



**BUAP**

**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

**ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA EN EL SECTOR INDUSTRIAL**

**TESIS**

Que para obtener el grado de

**MAESTRO EN INGENIERÍA  
CON OPCIÓN TERMINAL EN  
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Presenta:

**Ing. Luis Fernando Salazar Hernández**

Asesor de tesis:

**Dr. Erasmo Saloma Ruíz**

Co-Asesor de tesis:

**MC. Víctor Galindo López**

## Resumen

La evolución de la ingeniería eléctrica ha traído muchos beneficios a usuarios finales como la invención de nuevas alternativas para eficientar el consumo eléctrico, sin embargo, estas nuevas tecnologías traen como consecuencia una afectación a la calidad de la energía en el sistema de potencia eléctrico con los fenómenos conocidos o incluso nuevos.

Este trabajo de investigación se abordará un caso práctico de una empresa líder en el ramo industrial en el estado de Puebla, el cual constará en el estudio de armónicos eléctricos, así como la interpretación de mediciones y posibles soluciones con filtros pasivos al problema que el fenómeno puede provocar al sistema eléctrico.

Las soluciones presentadas se desarrollarán en los softwares de Matlab (Simulink) y ETAP.

Posteriormente se observará el cambio sin los filtros y con ellos, para comprobar el aumento en la calidad de la energía.

## Abstract

The evolution of electrical engineering has brought many benefits to end users such as the invention of new alternatives to make electrical consumption more efficient, however, these new technologies result in an impact on the quality of energy in the electrical power system with known or even new phenomena.

This research work will address a practical case of a leading company in the industrial sector in the state of Puebla, which will consist of the study of electrical harmonics, as well as the interpretation of measurements and possible solutions with passive filters to the problem that the phenomenon can cause in the electrical system.

The solutions presented will be developed in Matlab (Simulink) and ETAP software.

Later, the change will be observed without the filters and with them, to verify the increase in the quality of the energy.

## Agradecimientos

Con esta tesis se termina una etapa de crecimiento académico importante y dos años y medio de esfuerzo que sin duda ha valido mucho la pena, pero este trabajo no pudo llevarse a cabo sin la participación de algunas personas.

En primer lugar, a mis padres, Abel y Ariadna, que sin su apoyo desde que les comunique mis intenciones de regresar a estudiar y esos ánimos que siempre existieron no hubiera sido posible todo esto.

A mis hermanos, Andrea y Miguel, muchas gracias por el simple hecho de estar presentes para cuando fuera necesario, por todas las bromas y risas.

A ti Lupita, que, aunque ya no estes conmigo, sé que me estas guiando desde allá arriba y también que estarías muy feliz y orgullosa de este camino.

Al Ing. Ger Ramírez, Ing. Eduardo Grados y a todos mis compañeros de UTC, que sin su ayuda, apoyo y paciencia nada de esto sería posible después de 2 años y medio.

A mi asesor de tesis, Dr. Erasmo Saloma Ruíz, gracias por acompañarme en este camino y por todos los grandes consejos que me ha dado hasta el momento.

A mis compañeros de generación, Sergio, José, Kim, César y René, fue una experiencia inolvidable con ustedes, me llevó de ustedes una gran amistad.

A mis mejores amigas, Aranzasú y Pamela, gracias por las palabras y apoyo cuando parecía que iba a ser imposible, esas platicas interminables con ustedes hicieron posible también este resultado.

Y por último al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico brindado durante la estancia en la maestría.

Hay muchas más personas que están involucradas, pero a cada una de ellas este trabajo y esfuerzo también va con dedicatoria.

¡MUCHAS GRACIAS!

## Índice

Resumen .....	i
Abstract .....	ii
Agradecimientos .....	iii
Índice .....	iv
Índice de figuras .....	vii
Índice de tablas.....	ix
Lista de acrónimos.....	x
Capítulo 1.- Protocolo de investigación .....	1
1.1.- Introducción.....	1
1.2.- Planteamiento del problema.....	2
1.3.- Justificación.....	3
1.4.- Objetivos: .....	4
1.5.- Alcances y metas .....	4
Capítulo 2.- Marco teórico.....	5
2.1.- Calidad de energía .....	5
2.1.1.- ¿Qué es la calidad de la energía? .....	5
2.1.2.- Fuentes de disturbios en sistemas eléctricos de distribución .....	5
2.1.3.- Otros aspectos relacionados con la calidad del servicio .....	10
2.2.- Armónicos y sus efectos.....	11
2.2.1.- Fuentes de armónicos [11].....	11
2.2.2.- Normatividad sobre el problema de armónicos [12] .....	16
2.2.3.- Generación y efectos de la distorsión armónica en el voltaje y la corriente [13] .....	17
2.2.4.- Clasificación de los armónicos.....	18
2.2.5.- Circuitos resonantes [6] .....	19

2.3.- Filtros .....	25
2.3.1.- Introducción a filtros [15].....	25
2.3.2.- Filtros pasivos [15].....	26
2.3.2.1.- Filtros pasivos de derivación [15] .....	27
2.3.2.2.- Filtros pasivos en serie [15].....	27
2.3.2.3.- Filtro pasivo paralelo sintonizado (FPPS) [16] .....	28
2.3.3.- Filtros activos.....	30
2.4.- Equipo para medición de calidad de energía [18] .....	36
Capítulo 3.- Desarrollo de investigación .....	38
3.1.- Ingeniería en Plástico de Puebla (IPP) [19].....	38
3.1.1.- Antecedentes acerca de IPP.....	38
3.1.2.- Capacidad instalada .....	38
3.1.3.- Laboratorio de metrología .....	38
3.1.4.- Certificaciones .....	39
3.1.5.- Clientes.....	39
3.2.- Consumo eléctrico histórico de Ingeniería en Plástico de Puebla (IPP).....	40
3.3.- Conexión, configuración e instalación de analizador de redes. [20].....	42
3.3.1.- Conexiones de entrada.....	42
3.3.2.- Configuración del analizador.....	44
3.4.- Calibración de analizador de redes. ....	47
3.5.- Instalación de analizador de redes. ....	48
3.6.- Diagrama unifilar de Ingeniería en Plástico de Puebla (IPP) .....	50
Capítulo 4.- Resultados .....	52
4.1.- Valores obtenidos de acuerdo con medición de analizador de redes en Ingeniería en Plástico de Puebla (IPP).....	52
4.1.1.- Tiempo a instalar el analizador de redes.....	52
4.1.2.- Histograma de armónicos .....	52

4.1.3.- Evolución temporal de armónicos .....	53
4.1.4.- Forma de onda con armónicos de acuerdo con evolución temporal.....	54
4.1.5.- Datos obtenidos (corriente, voltaje, frecuencia, THD en voltaje y corriente, factor de potencia) .....	55
4.2.- Primera solución (Matlab y Simulink).....	56
4.2.1.- Código de programación en Matlab para la onda seleccionada .....	56
4.2.2.- Selección de bloques de programación en Simulink .....	56
4.2.3.- Descripción de bloques de programación en Simulink.....	57
4.2.4.- Resultados obtenidos en Simulink .....	59
4.3.- Segunda solución (ETAP) .....	60
4.3.1.- Diagrama unifilar y simulación en ETAP .....	60
4.3.2.- Forma de onda y armónicos resultantes en ETAP .....	61
4.3.3.- Selección y cálculo del filtro que reducirá los armónicos eléctricos.....	63
4.3.4.- Forma de onda corregida y armónicos existentes después de simulación .....	65
4.4.- Cálculos de resonancia y simulaciones adicionales .....	68
4.4.1.- Circuito resonante en banco de capacitores de 350 kVAR .....	68
4.4.2.- Resonancia en filtros calculados.....	68
4.4.3.- Simulaciones adicionales.....	69
4.5.- Conclusiones.....	71
4.6.- Recomendaciones para futuros trabajos .....	72
Bibliografía.....	73

## Índice de figuras

Fig 1 (a) y Fig 1 (b) Fluctuaciones de voltaje causadas por condiciones de fallas remotas y conexión o desconexión de grandes cargas. ....	6
Fig 2 Sobretensiones transitorias.....	7
Fig 3 Interrupciones temporales.....	8
Fig 4 Ruido eléctrico .....	9
Fig 5 a) y Fig 5 b) Distorsión armónica.....	10
Fig 6 Resonancia en paralelo .....	20
Fig 7 Circuito industrial .....	21
Fig 8 Diagrama equivalente referido a baja tensión .....	23
Fig 9 Circuito equivalente.....	24
Fig 10 Configuraciones comunes de filtros pasivos.....	26
Fig 11 Filtro de muesca para una 5ª armónica y su efecto en el sistema. ....	27
Fig 12 Filtro pasivo en serie .....	28
Fig 13 Diagrama de conexión de los FPPS.....	29
Fig 14 Aplicación de un filtro activo en la carga .....	31
Fig 15 Diagrama general de un filtro activo en paralelo .....	31
Fig 16 a), Fig 16 b), Fig 16 c), Fig 16 d) Operación del filtro activo en paralelo .....	32
Fig 17 Diagrama general de un filtro activo en serie .....	33
Fig 18 a), Fig 18 b), Fig 18 c) Operación del filtro en serie .....	33
Fig 19 Filtro activo híbrido con un filtro activo en paralelo y un filtro pasivo en paralelo ...	34
Fig 20 Filtro activo híbrido con un filtro activo en serie y un filtro pasivo en paralelo .....	34
Fig 21 Filtro activo híbrido con un filtro pasivo en paralelo, que a su vez tiene un filtro activo en serie.....	35
Fig 22 Costo de la energía eléctrica en IPP .....	40
Fig 23 Consumo eléctrico histórico de IPP .....	41
Fig 24 Montaje de etiquetas para entradas de tensión y corriente .....	42
Fig 25 Conexión del analizador a un sistema de distribución trifásico .....	43
Fig 26 Diagrama de vectores correspondiente al analizador correctamente conectado ...	44
Fig 27 Pantalla de entrada a las configuraciones del analizador .....	45
Fig 28 Dictamen de calibración del analizador de redes compartido por la empresa UTC (United Telecommunication Center S.A de C.V) .....	48
Fig 29 Preparación de analizador de redes.....	49

Fig 30 Instalación de pinzas amperimétricas.....	49
Fig 31 Instalación completa del analizador de redes.....	50
Fig 32 Configuración final del analizador de redes.....	50
Fig 33 Diagrama unifilar de transformador de 1000 KVA de Ingeniería en Plástico.....	51
Fig 34 Histograma de armónicos (de izquierda a derecha, general, 3er armónico, 5to armónico, 7mo armónico, 9 armónico, 11vo armónico) .....	53
Fig 35 Evolución temporal en horario y armónicos seleccionados .....	54
Fig 36 Evolución de la forma de onda en corriente .....	54
Fig 37 Grafica de corriente – Eje X (tiempo) y Eje Y (Corriente) .....	56
Fig 38 Bloques seleccionados en Simulink para la simulación .....	57
Fig 39 Bloque from workspace con datos de entrada de variables de corriente y tiempo establecidos en el espacio de Matlab en código de programación .....	58
Fig 40 Lowpass filter con datos de entrada de frecuencia de armónicos seleccionados con problemas (5to armónico 300 Hz – 50vo armónico 3000 Hz) que fueron los seleccionados en analizador de redes. ....	59
Fig 41 Bloque de Scope.....	59
Fig 42 Gráfica correspondiente al código de programación extraído de los datos de la evolución de la forma de onda de corriente .....	60
Fig 43 Gráfica correspondiente a la corrección mediante filtro paso bajas con los parámetros correspondientes desde el 5to armónico hasta el 50vo armónico .....	60
Fig 44 Diagrama unifilar correspondiente al transformador de 1000 kVA (transformador a estudiar) modelado en ETAP .....	61
Fig 45 Forma de onda resultante debido a la carga resultante en transformador de 1000 kVA.....	62
Fig 46 Espectro resultante de armónicos que afectan al sistema de potencia.....	62
Fig 47 Calculo de filtro pasivo para 11vo armónico otorgado por ETAP .....	64
Fig 48 Calculo de filtro pasivo para 5to armónico otorgado por ETAP.....	65
Fig 49 Diagrama unifilar con datos de corrección de armónicos eléctricos en transformador de 1000 kVA .....	66
Fig 50 Forma de onda resultante corregida con carga en el transformador de 1000 kVA	67
Fig 51 Disminución del espectro de armónicos que afectan al sistema de potencia.....	67

## Índice de tablas

Tabla 1 Principales fuentes de armónicos.....	15
Tabla 2 Límite máximo de distorsión de corriente armónica en porcentaje de corriente de carga .....	16
Tabla 3 Límite de distorsión de voltaje armónico .....	17
Tabla 4 Orden de armónicos.....	19
Tabla 5 Comparación entre las distintas topologías de filtros activos híbridos .....	35
Tabla 6 Características del analizador de redes (Fluke 435-II).....	36
Tabla 7 Especificaciones de analizador de redes para armónicos. ....	37
Tabla 8 Ajustes iniciales .....	44
Tabla 9 Datos mostrados en horario de 8:29:17 am.....	55
Tabla 10 Datos mostrados en horario de 8:34:17 am.....	55
Tabla 11 Simulaciones adicionales .....	69

## Lista de acrónimos

AWG	American Wire Gauge (calibre de alambre estadounidense)
BNC	Bayonet Neill – Concelman
CA	Corriente alterna
CD	Corriente directa
EMA	Entidad Mexicana de Acreditación
FIR	Finite Impulse Response (respuesta de impulso finita)
HVDC	High Voltage Direct Current (corriente continua de alta tensión)
Hz	Hertz (unidad de medida de frecuencia)
IEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos)
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (transistor bipolar de compuerta aislada)
IIR	Infinite Impulse Response (respuesta de impulso infinita)
IPP	Ingeniería de Plástico de Puebla
ms	Milisegundos
PCC	Point of Common Coupling (punto de acoplamiento común)
PLC	Programmable Logic Controller (controlador lógico programable)
PWM	Pulse Width Modulation (modulación por ancho de pulso)
RMS	Root Mean Square (valor cuadrático medio)
THD	Total Harmonic Distortion (distorsión armónica total)
UTC	United Telecommunication Center S.A de C.V

## Capítulo 1.- Protocolo de investigación

### 1.1.- Introducción

El consumo de energía eléctrica es una necesidad básica de toda la población, de forma razonable se debe al avance tecnológico que ha ido incrementando paulatinamente. Es bien sabido que la energía eléctrica tiene que recorrer varios caminos, desde su generación, transmisión, distribución y finalmente su consumo, pero en este último paso, es necesario conocer los estándares de calidad con los que se realiza dicho consumo, ya sea en el sector residencial, comercial o industrial. [1]

En esencia a estos estándares, se le conoce como **CALIDAD DE ENERGÍA**.

El buen uso de energía eléctrica les permite a las empresas tener un alto nivel de competitividad en sus procesos de producción y por ende una economía altamente funcional.

Uno de los principales factores que afectan el uso de energía eléctrica es que existe gran cantidad de equipo que es susceptible a las variaciones de tensiones eléctricas. Aunado a esto es indispensable un estudio de calidad de energía para garantizar el funcionamiento de equipos antes descritos. Para reducir los problemas de calidad de energía se intenta que la potencia suministrada sea constante y se tenga una estabilización entre frecuencia y voltaje para que la onda senoidal posea una forma libre de armónicos. [2]

En nuestros días, se ha abordado el tema de calidad de energía en nuestro país, sin embargo, al ser elevado el costo del mismo, se busca maneras alternativas de mejorar esta calidad.

Históricamente se ha confundido el hecho de tener bajo factor de potencia con la existencia de armónicos, lo cual ha dado pauta a la instalación de bancos de capacitores cuando estos no se requieren debido a la existencia de los mismos armónicos mencionados.

La calidad de energía tiene infinidad de subtemas para generar un análisis exhaustivo, pero para esta investigación nos enfocaremos en el estudio de las ondas de voltajes y corrientes para determinar los niveles de distorsión existentes en las mismas (armónicos), y con base a ellos poder otorgar alguna solución viable.

## 1.2.- Planteamiento del problema

Los armónicos son corrientes y/o voltajes presentes en un sistema eléctrico, con una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental. Así, en sistemas con frecuencia de 60 Hz y cargas monofásicas, las armónicas características son la tercera (180 Hz), quinta (300 Hz), y séptima (420 Hz), por ejemplo. Con el creciente aumento en el uso de cargas no lineales (procedentes de la electrónica de potencia), se han empezado a tener algunos problemas en las instalaciones eléctricas debido a los efectos de las componentes armónicas de corrientes y voltajes en el sistema eléctrico, que no se contemplaban anteriormente. Entre estos están el sobrecalentamiento de cables, transformadores y motores, corrientes excesivas en el neutro, fenómenos de resonancia entre los elementos del circuito (si se cuentan con bancos de capacitores para corrección del factor de potencia) y, en general, la calidad en el suministro de energía eléctrica se ha ido deteriorando por la distorsión presente en los voltajes y corrientes. [3]

En la medida en que se incrementa el orden de la armónica, su magnitud y frecuencia disminuyen; por ello, las armónicas de orden inferior tienen mayor repercusión en el sistema de potencia. Generalmente, la medición de armónicas se realiza en las ondas de corriente en el lado de la carga o usuario y en la onda de tensión en el lado de la red. La onda distorsionada de corriente en el lado de la carga produce una caída de tensión con la impedancia de la red de transmisión, de manera que se distorsiona la onda de tensión. Por lo tanto, el problema de las armónicas debe controlarse en el punto en donde se genera, de lo contrario se puede transmitir a otros usuarios conectados a la misma red. [4]

Esta distorsión de la forma de onda es particularmente importante en los sistemas de distribución eléctrica de elevada impedancia. Esta desviación anormal de las

fuentes de suministro causa disfunciones en los equipos y fallos prematuros que es lo que se denomina “Baja calidad de la energía”. [5]

Estas cuestiones son las que provocan en cierta medida el incorrecto funcionamiento de equipos instalados en la residencia, industria o negocio donde se estudia la calidad de la energía, los cuales son diseñados para la operación en condiciones normales, aunado a esto, el incremento en la facturación mensual que se debe pagar a la suministradora de energía.

### **1.3.- Justificación**

Esta investigación tiene como propósito generar una expectativa nueva y concisa acerca del problema que generan los armónicos eléctricos en cualquier nivel del sector energético, ya que para empresarios mexicanos es un riesgo latente, tanto para operación, como en costos finales, tener altas tarifas e ineficiencias en el proceso productivo.

La investigación proveerá de una visión general de cómo abordar los armónicos eléctricos, desde su concepto teórico, análisis del problema físico generado por los armónicos eléctricos y su solución mediante un modelado completo y, de existir, el filtro adecuado para reducir los armónicos mencionados.

Las personas beneficiadas con esta investigación será cualquier ingeniero o estudiante a fin de la ingeniería eléctrica que busque tener conocimiento fresco acerca de este problema de la calidad de la energía, y a su vez, los empresarios que buscan optimizar sus procesos productivos.

Es una realidad que en la actualidad la energía eléctrica es la prima fundamental para la operación de cualquier sistema activo, por lo cual, tener estándares de calidad en esta misma, es esencial para evitar problemas futuros.

Con la presente investigación se pretende que la población a fin a la ingeniería eléctrica tenga una manera sencilla de comprender lo que sucede con este fenómeno físico y, con este modo, resolver dudas o lagunas que se tengan del mismo, ya que el propósito es expresar los modelos de la manera más sencilla.

## 1.4.- Objetivos:

### Objetivo general:

Analizar las formas de onda de la energía eléctrica en el sector industrial para corregir problemáticas con la calidad de energía.

### Objetivos particulares:

- 1.- Conocer acerca de la historia del consumo eléctrico en Ingeniería en plástico
- 2.- Entender funcionamiento y especificaciones de analizador de red (FLUKE 435 SERIES II POWER QUALITY AND ENERGY ANALYZER).
- 3.- Establecer modelo del sistema eléctrico.
- 4.- Simular el modelo del problema real de armónicos de Ingeniería en plástico.
- 5.-Posible publicación de resultados y patente\* (Pendiente a valoración de resultados prácticos).

## 1.5.- Alcances y metas

- Al término de la investigación se tendrá una nueva metodología para abordar el problema de los armónicos eléctricos antes de que estos puedan producir daños severos a las instalaciones del giro industrial.
- Habrá una investigación de un caso práctico de una industria que lleva operando en el mercado mucho tiempo. Se tendrá una aplicación real a la teoría que se desarrolle.
- El propósito de la presente investigación será dar un panorama amplio acerca de este problema que aqueja a muchas empresas y que estas puedan asesorarse con las personas adecuadas para dar solución al mismo.

## Capítulo 2.- Marco teórico

### 2.1.- Calidad de energía

#### 2.1.1.- ¿Qué es la calidad de la energía?

La definición de la “calidad de la energía” es algo indeterminado. Pero que se puede definir como una ausencia de interrupciones, sobretensiones, deformaciones producidas por armónicas en la red y variaciones de voltajes RMS suministrado al usuario; esto concierne a la estabilidad de voltaje, la frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico. Actualmente, la calidad de la energía es el resultado de una atención continua. En años recientes, esta atención ha sido de mayor importancia, debido al incremento del número de cargas sensibles en los sistemas de distribución, las cuales por si solas, resultan ser una causa de degradación en la calidad de la energía eléctrica. [6]

Debido a la importancia que representa la energía eléctrica en nuestra vida, para su uso en la iluminación, la operación de diversos equipos, video, aire acondicionado y sistemas de cómputo. La energía eléctrica se ha empleado en la fabricación de la mayoría de las cosas que utilizamos. Por consiguiente, los disturbios y variaciones de voltaje que se producen tienden a afectarnos de alguna u otra manera. [6]

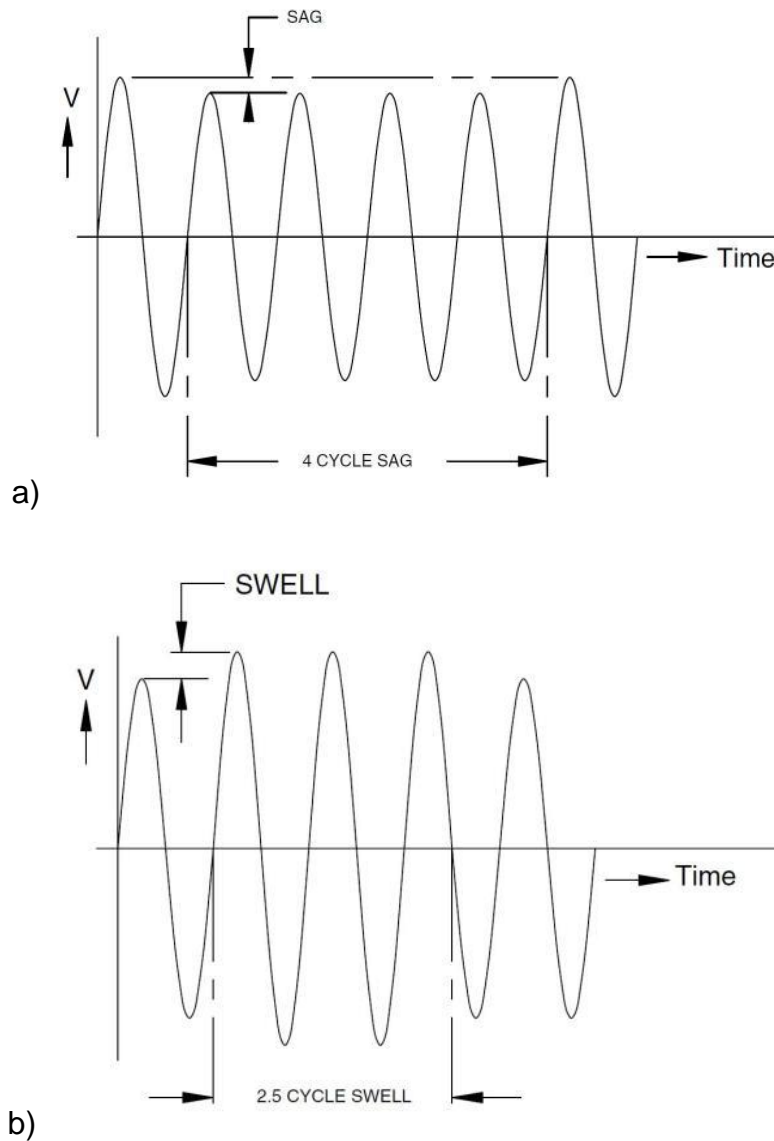
Podemos decir que el objetivo de la calidad de la energía es encontrar caminos efectivos para corregir los disturbios y variaciones de voltaje en el lado del usuario y proponer soluciones para corregir las fallas que se presentan en el lado del sistema de las compañías suministradoras de energía eléctrica, para lograr con ello un suministro de energía eléctrica con calidad. [6]

#### 2.1.2.- Fuentes de disturbios en sistemas eléctricos de distribución

##### a) Fluctuaciones de voltaje.

Significa una disminución momentánea en la magnitud del voltaje RMS, con una duración que va desde 10 ms (0.6 ciclos) hasta 2.5 segundos. (150 ciclos), causado por una falla remota en algún lugar del sistema de potencia. También existen las elevaciones de tensión (“swells”), que no son tan comunes. Las condiciones de alto

o bajo voltaje pueden representarse en circuitos durante la desconexión de cargas de gran tamaño o durante periodos de sobrecargas, respectivamente. (Fig 1 a) y Fig 1 b) [6]



*Fig 1 (a) y Fig 1 (b) Fluctuaciones de voltaje causadas por condiciones de fallas remotas y conexión o desconexión de grandes cargas.*

Una depresión severa se define como aquella menor que el 85% de la tensión nominal. Si estas condiciones se presentan como frecuencia o durante periodos prolongados, pueden dar lugar a envejecimiento de componentes electrónicos en sistemas digitales y errores durante el almacenamiento o lectura de la información.

Su presencia puede, algunas veces, detectarse visualmente al presentarse “parpadeo” o disminución del nivel de iluminación en lámparas, o reducción “encogimiento” del área de despliegue en monitores de televisión o computadoras. [6]

### b) Sobretensiones transitorias

Estas se presentan en forma de impulsos de voltaje de corta duración, superpuestos en la señal de alimentación y frecuentemente intermitentes, con una duración menor a dos milisegundos. Los impulsos pueden tener su origen en las descargas atmosféricas, en maniobra de interruptores y al conectar o desconectar capacitores para la corrección del factor de potencia. Estos constituyen los llamados “picos” de voltaje. (Fig 2) [6]



*Fig 2 Sobretensiones transitorias*

A diferencia de las sobretensiones temporales y exceptuando el caso crítico de rayos muy cerca de las instalaciones que producen chispas en los contactos, estas sobretensiones no presentan una indicación clara de su existencia, que pueda detectarse visualmente en circuitos de alumbrado o en alguna otra forma. Sin embargo, dado que su nivel puede llegar a alcanzar valores de cinco veces o más el voltaje nominal, su efecto consiste en aplicar esfuerzos excesivos al aislamiento

de diversos equipos o disturbios a componentes electrónicos sensibles. Esto último puede traer como consecuencia la interrupción de programas en procesos de computadoras, pérdida de información almacenada en memoria o daño a los elementos mismos (hardware). Otros factores transitorios, dentro de esta clasificación, son las operaciones de conexión y desconexión de motores eléctricos en elevadores, equipos de aire acondicionado, refrigeradores, etc. [6]

### c) Interrupciones de energía

Los efectos de las interrupciones del suministro eléctrico son variados y van desde el deterioro de la calidad de vida de la sociedad hasta las pérdidas económicas, no sólo al sector industrial sino, adicionalmente, de las empresas dedicadas a prestar este servicio, como se muestra en la Fig 3. Dentro de las alternativas que se muestran para incrementar la confiabilidad y disminuir estos efectos están las nuevas técnicas de mantenimiento que buscan predecir de manera prematura e incipiente la ocurrencia de una falla para corregirla, con un menor nivel de inversión y de efectos negativos posibles. [7]

Las pérdidas asociadas a las interrupciones del suministro eléctrico pueden ser de diferente naturaleza, desde las económicas de las empresas de bienes y servicios, que al detener sus procesos disminuyen sus ingresos por los productos no terminados y no pueden ser colocados en el mercado o servicios no prestados, incremento de los costos debido a la fuerza laboral inactiva en esos momentos, de los recursos económicos y humanos adicionales necesarios para poner a punta estos procesos y hasta daños a los equipos. [7]

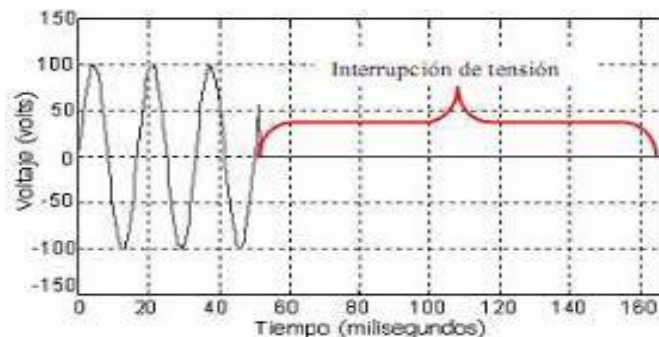
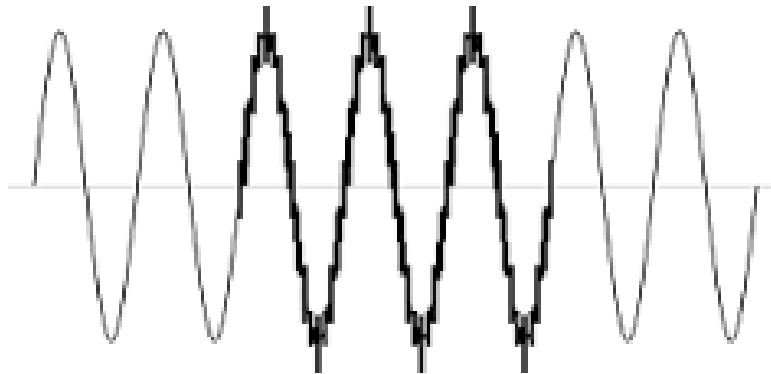


Fig 3 Interrupciones temporales

#### **d) Ruido eléctrico (interferencia)**

Son señales eléctricas en un ancho de banda menor a 200 kHz superpuestas a la señal fundamental de corriente o voltaje del sistema. [8]

Se debe principalmente a switcheo, sistemas de transmisión de señales de radio, balastos de lámparas fluorescentes, variadores de frecuencia, dimmers (atenuadores de iluminación) y equipo industrial de arco eléctrico. El ruido provoca efectos indeseables tales como, la operación errónea de PLC's, problemas en la operación de sistemas de cómputo, problemas de audio y video, entre otros y regularmente es amplificado por aterrizamientos incorrectos. Véase en Fig 4. [8]



*Fig 4 Ruido eléctrico*

#### **e) Armónicos.**

Significa simplemente que la forma de onda de la tensión (o corriente) no es senoidal pura. Esto resulta de la adición de una o más ondas armónicas que se superponen a la onda fundamental o de 60 Hz. La aparición creciente de cargas no lineales en sistemas de distribución, tales como convertidores estáticos de potencia, controladores de motores con rectificadores controlados de silicio, hornos de arco en aplicaciones industriales, etcétera, ha traído como consecuencia un aumento notable del contenido de componentes armónicas, que se manifiestan en forma de distorsiones diversas de la forma de onda de voltaje en la red de distribución.[6]

En el ámbito industrial, la utilización de capacitores para corregir el factor de potencia puede proporcionar, en algunas circunstancias, la aparición de condiciones de resonancia entre los capacitores y la inductancia de los transformadores. La

existencia de armónicos en la red de distribución provoca aumento de las pérdidas en equipos por efecto Joule, con el consecuente aumento de temperatura, sobre esfuerzo en aislamientos y disturbios provocados por interferencia en circuitos de control, de protecciones y en sistemas de telecomunicaciones como se muestra en la Fig 5 a) y Fig 5 b). [6]

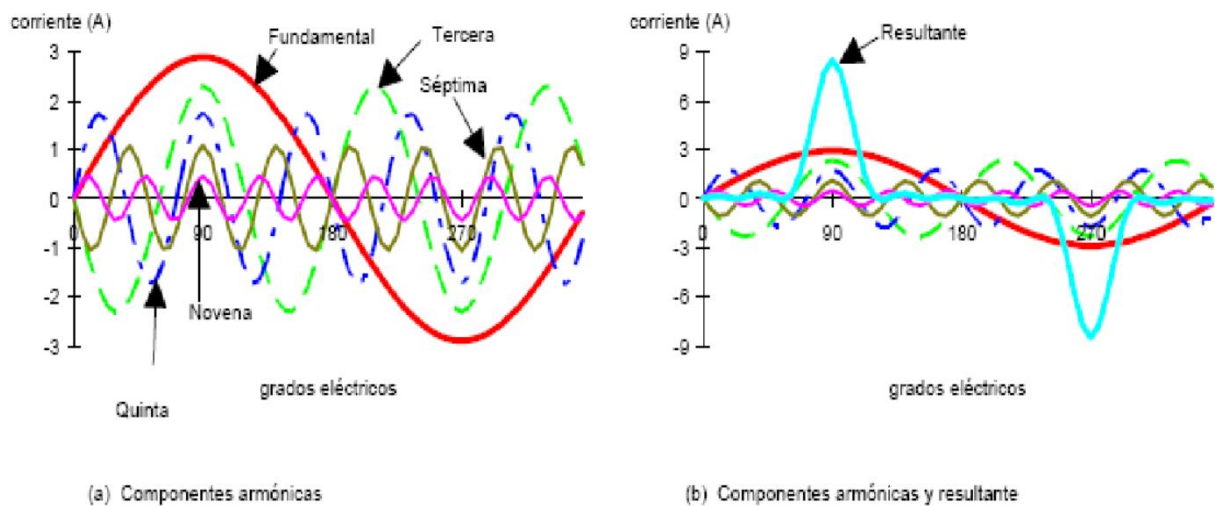


Fig 5 a) y Fig 5 b) Distorsión armónica

### 2.1.3.- Otros aspectos relacionados con la calidad del servicio

#### a) Desbalance de voltaje

El desbalance trifásico es el fenómeno que ocurre en sistemas trifásicos donde las tensiones y/o ángulos entre fases consecutivas no son iguales. El balance perfecto de tensiones es técnicamente inalcanzable. El continuo cambio de cargas presentes en la red, causan una magnitud de desbalance en permanente variación. La mera conexión de cargas residenciales, de naturaleza monofásica, provocan un estado de carga en el sistema trifásico que no es equilibrado entre fases, de allí las caídas de tensión del sistema tampoco serán equilibradas dando por resultado niveles de tensión desiguales.

A modo de recordar, un sistema de generación simétrico es aquel donde las tres tensiones tienen igual magnitud de tensión y sus fasores están a  $120^\circ$  entre sí. Una carga trifásica simétrica, es aquella que genera tres corrientes de magnitudes y fases iguales respecto a la tensión. [9]

## **b) Distorsión en la forma de onda**

Los límites de distorsión que los armónicos pueden producir se miden en la frontera entre la empresa suministradora de energía y el usuario (point of common coupling - PCC). La distorsión que el usuario produce a la empresa de energía depende de las corrientes armónicas que le inyecte y de la respuesta de impedancia del sistema a estas frecuencias. En ese sentido se ha establecido que los límites de distorsión armónica permitidos a los usuarios se midan en corrientes. La distorsión que la empresa de energía le produce al usuario se mide en la forma de onda de la tensión en el punto de frontera entre ambos. Aunque existen varios índices para establecer el grado de contaminación armónica en un punto de frontera, los índices más usados son la distorsión armónica individual y la distorsión armónica total tanto en tensión como en corriente. [10]

## **2.2.- Armónicos y sus efectos**

### **2.2.1.- Fuentes de armónicos [11]**

Existe un gran número de dispositivos que producen distorsiones armónicas. En nuestros días, la distorsión armónica constituye un gran problema, debido al uso de cargas no-lineales. Algunas de estas fuentes han existido desde la implementación de los sistemas de potencia; otros, han existido, pero en números más pequeños durante muchos años atrás. Una vez más, el progreso tecnológico ha traído consigo una contaminación grave del medio (en este caso, eléctrico), por lo tanto, es preciso aprender a controlarlo a base de una técnica adecuada.

A continuación, veremos en forma detallada la clasificación de las fuentes principales que producen estos disturbios en la red de energía eléctrica:

- a) Fuentes de armónicos tradicionales
- b) Fuentes nuevas de armónicos
- c) Fuentes futuras de armónicos

#### **a) Fuentes de armónicos tradicionales**

Anteriormente, la propagación de armónicos se relacionaba con el diseño y la operación de transformadores y maquinas rotatorias; de hecho, la primera fuente generadora de armónicos en esos días era la corriente magnetizante de los transformadores de potencia.

## **1.- Transformadores**

En un núcleo ideal sin pérdidas por histéresis, el flujo magnético y la corriente de magnetización necesaria para producirlo están relacionadas entre sí, mediante la curva de magnetización del acero utilizado en las laminaciones. Aun en esta condición, la forma de onda resultante no es una senoidal pura.

Cuando hay pérdidas por histéresis, la forma de onda de la corriente no es simétrica con respecto a su valor máximo. La distorsión que se obtiene se debe a los armónicos triples (3ª, 9ª, 12ª, etc.), pero primordialmente a la tercera, ya que para mantener una alimentación de voltaje senoidal es necesario proporcionar una trayectoria para estos armónicos triples, esto se logra generalmente con el uso de devanados conectados en delta.

Los armónicos debidos a la corriente de magnetización se incrementan a sus niveles máximos en las horas de la madrugada, cuando el sistema tiene muy poca carga y el nivel de voltaje es alto.

## **2.- Maquinas rotatorias**

Los efectos más conocidos de los armónicos en las maquinas rotatorias con el aumento en las pérdidas y calentamiento, generalmente atribuidos a armónicos de bajo orden, alta magnitud y la aparición de pares parásitos.

Las pérdidas ocasionadas por las corrientes armónicas en los motores de inducción trifásicos son el tipo  $I^2R$  y pueden dividirse en pérdidas en el estator, pérdidas en el rotor y pérdidas adicionales. El valor de la resistencia tiende a disminuir la frecuencia. Otros tipos de pérdidas debidas a la distorsión de voltaje pueden despreciarse, por ser pequeñas.

Para las maquinas síncronas, generalmente se considera que la impedancia armónica es igual a la reactancia subtransitoria multiplicada por el orden del armónico.

### **3.- Hornos de arco**

Un horno de arco es una carga compleja, no únicamente por lo fluctuación en el consumo de potencia reactiva, sino también porque la corriente del horno es altamente distorsionada. Es difícil describir las características de la corriente de un horno de arco.

Debido al incremento en el costo de la energía, el bajo factor de potencia con que opera un horno de arco debe tratarse de mejorar colocando bancos de capacitores para compensar el consumo de los reactivos de la carga.

El horno de arco, por ser una carga eléctrica de características no lineales, es una fuente de generación de corrientes armónicas en forma aleatoria, teniendo valores cercanos a la resonancia, debido a la respuesta en frecuencia del banco de capacitores con la reactancia propia de la línea de alimentación, ocasionando problemas de sobrevoltajes y sobre corrientes, causando frecuentemente operación de los fusibles de los bancos de capacitores, fallas en el equipo de medición, etc.

### **4.- Lámparas fluorescentes**

La utilización en gran escala de las lámparas fluorescentes como un medio para reducir el consumo de energía, se ha visto recientemente incrementada en muchos lugares del mundo. La utilización de nuevas tecnologías que abarcan diseños de lámparas fluorescentes y lámparas de vapor de metal, constituyen sistemas más eficientes de iluminación. Sin embargo, es importante analizar el lado negativo del uso masivo de las lámparas fluorescentes. La preocupación reside en el deterioro que puede sufrir la calidad de la energía en las instalaciones eléctricas donde se aplica este tipo de alumbrado, por la generación de corrientes armónicas.

Las lámparas incandescentes, por ser cargas lineales, producen la circulación de corrientes de 60 Hz al ser alimentadas por una fuente de voltaje senoidal de la misma frecuencia. En cambio, las lámparas fluorescentes son cargas no lineales

por naturaleza, por lo tanto, al aplicarles un voltaje senoidal, se produce una circulación de corrientes no senoidales a través de ellas.

### **b) Nuevas fuentes de armónicos**

En la actualidad, otra de las principales fuentes de distorsiones armónicas son los inversores y rectificadores con control de ángulo de fase.

Las líneas de transmisión de corriente directa producen problemas para los sistemas de control de rizado. Los armónicos, en frecuencias altas, causan errores en los sistemas de comunicación, dentro de estos se pueden mencionar la interferencia sobre las líneas telefónicas, pues al acoplarse los armónicos mutuamente con la red del sistema de potencia a las frecuencias de estas, hay falla. Estos armónicos afectan la operación de ciertos equipos, como son: motores de corriente continua, computadoras, máquinas de control numérico, etc, que son muy sensibles a la distorsión en la señal recibida.

Los convertidores se clasifican en:

- 1.- Grandes convertidores de potencia
- 2.- Convertidores de mediano tamaño
- 3.- Rectificación de baja potencia de fuentes monofásicas, como en los televisores y cargadores de baterías.

### **c) Futuras fuentes de armónicos**

A largo plazo, se prevé un aumento importante en el contenido de armónicas en las redes eléctricas, debido al uso en gran escala de autos eléctricos que requieren recargar sus baterías en grandes bancos de rectificación.

Otras posibles fuentes de armónicos serán aquellos que requerirán la conversión de grandes volúmenes de energía, posiblemente producidas por fuentes no convencionales (eólica, solar, etc.), el uso de ciclo-convertidores para operación de máquinas de baja velocidad y alto par, el uso de dispositivos de conversión directa de energía como baterías de almacenamiento y celdas de combustible.

Núm.	EQUIPO	CARACTERISITICAS DE LAS PRINCIPALES ARMONICAS	MAGNITUDES (1% DE 60 Hz)
1	Transformador: -Saturación -Energización	Corrientes armónicas 2 <sup>a</sup> , 3 <sup>a</sup> , 4 <sup>a</sup> , 5 <sup>a</sup> y 7 <sup>a</sup>	1 a 8%
2	Hornos y soldadoras de arco	Voltajes armónicos 5° y 7°	2.5 a 8%
3.1	Convertidores de potencia: -Conmutadores de línea (rectificadores), -Autoconmutados (inversores que usan celdas de combustible o baterías)	Corrientes armónicas: $h = np \pm 1$ Voltajes armónicos: $h = np \pm 1$	$I_h = 100/h$  52 a 78%
3.2	Cicloconvertidores (grandes equipos, fábricas de papel para conversión directa de AC a DC).	Corrientes armónicas: $h = np \pm 1$	5 a 9%
3.3	Controladores estáticos de VAR's (utilizados junto con hornos de arco o de inducción).	Corrientes armónicas: $h = np \pm 1$	2 a 4%
4	Reactores saturables (normalmente en paralelo con capacitores para compensación de reactivos en hornos de arco)	Corrientes armónicas 3 <sup>a</sup> , 5 <sup>a</sup> y 7 <sup>a</sup>	1 a 8%

*Tabla 1 Principales fuentes de armónicos*

**Nomenclatura: h = orden de armónico, p = numero de pulso; n = 1,2**

### 2.2.2.- Normatividad sobre el problema de armónicos [12]

Al realizar estudios armónicos utilizando cualquier software de análisis de sistemas de energía, es necesario determinar si la distorsión armónica total de voltaje y corriente excede los límites permitidos en el punto de acoplamiento común. (PCC). Los límites varían según la autoridad reguladora regional y son función de la distribución voltaje y la corriente de cortocircuito disponible en el PCC. Un buen punto de referencia inicial para determinar si se exceden los límites permitidos es utilizar la norma *IEEE Std 519*. Los límites recomendados de distorsión de corriente armónica utilizado por *IEEE Std 519* se muestra en la Tabla 2, y los límites de distorsión de voltaje se muestran en la Tabla 3.

For distribution systems (120 V through 69 000 V)						
$I_{sc}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	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

For distribution systems (120 V through 69 000 V)						
For sub-transmission systems (69 001 V through 161 kV)						
$I_{sc}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20 < 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50 < 100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100 < 1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
> 1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

For transmission systems (> 161 kV)						
$I_{sc}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 25	1.0	0.5	0.38	0.15	0.1	1.5
25 < 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
$\geq 50$	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Tabla 2 Límite máximo de distorsión de corriente armónica en porcentaje de corriente de carga

Donde  $I_{sc}/I_L$  es la relación entre la corriente de cortocircuito disponible en el punto de acoplamiento común (PCC) y el máximo corriente de carga fundamental

Bus voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (IVD) (%)	Total Harmonic Distortion (THD) (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161.001 \text{ kV} < V$	1.0	1.5 <sup>a</sup>

*Tabla 3 Límite de distorsión de voltaje armónico*

**Los sistemas de alto voltaje pueden tener hasta un 2,0 % de THD cuando la causa es una corriente continua de alto voltaje (HVDC) terminal cuyos efectos se habrán atenuado en puntos de la red donde puedan conectarse futuros usuarios.**

### 2.2.3.- Generación y efectos de la distorsión armónica en el voltaje y la corriente [13]

En un sistema eléctrico de potencia, la forma de onda del voltaje nunca es exactamente una senoide a una frecuencia constante, este fenómeno es llamado distorsión armónica del voltaje o simplemente distorsión del voltaje. Cuando una forma de onda es periódica (o se trata como periódica), ésta puede ser descrita como una suma de ondas sinusoidales con frecuencias que son múltiplos de la frecuencia fundamental (60 Hz en México). Las componentes a frecuencia no fundamentales son llamadas **distorsión armónica**.

Existen tres contribuciones a la distorsión armónica del voltaje:

- El voltaje generado por una máquina sincrónica no es exactamente sinusoidal debido a pequeñas desviaciones de la forma ideal de la máquina. Ésta es una contribución pequeña, de manera que suponer que el voltaje generado es sinusoidal es una buena aproximación.
- El sistema de potencia que transporta la energía eléctrica de las estaciones generadoras a las cargas no es completamente lineal, aunque la desviación es pequeña. Algunas componentes en el sistema extraen una corriente no sinusoidal, aún para un voltaje sinusoidal. El ejemplo clásico es el transformador de potencia, donde la no linealidad es debida a la saturación del flujo magnético en el núcleo de

hierro del transformador. Un ejemplo más reciente de no linealidad son los enlaces en HVDC. La transformación de CA a CD y de CD a CA tiene lugar usando componentes de electrónica de potencia que sólo conducen durante parte de un ciclo.

La cantidad de distorsión armónica que se origina en el sistema de potencia es normalmente pequeña. El uso creciente de electrónica de potencia para el control del flujo de potencia y del voltaje (sistemas flexibles de transmisión de CA o FACTS) lleva el riesgo de incrementar la cantidad de distorsión armónica que se origina en el sistema de potencia. La tecnología FACTS también ofrece la posibilidad de remover una parte grande de la distorsión armónica que se origina en el sistema o en la carga.

- La principal contribución a la distorsión armónica del voltaje son las cargas no lineales. Una parte creciente de la carga conectada a un sistema de potencia está siendo alimentada a través de convertidores electrónicos de potencia que extraen una corriente no sinusoidal. Las componentes armónicas de la corriente originan componentes armónicas en el voltaje y, por lo tanto, un voltaje no sinusoidal en el sistema.

La presencia de armónicas constituye uno de los problemas más frecuentes de la calidad de la energía, lo que justifica una comprensión integral del problema. Las armónicas son voltajes o corrientes sinusoidales con frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia a la que está diseñado para operar el sistema de alimentación (llamada frecuencia fundamental). La frecuencia de un voltaje armónico es un múltiplo entero de la frecuencia original. Por ejemplo, en un sistema de 60 Hz, la segunda armónica será de 120 Hz, la tercera de 180 Hz, y así sucesivamente.

#### **2.2.4.- Clasificación de los armónicos**

a) De secuencia (+): La secuencia de los armónicos puede ser positivo (insertan corrientes en sentido de las agujas del reloj). Producen calentamiento de conductores, apertura de interruptores, etc.

b) De secuencia (-): Negativa (insertan corrientes en sentido contrario a las agujas del reloj). Producen calentamiento de conductores, problemas en los motores (se frenan), etc.

c) De secuencia (0): Las llamadas de secuencia cero (no tienen sentido de rotación). Producen calentamiento de conductores, se suman corrientes en el neutro (en sistemas trifásicos de 4 hilos) [14]

La tabla 4 muestra el orden de armónicos, así como la secuencia a la que pertenece.

<b>Armónica</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Frecuencia</b>	60	120	180	240	300	360	420	480	540
<b>Secuencia</b>	+	-	0	+	-	0	+	-	0

*Tabla 4 Orden de armónicos*

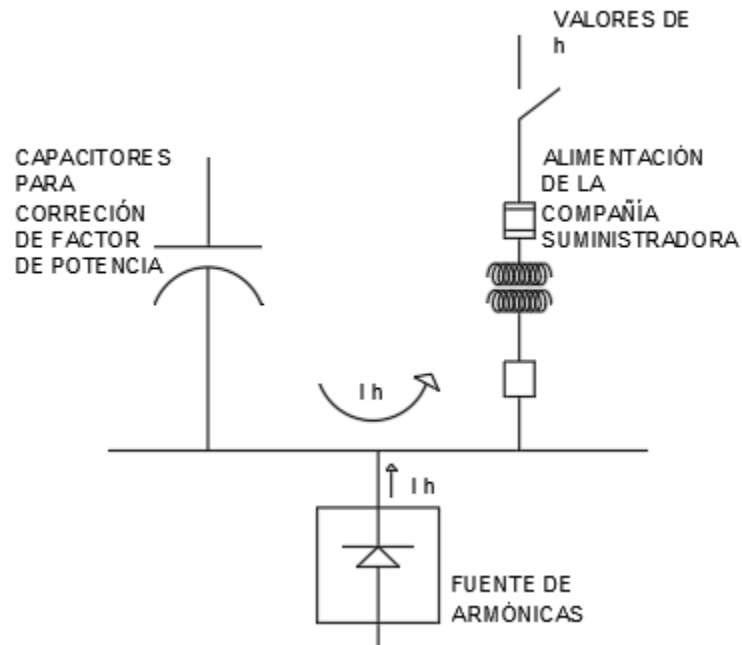
### 2.2.5.- Circuitos resonantes [6]

Los sistemas eléctricos de potencia están formados por distintas componentes, que, en términos de los parámetros de un circuito eléctrico, se pueden resumir como inductancias (L), capacitancias (C) y resistencias (R)

En general, los sistemas eléctricos modelan para un estudio de flujos de carga, cargas lineales y se hace el análisis para que las componentes L y C no entren en resonancia a la frecuencia fundamental; no obstante, en los sistemas reales existen cargas no lineales donde se pueden generar frecuencias diferentes de la fundamental, entonces, los parámetros L y C que no eran resonantes a la frecuencia fundamental pueden serlo a otra frecuencia para o impar.

En las redes de distribución o en las instalaciones industriales, se puede presentar también este problema al conectar capacitores para la corrección del factor de potencia.

Uno de los circuitos resonantes más comunes en los estudios de armónicos es el llamado **circuito paralelo** como el mostrado en la Fig 6.



*Fig 6 Resonancia en paralelo*

La característica de un “circuito resonante paralelo” como el anterior, es una alta impedancia al flujo de la corriente a la frecuencia de resonancia, también se presenta el problema de la llamada resonancia serie.

La característica de un “circuito resonante serie” es su baja impedancia al flujo de la corriente a la frecuencia de resonancia. En ambos tipos de circuitos, se debe determinar la frecuencia a la cual se presenta la resonancia. En el caso de los circuitos con resonancia en paralelo, para ilustrar el procedimiento de cálculo, consideramos un circuito industrial como el mostrado en la Fig 7:

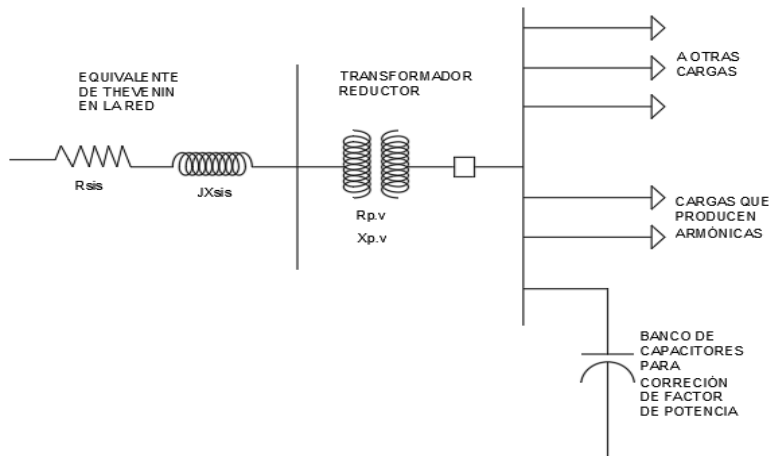


Fig 7 Circuito industrial

Para analizar el diagrama unifilar de un sistema, como el mostrado en la Fig 7, los valores de las impedancias de los elementos se deben referir al lado de carga o de bajo voltaje del sistema. Para el sistema o red equivalente al cual se conecta la instalación en estudio, estos valores se obtienen con las siguientes expresiones:

$$R_{sis} = \frac{kV^2}{MVA_{cc}} \times \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right)\right) \dots \dots \dots Ec(1)$$

$$X_{sis} = \frac{kV^2}{MVA_{cc}} \times \sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right)\right) \dots \dots \dots Ec(2)$$

Donde:

MVA<sub>cc</sub> = Valor de cortocircuito expresado en MVA en el punto de conexión de la planta a la compañía suministradora.

X/R = Relación X / R equivalente para el sistema.

Los valores anteriores están referidos al lado de alimentación, pero se deben expresar en el lado de bajo voltaje de la instalación, es decir:

$$R'_{sis} = \frac{R_{sis}}{a^2} \dots \dots \dots Ec(3)$$

$$X'_{sis} = \frac{X_{sis}}{a^2} \dots \dots \dots Ec(4)$$

Donde:

a = Relación de transformación del transformador.

Generalmente, los datos del transformador están expresados en porciento o en por unidad, como deben estar expresados en ohms y referidos al lado de bajo voltaje, los valores de  $R_{p.u}$  y  $X_{p.u}$  dados como datos, se transforman en ohms al secundario con las siguientes expresiones:

$$R_t = R_{p.u} \frac{1000 \text{ kV}^2}{\text{kVA}_t} \dots \dots \dots \text{Ec}(5)$$

$$X_t = X_{p.u} \frac{1000 \text{ kV}^2}{\text{kVA}_t} \dots \dots \dots \text{Ec}(6)$$

Donde:

R p.u = Resistencia del transformador en p.u. referido a su propia base.

X p.u = Reactancia del transformador en p.u referida a su propia base.

$\text{kVA}_t$  = Potencia nominal (aparente) del transformador.

$\text{kV}$  = Voltaje de línea a línea del transformador en el lado de bajo voltaje.

El valor de la reactancia capacitiva para el banco de capacitores del factor de potencia, expresada en ohms, se calcula como:

$$X_c = \frac{1000 \text{ kV}^2}{\text{kVAR}} \dots \dots \dots \text{Ec}(7)$$

Donde:

$\text{kV}$  = Voltaje de línea a línea del banco de capacitores.

$\text{kVAR}$  = Potencia reactiva del banco de capacitores.

El diagrama unifilar equivalente que corresponde al diagrama unifilar anterior es el siguiente en la Fig 8:

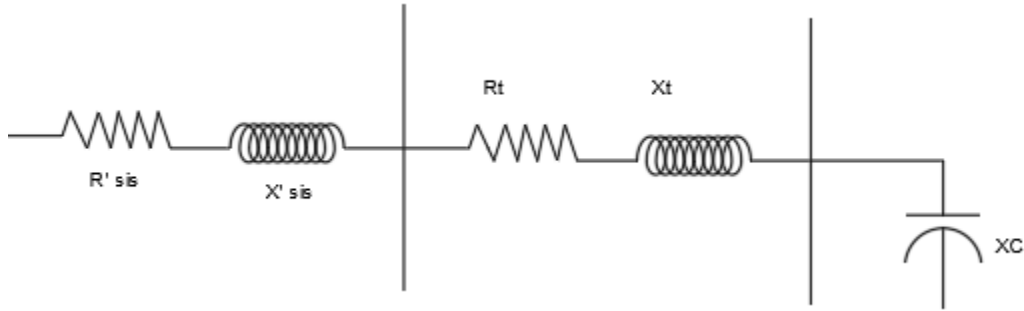


Fig 8 Diagrama equivalente referido a baja tensión

La resistencia total es:

$$R_{TOT} = R'_{sis} + R_t \dots \dots \dots Ec(8)$$

La reactancia total es:

$$X_{TOT} = X'_{sis} + X_t \dots \dots \dots Ec(9)$$

La inductancia correspondiente a la reactancia inductiva total es:

$$L_{TOT} = \frac{X_{TOT}}{2\pi f_{sis}} = \frac{X_{TOT}}{\omega_{sis}} \dots \dots \dots Ec(10)$$

Donde:

$f_{sis}$  = Frecuencia de operación normal para el sistema.

El valor de la inductancia total del sistema (LTOT) es una cantidad constante, pero el valor de la reactancia inductiva (XL) a cualquier otra frecuencia está dada por:

$$X_L = 2\pi f_{ac} L_{TOT} = \omega_{ac} X_{TOT} \dots \dots \dots Ec(11)$$

Donde:

$f_{ac}$  = Frecuencia actual o de operación del sistema.

De igual forma, la capacitancia del sistema correspondiente al banco de capacitores es:

$$C = \frac{1}{2\pi f_{sis} X_C} = \frac{1}{\omega_{sis} \cdot X_C} \dots \dots \dots Ec(12)$$

El valor de la capacitancia a la frecuencia del sistema es una constante, pero el valor de esta reactancia capacitiva a cualquier otra frecuencia de operación es:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f_{ac}C} = \frac{1}{\omega_{ac} \cdot C} \dots \dots \dots Ec(13)$$

El circuito equivalente resultante con estas modificaciones es el mostrado en la Fig 9:

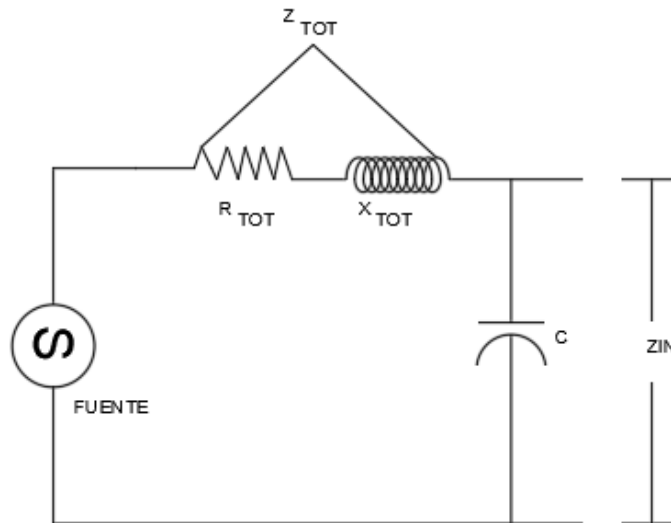


Fig 9 Circuito equivalente

El problema consiste en determinar la impedancia equivalente de la fuente, vista desde el bus de carga:  $Z_{in}$ ,

La  $Z_{in}$  resultado de la combinación en paralelo de:

$$Z_{TOT} = (R_{TOT} + j\omega_{ac}L_{TOT}) \text{ y } \frac{1}{j\omega_{ac}C} = \frac{-j}{\omega_{ac}C} \dots \dots \dots Ec(14)$$

$$Z_{in} = \frac{(R_{TOT} + j\omega_{ac}L_{TOT}) \times \left(\frac{-j}{\omega_{ac}C}\right)}{(R_{TOT} + j\omega_{ac}L_{TOT}) - \left(\frac{-j}{\omega_{ac}C}\right)} \dots \dots \dots Ec(15)$$

El valor de la impedancia equivalente ( $Z_{in}$ ) se puede obtener para distintos valores de frecuencia ( $f_{ac}$ ) ó  $\omega_{ac} = 2\pi f_{ac}$  que pueden ir desde la fundamental ( $f = 60 \text{ Hz}$ ) hasta  $f_{ac} = 3000 \text{ Hz}$  (corresponde a 50ª armónica), esta relación se puede expresar

gráficamente como una curva de Zin contra f, de manera que se pueda localizar gráficamente a la frecuencia resonante en paralelo.

Se presenta la resonancia cuando la reactancia inductiva es igual a la reactancia capacitiva, es decir:

$$\omega_0 L_{TOT} = \frac{1}{\omega_0 \times C} \dots \dots \dots Ec(16)$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{L_{TOT} \times C} \dots \dots \dots Ec(17)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{TOT} \times C}} \dots \dots \dots Ec(18)$$

$$si; \omega_0 = 2\pi f_0$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{TOT} \times C}} \dots \dots \dots Ec(19)$$

Donde  $f_0 =$  frecuencia de resonancia

En este sistema, la frecuencia de resonancia se puede presentar por la adición:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{L_{TOT} \times C}} = f_1 \sqrt{\frac{X_c}{X_L}} = f_1 \times \sqrt{\frac{MVA_{CC}}{MVAR_{CAP}}} \dots \dots \dots Ec(20)$$

Donde:

$f_1 =$  Frecuencia fundamental (Hz)

$MVA_{CC} =$  Potencia de corto circuito trifásica

$MVAR_{CAP} =$  Potencia del banco de capacitores

## 2.3.- Filtros

### 2.3.1.- Introducción a filtros [15]

El filtro de derivación funciona cortocircuitando corrientes armónicas lo más cercano a la fuente de distorsión en la medida de lo posible. Esto mantiene las corrientes fuera del sistema de suministro. Este es el tipo de filtrado más común aplicado por

economía y porque también tiende a corregir el factor de potencia de la carga, así como eliminar la corriente armónica.

Otro enfoque es aplicar un filtro en serie que bloquee los armónicos. Este es un circuito sintonizado en paralelo que ofrece una alta impedancia a la corriente armónica. No se utiliza con frecuencia porque es difícil aislar y el voltaje de carga está muy distorsionado. Una aplicación común es en el neutro de un condensador en estrella conectado a tierra para bloquear el flujo de triplicar los armónicos sin dejar de conservar una buena base en la frecuencia fundamental.

Los filtros activos funcionan suministrando electrónicamente el componente armónico de la corriente a una carga no lineal.

### 2.3.2.- Filtros pasivos [15]

Los filtros pasivos son elementos de inductancia, capacitancia y resistencia, configurados y sintonizados para controlar los armónicos. Son comúnmente utilizados y son relativamente económicos en comparación con otros medios para eliminar la distorsión armónica. Sin embargo, tienen la desventaja de potencialmente interactuar adversamente con el sistema de energía, y es importante comprobar todas las posibles interacciones del sistema cuando se diseña. Se emplean para desviar las corrientes armónicas de la línea o bloquear su flujo entre partes del sistema ajustando los elementos para crear una resonancia a una frecuencia seleccionada. En la Fig 10 se muestra una configuración clásica.

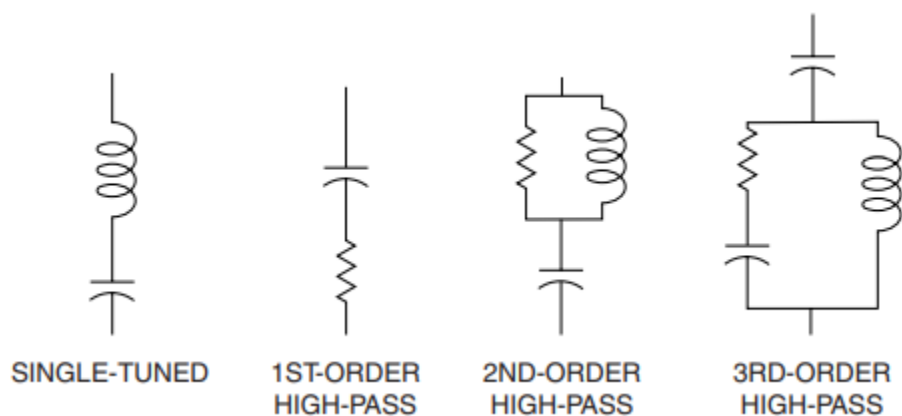


Fig 10 Configuraciones comunes de filtros pasivos

### 2.3.2.1.- Filtros pasivos de derivación [15]

El tipo más común de filtro pasivo es el filtro de “muesca” de sintonización única. Este es el tipo más económico y frecuentemente es suficiente para la aplicación. El filtro de muesca está sintonizado en serie para presentar una baja impedancia a una corriente armónica particular y está conectado en derivación con el sistema de energía. Por tanto, las corrientes armónicas son desviados de su ruta de flujo normal en la línea a través del filtro (Fig 11).

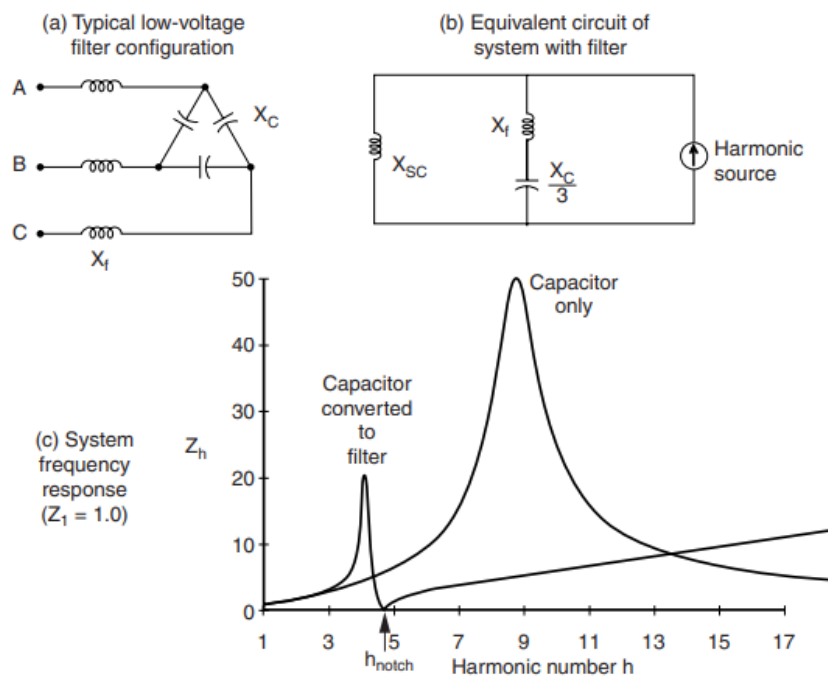


Fig 11 Filtro de muesca para una 5ª armónica y su efecto en el sistema.

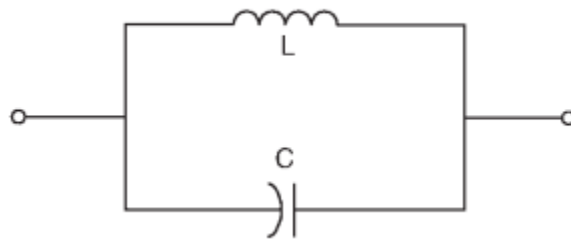
### 2.3.2.2.- Filtros pasivos en serie [15]

A diferencia de un filtro de muesca que está conectado en derivación con el sistema de energía, un filtro pasivo en serie está conectado en serie con la carga. La inductancia y la capacitancia están conectadas en paralelo y sintonizadas para proporcionar una alta impedancia en un armónico seleccionado. La alta impedancia bloquea entonces el flujo de corrientes armónicas únicamente en la frecuencia sintonizada. En la frecuencia fundamental, el filtro estaría diseñado para producir

una impedancia baja, permitiendo así que la corriente fundamental siga con solo una impedancia adicional menor y pérdidas.

Los filtros en serie se utilizan para bloquear una corriente armónica única (como el tercer armónico) y son especialmente útiles en un circuito monofásico donde no es posible aprovechar las características de secuencia cero (Fig 12). El uso de filtros en serie está limitado al bloquear múltiples corrientes armónicas. Cada corriente armónica requiere un filtro en serie sintonizado para ese armónico. Este acuerdo puede generar pérdidas significativas en la frecuencia fundamental.

Además, al igual que otros componentes en serie en sistemas de potencia, un filtro en serie debe estar diseñado para transportar una corriente de carga nominal completa y debe tener un esquema de protección contra sobre corriente. Por lo tanto, los filtros en serie se aplican con mucha menos frecuencia que los filtros de derivación



*Fig 12 Filtro pasivo en serie*

### **2.3.2.3.- Filtro pasivo paralelo sintonizado (FPPS) [16]**

Este filtro se nombra así por su modo de conexión con la carga distorionante como se aprecia en la Fig 13. En su versión monofásica, la cual es la base para la trifásica, está conformada por un arreglo en serie de capacitores ( C ) y de un reactor (L). Los FPPS son los filtros de armonicas mas comunes en instalaciones comerciales e industriales de baja y alta tensión.

Este filtro realiza su función mediante una acción de drenado, ya que presenta una trayectoria de baja impedancia a la corriente armónica, por mitigar, evitando así que se propague al resto del sistema

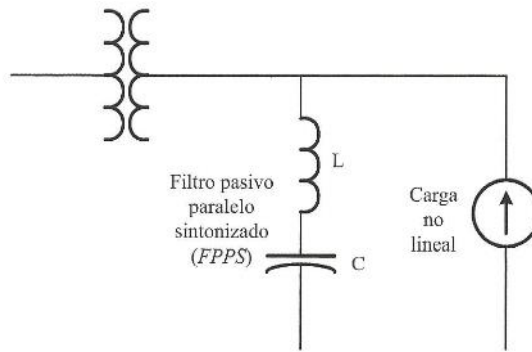


Fig 13 Diagrama de conexión de los FPPS

En funcionamiento pleno, el FPPS drena una cantidad de corrientes armónicas diferentes a la de su sintonía. Esto se debe a que la impedancia que opone el filtro a dichas frecuencias no es infinita, ya que está construido con elementos físicos reales, los cuales presentan resistencia óhmica, que a su vez ocasiona pérdidas. Por lo tanto, el flujo de corrientes armónicas (por el filtro y por el sistema), queda determinado por las leyes de circuitos eléctricos. Un modelo del FPPS que contemple lo anterior incluye una resistencia **R**, en serie con **C** y **L**. Además, este tipo de filtro se especifica considerando el hecho de que, a frecuencia fundamental, inyecta o aporta potencia reactiva en el nodo de conexión.

Al utilizar esta clase de filtro, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) Se define un parámetro denominado factor de calidad (**Q**), que indirectamente define el ancho de banda, el cual es el rango de armónicas cercanas a la de sintonía que drena el filtro. La definición de **Q** es:

$$Q = \frac{X_{Ls}}{R} = \frac{X_{Cs}}{R} \dots \dots \dots Ec(21)$$

- b) Se debe incluir, en cualquier análisis, las interacciones del FPPS con la impedancia de la fuente ( $L_s$ ) ante la posibilidad de que se presente el fenómeno de resonancia en paralelo. Ésta se da cuando alguna corriente armónica, de frecuencia ( $f_{rp}$ ) y diferente a la de sintonía ( $f_s$ ), encuentra a

su paso una impedancia de alto valor y con la probabilidad de resultar amplificada

$$f_{rp} = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L + L_s)} C} [Hz] \dots \dots \dots Ec(22)$$

### 2.3.3.- Filtros activos

Los filtros activos son tipos de dispositivos relativamente nuevos para eliminar armónicos. Se basan en una sofisticada electrónica de potencia y son mucho más caros que los filtros pasivos. Sin embargo, tienen la clara ventaja de que no resuenan con el sistema. Los filtros activos pueden funcionar independientemente de las características de impedancia del sistema. Por lo tanto, se pueden utilizar en circunstancias muy difíciles donde los filtros pasivos no pueden funcionar correctamente debido a problemas de resonancia paralela. También pueden abordar más de un armónico a la vez y combatir otros problemas de calidad de la energía, como el parpadeo. Son particularmente útiles para cargas grandes y distorsionantes alimentadas desde puntos relativamente débiles. en el sistema de potencia. [15]

La idea básica es reemplazar la porción de la onda sinusoidal que falta en la corriente en una carga no lineal. Un control electrónico monitorea el voltaje y/o la corriente de la línea, conmutar la electrónica de potencia con mucha precisión para seguir la corriente de carga. o voltaje y forzarlo a ser sinusoidal. Como se muestra, hay dos enfoques fundamentales: uno que utiliza un inductor para almacenar corriente para ser inyectado en el sistema en el instante adecuado y que utiliza un condensador. Por lo tanto, mientras que la corriente de carga se distorsiona en la medida demandada por la carga no lineal, la corriente vista por el sistema es mucho más sinusoidal. [15]

Los filtros activos generalmente se pueden programar para corregir el factor de potencia y armónicos (Fig 14). [15]

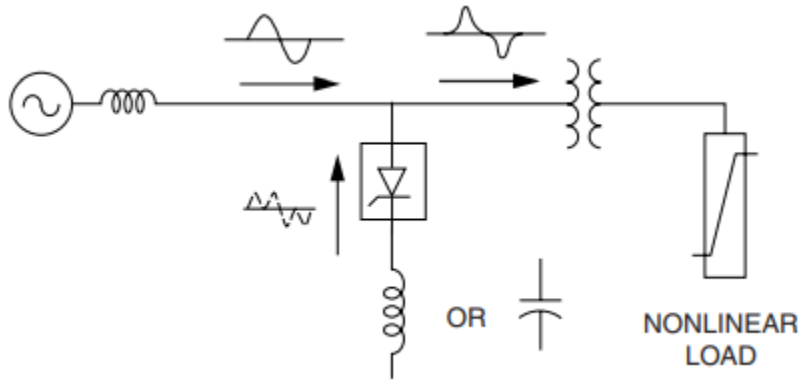


Fig 14 Aplicación de un filtro activo en la carga

### a) Filtros activos en paralelo [17]

La configuración más habitual de los filtros activos es en derivación o conexión en paralelo.

La Fig 15 muestra el esquema básico de la conexión, donde un dispositivo de conmutación como un transistor bipolar de compuerta aislada (IGBT) representa el bloque de potencia del filtro activo. Las cargas con armónicos de corriente pueden ser compensadas por esta configuración de filtro activo. Un ejemplo típico de una carga con fuente de corriente es un rectificador con una rama inductiva en el lado de corriente continua.

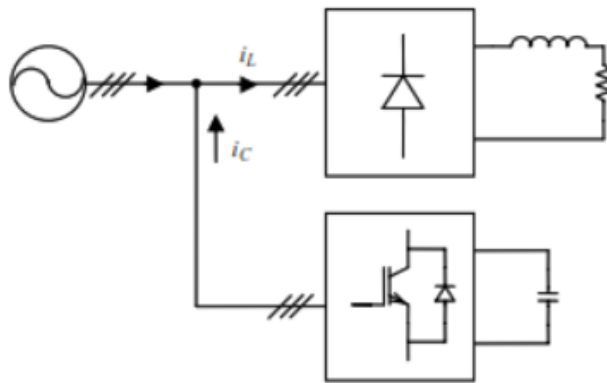
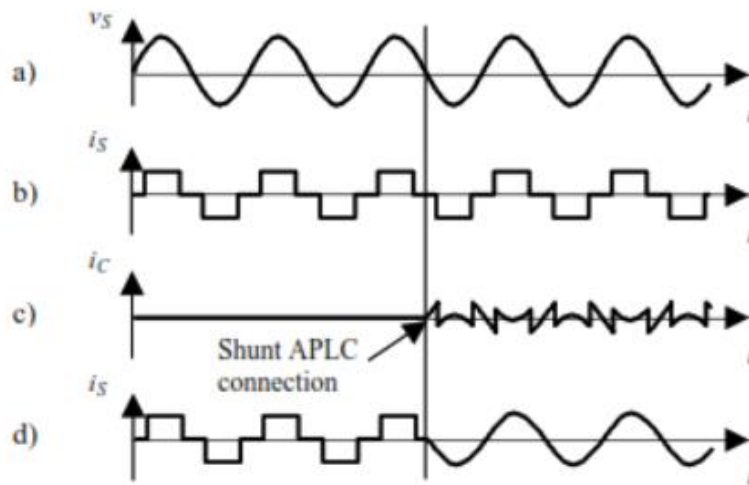


Fig 15 Diagrama general de un filtro activo en paralelo

La Fig 16 muestra el rendimiento básico de un filtro activo en paralelo. El objetivo general es que el filtro activo en paralelo inyecte en el sistema una corriente de

compensación,  $i_c$ , para cancelar el componente armónico de la corriente de carga,  $i_L$ . La fuente de corriente  $i_s$  se vuelve sinusoidal después de la compensación.

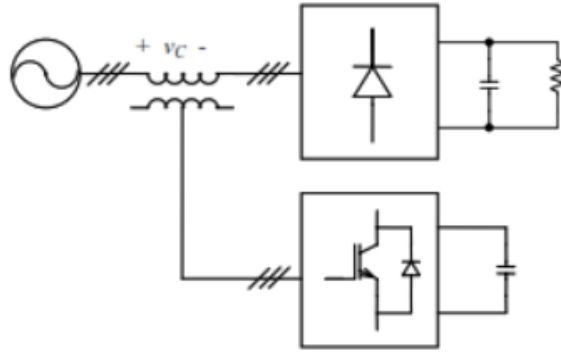


*Fig 16 a), Fig 16 b), Fig 16 c), Fig 16 d) Operación del filtro activo en paralelo*

La forma de onda de corriente de una carga no lineal, de un rectificador de diodos trifásico con una rama de corriente directa altamente inductiva, se muestra en la Fig 16 (b). El filtro activo inyecta una corriente de compensación en paralelo con la carga, véase Fig 15 (c). La Fig 15 (d) muestra la forma de onda de la fuente de corriente del sistema antes y después de la compensación. En este ejemplo se considera que la fuente de voltaje es sinusoidal (Consultar la Fig 15 (a)).

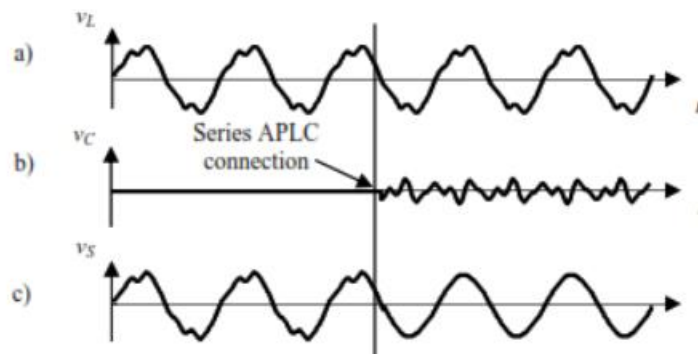
### **b) Filtros activos en serie [17]**

La Fig 17 muestra el esquema de conexión de un filtro activo en serie. Está conectado al sistema a través de un transformador de acoplamiento. El voltaje de compensación,  $v_c$ , se usa para cancelar los armónicos de tensión de la carga, por ejemplo, rectificadores de diodos con alta capacitancia en lado de corriente directa.



*Fig 17 Diagrama general de un filtro activo en serie*

El esquema de rendimiento de un filtro activo en serie se muestra en la Fig 18. En este caso, el filtro suministra un voltaje de compensación b) cuando está conectado. Estos componentes armónicos cancelan los armónicos de voltaje en la carga a). Después de la compensación, el voltaje de la fuente será sinusoidal c).

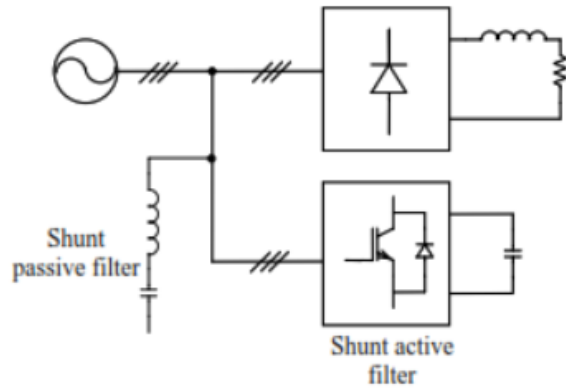


*Fig 18 a), Fig 18 b), Fig 18 c) Operación del filtro en serie*

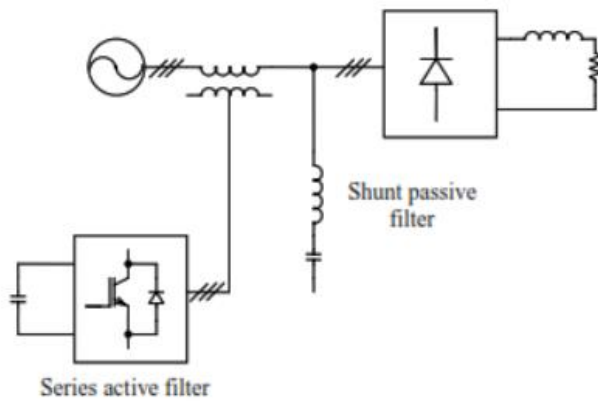
### **c) Filtros activos híbridos [17]**

Las Fig 19, 20 y 21 muestran algunos filtros pasivos y activos híbridos. Los objetivos básicos de estas combinaciones son para reducir el costo de la compensación estática. Los filtros pasivos se utilizan para cancelar los armónicos más relevantes de la carga, y el filtro activo está dedicado a mejorar el rendimiento de los filtros pasivos o para cancelar otros componentes armónicos. Como resultado, la potencia del filtro activo se reduce y los problemas del filtro pasivo (por ejemplo, resonancias

con la impedancia de origen) se mitigan. En resumen, el costo total disminuye sin reducción de la eficiencia.



*Fig 19 Filtro activo hibrido con un filtro activo en paralelo y un filtro pasivo en paralelo*



*Fig 20 Filtro activo hibrido con un filtro activo en serie y un filtro pasivo en paralelo*

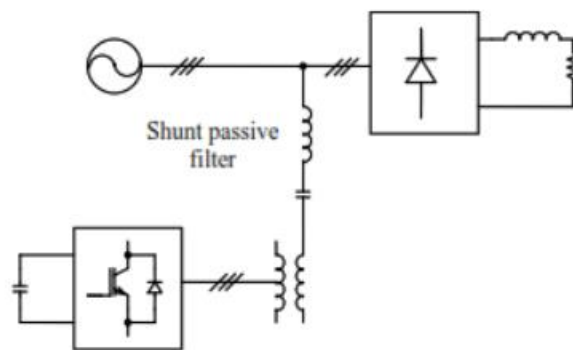


Fig 21 Filtro activo híbrido con un filtro pasivo en paralelo, que a su vez tiene un filtro activo en serie

La tabla 5 muestra una comparación entre los diferentes tipos de filtros activos híbridos.

	Filtro activo paralelo + filtro activo paralelo	Filtro activo serie + filtro activo paralelo	Filtro activo en serie con un filtro pasivo en paralelo
<b>Tipo de circuito</b>	Inversor PWM con control de corriente	Inversor PWM sin control de corriente	Inversor PWM con o sin control de corriente
<b>Objetivo</b>	Eliminar armónicos	Compensar armónicos en voltaje y corriente	Compensar armónicos o mejorar filtro pasivo
<b>Ventajas</b>	Regulación de potencia reactiva, filtros activos comerciales	No hay armónicos de corriente, filtros pasivos comerciales	Baja protección del filtro activo, filtros pasivos comerciales
<b>Desventajas</b>	Intervalos de compensación	Sobrecorrientes, no hay control de potencia reactiva	No hay control de potencia reactiva

Tabla 5 Comparación entre las distintas topologías de filtros activos híbridos

## 2.4.- Equipo para medición de calidad de energía [18]

El analizador empleado para el caso de estudio de la investigación será el siguiente:

### **Analizador de red (FLUKE 435 SERIES II POWER QUALITY AND ENERGY ANALYZER).**

Se miden simultáneamente múltiples parámetros y se muestran en formatos que describen rápidamente el estado general de calidad eléctrica. La información detallada le ayuda a tomar mejores decisiones de mantenimiento, tanto si intenta reducir la pérdida energética, como si se propone encontrar la causa de los problemas de calidad eléctrica o averiguar de qué modo afecta al sistema eléctrico el arranque de motores. Se puede acceder a los datos como simples valores digitales, gráficos de tendencias (para visualizar rápidamente los cambios a lo largo del tiempo), formas de onda o diagramas fasoriales. Los datos también pueden analizarse y organizarse en formato tabular. Los datos de eventos detallados le permiten ver las etiquetas de magnitud, duración y tiempo de las anomalías de forma que pueda correlacionar rápidamente los problemas que experimenta en sus instalaciones.

Características	Fluke 434-II	Fluke 435-II	Fluke 437-II	Fluke 438-II
Medidas de potencia	•	•	•	•
Medidas de calidad eléctrica	•	•	•	•
Conformidad con IEC61000-4-30	Clase S	Clase A	Clase A	Clase A
Calculadora de calidad eléctrica, energía y pérdida de energía	•	•	•	•
Supervisión y análisis de tendencias	•	•	•	•
Corriente de entrada, eficiencia del inversor	•	•	•	•
Análisis avanzado; formas de onda de eventos, parpadeo, transitorios, señalización de la red eléctrica y onda de potencia		•	•	•
Alimentación de sistemas navales y de 400 Hz			•	
Análisis eléctrico y mecánico del motor	(Opcional)	(Opcional)	(Opcional)	•
Tarjeta SD	•	•	•	•

*Tabla 6 Características del analizador de redes (Fluke 435-II)*

El analizador da a detalle y en tiempo real las siguientes magnitudes:

- a) Amperaje

- b) Voltaje
- c) Potencia activa
- d) Potencia aparente
- e) Potencia reactiva
- f) Factor de potencia
- g) Armónicos (desde 3<sup>a</sup> armónica hasta 50<sup>a</sup> armónica)

Por mencionar algunas.

Basándonos en el caso de investigación (armónicos las especificaciones del equipo son las siguientes:

Armónicos				
Orden de armónicos (n)		CC, grupos de 1 a 50: Grupos de armónicos según la norma IEC 61000-4-7		
Orden de interarmónicos (n)		Desactivado, grupos de 1 a 50: subgrupos de armónicos e interarmónicos de acuerdo con la norma IEC 61000-4-7		
% tensión	f	0,0% a 100%	0,1%	$\pm 0,1\% \pm n \times 0,1\%$
	r	0,0% a 100%	0,1%	$\pm 0,1\% \pm n \times 0,4\%$
	Absoluta	0,0 a 1000 V	0,1 V	$\pm 5\%^1$
	THD	0,0% a 100%	0,1%	$\pm 2,5\%$
% A	f	0,0% a 100%	0,1%	$\pm 0,1\% \pm n \times 0,1\%$
	r	0,0% a 100%	0,1%	$\pm 0,1\% \pm n \times 0,4\%$
	Absoluta	0,0 a 600 A	0,1 A	$\pm 5\% \pm 5$ cuentas
	THD	0,0% a 100%	0,1%	$\pm 2,5\%$
% W	f o r	0,0% a 100%	0,1%	$\pm n \times 2\%$
	Absoluta	Según escala de la sonda de corriente y tensión nominal	—	$\pm 5\% \pm n \times 2\% \pm 10$ cuentas
	THD	0,0% a 100%	0,1%	$\pm 5\%$
Ángulo de fase		-360° a +0°	1°	$\pm n \times 1^\circ$

*Tabla 7 Especificaciones de analizador de redes para armónicos.*

## Capítulo 3.- Desarrollo de investigación

### 3.1.- Ingeniería en Plástico de Puebla (IPP) [19]

#### 3.1.1.- Antecedentes acerca de IPP

Ingeniería en Plástico de Puebla (IPP) cuenta con más de 25 años de experiencia en la inyección de plástico y ofrece su gran diversidad de productos a diferentes sectores, siendo una empresa 100% mexicana. La empresa se encuentra ubicada estratégicamente en el centro de México con su planta de producción y oficinas comerciales en el Estado de Puebla. Además, cuenta con dos centros de distribución en Querétaro y San Luis Potosí.

IPP es una empresa formal y cumplida con sus clientes. La empresa ha logrado en los últimos años un crecimiento exponencial en ventas, productos e instalaciones. Así como un mayor posicionamiento en el mercado con sus clientes, demostrando su capacidad y el cumplimiento. Al buscar el ganar-ganar de ambos lados, IPP se ha ganado la confianza de sus clientes.

Se trabaja constantemente en la mejora continua de los procesos de producción, logrando de esta manera una mayor competitividad de la empresa.

#### 3.1.2.- Capacidad instalada

IPP cuenta con una gran capacidad instalada de más de 35 máquinas de inyección de plástico que son prensas de 50 a 2mil toneladas con sus periféricos (robots, secadores, termorreguladores, etc.) 4 grúas viajeras de 5 a 30 toneladas con tecnología de punta que demuestra su gran potencial y competencia.

#### 3.1.3.- Laboratorio de metrología

El laboratorio de metrología cuenta con equipos de tecnología de vanguardia. De esta manera se cumple con los más altos estándares de calidad que requiere la industria automotriz, logrando optimizar los tiempos de respuesta y obteniendo mediciones más exactas y constantes.

Nuestro laboratorio cuenta con equipos de metrología 3D, instrumentos de medición y equipos para pruebas. Gracias a estos procesos es posible evaluar, reportar y ajustar características de los componentes.

### **3.1.4.- Certificaciones**

La empresa está respaldada por importantes certificaciones internacionales que garantizan la calidad en sus procesos:

- 1.- ISO9001 (desde 2014)
- 2.- IATF16949 (desde 2014)

### **3.1.5.- Clientes**

Para IPP, lo más importante son sus clientes. Al trabajar con IPP, ellos tienen la seguridad de contar con un proveedor certificado que garantiza un buen servicio y cumplimiento en tiempo y forma. Además, se desarrollan continuamente nuevos productos para satisfacer las necesidades de los mercados.


Los clientes de IPP son los proveedores Tier1 de las armadoras transnacionales del sector automotriz, empresas exportadoras de frutas y verduras, comercializadoras de productos del hogar y compañías del sector industrial en general.

Algunos clientes son:

- 1.- Sector automotriz: Plastico Omnium, SA Automotive, Concorde, SMP, Webasto, Eissmann, Faurecia, American Eagle, Summit Polymers
- 2.- Sector agrícola: Comelesa, Latin Fruits, Mirasoles, Rio Grande Exportaciones, Agroverdi, Champiñones Rioxal, Next Vegetables.
- 3.- Sector hogar: La Campana, La Comercial de Tehuacán, Casa Ahued
- 4.- Sector industrial en general: Pinturas de Alto Rendimiento, Proteínas y Oleicos, Grupo Asavelle, Pisos Industriales, Litografías, Áramo, DJ Global Trade, PYRSA, Industrias Novaceramics, MYM, Sunset.

### 3.2.- Consumo eléctrico histórico de Ingeniería en Plástico de Puebla (IPP)

A continuación, en la Fig 22 y en la Fig 23 se presentará información acerca del costo de la energía y consumo eléctrico de IPP comprendido del año 2023 y parte del año 2024.

 <b>Comisión Federal de Electricidad®</b>		<b>CFE Suministrador de Servicios Básicos</b> Río Ródano No. 14, colonia Cuauhtémoc, Alcaldía Cuauhtémoc, Código Postal 06500, Ciudad de México. RFC: CSS160330CP7	
<b>ING EN PLASTICO DE PUE SA CV</b> CARR FED AMOZÓ OTAL KM 6 400 FEDERAL EN KM 6.4 Y BARRIO STÓ ANGEL SAN ANTONIO AMOZOC OBJ C.P. 72980 AMOZOC DE MOTA PUEBLA, PUE.		<b>TOTAL A PAGAR:</b> <b>\$1,172,718</b> (UN MILLON CIENTO SETENTA Y DOS MIL SETECIENTOS DIECIOCHO PESOS. M.N.)	
<b>NO. DE SERVICIO:</b> 217100502029 <b>RMU:</b> 72980 10-05-21 IPP0-00209 006 CFE		<b>PERIODO FACTURADO:</b> 31 ENE 24 - 29 FEB 24	
<b>TARIFA:</b> GDMTH	<b>NO. MEDIDOR:</b> 896MGP	<b>MULTIPLICADOR:</b> 1750	<b>FECHA LÍMITE DE PAGO:</b> 13 MAR 24
<b>CARGA CONECTADA kW:</b> 1600		<b>DEMANDA CONTRATADA kW:</b> 1600	
		<b>CORTE A PARTIR:</b> 14 MAR 24	

Concepto	Consumo		Precio (MXN)	Subtotal (MXN)
	Medida <input checked="" type="checkbox"/>	Estimada <input type="checkbox"/>		
WWh base		70,781		
WWh intermedia		160,297		
WWh punta		58,527		
KW base		974		
KW intermedia		976		
KW punta		1,007		
KWMax		1,007		
kVAh		190,631		
Factor de potencia %		84		

Costos de la energía en el Mercado Eléctrico Mayorista					Desglose del importe a pagar	
Concepto	\$	\$/kW	\$/kWh	Importe (MXN)	Concepto	Importe (MXN)
Suministro	360.01	0.00	0.00	360.01	Cargo Fijo(3)	360.01
Distribución	0.00	116,910.78	0.00	116,910.78	Energía	938,263.80
Transmisión	0.00	0.00	52,823.23	52,823.23	Cargo Factor de Potencia(3)	71,335.41
CENACE	0.00	0.00	1,940.94	1,940.94	Int S/doc(3)	931.90
Generación B	0.00	0.00	70,263.13	70,263.13	Subtotal	1,010,891.12
Generación I	0.00	0.00	277,634.40	277,634.40	IVA 16%	161,742.58
Generación P	0.00	0.00	115,918.58	115,918.58	Facturación del Periodo	1,172,633.70
Capacidad	0.00	300,921.39	0.00	300,921.39	Derecho de Alumbrado Público(2)	63.77
SCoMEM(1)	0.00	0.00	1,851.35	1,851.35	Adeudo Anterior	818,088.65
<b>TOTAL</b>	<b>360.01</b>	<b>417,832.17</b>	<b>520,431.63</b>	<b>938,623.80</b>	Su Pago	-818,088.00
					<b>Total</b>	<b>1,172,718.12</b>

Fig 22 Costo de la energía eléctrica en IPP



Periodo	Demanda kW	Consumo total kWh	Factor potencia %	Factor carga %	Precio medio (MXN)
FEB 23	1,101	384,898	93.41	52.02	2.9733
MAR 23	1,095	347,842	94.16	42.70	2.8867
ABR 23	760	12,787	95.18	70.10	2.6037
ABR 23	1,077	301,298	94.43	40.19	2.9426
MAY 23	923	329,729	95.01	48.02	2.9676
JUN 23	1,350	486,654	88.93	48.01	3.0967
JUL 23	1,339	491,059	86.61	49.29	3.1333
AGO 23	1,185	400,993	86.80	45.48	3.1298
SEP 23	1,046	343,939	83.72	45.67	3.2140
OCT 23	842	246,566	81.46	43.58	3.2139
OCT 23	593	16,849	77.36	39.46	3.4475
NOV 23	863	223,811	82.48	36.02	3.2352
DIC 23	750	166,150	83.88	29.78	3.1457
ENE 24	781	206,190	78.22	35.48	3.4204
FEB 24	1,007	298,605	84.29	42.60	3.3823

*Fig 23 Consumo eléctrico histórico de IPP*

Dado el consumo y datos proporcionados por la Fig 23, se puede visualizar que hay un detalle con el factor de potencia a relación con la carga que se maneja comprendido desde el mes de julio de 2023.

Sin embargo, para conocer más estos fenómenos eléctricos, es necesario realizar un estudio de calidad de energía en el punto crítico de operación para saber el comportamiento y uso de la energía eléctrica.

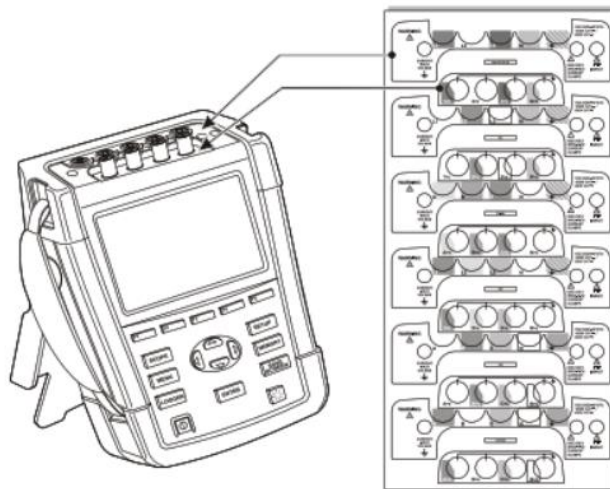
### 3.3.- Conexión, configuración e instalación de analizador de redes. [20]

#### 3.3.1.- Conexiones de entrada

El analizador tiene 4 entradas BNC para pinzas amperimétricas y 5 entradas tipo banana para tensiones.

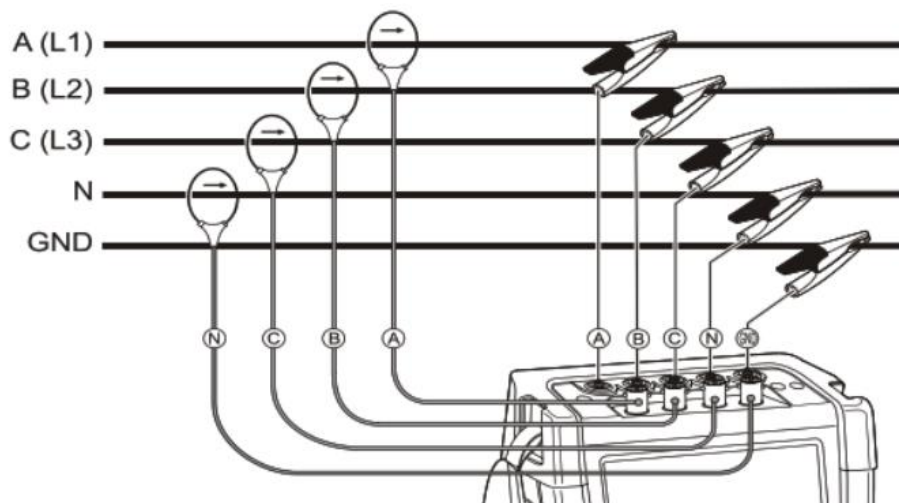
Hay que utilizar solamente las pinzas amperimétricas como se suministran, o bien pinzas recomendadas para un uso seguro con el analizador. Estas pinzas tienen un conector BNC (Bayonet Neill-Concelman) de plástico. Es necesario utilizar conectores BNC aislados para realizar las medidas de forma segura.

Se suministran etiquetas autoadhesivas que se corresponden con los códigos de color del cableado para EE. UU, Canadá, Europa continental, Reino Unido y China. Adhiera las etiquetas correspondientes a sus códigos del cableado locales alrededor de las entradas de corriente y tensión como se muestra en la Fig 24.



*Fig 24 Montaje de etiquetas para entradas de tensión y corriente*

En un sistema trifásico, realizar las conexiones como se muestra en la figura Fig 25.



*Fig 25 Conexión del analizador a un sistema de distribución trifásico*

Primero, ponga las pinzas amperimétricas alrededor de los conductores de fase A (L1), B (L2), C (L3) y N (Neutro). Las pinzas están marcadas con una flecha que indica la polaridad de señal correcta.

A continuación, realice las conexiones de tensión: comience por la conexión a tierra y, después, en sucesión N, A (L1), B (L2) y C (L3). Para obtener resultados de medida correctos, conecte siempre la entrada de conexión a tierra. Compruebe siempre dos veces las conexiones. Compruebe que las pinzas amperimétricas están firmemente fijadas y completamente cerradas alrededor de los conductores.

Las pantallas de osciloscopio y fador son útiles para comprobar si los cables de tensión y las pinzas amperimétricas están conectados correctamente. En el diagrama de vectores, las tensiones de fase y las corrientes A (L1), B (L2) y C (L3) deben aparecer en secuencia al observarlas en el sentido de las agujas del reloj como se muestra en el ejemplo de la Fig 26.

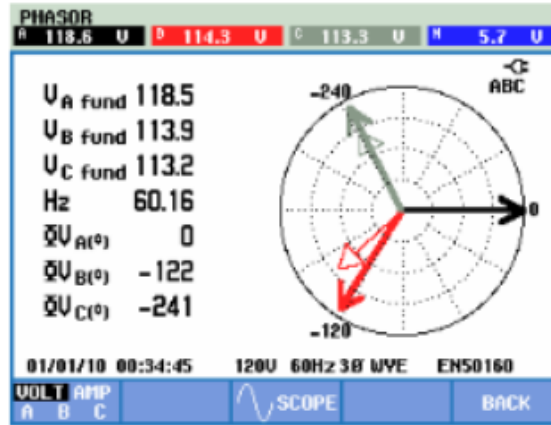


Fig 26 Diagrama de vectores correspondiente al analizador correctamente conectado

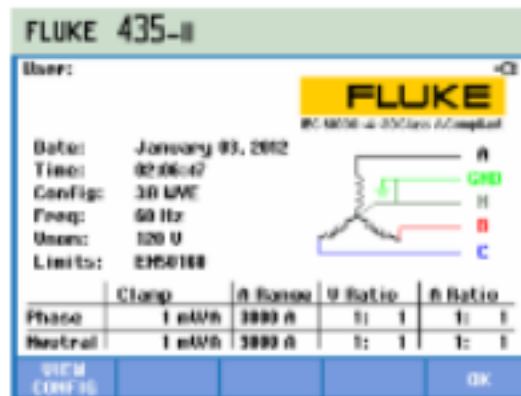
### 3.3.2.- Configuración del analizador

Al encender el analizador por primera vez, tras un ajuste predeterminado de fábrica, o si se ha desconectado de todas las fuentes de alimentación, deberá ajustar varios valores generales que se adapten a su situación local. En la tabla 8 se proporciona una visión general:

Ajuste	Valor predefinido
Idioma de la información	Inglés
Frecuencia nominal	60 Hz
Tensión nominal	120 V
Identificación de fase	A, B, C
Colores de fase A/L1-B/L2-C/L3-N-Puesta a tierra	Negro-Rojo-Azul-Gris-Verde
Fecha* + Formato de fecha	Mes/día/año
Hora*	00:00:00

Tabla 8 Ajustes iniciales

Cuando termine de configurar los parámetros de la tabla, aparecerá la pantalla mostrada en la Fig 27. Esta pantalla permite acceder a todos los ajustes del analizador.



*Fig 27 Pantalla de entrada a las configuraciones del analizador*

### **a) Configuración manual**

1.- Pulse la tecla SETUP y, a continuación, la tecla de función F4 – MANUAL SETUP para acceder a la pantalla MANUAL SETUP.

2.- Utilice las teclas de flecha arriba/abajo para seleccionar uno de los parámetros enumerados debajo y, a continuación, pulse ENTER para acceder al menú de configuración:

- Date (Fecha), Time (Hora): Utilice las teclas de flecha para seleccionar la fecha, la hora y el formato de fecha. Pulse ENTER para confirmar el formato de fecha seleccionado. Con un receptor GPS conectado y F2 ajustado en GPS ON, la fecha y la hora se sincronizan automáticamente. También puede establecer la zona horaria y el horario de verano. Pulse F1 para acceder al menú de comprobación de GPS que informa acerca de la calidad de la recepción. Pulse la tecla de función F5 – BACK para volver al menú anterior.

- Config (Configuración): selección de 10 configuraciones de cableado (sistemas de alimentación de 50/60 Hz). Realice la selección con las teclas F1, F2, F3 y las teclas de flecha. A continuación, pulse ENTER para confirmar y para entrar en una pantalla que muestra cómo conectar el analizador al sistema de alimentación. Cuando esté preparado, pulse la tecla de función F5 dos veces para volver a la pantalla de entrada a la configuración.

- Freq (Frecuencia): ajuste de la frecuencia nominal (60 Hz. Utilice las teclas de flecha arriba/abajo para seleccionar la frecuencia nominal. Pulse ENTER para confirmar y la tecla de función F5 – BACK para volver al siguiente menú superior.

- Vnom: ajuste de la tensión nominal. Utilice las teclas de flecha para seleccionar 100 V, 120 V, 230 V, 400 V o cualquier otra tensión. Pulse ENTER para confirmar y la tecla de función F5 – BACK para volver al siguiente menú superior.

- Clamp (Pinza), A range (Rango A), V scale (Escala V): ajuste del analizador a las características de las pinzas amperimétricas y los cables de tensión. La selección predeterminada es válida para los accesorios suministrados con el analizador. Los cables de tensión suministrados son de tipo 1:1; al utilizar cables de atenuación o un transformador de tensión, deberá adaptar la escala de tensión en consecuencia (por ejemplo, 10:1 para atenuación de 10 veces). De igual forma, se puede ajustar la escala de corriente cuando se utilizan convertidores de corriente junto con pinzas amperimétricas. Con las teclas de flecha puede personalizar la lectura de tensión y corriente a cualquier relación de transformación que desee. La selección de la escala de amperios y voltios se realiza con la tecla de función F3. Hay tablas de selección por separado para fase y neutro: para la selección se utiliza la tecla de función F4. Para la pinza amperimétrica: puede seleccionar muchos tipos de pinzas Fluke.

3.- Trend Scale (Escala de tendencia): en este menú se puede ajustar la desviación y la escala de las pantallas de tendencia. Es posible realizar el ajuste manual cuando el modo AUTO se ajusta en OFF con la tecla de función F4. Cuando el modo AUTO está ajustado en ON, la desviación y la escala se ajustan en un valor tal que se obtiene una presentación clara en prácticamente todas las circunstancias (escala automática). Se proporcionan ajustes independientes para fase y neutro: la selección se realiza con la tecla de función F3.

4.- Scope Scale (Escala de osciloscopio): ajuste del rango de tensión y corriente de la pantalla de osciloscopio. Se proporcionan ajustes independientes para fase y neutro: la selección se realiza con la tecla de función F3. La tecla de función F4 permite volver a los valores predeterminados.

5.- Function Preferences (Opciones): ajuste de las funciones relacionadas con la pantalla de tendencia, armónicos, fluctuaciones, parpadeo, fasor, potencia y varios ciclos de agregación para Vrms/Arms. En la tabla siguiente se ofrece información adicional. Utilice las teclas de flecha arriba/abajo para seleccionar un elemento y las teclas de flecha izquierda/derecha para seleccionar valores y rangos para ese elemento.

6.- Wave Capture (Captura de ondas) (disponible mediante la tecla de función F1): aquí se pueden definir parámetros relacionados con la captura de formas de onda de tensión y corriente en modos de transitorios y parpadeo, por ejemplo. En este menú, la tecla de función F4 se puede utilizar para recuperar valores predeterminados y la tecla de función F5 para salir del menú.

7.- Rapid Change (Cambio rápido) (disponible mediante la tecla de función F3): menú que permite definir los parámetros para la medida de cambios rápidos de tensión (tolerancia de tensión, tiempo estable, intervalo mínimo, detección en Vstep/Vmax). En este menú, la tecla de función F4 se puede utilizar para recuperar valores predeterminados y la tecla de función F5 para salir del menú.

8.- Energy Loss (Pérdida de energía) (disponible mediante la tecla de función F4): menú que permite definir los parámetros para la medida de pérdidas de energía. Los parámetros que se deben definir son: cuatro tarifas distintas, datos del cable (longitud en metros/pies, diámetro en milímetros cuadrados o según AWG / American Wire Gauge, o sistema americano de calibres de cables). En el modo automático no es necesario configurar datos del cable: el analizador basa los cálculos de costes en la suposición de una pérdida por cobre del 3% en el cable. Otras pérdidas se calculan en relación con la pérdida por cobre.

### **3.4.- Calibración de analizador de redes.**

Dado que el caso de estudio requiere mediciones confiables, se tuvo que hacer calibración del equipo ante un laboratorio avalado por EMA (Entidad Mexicana de Acreditación). En la Fig 28 se muestra el dictamen emitido:

## Certificado de Calibración Calibration Certificate



Certificado de calibración (Calibration Certificate): 37530:44613113

Laboratorio de calibración acreditado por ema, a.c. con acreditación No. E-84, bajo la norma NMX-EC-17025-IMNC-2018  
Calibration Laboratory Accredited by ema, a.c. with Accreditation No. E-84, under Standard NMX-EC-17025-IMNC-2018



### Instrumento bajo calibración (Unit Under Calibration)

Descripción (Description): Analizador de potencia eléctrica  
Fabricante (Manufacturer): Fluke  
Modelo (Model): 435-II  
Número de serie (Serial Number): 44613113, Inventario (Id): 44613113

### Cliente (Customer)

Nombre (Name): United Telecommunication Center S.A. de C.V.  
Dirección (Address): 11 Sur #4723  
Colonia (Address): Prados Agua Azul  
Ciudad (City): Puebla  
Estado (State): Puebla, CP. (Zip Code): 72430  
Contacto del cliente (Customer contact): Sin información.

### Certificado de Calibración (Calibration Certificate)

Factor de cobertura (Coverage Factor):  $k = 2$ . Nivel de confianza (Confidence Level): aproximadamente (Aprox.) 95%  
Recibido (Received): 2023-11-07. Calibrado (Calibrated): 2023-11-14. Emitido (Issued): 2023-11-14  
Temperatura (Temperature): 24.2 °C. Humedad relativa (Relative Humidity): 40 %  
Orden de servicio (Service Order): 37530  
Método de calibración (Calibration Method): Directo (Direct)  
Procedimiento de calibración (Calibration Procedure): Fluke 435-2 F728 Cal 5080A, Revisión (Revision): 1.0  
Condición del equipo a la recepción (UUT Reception Condition): En condiciones de ser calibrado (In conditions to be calibrated).  
Comentarios (Comments): Ninguno.

Calibró  
Calibrated by:



León Barrera  
Pacheco

Aprobó  
Approved by:



José Mundo  
Ortega

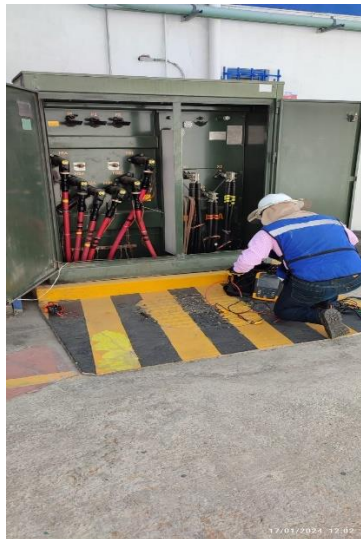
Este documento es un Certificado electrónico de calibración.  
En su forma electrónica, las firmas se validan electrónicamente por el programa Adobe Reader DC.

*Fig 28 Dictamen de calibración del analizador de redes compartido por la empresa UTC (United Telecommunication Center S.A de C.V)*

### 3.5.- Instalación de analizador de redes.

De acuerdo con la metodología empleada en los subcapítulos anteriores, se procede a instalar el analizador de redes (Fig 29, Fig 30, Fig 31 y Fig 32) en uno de

los transformadores de Ingeniería en Plástico para realizar su estudio de calidad de energía enfocado en armónicos.



*Fig 29 Preparación de analizador de redes*



*Fig 30 Instalación de pinzas amperimétricas*



*Fig 31 Instalación completa del analizador de redes*



*Fig 32 Configuración final del analizador de redes*

Para tener una medición precisa y confiable de los parámetros de calidad de energía descritos en el capítulo 2.4 se instaló durante un periodo de tiempo de 1 semana.

### **3.6.- Diagrama unifilar de Ingeniería en Plástico de Puebla (IPP)**

A continuación, se presenta el diagrama unifilar representativo (Fig 33) en el que se basará el caso de estudio para un transformador de 1000 KVA, configuración estrella – estrella. Voltaje: 34,500 V / 440 V, operación anillo.



## **Capítulo 4.- Resultados**

### **4.1.- Valores obtenidos de acuerdo con medición de analizador de redes en Ingeniería en Plástico de Puebla (IPP)**

#### **4.1.1.- Tiempo a instalar el analizador de redes**

De acuerdo con el código de red para considerarse una medición confiable se debe dejar en funcionamiento el analizador de redes mínimo 7 días con un registro cada 5 minutos (medición cincominutal).

Una vez teniendo en cuenta lo establecido por el código de red se procede a instalar el analizador de redes en el siguiente calendario:

Inicio de medición: miércoles 17 de enero de 2024 (12:49 pm)

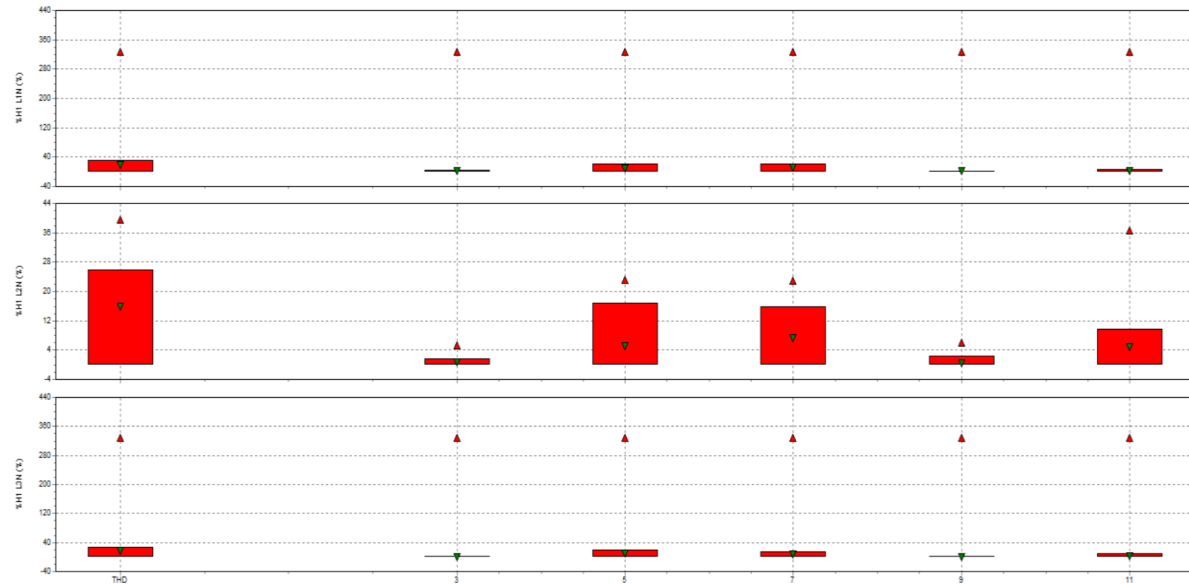
Fin de medición: miércoles 24 de enero de 2024 (12:49 pm)

Posterior a este tiempo, es apto para análisis de estudio para calidad de energía (enfocado en armónicos eléctricos)

#### **4.1.2.- Histograma de armónicos**

Mediante el software eléctrico de PowerLog 5.9 (compatible con analizador de redes Fluke) se logró la visualización de los elementos expuestos en el capítulo 2. La Fig 34 muestra el histograma de armónicos global durante la medición.

El histograma es sumamente útil ya que nos proporciona una manera simple de observar y analizar datos mediante una gráfica y de esta manera lograr a primera instancia percibir si estamos en rangos aceptables.



*Fig 34 Histograma de armónicos (de izquierda a derecha, general, 3er armónico, 5to armónico, 7mo armónico, 9 armónico, 11vo armónico)*

Con el histograma observado en la Fig 34 se puede notar que existe la presencia de armónicos eléctricos prácticamente desde el armónico de orden 5.

#### **4.1.3.- Evolución temporal de armónicos**

Mediante el software eléctrico de PowerLog 5.9 (compatible con analizador de redes Fluke) se puede observar en las mediciones cincominutales el porcentaje de THD en corriente. En este caso nos basaremos en un caso en particular. La medición del lunes 22 de enero de 2024 en horario de 8:29 am a 8:34 am, ya que es considerada una forma de onda y datos críticos.

La Fig 35 muestra la evolución temporal en dicho horario y mostrando los armónicos de orden 3,5,7,9 y 11, ya que estos históricamente son considerados los que más afectan al sistema de potencia.

Además, que la Fig 35 muestra cómo se va comportando cada armónico del orden correspondiente en comparación a los demás, lo cual es de gran ayuda en el análisis de THD posterior.

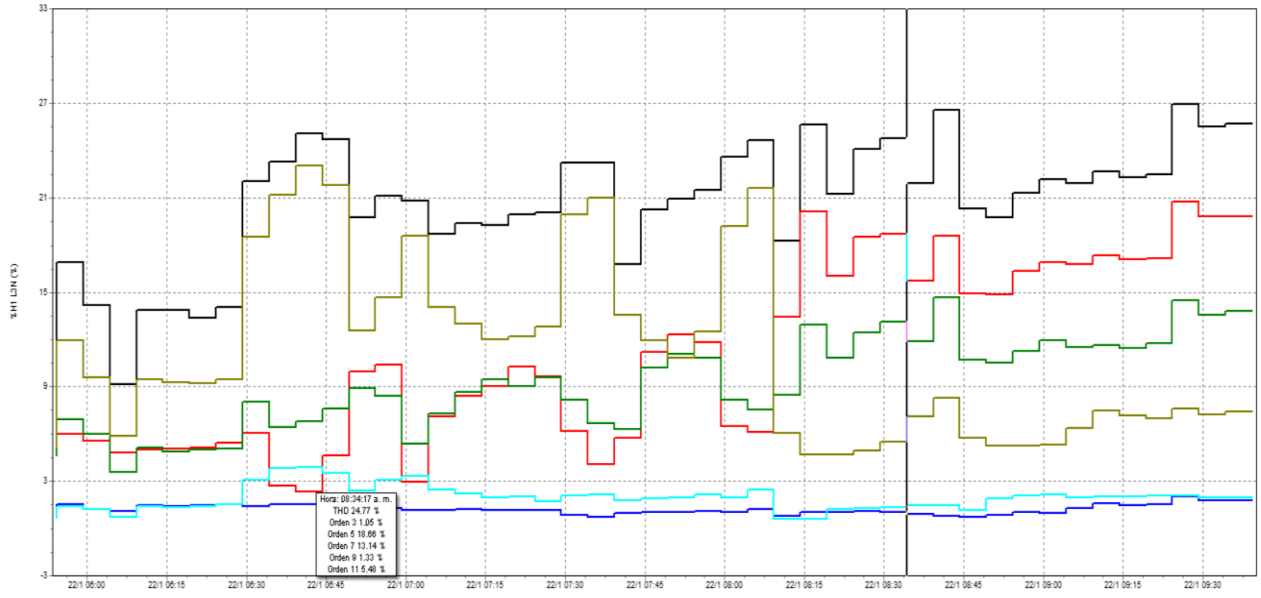


Fig 35 Evolución temporal en horario y armónicos seleccionados

#### 4.1.4.- Forma de onda con armónicos de acuerdo con evolución temporal

La forma de onda obtenida de acuerdo con la medición del lunes 22 de enero de 2024 en horario de 8:29 am a 8:34 am en la Fig 36 muestra la evolución del comportamiento de la corriente de la carga en el transformador de 1000 kVA.

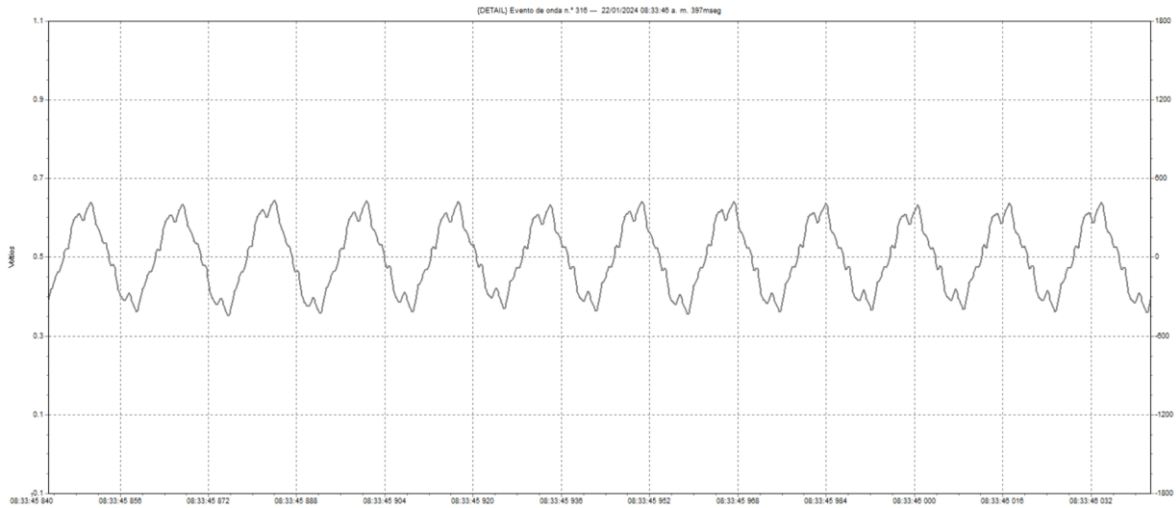


Fig 36 Evolución de la forma de onda en corriente

Se puede apreciar la presencia notoria del fenómeno de armónicos eléctricos en la forma de onda expuesta en la Fig 36, lo cual coincide con la evolución temporal en el histograma.

#### 4.1.5.- Datos obtenidos (corriente, voltaje, frecuencia, THD en voltaje y corriente, factor de potencia)

Mediante el software eléctrico de PowerLog 5.9 (compatible con analizador de redes Fluke) nos muestra datos históricos de corriente en la Tabla 9 y 10, voltaje, frecuencia y THD (en voltaje y corriente) mostrando los siguientes valores en el horario seleccionado del lunes 22 de enero de 2024 en horario de 8:29 am a 8:34 am:

Hora	Variable	L1	L2	L3
8:29:17 am	$V_{rms}$	258.54 V	258.28 V	257.92 V
8:29:17 am	$A_{rms}$	282 A	325 A	317 A
8:29:17 am	Frecuencia	59.969 Hz	59.969 Hz	59.969 Hz
8:29:17 am	$THD_V$	2.79%	2.61%	2.81%
8:29:17 am	$THD_A$	29.36%	23.13%	24.08%
8:29:17 am	Factor de potencia	0.9	0.93	0.88

*Tabla 9 Datos mostrados en horario de 8:29:17 am*

Hora	Variable	L1	L2	L3
8:34:17 am	$V_{rms}$	258.82 V	258.56 V	258.24 V
8:34:17 am	$A_{rms}$	288 A	323 A	315 A
8:34:17 am	Frecuencia	60.012 Hz	60.012 Hz	60.012 Hz
8:34:17 am	$THD_V$	2.71%	2.65%	2.83%
8:34:17 am	$THD_A$	28.63%	23.76%	24.77%
8:34:17 am	Factor de potencia	0.91	0.93	0.89

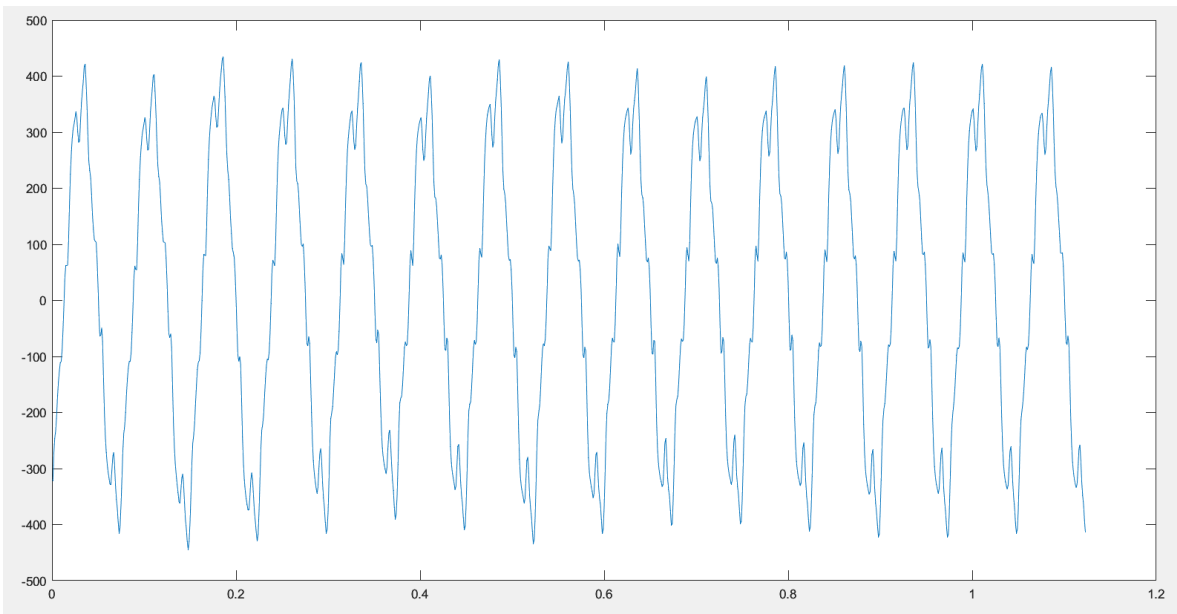
*Tabla 10 Datos mostrados en horario de 8:34:17 am*

Con los datos obtenidos se puede corroborar que efectivamente la onda que requiere corrección mediante un filtro es la onda de corriente expuesta en la Fig 36.

## 4.2.- Primera solución (Matlab y Simulink)

### 4.2.1.- Código de programación en Matlab para la onda seleccionada

Para la onda seleccionada se extrajeron los datos dados por PowerLog5.9 y en base en ellos se logró hacer un código de programación sencillo en el que se puede graficar corriente y tiempo como se muestra en la Fig 37, la cual coincide con la Fig 36 (Evolución de forma de onda en corriente).



*Fig 37 Grafica de corriente – Eje X (tiempo) y Eje Y (Corriente)*

Es apreciable que coincide con la Fig 36 ya que se pueden apreciar los armónicos eléctricos presentes en la forma de onda, y al tener un código de programación con variables establecidas y valores reales, es posible ejecutar una simulación en Simulink mediante bloques.

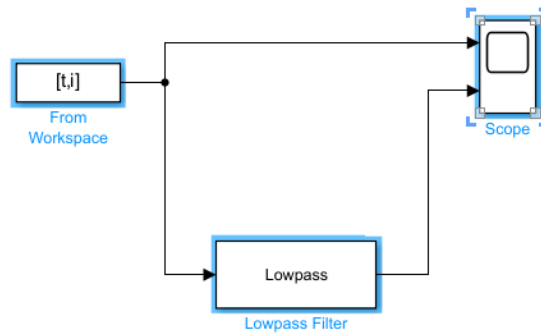
### 4.2.2.- Selección de bloques de programación en Simulink

Para la selección de bloques se buscó en la paquetería de Simulink lo más apropiado para poder realizar la simulación, dando como elección los siguientes bloques en la Fig 38:

1.- From workspace

2.- Lowpass Filter

3.- Scope



*Fig 38 Bloques seleccionados en Simulink para la simulación*

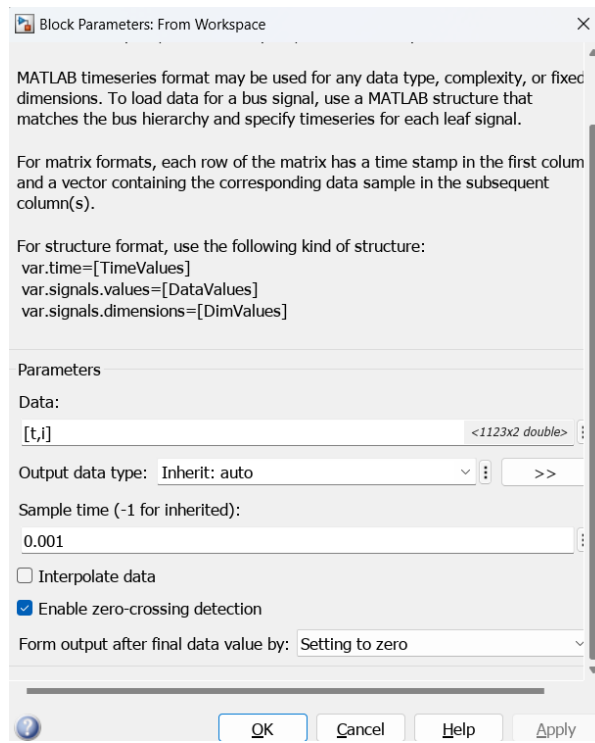
#### **4.2.3.- Descripción de bloques de programación en Simulink**

##### **1.- From workspace**

El bloque from workspace de trabajo lee datos en un modelo de Simulink<sup>®</sup> desde un espacio de trabajo y proporciona los datos como una señal o un bus no virtual en la salida del bloque. Puede cargar datos desde el espacio de trabajo base, el espacio de trabajo del modelo o el espacio de trabajo de máscara. Puede utilizar el bloque Desde el espacio de trabajo para cargar datos de señal en cualquier modelo o subsistema en una jerarquía de modelos desde un espacio de trabajo accesible al modelo o subsistema de referencia. [21]

Puede especificar cómo el bloque construye la salida a partir de los datos del espacio de trabajo, incluido el período de muestra de salida, el comportamiento de interpolación y extrapolación, y si se utilizará la detección de cruce por cero. [21]

En la Fig 39 se muestran los datos de entrada del bloque from workspace utilizados para la simulación.

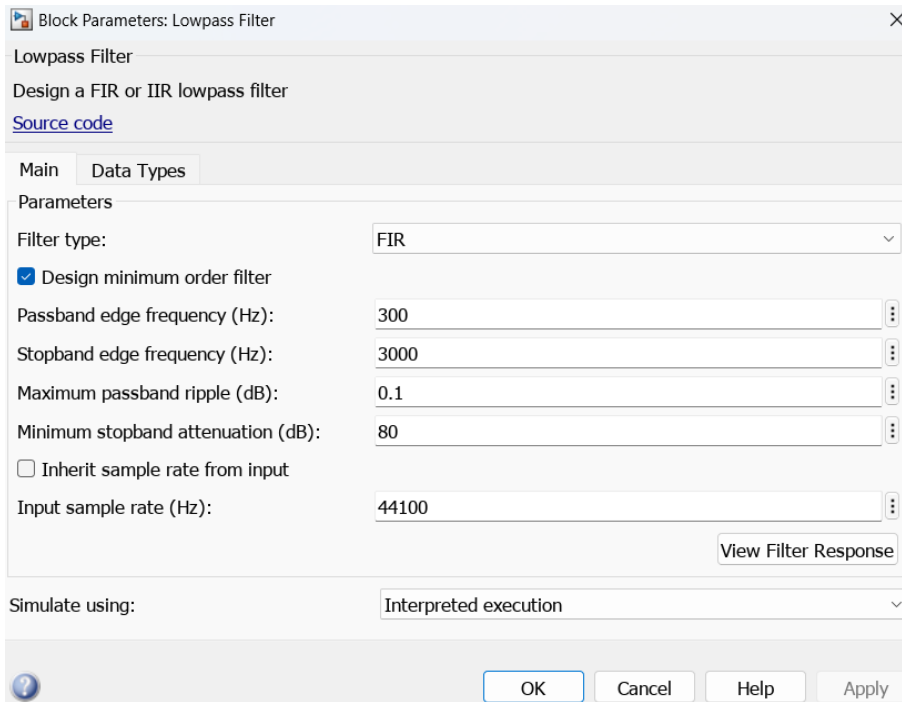


*Fig 39 Bloque from workspace con datos de entrada de variables de corriente y tiempo establecidos en el espacio de Matlab en código de programación*

## 2.- Lowpass filter

El bloque de lowpass filter filtra de forma independiente cada canal de la señal de entrada a lo largo del tiempo utilizando el diseño de filtro especificado por los parámetros del bloque. Puede controlar si el bloque implementa un filtro de paso bajo IIR o FIR utilizando el parámetro Tipo de filtro. Puede especificar las frecuencias de borde de banda de paso y banda de rechazo en Hz o en unidades de frecuencia normalizadas. [22]

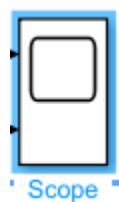
En la Fig 40 se muestran los datos de entrada del bloque lowpass filter utilizados para la simulación.



*Fig 40 Lowpass filter con datos de entrada de frecuencia de armónicos seleccionados con problemas (5to armónico 300 Hz – 50vo armónico 3000 Hz) que fueron los seleccionados en analizador de redes.*

### 3.- Scope

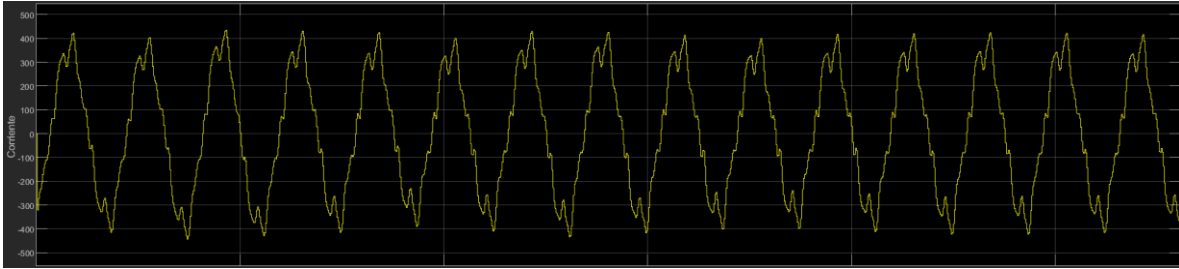
El Scope muestran señales del dominio del tiempo como se muestra en la Fig 41.



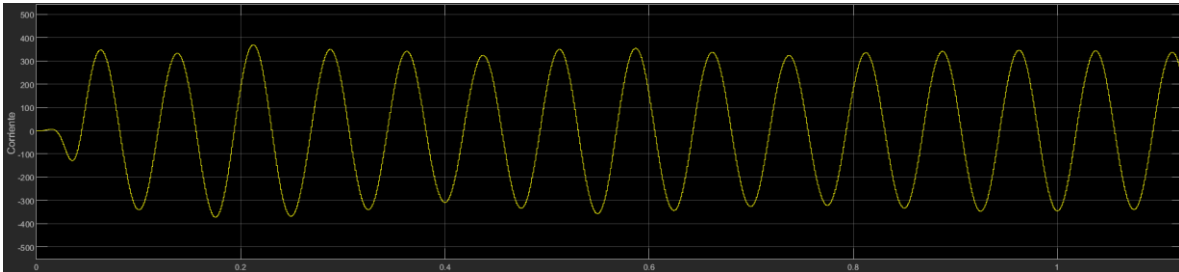
*Fig 41 Bloque de Scope*

#### 4.2.4.- Resultados obtenidos en Simulink

Aplicados los parámetros necesarios en los distintos bloques seleccionados se procedió a realizar la simulación en Simulink arrojando los siguientes resultados en las Fig 42 y Fig 43



*Fig 42 Gráfica correspondiente al código de programación extraído de los datos de la evolución de la forma de onda de corriente*



*Fig 43 Gráfica correspondiente a la corrección mediante filtro paso bajas con los parámetros correspondientes desde el 5to armónico hasta el 50vo armónico*

Con las Fig 42 y Fig 43 se puede comprobar la corrección de la forma de onda mediante un filtro pasivo y que como consecuencia mejora la calidad de energía y consumo energético en el sistema de potencia.

Desafortunadamente no se pueden comprobar más datos eléctricos en la corrección de simulación de onda más que la visualización de forma de onda con el filtro, que sin duda es un gran avance en la investigación, pero se requiere dimensionar el filtro en cuestión para poder dar una solución factible y tangible al usuario final.

### **4.3.- Segunda solución (ETAP)**

#### **4.3.1.- Diagrama unifilar y simulación en ETAP**

Para el modelamiento del sistema eléctrico de potencia se tuvo como apoyo el diagrama unifilar mostrado en el capítulo 3 correspondiente al primer transformador de 1000 kVA. En la Fig 44 se puede visualizar el modelo completo del diagrama unifilar en el software ETAP.

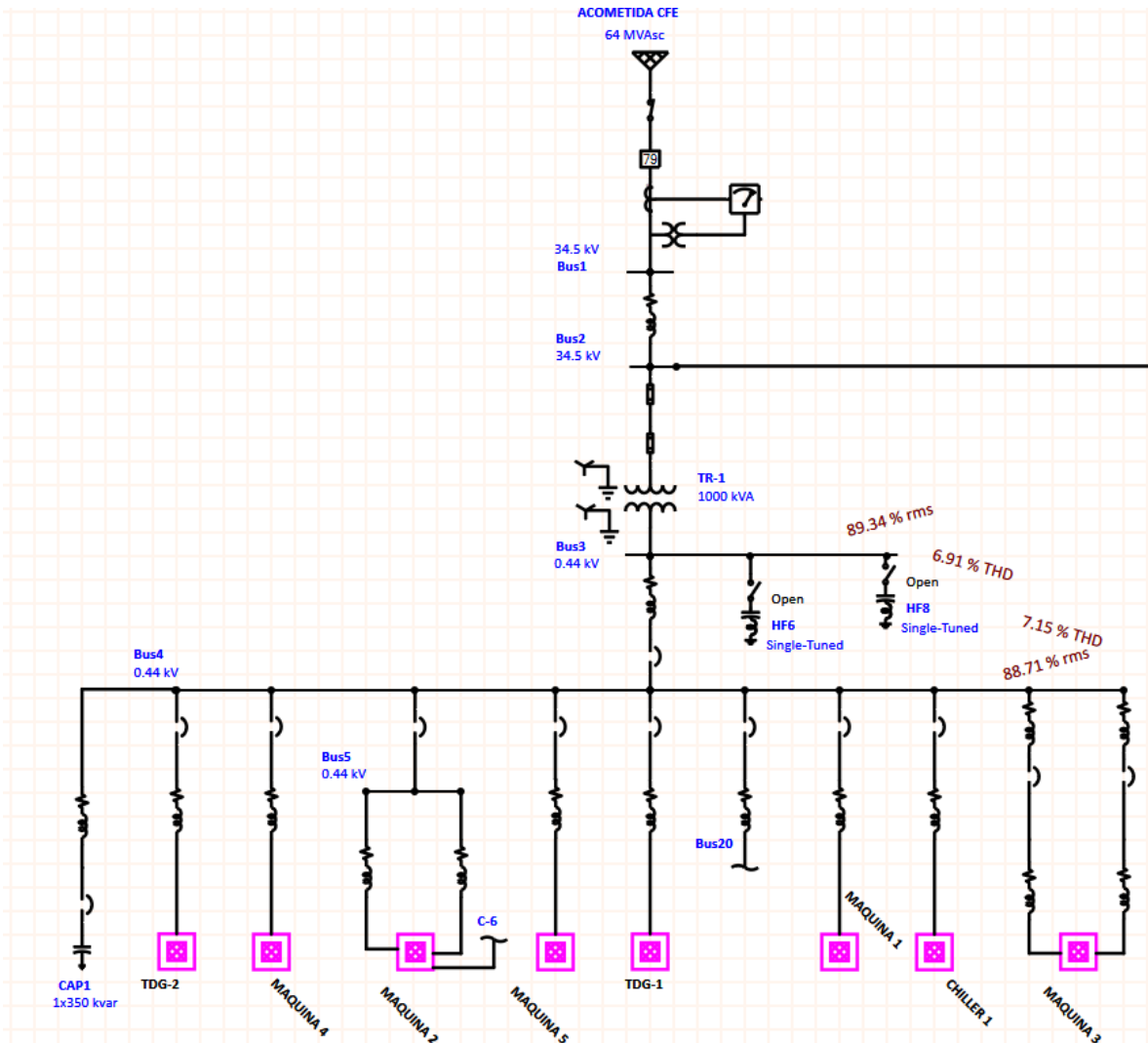
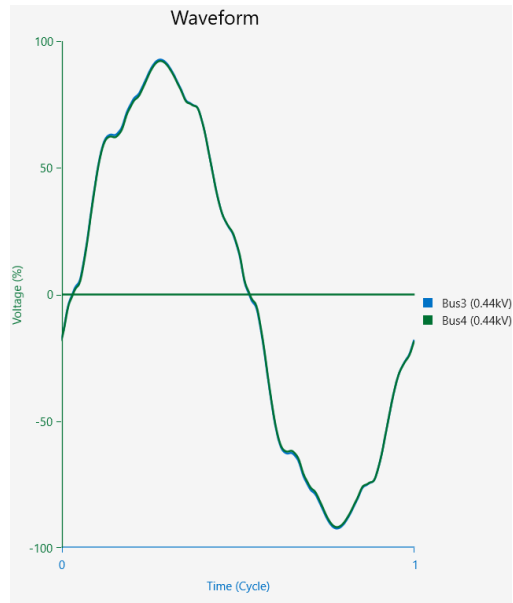


Fig 44 Diagrama unifilar correspondiente al transformador de 1000 kVA (transformador a estudiar) modelado en ETAP

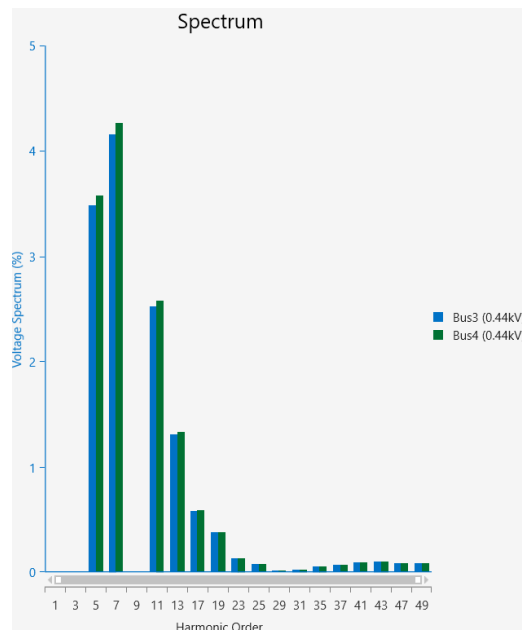
De la Fig 44 podemos asumir lo siguiente que es una simulación acertada ya que coinciden la mayor parte de los parámetros eléctricos que mostró el analizador de redes.

#### 4.3.2.- Forma de onda y armónicos resultantes en ETAP

Una vez realizada la simulación en el dominio armónico en ETAP, se pueden visualizar la forma de onda resultante con el histograma en cuestión, así como lo muestra la Fig 45 y Fig 46.



*Fig 45 Forma de onda resultante debido a la carga resultante en transformador de 1000 kVA*



*Fig 46 Espectro resultante de armónicos que afectan al sistema de potencia*

De la Fig 45 y la Fig 46 podemos comparar de la misma forma con los datos obtenidos en la primera solución (Simulink) y podemos apreciar que las formas de onda son similares, por lo tanto, se puede proceder con la solución de aplicar un filtro para mitigar los armónicos eléctricos en el sistema de potencia.

### 4.3.3.- Selección y cálculo del filtro que reducirá los armónicos eléctricos

De acuerdo con la Fig 46, los armónicos que más afectan al sistema son el 5to, 7mo y 11vo. Para la solución se planteará dos filtros pasivos conectados al bus principal de 440 V, los cuales mitigarán el 5to armónico y el 11vo armónico.

#### Calculo para armónico 11

$$\theta_{ff} = 531.9 \text{ kVAR} \dots \dots \dots Ec \text{ (23)}$$

$$X_{ff} = \frac{V_{LL}^2}{\theta_{ff}} = \frac{440V^2}{531.9 \text{ kVAR}} = 0.3639 \Omega \dots \dots \dots Ec \text{ (24)}$$

$$\begin{aligned} X_c^* = X_L^* &= \left( \frac{h^2}{h^2 - 1} \right) (X_{ff}) = \left( \frac{10.34^2}{10.34^2 - 1} \right) (0.3639 \Omega) \\ &= 0.3673 \Omega \dots \dots \dots Ec \text{ (25)} \end{aligned}$$

Donde “h” representa el armónico seleccionado menos el 6% del mismo armónico, en este caso fue seleccionado el armónico 11 menos su 6% da como resultado 10.34.

$$C = -\frac{1}{j2\pi f X_c^*} = 7221.84 \mu F \dots \dots \dots Ec \text{ (26)}$$

$$X_L = \frac{X_L^*}{h^2} = \frac{0.3673 \Omega}{10.34^2} = 0.00343 H \dots \dots \dots Ec \text{ (27)}$$

$$R = \frac{X_L h}{Q_f} = \frac{(3.43 \text{ mH})(10.34)^2}{20} = 0.0183360 \Omega \dots \dots \dots Ec \text{ (28)}$$

Donde  $Q_f$  es el factor de calidad, en este caso seleccionado de 20

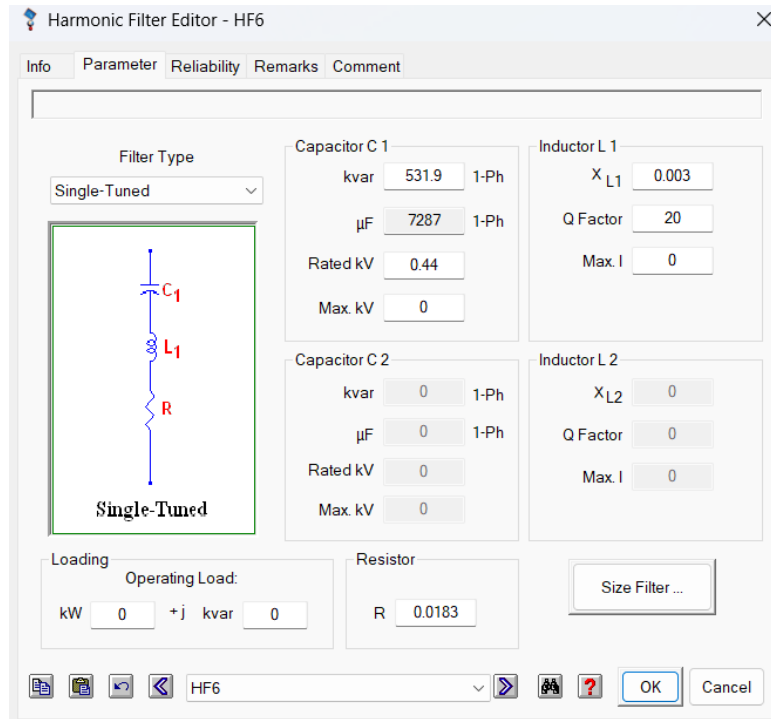


Fig 47 Calculo de filtro pasivo para 11vo armónico otorgado por ETAP

### Calculo para armónico 5

$$\theta_{ff} = 317.1 \text{ kVAR} \dots \dots \dots \text{Ec (29)}$$

$$X_{ff} = \frac{V_{LL}^2}{\theta_{ff}} = \frac{440V^2}{317.1 \text{ kVAR}} = 0.6105 \Omega \dots \dots \dots \text{Ec (30)}$$

$$\begin{aligned} X_c^* = X_L^* &= \left( \frac{h^2}{h^2 - 1} \right) (X_{ff}) = \left( \frac{4.7^2}{4.7^2 - 1} \right) (0.6105 \Omega) \\ &= 0.6394 \Omega \dots \dots \dots \text{Ec (31)} \end{aligned}$$

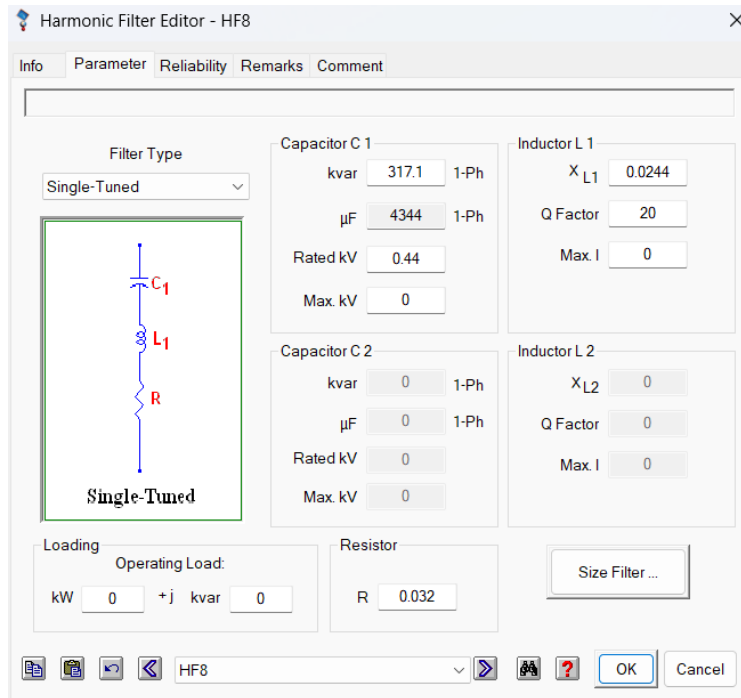
Donde “h” representa el armónico seleccionado menos el 6% del mismo armónico, en este caso fue seleccionado el armónico 11 menos su 6% da como resultado 10.34.

$$C = -\frac{1}{j2\pi f X_c^*} = 4148.54 \mu F \dots \dots \dots \text{Ec (32)}$$

$$X_L = \frac{X_L^*}{h^2} = \frac{0.6394 \Omega}{4.7^2} = 0.0289 H \dots \dots \dots \text{Ec (33)}$$

$$R = \frac{X_L h}{Q_f} = \frac{(0.0289 H)(4.7)^2}{20} = 0.03197 \Omega \dots \dots \dots Ec (34)$$

Donde  $Q_f$  es el factor de calidad, en este caso seleccionado de 20



*Fig 48 Calculo de filtro pasivo para 5to armónico otorgado por ETAP*

Al realizar los cálculos pertinentes a los filtros y haciendo la comparativa con los resultados de ETAP como solución, podemos rectificar que fueron obtenidos de manera fiel y se puede continuar con una nueva simulación aplicando los filtros obtenidos para poder visualizar si en efecto hubo disminución del problema de armónicos eléctricos en el sistema de potencia.

#### **4.3.4.- Forma de onda corregida y armónicos existentes después de simulación**

De la Fig 49 se puede observar en el diagrama unifilar la disminución del THD en el bus principal del sistema de potencia en baja tensión, así como el aumento del factor de potencia. Esto fue posible gracias a los dos filtros previamente calculados y conectados en el bus principal del sistema.

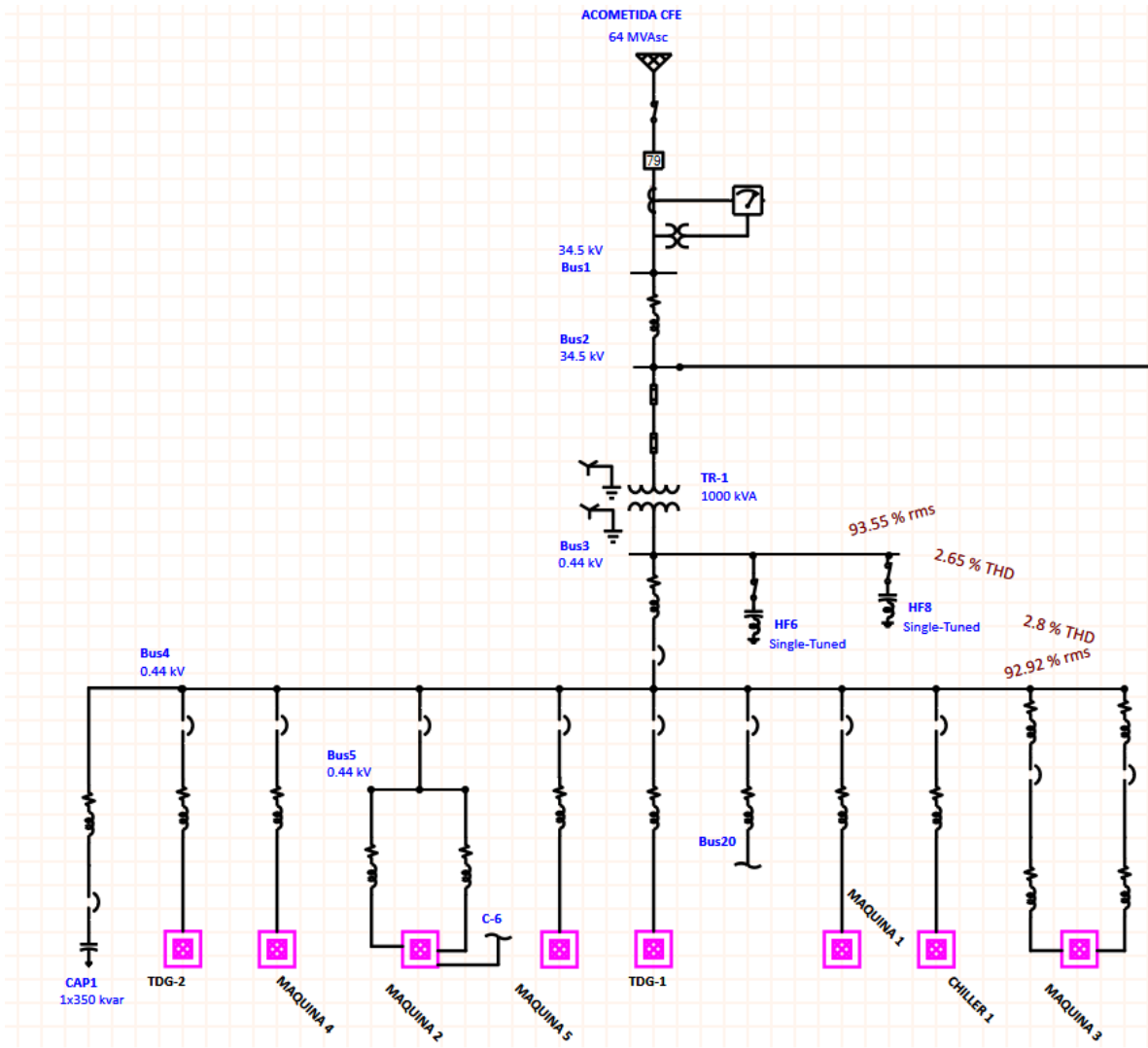


Fig 49 Diagrama unifilar con datos de corrección de armónicos eléctricos en transformador de 1000 kVA

En la Fig 50 y Fig 51 se puede ver el cambio en la forma de onda y el espectro de armónicos con la aplicación de ambos filtros pasivos y que se asemeja a la solución obtenida en Simulink.

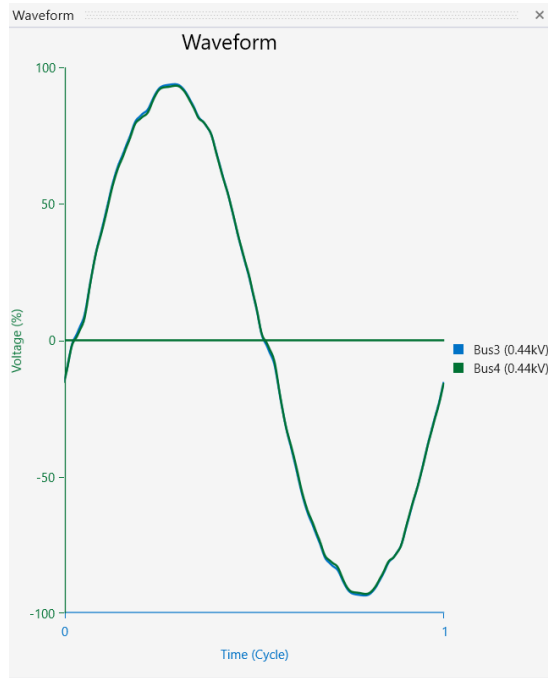


Fig 50 Forma de onda resultante corregida con carga en el transformador de 1000 kVA

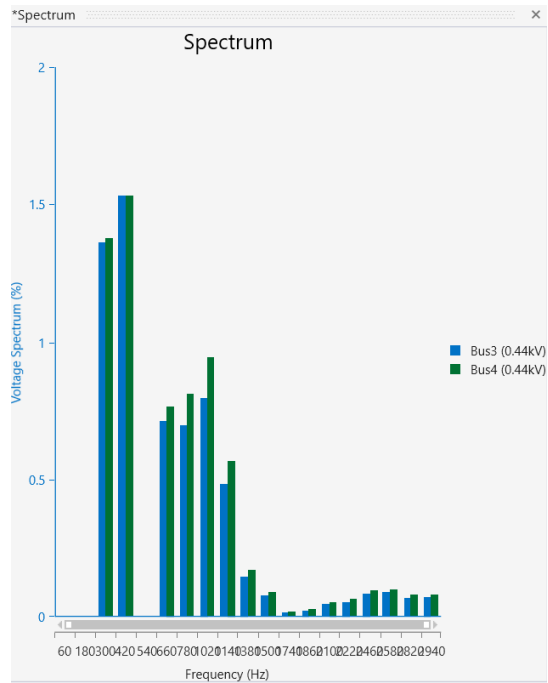


Fig 51 Disminución del espectro de armónicos que afectan al sistema de potencia

#### 4.4.- Cálculos de resonancia y simulaciones adicionales

Uno de los cálculos complementarios al problema de investigación es el de resonancia. En este caso se exponen dos cálculos de resonancia:

- a) Resonancia armónica en banco de capacitores de 350 kVAR
- b) Resonancia en los filtros calculados para el 5to armónico y 11vo armónico

##### 4.4.1.- Circuito resonante en banco de capacitores de 350 kVAR

De acuerdo con la teoría expuesta en la *Ec (20)* se puede sustituir con los valores reales.

$$f_1 = 60 \text{ Hz}$$

$$MVA_{cc} = \frac{1 \text{ MVA (Capacidad del transformador)}}{0.0521 \text{ (Impedancia del transformador)}} = 19.19 \text{ MVA}_{cc}$$

$$MVA_{CAP} = 350 \text{ kVAR}$$

$$f_0 = 60 \times \sqrt{\frac{19.19 \text{ MVA}_{cc}}{0.350 \text{ MVAR}_{CAP}}} = 444.27 \text{ Hz} = 8\text{vo armónico} \dots \dots \dots \text{Ec (35)}$$

El bus del banco de capacitores entrará en resonancia a partir del 8vo armónico.

##### 4.4.2.- Resonancia en filtros calculados

De acuerdo con la teoría expuesta en la *Ec (22)* se puede sustituir con los valores reales.

**Calculo para filtro del 11vo armónico:**

$$L = 0.00343 \text{ H}$$

$$L_s = 7.04 \Omega$$

$$C = 7221.84 \mu F$$

$$f_{rp} = \frac{1}{2\pi \sqrt{(0.00343 H + \frac{7.04 \Omega}{2\pi (60 Hz)}) (7221.84 \mu F)}} = 12.59 Hz \dots \dots Ec (36)$$

**Calculo para filtro del 5to armónico:**

$$L = 0.0289 H$$

$$L_s = 7.04 \Omega$$

$$C = 4148.54 \mu F$$

$$f_{rp} = \frac{1}{2\pi \sqrt{(0.0289 H + \frac{7.04 \Omega}{2\pi (60 Hz)}) (4148.54 \mu F)}} = 11.32 Hz \dots \dots Ec (38)$$

En ambos casos no se esperan afectaciones al sistema ya que muestran unas frecuencias de resonancias muy bajas, por lo tanto, podemos tener seguridad que los filtros calculados tendrán buena respuesta y mitigación a armónicos eléctricos.

#### 4.4.3.- Simulaciones adicionales

Las simulaciones presentadas se realizaron considerando las cargas siempre activas, en las siguientes simulaciones se hizo un comparativo reduciendo carga y aplicando los filtros calculados, dando como resultado lo expuesto en la Tabla 11.

SIMULACIÓN	F.P	THD	FLUJOS DE POTENCIA EN BUS 4
DIAGRAMA COMPLETO S/FILTRO	88.48%	7.15%	3312 KVA, 4877 A
DIAGRAMA COMPLETO C/FILTRO	92.89%	2.80%	3448 KVA, 4838 A
SIN MAQUINA 1 S/FILTRO	89.72%	6.74%	3179 KVA, 4618 A
SIN MAQUINA 1 C/FILTRO	94.12%	2.59%	3313 KVA, 4591 A
SIN MAQUINA 1 Y 2 S/FILTRO	91.53%	6.88%	2998 KVA, 4299 A
SIN MAQUINA 1 Y 2 C/FILTRO	95.38%	2.58%	3137 KVA, 4292 A
SIN MAQUINA 1,2 y 3 S/FILTRO	91.49%	6.51%	2884 KVA, 4133 A
SIN MAQUINA 1,2 y 3 C/FILTRO	95.90%	2.38%	3018 KVA, 4108 A
SIN MAQUINA 1,2, 3 Y 4 S/FILTRO	93.41%	6.39%	2528 KVA, 3536 A
SIN MAQUINA 1,2, 3 Y 4 C/FILTRO	97.83%	2.22%	2659 KVA, 3552 A
SIN MAQUINA 1,2,3, 4 Y 5 S/FILTRO	95.95%	6.10%	2137 KVA, 2914 A
SIN MAQUINA 1,2,3, 4 Y 5 C/FILTRO	100.40%	2.03%	2272 KVA, 2962 A
SIN TDG-2 S/FILTRO	93.30%	7.61%	2243 KVA, 3142 A
SIN TDG-2 C/FILTRO	97.86%	2.37%	2324 KVA, 3104 A

*Tabla 11 Simulaciones adicionales*

Se actualizó la Tabla 11 con el dato de flujos de potencia en el nodo de interés (donde se están aplicando los filtros para mitigación de armónicos eléctricos) para ver como interactúan con ellos, y en efecto, se puede observar una mejora sustancial tanto en potencia aparente como en corriente demandada, teniendo efecto positivo los filtros empleados en el sistema eléctrico de potencia.

## 4.5.- Conclusiones

Después de analizar los diferentes resultados obtenidos en las simulaciones efectuadas se realizan las siguientes conclusiones.

- 1.- Es posible reducir el porcentaje de THD en corriente con la aplicación de los filtros pasivos y entrar en índices normativos aceptables.
- 2.- Con la aplicación de los filtros pasivos es posible elevar el factor de potencia hasta en un 6%.
- 3.- Después de la aplicación de los filtros pasivos en el sistema el sistema de potencia se pudo apreciar el mejoramiento de la forma de onda pasando de una onda con altos niveles de armónicos a una forma de onda casi senoidal.
- 4.- Hay que tener en consideración la resonancia para evitar problemas futuros en nuestra instalación eléctrica de cualquier giro.
- 5.- La presencia de armónicos eléctricos no se podrá eliminar al 100% pero si se puede reducir considerablemente con la ayuda de distintos tipos de filtros.

#### 4.6.- Recomendaciones para futuros trabajos

Después del análisis de resultados en los diferentes softwares en los que se abarco el caso de estudio, se hace énfasis en los siguientes puntos.

1.- Es posible determinar la serie de Fourier con la forma de onda proporcionada de acuerdo con las mediciones realizadas en IPP.

2.- En la simulación de Simulink, se realizó con los datos reales obtenidos en mediciones, sin embargo, es posible establecer un modelo con los diferentes bloques eléctricos para hacer una simulación desde un sistema eléctrico basándose en el diagrama unifilar existente del transformador del caso de estudio.

3.- En la simulación de ETAP, se considera en los cálculos y en el software la aplicación del filtro con un factor de calidad muy bueno, esto puede variar de acuerdo con la existencia de un filtro comercial real.

4.- Se puede tomar como base esta tesis como referencia para aplicación de futuros estudios armónicos en empresas de diferentes giros del ramo industrial que deseen mejorar la calidad de energía en su sistema de potencia.

Se planea a futuro implementar el filtro calculado y simulado en IPP para reflejar las ventajas que tienen los filtros en la industria.

## Bibliografía

- [1] IECOR. (10 de Septiembre de 2023). *Calidad de energía eléctrica*. <https://www.iecor.com/calidad-de-energia-electrica/>
- [2] Gomez. D. (Noviembre 2015). Reporte ¡Calidad de energía eléctrica, *Jocar Eléctrica del Centro S. de R.L de C.V*, 5
- [3] Tejada. A, Llamas. A (2010). Efectos de las armónicas en los sistemas eléctricos, *Departamento de Ingeniería Eléctrica del ITESM Campus Monterrey*, 1-2.
- [4] PTOLOMEO UNAM (7 de diciembre de 2023). *Armónicas*. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/293/A6.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
- [5] AESoluciones Productos y Servicios para GRANDES CLIENTES (9 de diciembre de 2023). *LOS EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS Y SUS SOLUCIONES*. <https://agngroup.net/papers/boletin%20aes%20soluciones%20armo>
- [6] Harper, G. (2006). *La calidad de la energía en los sistemas eléctricos*. México D.F: Limusa.
- [7] Vásquez, C. Luna, M. Pérez, R. Osal, W. Blanco C. (2012). Interrupciones del suministro eléctrico: Una revisión de su impacto y de las técnicas de mantenimiento preventivo. *Tenth LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2012)*, 1-2.
- [8] Universidad Nacional Autónoma de México. (28 de mayo de 2024). *Disturbios eléctricos*.
- [9] Marín. J. (Septiembre 2009). Desbalance de tensiones en sistemas trifásicos, *Ecamec Tecnología* , 1-2
- [10] Arcila, D. (2020). Armónicos en los sistemas eléctricos, *Ingeniería especializada S.A*, 16

- [11] Harper, G. (2006). *El ABC de la calidad de la energía eléctrica*. México D.F: Limusa
- [12] Dai, J. Shokooh, F. (Septiembre 2018). Recommended practice for conducting harmonic studies and analysis of industrial and commercial power systems. *IEEE 3002 STANDARDS: POWER SYSTEMS ANALYSIS*, 54-55
- [13] Sánchez, M. (Febrero 2009). *Calidad de la energía eléctrica*. Puebla, Pue. Instituto Tecnológico de Puebla - Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.
- [14] Asociación de Normalización y certificación, A.C. (Agosto 2021). *Armonicas y factor de potencia*. Ciudad de México. 9-10.
- [15] Dugan, R. McGranahan, M. Santoso, S. Waynebeaty, H. (2012). *Electrical Power Systems Quality*. Estados Unidos de América: McGrawHill
- [16] Barcón, S. Guerrero, R. Martínez, I. (2012). *Calidad de la energía, factor de potencia y filtrado de armónicas*. México D.F: McGrawHill
- [17] A. Moreno-Muñoz, *Power Quality*. Londres: Springer, 2007
- [18] Analizador de redes FLUKE. <https://www.fluke.com/es-mx/producto/comprobacion-electrica/calidad-electrica/434-435>
- [19] Ingeniería en Plástico de Puebla. (4 de junio de 2024). <https://www.ippplastic.com/index.html#header4-a>
- [20] Fluke Corporation. (2012). *Fluke 434-II/435-II/437-II Analizador trifásico de energía y calidad de la energía eléctrica*. (Rev.1 06/12)
- [21] From Workspace – Simulink Model (11 de diciembre de 2024) <https://la.mathworks.com/help/simulink/slref/fromworkspace.html>
- [22] Lowpass Filter – Simulink Model (11 de diciembre de 2024) <https://la.mathworks.com/help/dsp/ref/lowpassfilter.html>