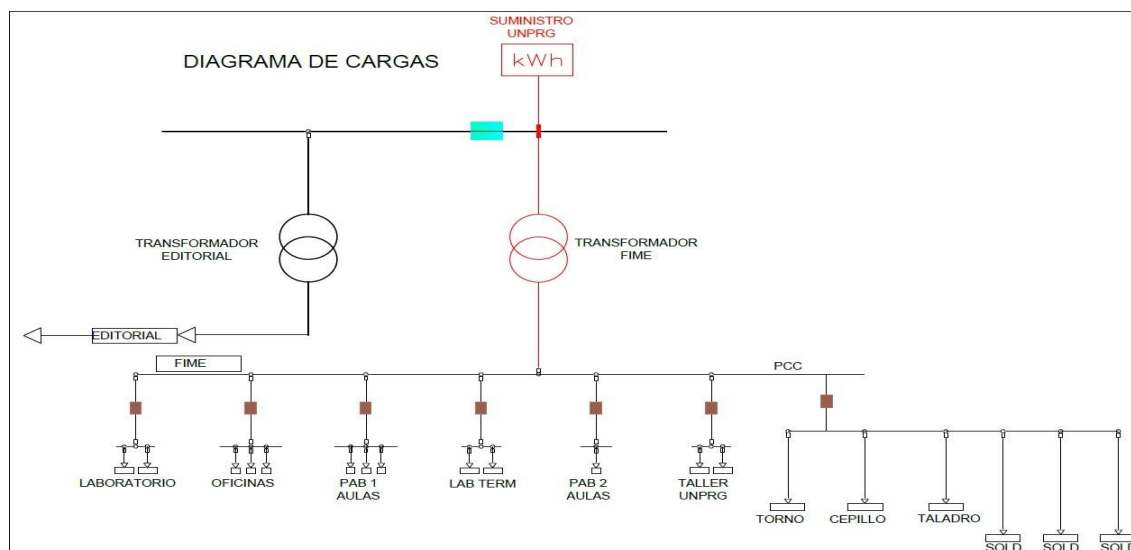
Máximo Factor de Cresta	: 1.4
Rango de frecuencia	: 43-68 Hz (Fundamental)
Periodo básico de Integración r.m.s	: 10 ms (1/2 ciclo de señal)
Temperatura de Trabajo	: -10°C.... +45°C

Temperatura de Almacenamiento	: -20°C.... +70°C
Clasificación de Aislamiento	: doble aislamiento
Grado de Protección	: IP 64

Un segundo Instrumento es el **Power Quality Analyser Analyst 3P** de caracteristias similares al antterior.

4.3 PUNTO DE MEDICIÓN Y AMBIENTES DE TRABAJO

Diagrama de cargas de la F.I.M.E. y punto de medicion. PCC, referido al punto de conexión común considrerado en la barra de suministro de energia a la Facultad de Ingenieria Mecánica y Eléctrica – U.N.P.R.G. y de manera particular en cada tablero de las cargas importantes como el Centro de Producción, Laboratorio de Electricidad y Máquinas Eléctricas y las instalaciones del nuevo Edificio de la Editorial UNPRG como una carga cuyos efectos colaterales se debe establecer.



Grafica 4.1 Diagrama de cargas FIME– U.N.P.R.G.

4.4 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS DEL CENTRO DE PRODUCCION

Las maquinas de soldar presentes en el centro de producción son:

- **MAQUINA DE SOLDAR WELD ARC , 200-PRO (x2)**

Voltaje de Entrada: 220 V ,50/60Hz

Potencia : 7KVA

Corriente Maxima : 155A

Voltaje de Salida: 26.2 V

Régimen de Trabajo: 60%

Eficiencia: 85%

Factor de Potencia: 0.93

- **MAQUINA DE SOLDAR IDEALARC , SP 250**

Voltaje de Entrada: 220/230 V, 230/460/575 V, 60 Hz

Corriente de Entrada: 53/49 A, 50/25/20 A

Régimen de Trabajo: 100 %, 145 A , 26 V

60 %, 200 A , 28 V

35 %, 250 A , 26 V

Corriente Maxima 250 A

- **MAQUINA DE SOLDAR WELD DALF , POWERMIG 250P**

Voltaje de Entrada: 220/240 V, 60 Hz

Régimen de Trabajo: 60 %, 200 A, 24 V

100 %, 160 A, 22 V

Corriente Maxima : 250 A

- **MAQUINA DE SOLDAR DC TIG 200 HF**

Voltaje de entrada: 220 V

Régimen de Trabajo: 60 %

Corriente Maxima 200 A

4.5 MEDICIONES EFECTUADAS EN EL CENTRO DE PRODUCCION

4.5.1 Punto de medición (Tablero General Ceprose)



FIG 4.1 Punto de Medición CEPROSE



Figura 4.2 – Ambiente de Trabajo- Centro de Producción

4.5.2 Mediciones efectuadas

	Potencia Activa (kW)	Potencia Reactiva (kVAr)	Potencia Aparen (kVA)
Mínima	0	0	0
Promedio	3.67	0.82	2,830
Máxima	10.94	12.60	15.5

Tabla 4.1 POTENCIA ACTIVA, REACTIVA Y APARENTE

	Vrms (V)	Irms (A)
Fase 1	216.90	33.85
Fase 2	219.80	54.27
Fase 3	224.70	23.18

TABLA 4.2- VALORES DE TENSION Y CORRIENTE

	V h3 (%)	V h5 (%)	V h7 (%)	V h9 (%)	THDV (%)
Fase 1	5.7	5.6	2.1	1.1	8.33
Fase 2	4.9	4.2	2.2	1.3	6.94
Fase3	4.9	4.7	1.2	0.8	6.94

TABLA 4.3 – PORCENTAJE DE VOLTAJES POR ARMÓNICO

	I h3 (A)	I h5 (A)	I h7 (A)	I h9 (A)	THDI (%)
Fase 1	78.4	48.1	17.4	6.5	241.5
Fase 2	72.3	45.9	37.7	22.0	177.11
Fase 3	85.5	56.5	23.7	6.5	454.6

TABLA 4.4 – VALORES DE CORRIENTE POR ARMÓNICO

4.6 MEDICIONES EFECTUADAS EN EL LABORATORIO ELECTRICIDAD Y MAQUINAS ELECTRICAS-FIME

4.6.1 Punto de medicion (Tablero General del Laboratorio de Electricidad)

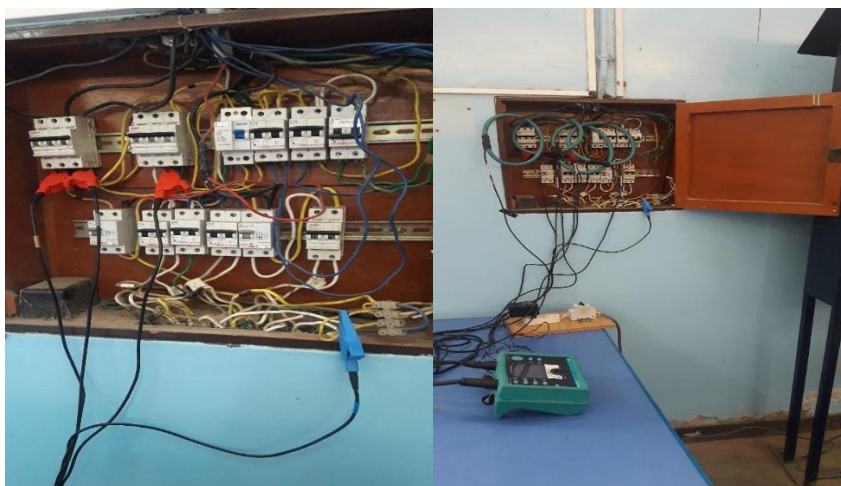


Figura 4.3 Punto de medicion en Laboratorio de Electricidad

4.6.2 Mediciones efectuadas

	Vrms (V)	Irms (A)	P (KW)	S (KVA)	PF
Fase 1	225.8	0.0	0.0	0.01	0.9
Fase 2	226.5	0.0	0.0	0.01	0.0
Fase 3	224.0	2.8	0.63	1.2	0.53

TABLA 4.5 VALORES DE TENSION, CORRIENTE Y POTENCIA

	VRMS (V)	THDV (%)	IRMS (A)	THDI (%)
FASE 1	226.5	1.8	0.0	0.0
FASE 2	227.1	1.8	0.0	0.0
FASE 3	224.2	2.1	5.3	14.8
NEUTRO			5.6	14.3

TABLA 4.6 VALORES DE TENSION, CORRIENTE Y DISTORSION

4.7 MEDICIONES EFECTUADAS EN LA EDITORIAL UNPRG

4.7.1 Punto de medición (Tablero general de editorial)

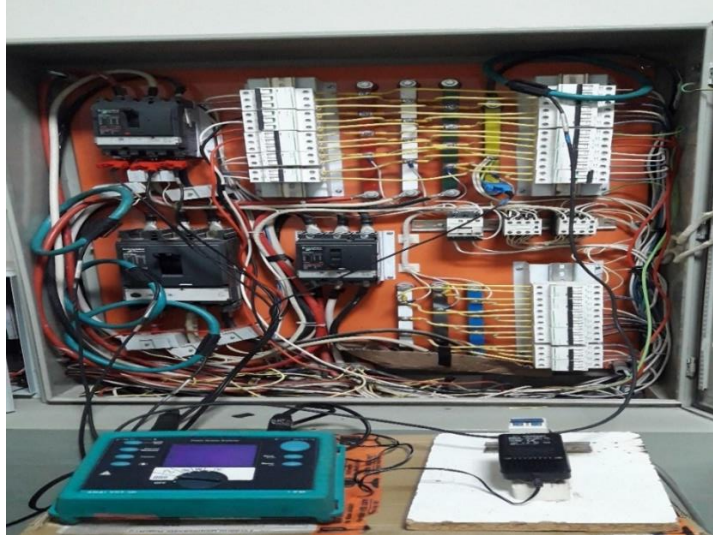


FIGURA 4.4 PUNTO DE MEDICION EN EDITORIAL UNPRG

4.7.2 Equipos de para impresiones en Editorial UNPRG:

- **Impresora Offset SX 74-4 Edition**
Con lavadores automaticos
04 Colores
30 kW
Germany
- **Procesadora de Planchas Offset Suprasetter A 75**

Maquina CtP
Con servidor UPS
10 kW
Germany
- **Encuadernadora Horizon VAC 1000**

10 kW , Japan
- **Compaginadora Horizon VAC 1000**

6 kW , Japan
- **Guillotina Hidraulica-Electrica Baumann**

13 kW, Germany

- **Plastificadora Industrial Automatica**

Uso Industrial
10 kW ,

Germany

4.7.3 MEDICIONES EFECTUADAS

CIRCUITO I

	Vrms (V)	Irms (A)	P (KW)	S (KVA)	PF
Fase 1	226.1	11.4	2.53	2.57	0.985
Fase 2	227.6	0.2	0.0	0.04	0.285
Fase 3	228.1	3.9	0.64	0.87	0.737

TABLA 4.7 VALORES DE TENSION, CORRIENTE Y POTENCIA

	VRMS (V)	THDV (%)	IRMS (A)	THDI (%)
FASE 1	220.3	1.9	1.73	13.8
FASE 2	220.1	2.0	8.0	41.19
FASE 3	220.4	1.7	6.8	37.7

TABLA 4.8 VALORES DE TENSION, CORRIENTE Y DISTORSION

CIRCUITO II

	Vrms (V)	Irms (A)	P (KW)	S (KVA)	PF
Fase 1	220.7	1.6	0.34	0	
Fase 2	221.5	1.8	0.0	0	
Fase 3	221.0	0.2	0.02	0.	

TABLA 4.9 VALORES DE TENSION, CORRIENTE Y POTENCIA

	V_{RMS} (V)	THDV (%)	I_{RMS} (A)	THDI (%)
FASE 1	225.0	2.1	11.4	13.8
FASE 2	227.8	2.0	0.2	41.19
FASE 3	228.8	2.1	5.0	37.7
NEUTRO			11.4	18.8

TABLA 4.10 VALORES DE TENSION, CORRIENTE Y DISTORSION

CAPITULO V

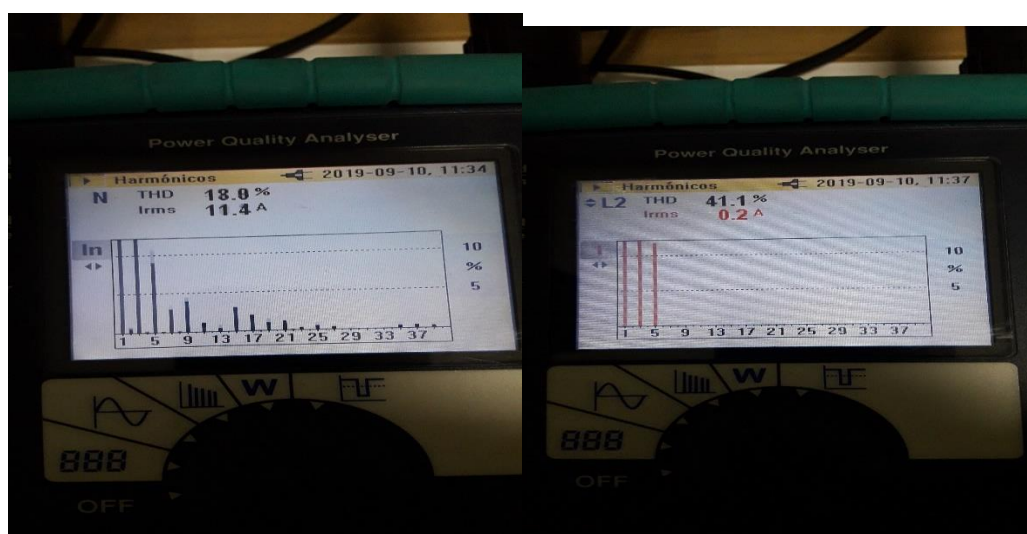
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS-PROPUESTA TEÓRICA

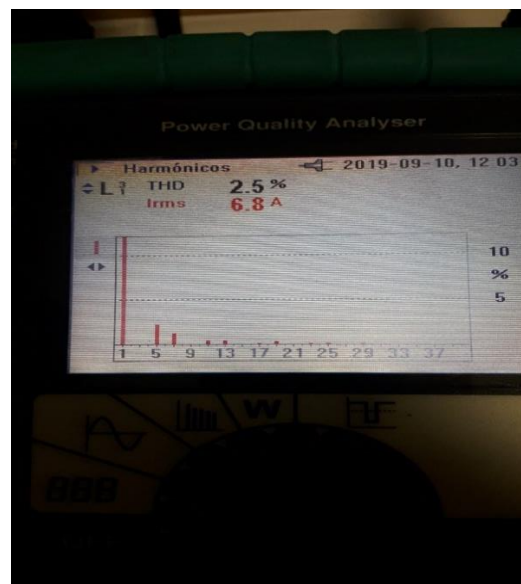
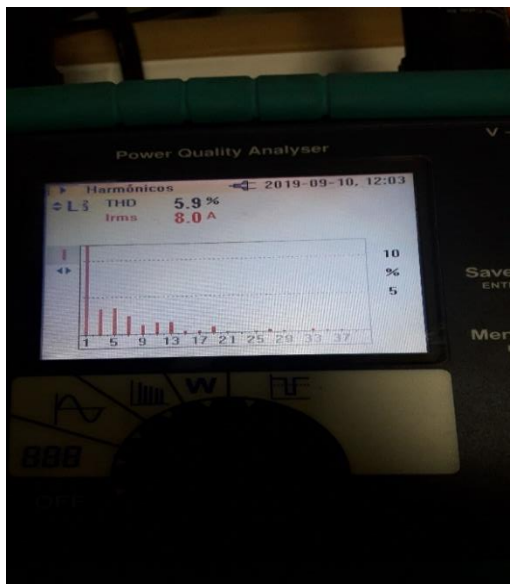
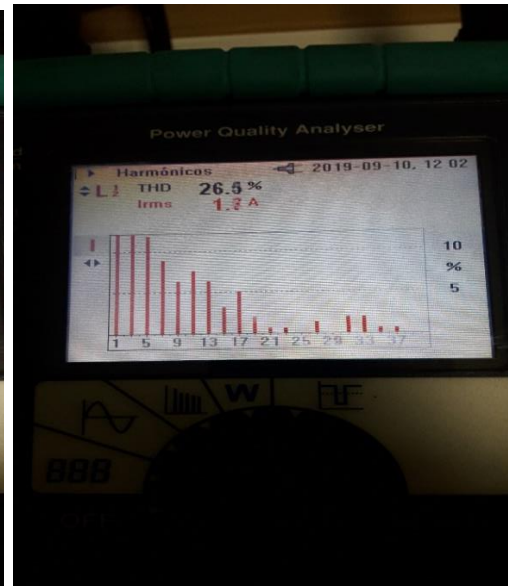
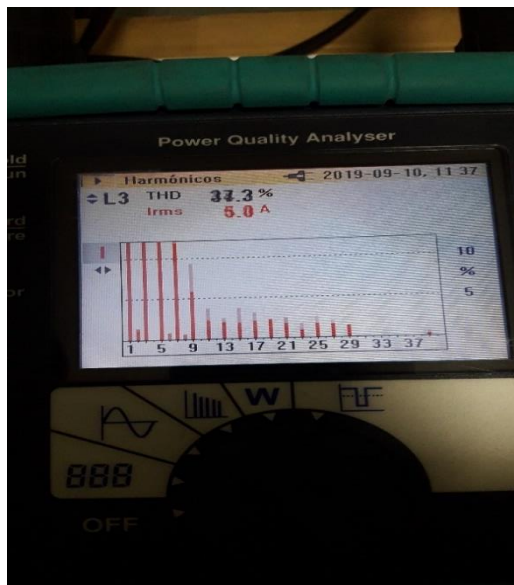
5.1 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS.

Un análisis serio de los resultados pasa por que la información sea fidedigna y consecuente; Consecuente con la situación por la que ha pasado nuestra facultad que es el objeto principal de nuestro estudio. Hemos venido pasando por un proceso de retracción de nuestras actividades productivas y es por eso que el presente trabajo también constituye un llamado para retomar con énfasis nuestro trabajo en las actividades que le permitan a nuestra facultad captar recursos generados con trabajo al interno y proyectarnos efectivamente a la colectividad universitaria y regional; Muchas de las obras de metal mecánica para la UNPRG han salido de nuestra Facultad.

Una mirada a los diferentes espectros armónicos que hemos registrado nos permite observar algo que estadísticamente es una correcta afirmación; en instalaciones como las que tenemos en la FIME – UNPRG, y anexando las instalaciones de la Editorial es que los armónicos de corriente que tienen mayor incidencia son la tercera, la quinta y séptima

ESPECTROS ARMÓNICOS





CUADRO RESUMEN POR TABLERO DE LOS CIRCUITOS MÁS IMPORTANTES DEL ESTUDIO

FASE	THDV (%)				THDI (%)			
FASE1	8.33	1.8	2.1	1.9	93.83	13.8	0.0	26.5
FASE2	6.94	1.8	2.0	2.0	96.12	41.19	0.0	6.0
FASE3	6.94	2.1	2.1	1.7	105.38	37.7	14.8	2.5

Es evidente la distorsión de las tensiones en valores relativamente bajos encuadradas dentro de los valores establecidos por las normas; no así para la distorsión de corrientes que en el caso del Centro de Producción FIME superan ampliamente valores normalizados como se ve en el cuadro que se resalta y que

son explicables por la característica de los equipos como soldadoras altamente distorsionantes y de alguna manera por la precariedad de las instalaciones. Es un hecho que nuestra atención será centrada en estas instalaciones.

Cabe destacar la poca influencia distorsionadora en corrientes del laboratorio de electricidad con valores de 14.8 % debido a la naturaleza de los equipos donde mayormente son lámparas fluorescentes y equipos portátiles para mediciones en el laboratorio de electricidad.

Con respecto a la distorsión manifiesta en la Editorial UNPRG se observa valores de THDI en el orden de 41.19 % y 37.7% pero que por pertenecer a un circuito independiente del transformador alimentador de la FIME-UNPRG producen poca o ninguna incidencia. Los desbalances en los niveles de tensión observados en las diferentes tablas son propios de las instalaciones motivo del estudio que no introducen efectos distorsionantes ni problemas de operación de los equipos, más aún cuando el orden de la magnitud de corrientes es relativamente bajo como se muestra.

La Editorial como una Unidad de prestación de un servicio importante para la Universidad debe ser tratada en forma particular para que los efectos distorsionantes de instalaciones vecinas no afecten el normal funcionamiento de sus equipos que por lo que se observa y en las actuales circunstancias no se ven muy afectados.

5.2 PROPUESTA TEÓRICA

A través de la presente tesis se va a establecer una propuesta que mitigue el efecto de los armónicos para de esa manera encuadrar las instalaciones eléctricas, en particular de nuestro Centro de Producción, dentro de los valores establecidos por las normas. Ya se ha visto la alta distorsión de corrientes con THDI del orden del 96.12 y 105.38 % que resultan elevados; ante la intención de reactivar el Centro y constituirlo en lo que otrora fue fuente de servicio y gran aporte de la infraestructura universitaria.

De lo expuesto en el análisis teórico se tienen diferentes opciones:

Limitar, en lo posible la potencia de las fuentes generadoras de armónicas; en este caso optimizar el uso de las maquinas soldadoras del Centro de Producción. Esto pasa por un trabajo programado de los equipos que operan simultáneamente. Conectar las cargas monofásicas en sistemas trifásicos en forma balanceada. Agregar en forma conveniente y racional neutros adicionales. Considerar Puestas a tierra separadas de la PAT principal y separar convenientemente las cargas contaminantes en circuitos aguas arriba de la instalación.

Estas medidas son viables y no requieren de mayor inversión en términos económicos; Otra medida es realizar conexiones de los transformadores en la Sub Estación con carácter de mitigación como es el caso de una conexión Dy perfectamente posible y que mitiga el tercer armónico. Una solución que es la que impulsamos en la presente tesis es la de considerar la Instalación de Filtros supresores o eliminadores de armónicos. En Tal sentido existen los Filtros Activos de Armónicos descritos con amplitud en el Capítulo II, Marco Teórico de la presente Tesis.

Los filtros activos resultan ser una solución confiable y necesaria existiendo en el ámbito comercial diferentes marcas y características de uso. Por ser un trabajo de investigación podemos abstraernos de las diferentes marcas, pero sí vamos a establecer en función de su actuación la mejor alternativa.

Lo que se debe tener presente es que el contenido de armónicos en corriente va a generar una sobrecarga y que la medida de la corriente eficaz (I_{rms}) se incrementa como se prevé en la expresión:

$$I_{rms} = I_1 \sqrt{1 + THDI^2}$$

El filtro activo reduce esta corriente adicional bajando las pérdidas en transformadores y conductores con el consecuente ahorro de energía en la instalación.

El campo de aplicación de los Filtros Activos es bastante amplio dentro de los cuales podemos citar:

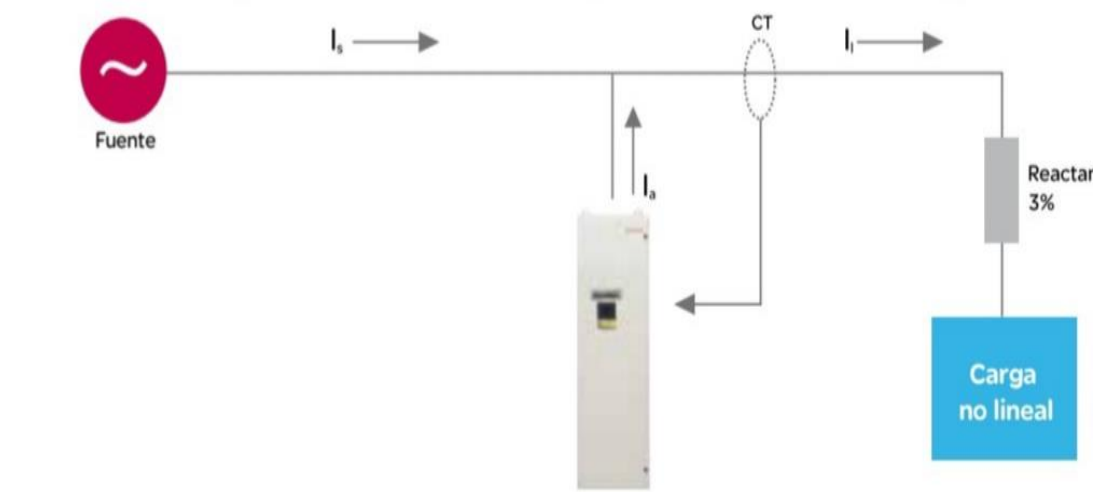
Productos farmacéuticos, plantas de tratamiento de aguas residuales, plantas textiles, fábricas de papel, industrias metal mecánica, industrias de artes gráficas, industrias de plásticos, centros de datos, soldadoras, motores de inducción, fundiciones y otros. Existe si algunos requerimientos para su uso siendo el más relevante el que el THDV no sea mayor del 5 % para garantizar su correcta operación y sin interferencias.

Por otro lado, ofrece una rápida compensación de la potencia reactiva en un entorno abundante de armónicos. Cuando la distorsión del voltaje de alimentación es del orden del 10% la vida útil de los equipos disminuye de manera significativa dependiendo del aparato eléctrico la reducción en esta vida útil; En términos porcentuales hablamos de 32.5% para las máquinas 1Ø, un 18% máquinas 3 Ø, un 5% para transformadores. Una correcta selección e instalación posibilita el establecimiento de mejores condiciones de operación de equipos vía la atenuación y/o supresión de las armónicas de corriente y, desde luego enmarcar los TDH en valores establecidos por las normas.

El principio de operación de los filtros activos está basado en la inyección, por parte del filtro(s) de una corriente armónica y reactiva para limitar la distorsión y mejorar el factor de potencia de la fuente suministradora de energía.

El filtro censa la corriente de carga del sistema, identifica la componente fundamental e inyecta a la red eléctrica una corriente armónica de fase contraria eliminando así los armónicos. Los transformadores de corriente conectados facilitan la inyección.

La figura se muestra la correcta instalación de un Filtro Activo en la que se observa el flujo de corrientes y las formas de onda de las mismas a efectos de la corrección requerida.



Instalación de Filtro Activo

I_s : Corriente de la fuente de alimentación sin armónicos

I_a : Corriente suministrada por el filtro

I_L : Corriente de carga

Se pueden instalar varias unidades en paralelo de tal manera que faciliten una mejor compensación de corriente y enmarcar el TDDI en el estándar IEEE519-2014, o según los requerimientos de funcionamiento de la planta en caso sea necesario.

5.3 DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DEL FILTRO

Nuestra propuesta establece la necesidad de instalar filtros de compensación de armónicos en lo que consideramos la parte crítica de la instalación que resulta ser evidentemente el Centro de Producción FIME.

Existen programas que pueden dar alternativas de solución como NEPLAN o ETAP en el caso de una simulación; Sin embargo nuestra propuesta contempla una solución basada en las mediciones y propuesta directa de los fabricantes como ya se sostuvo.

Partiendo de la información acopiada y a partir de los datos tomados en las pruebas y llegar a una respuesta viable de gran efectividad en nuestro propósito de resolver el problema de armónicos en el área en discusión.

TENSION DEL SISTEMA	220 , 3Φ
CORRIENTE PROMEDIO	54.27 AMPERIOS
THDI	96.12 %
ENERGIA REACTIVA CONSUMIDA	12.6 kVAR

CÁLCULO DE LA CORRIENTE rms ARMONICA: I_H

Usamos

$$I_H = I_{rms} / \left(\frac{1}{THDI^2} + 1 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Donde: $I_{rms} = 54.27$ Amperios

$$THDI = 96.12 \%$$

Luego $I_H = 37.6$ Amperios.

Por otro lado para el cálculo de la corriente del filtro I_{FILTRO} usaremos:

$$I_{FILTRO} = \sqrt{(I_H^2 + I_R^2)}$$

Donde: I_R = Corriente reactiva requerida, y para $Q = 12.6$ kVAR, $V = 219.8$ V

$$\text{En: } I_R = Q / \sqrt{3} \times V_L$$

$$I_R = 33.10 \text{ Amperios y por lo tanto}$$

Finalmente, $I_{FILTRO} = 50$ Amperios

La solución técnica y encuadrada en el aspecto comercial nos permite seleccionar:

- Compensador de armónicos activo adecuado para las tensiones 3 Ø, de 400/380/220 V.
- Se puede compensar entre 20 y 120 A por cada fase.
- Respecto a la atenuación: Carga THDi aguas arriba superior a 10 veces la capacidad nominal.

- Compensa todos los rangos armónicos del 2 al 25 de manera o selectiva.
- Estos Filtros activos pueden filtrar entre 50 y 300 Amperios por cada fase con opción a filtrar todos los rangos de armónicos hasta 50.
- Las funciones posibilitan una corrección del factor de potencia de manera automática de acuerdo a las fluctuaciones de carga.

Ha quedado resuelto el problema fundamental en la parte más crítica de la Facultad como lo es el Centro de Producción y puesto que las otras áreas no tienen gran incidencia de armónicos según los cuadros mostrados.

CONCLUSIONES

- Se ha seleccionado un filtro activo cuya versatilidad nos va a permitir realizar una reducción sustancial del THDI generado en el Centro de Producción FIME donde, por la característica de los equipos de soldar, se nota con mayor incidencia este efecto pasando de un THDI de 96.12 % a un valor dentro de la norma, es decir por debajo del 5 %, inyectando una corriente de 50 Amperios propio del estándar de fabricación del equipo aun cuando nuestros cálculos establecen una corriente del filtro de 33.10 A.
- Hemos realizado el Análisis de los niveles de contaminación armónica en las instalaciones la facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica haciendo las mediciones con el Analizador de Redes en los tableros del Centro de producción, el laboratorio de electricidad y Maquinas Eléctricas y para precisar el nivel de influencia también se ha hecho lo propio con las instalaciones de la Editorial de la Universidad. Se ha constatado que existe una distorsión del orden de 41.19 % como el valor más alto subsanable con la metodología empleada para el Centro de Producción.
- Los valores de corriente Irms nos permiten llegar a la conclusión que existe un fácil manejo de las distorsiones dadas en los diferentes ámbitos sujetos a estudio toda vez que estos valores de corriente son relativamente bajos comparados con los que se pueden tener en una gran industria o en un sistema de potencia.
- El factor de potencia o $\cos\phi$ del Centro de Producción cuyo valor promedio es de 0.70 pasa a un valor superior incluso a 0.95 toda vez que el filtro seleccionado inyecta una corriente suficiente para compensar toda la potencia reactiva presente.
- Respecto a la distorsión de voltaje y los valores de THDV los encontramos encuadrados dentro de la norma siendo el valor más alto de 8.33 % fácilmente manejable aun cuando esto depende de la concesionaria.

RECOMENDACIONES

- Reconectar las cargas que originan las distorsiones aguas arriba de la instalación agrupadas y separadas de las otras cargas.
- Revisar las conexiones de los transformadores de la SE y confirmar una conexión Dy5 en el mejor de los casos, esto suprime en gran medida los 3 y 5tos armónicos que según se verifica muestra valores en el orden de 78.4, 72.3 y 85.5 %
- La compensación permite el filtrado de armónicos en un amplio rango de frecuencias; Adaptable a cualquier carga pero es recomendable su uso para una limitada potencia armónica. Una excelente opción para casos más críticos pueden ser los filtros híbridos
- Siendo la facultad fundamento y fuente de desarrollo tecnológico se debe involucrar a los estudiante en el monitoreo y supervisión de las instalaciones como y obviamente ser promotores del cumplimiento de las normas de calidad y normatividad eléctricas en general
- La Editorial UNPRG merece un trato especial por ser una instalación nueva, moderna y estratégica en el ámbito de la universidad que debe tener un plan de mantenimiento de equipos e instalaciones dado que con el uso y el tiempo se deterioran.
- Se debe realizar una remodelación de las instalaciones eléctricas del Centro de Producción FIME a efectos de impulsar los trabajos que contribuyeron en buena forma con el equipamiento de aulas y otras instalaciones de la UNPRG.
- También debemos tener en cuenta que los componentes armónicos se precisan según la IEC 60050; como un componente de orden por encima a 1 de la serie matemática de Fourier, de una cuantía periódica [IEV 161-02-18].

BIBLIOGRAFIA

- E. Acha, M. Madrigal. Power Systems Harmonics: Computer Modelling and Analysis, John Wiley & Sons, 2001.
- R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, and H. W. Beaty. Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill, New York, 1996.
- G. T. Heydt, Electric Power Quality, Stars in Circle Publications, West Lafayette, IN, 1991.
- IEEE Standard 519-1992, Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1993.
- T. H. Ortmeier, "Harmonic Analysis Methodology," IEEE PES Tutorial Course, Course Text 84 EH0221-2-PWR, February 1984, pp. 74-84.
- Gary W. Chang Paulo F. Ribeiro, Harmonics Theory, Modelling and Simulation of Power System Harmonics, Transmission & Distribution Committee, IEEE Power Engineering Society, 1999.
- Thomas H. Ortmeier, M. Fayyaz Akram, Takashi Hiyama, Harmonic Modelling of Networks, Modelling and Simulation of Power System Harmonics, Transmission & Distribution Committee, IEEE Power Engineering Society, 1999.
- T. Hiyama, M. S. A. A. Hamman and T. H. Ortmeier. "Distribution System Modelling with Distributed Harmonic Sources. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2 , April 1989, pp. 1297-1304.
- Task force on Harmonics Modelling and Simulation. The modelling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks Part I: Concepts, models and simulation techniques", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, Jan. 1996, pp. 452-465.

LINKOGRAFIA

- <http://www.leonardo-energy.org/espanol/?p=221>