



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD PROFESIONAL ADOLFO LÓPEZ MATEOS “ZACATENCO”**

**“ANÁLISIS DE CONTENIDO ARMÓNICO, CÁLCULO Y
SELECCIÓN DE FILTRO PASIVO EN LA ESTACIÓN DE
SELECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS SAN JUAN DE
ARAGÓN UTILIZANDO EL SOFTWARE ETAP”**

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA**

PRESENTAN

MONES RIVERO LUIS ANTONIO

ROBLES ARANDA JESUS

ASESORES

M. EN C. MANUEL TORRES SABINO

M. EN C. MANUEL ÁGUILA MUÑOZ



Ciudad de México, julio 2022.

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS”

T E M A D E T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN
DEBERA (N) DESARROLLAR**

**INGENIERO ELECTRICISTA
TESIS COLECTIVA Y EXAMEN ORAL INDIVIDUAL
C. LUIS ANTONIO MONES RIVERO
C. JESUS ROBLES ARANDA**

“ANÁLISIS DE CONTENIDO ARMÓNICO, CÁLCULO Y SELECCIÓN DE FILTRO PASIVO EN LA ESTACIÓN DE SELECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS SAN JUAN DE ARAGÓN UTILIZANDO EL SOFTWARE ETAP”

ESTIMAR Y ANALIZAR EL CONTENIDO ARMÓNICO EN LA ESTACIÓN DE SELECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS SAN JUAN DE ARAGÓN PARA PROPONER LA UBICACIÓN DE FILTROS DENTRO DE LA MISMA, CONSIDERANDO LA NORMATIVIDAD VIGENTE MEDIANTE UN SOFTWARE ESPECIALIZADO.

- ❖ **INTRODUCCIÓN**
- ❖ **GENERALIDADES DE REDES ELÉCTRICAS**
- ❖ **ARMÓNICOS**
- ❖ **ANÁLISIS DE CONTENIDO ARMÓNICO**
- ❖ **ESTUDIO ECONÓMICO**

CIUDAD DE MÉXICO, A 04 DE JULIO DE 2022.

ASESORES


**M. EN C. MANUEL TORRES
SABINO**


**M. EN C. MANUEL ÁGUILA
MUÑOZ**


**ING. BULMARO SÁNCHEZ HERNÁNDEZ
JEFE DE LA CARRERA DE
INGENIERÍA ELÉCTRICA**



Instituto Politécnico Nacional

Presente

Bajo protesta de decir verdad los que suscriben **LUIS ANTONIO MONES RIVERO** y **JESUS ROBLES ARANDA**, manifestamos ser autores y titulares de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada “**ANÁLISIS DE CONTENIDO ARMÓNICO, CÁLCULO Y SELECCIÓN DE FILTRO PASIVO EN LA ESTACIÓN DE SELECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS SAN JUAN DE ARAGÓN UTILIZANDO EL SOFTWARE ETAP**”, en adelante “**La Tesis**” y de la cual se adjunta copia en un impreso y un cd por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgamos al **INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**, en adelante **EI IPN**, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales o en cualquier otro medio; para apoyar futuros trabajos relacionados con el tema de “**La Tesis**” por un periodo de **3 años** contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a **EI IPN** de su terminación.

En virtud de lo anterior, **EI IPN** deberá reconocer en todo momento nuestra calidad de autores de “**La Tesis**”.

Adicionalmente, y en nuestra calidad de autores y titulares de los derechos morales y patrimoniales de “**La Tesis**”, manifestamos que la misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por los suscritos respecto de “**La Tesis**”, por lo que deslindamos de toda responsabilidad a **EI IPN** en caso de que el contenido de “**La Tesis**” o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumimos las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Ciudad de México., a 07 de diciembre de 2022.

Atentamente


Luis Antonio Mones Rivero


Jesus Robles Aranda

RESUMEN

El análisis y regulación del contenido armónico en ambientes industriales ha tomado relevancia en los últimos años debido a que con el desarrollo de la electrónica de potencia estas perturbaciones en la energía están provocando en las instalaciones sobrecarga y degradación de los conductores, resonancia, disparo de protecciones, mal funcionamiento de equipo sensible, etc.

En el presente trabajo se analizaron los niveles de contenido armónico en la Estación de Selección de Residuos Sólidos San Juan Aragón mediante el software especializado ETAP. Este análisis se desarrolló a través de tres casos de estudio, el primero consistió en analizar la instalación sin ningún tipo de compensación reactiva dando como resultado un bajo factor de potencia y niveles de contenido armónico dentro de los límites permisibles indicados en la normativa. El segundo caso consistió en la instalación de un banco de capacitores para compensar el bajo factor de potencia a niveles establecidos en el Código de Red. Dicha implementación tuvo como consecuencia un incremento en los niveles de distorsión armónica en la instalación eléctrica. En el tercer caso se analizó la Estación de Selección de Residuos Sólidos conectando un filtro sintonizado simple. Al completar el análisis se hace la selección de dicho filtro para solucionar el problema del factor de potencia y los niveles de contenido armónico.

Finalmente, se hace el estudio económico en el cual se puede ver que los gastos generados por la implementación del filtro armónico en la instalación pueden ser amortizados considerando el esquema de bonificación por parte de la compañía suministradora.

CONTENIDO

RESUMEN	i
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABLAS.....	viii
NOMENCLATURA	ix
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	x
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN	2
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.3 OBJETIVO GENERAL	4
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.5 JUSTIFICACIÓN	5
1.6 ALCANCES.....	6
1.7 ANTECEDENTES.....	7
1.8 ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	11
CAPÍTULO 2 GENERALIDADES DE REDES ELÉCTRICAS.....	12
2.1 SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	13
2.1.1 Sistema de distribución radial.....	14
2.1.2 Sistema de distribución en anillo	14
2.1.3 Sistema de distribución mallado	15
2.1.4 Tipos de usuarios en sistemas de distribución	16
2.2 CARGAS ELÉCTRICAS.....	17
2.2.1 Cargas lineales.....	17
2.2.2 Cargas no lineales.....	18

2.2.3	Cargas sensibles	20
2.2.4	Cargas críticas.....	20
2.3	TIPOS DE PERTURBACIONES EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS	21
2.3.1	Variaciones de tensión	21
2.3.2	Variaciones de frecuencia	26
CAPÍTULO 3 ARMÓNICOS.....		28
3.1	ORIGEN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA	29
3.2	CARACTERÍSTICAS.....	29
3.2.1	Factor de potencia y $\cos \phi$	32
3.2.2	Cantidades que describen la distorsión de tensión y corriente	38
3.3	EFFECTOS DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA	39
3.3.1	Resonancia.....	40
3.3.2	Máquinas rotatorias	42
3.3.3	Transformadores	44
3.3.4	Comunicaciones	45
3.3.5	Sobrecarga y degradación de los conductores.....	46
3.3.6	Sistemas de protección	46
3.4	FUENTES DE ARMÓNICOS	47
3.4.1	Convertidores estáticos	48
3.4.2	Equipo electrónico	49
3.4.3	Equipos no lineales de corriente y tensión	49
3.4.4	Equipos ferromagnéticos	49
3.4.5	Transformadores	50
3.4.6	Motores eléctricos.....	50
3.4.7	Hornos de arco	50

3.5	SOLUCIONES A LOS ARMÓNICOS	51
3.5.1	Filtro Pasivo.....	51
3.5.2	Filtro Activo.....	55
3.5.3	Factor K en transformadores	56
3.6	NORMATIVIDAD APLICABLE	57
3.6.1	Especificación CFE L0000-45, Desviaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente en el suministro y consumo de energía eléctrica.	57
3.6.2	Código de Red.....	58
3.6.3	IEC 61000-4-30	58
3.6.4	IEEE 519	59
CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE CONTENIDO ARMÓNICO.....		61
4.1	INTRODUCCIÓN	62
4.2	DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN	62
4.3	METODOLOGÍA	64
4.3.1	Primer caso: Sistema sin compensación reactiva.....	64
4.3.2	Análisis de resultados para el primer caso de estudio.....	67
4.3.3	Segundo caso: Sistema con compensación reactiva.....	69
4.3.4	Análisis de resultados para el segundo caso de estudio	74
4.3.5	Tercer caso: Sistema con compensación reactiva más filtro sintonizado simple.	76
4.3.6	Análisis de resultados para el tercer caso de estudio.....	80
CAPÍTULO 5 ESTUDIO ECONÓMICO		82
5.1	Estimación de costos	83
5.2	Penalización por bajo factor de potencia.....	91
5.3	Bonificación por alto factor de potencia.....	94

CONCLUSIONES.....	97
RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.....	98
REFERENCIAS.....	100
ANEXO 1.....	104
ANEXO 2.....	113
COTIZACIONES	113
ANEXO 3.....	117
DIAGRAMA UNIFILAR.....	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Sistema de distribución radial.	pag. 14
Figura 2.2	Sistema de distribución en anillo.	pág. 15
Figura 2.3	Sistema de distribución mallado.	pág. 16
Figura 2.4	Oscilograma de tensión y corriente debidas a una carga lineal.	pág. 18
Figura 2.5	Oscilograma de tensión y corriente debidas a una carga no lineal.	pág. 19
Figura 2.6	Variaciones de tensión.	pág. 22
Figura 2.7	Caída de tensión.	pág. 24
Figura 2.8	Incremento de tensión.	pág. 25
Figura 2.9	Variación de la frecuencia.	pág. 27
Figura 3.1	Onda resultante de la suma de los primeros tres armónicos.	pág. 30
Figura 3.2	Espectro de frecuencias para una onda cuadrada	pág. 32
Figura 3.3	Ondas de tensión y corriente sinusoidales.	pág. 33
Figura 3.4	Onda de tensión sinusoidal y onda de corriente no sinusoidal.	pág. 34
Figura 3.5	Representación de potencias en presencia de armónicos.	pág. 37
Figura 3.6	Circuito con resonancia serie.	pág. 40
Figura 3.7	Circuito con resonancia paralelo del capacitor con la impedancia de cortocircuito.	pág. 42
Figura 3.8	Corriente de magnetización con respecto al tiempo.	pág. 45
Figura 3.9	Conexión de filtro activo.	pág. 55
Figura 4.1	Motores que conforman el proceso de selección de residuos.	pág. 63
Figura 4.2	Motores que conforman el proceso de compactación.	pág. 63
Figura 4.3	Flujo de potencia sin compensación reactiva.	pág. 64

Figura 4.4	Onda y espectro armónico resultante en el Tablero Principal.	pág. 65
Figura 4.5	Onda y espectro armónico resultante en el transformador principal.	pág. 66
Figura 4.6	Escaneo de frecuencia en el Tablero Principal.	pág. 67
Figura 4.7	Flujo de potencia con compensación reactiva.	pág. 70
Figura 4.8	Onda y espectro armónico resultante en el Tablero Principal.	pág. 71
Figura 4.9	Onda y espectro armónico resultante en el transformador principal.	pág. 72
Figura 4.10	Escaneo de frecuencia en el Tablero Principal.	pág. 73
Figura 4.11	Amplificación del punto resonante paralelo presente en el Tablero Principal.	pág. 74
Figura 4.12	Flujo de potencia con compensación reactiva más filtro sintonizado simple.	pág.77
Figura 4.13	Onda y espectro armónico resultante en el Tablero Principal.	pág.77
Figura 4.14	Onda y espectro armónico resultante en el transformador principal.	pág.78
Figura 4.15	Escaneo de frecuencia en el Tablero Principal.	pág.79
Figura 4.16	Amplificación de los puntos resonantes presentes en el Tablero Principal.	pág.79
Figura 5.1	Tipo de cambio de dólares estadounidenses a pesos mexicanos.	pág.86
Figura 5.2	Periodos de base, intermedia y punta.	pág.92
Figura 5.3	Cargos de las tarifas finales del suministro básico.	pág.93
Figura 5.4	Estimación por concepto de energía con bajo factor de potencia.	pág.93
Figura 5.5	Estimación por concepto de energía con alto factor de potencia.	pág.95
Figura 5.6	Gráfica de punto de equilibrio..	pág.96

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1	Comparación de filtros pasivos.	pág. 54
Tabla 3.2	Clasificación del factor K para transformadores.	pág. 56
Tabla 4.1	Parámetros de THD y factor de potencia para el primer caso de estudio.	pág.59
Tabla 4.2	Distorsión armónica máxima permitida en corriente hasta 69 kV.	pág.60
Tabla 4.3	Límites máximos de distorsión armónica total en la tensión.	pág.67
Tabla 4.4	Parámetros de THD y factor de potencia para el segundo caso de estudio.	pág.68
Tabla 4.5	Parámetros de THD y factor de potencia para el tercer caso de estudio.	pág.80
Tabla 5.1	Costos totales de la visita de la instalación.	pág.84
Tabla 5.2	Costo de las licencias de los softwares utilizados.	pág.85
Tabla 5.3	Costos de la utilización de los softwares.	pág.86
Tabla 5.4	Cotización del banco de capacitores de 450 kVAR con reactor de rechazo en el 5to armónico.	pág.87
Tabla 5.5	Cotización del conductor 350 MCM.	pág.88
Tabla 5.6	Cotización de interruptor termomagnético.	pág.88
Tabla 5.7	Precios del equipo utilizado externo para realizar el análisis del contenido armónico.	pág.90
Tabla 5.8	Resumen de gastos.	pág.90

NOMENCLATURA

S_1	Potencia aparente a frecuencia fundamental.
Q_1	Potencia reactiva a frecuencia fundamental.
V_{ef}	Tensión eficaz o r.m.s.
I_{ef}	Corriente eficaz o r.m.s.
FP1	Factor de potencia inicial (antes de compensación reactiva).
FP2	Factor de potencia final (después de compensación reactiva).
THD _i	Distorsión armónica total (corriente) - <i>Total Harmonic Distortion</i> .
THD _v	Distorsión armónica total (tensión) - <i>Total Harmonic Distortion</i> .
X_{C1}	Reactancia capacitiva a frecuencia fundamental.
X_{C5}	Reactancia capacitiva a la quinta armónica.
X_{L1}	Reactancia inductiva a frecuencia fundamental.
PCC	Punto de acoplamiento común - <i>Point of Common Coupling</i>
kW	kilo-watt
kWh	kilo-watt hora
kVAR	kilo-voltamper reactivo
kVARh	kilo-voltamper reactivo hora

GLOSARIO DE TÉRMINOS

A

Amortización económica: Proceso mediante el cual se extingue gradualmente un préstamo o una deuda.

Armónicos triples: Son armónicos de secuencia cero y múltiplos impares del tercer armónico (3,9,15,21).

C

Componente armónico: En los sistemas eléctricos, son frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental de trabajo del sistema.

Componentes pasivos: Son aquellos que no tienen la capacidad de controlar la corriente por medio de otra señal eléctrica, ejemplos de estos componentes son resistores, inductores y capacitores.

D

Distorsión armónica: Se presenta cuando una onda de tensión o de corriente de un sistema eléctrico

presenta deformaciones con respecto a la forma de onda.

E

Efecto piel o pelicular: En corriente alterna, la distribución del flujo de electrones a través del conductor no es uniforme, debido a que se presenta mayor densidad de corriente en la superficie que en el centro del conductor sobre todo a altas frecuencias.

Escaneo de frecuencia: La salida de un escaneo de frecuencia es un gráfico de tensiones por unidad, corrientes por unidad o ambos. De estos gráficos se puede derivar resultados como amplificaciones de tensión y corriente o puntos de resonancia.

Espectro de frecuencias o armónico: Se llama así a la gráfica resultante de representar la amplitud de la variable (tensión o corriente) en función de la frecuencia.

F

Factor de potencia: Relación de la potencia activa o de trabajo útil y la potencia aparente, esta relación mide la eficacia con la que se utiliza la energía eléctrica, es un valor adimensional y varía entre 0 y 1.

Frecuencia angular: Cambio de rotación por unidad de tiempo en un sistema rotativo u oscilante.

H

Histéresis: Se origina cuando la imantación de algunos materiales ferromagnéticos no depende solo del flujo sino además dependen de los estados magnéticos anteriores.

I

Impedancia relativa: Relación de la corriente de corto circuito en el punto de acometida a la corriente máxima de carga del propio suministro a frecuencia fundamental. La relación anterior también equivale a dividir la impedancia de la carga entre la que ofrece el sistema en el punto mencionado.

P

Potencia reactiva de distorsión: A altas frecuencias las corrientes armónicas también generan potencia real e imaginaria lo que provoca un aumento en la potencia aparente.

S

Secuencia negativa, positiva y cero:

En un sistema trifásico, un conjunto de corrientes de secuencia positiva produce un campo rotatorio normal, un conjunto de corrientes de secuencia negativas producen un campo con rotación apuesto, mientras que la secuencia cero produce un campo que oscila pero no gira.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Se sabe de la existencia de las distorsiones armónicas en los sistemas eléctricos desde que los primeros sistemas comenzaron a operar, puesto que, máquinas como los generadores o transformadores bajo condiciones de saturación comienzan a entregar ondas no sinusoidales, en ese entonces se solucionó mejorando los diseños de las máquinas para evitar dichas perturbaciones, pero con la entrada de la electrónica de potencia los fenómenos de tipo armónico comenzaron a presentarse cada vez más en los sistemas eléctricos, por lo que su mitigación y normalización ha sido de interés en los últimos años.

En México con la entrada en vigor del Código de Red, se establece en uno de sus apartados los lineamientos que deberán cumplir los centros de carga conectados en alta o media tensión con respecto a la calidad de la energía, algunos de estos parámetros son, desbalance de tensión, factor de potencia y distorsión armónica.

Por lo que este trabajo tiene como objetivo estimar y analizar, haciendo uso de un software comercial como lo es ETAP, las componentes armónicas en la Planta de Selección de Residuos Sólidos San Juan de Aragón, así como también, proponer una solución a dichas perturbaciones mediante el cálculo y selección de un filtro pasivo.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El incremento en el uso de diversos componentes electrónicos en todos los niveles del sistema eléctrico nacional (Generación, transmisión, distribución y utilización) ha provocado perturbaciones en la calidad de la energía eléctrica.

En el caso de áreas industriales se pueden encontrar cargas no lineales tales como variadores de frecuencia, bancos de capacitores, hornos eléctricos y aunque su uso ha ayudado a facilitar o mejorar ciertos procesos han provocado alteraciones en la energía, teniendo como consecuencia, en el menor de los casos, mal funcionamiento de equipos sensibles, por otra parte, se tiene el incumplimiento con el Código de Red el cual tiene como objetivo mantener la energía eléctrica bajo ciertos parámetros de tensión, frecuencia, distorsión armónica y factor de potencia con la finalidad de asegurar la continuidad y seguridad del sistema eléctrico.

De ahí la importancia de medir y analizar el contenido armónico en las instalaciones industriales y posteriormente corregir estas perturbaciones mediante el cálculo y selección de filtros en la instalación eléctrica.

1.3 OBJETIVO GENERAL

Estimar y analizar el contenido armónico en una instalación eléctrica para proponer la ubicación de filtros dentro de la misma, considerando el cumplimiento de la normatividad mediante el empleo de un software especializado.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar las perturbaciones de las ondas de corriente y tensión de la Estación de Selección de Residuos Sólidos San Juan de Aragón.
- Verificar el cumplimiento de los límites de distorsión armónica de acuerdo con lo especificado en la normativa vigente.
- Realizar el cálculo del filtro pasivo sintonizado para cumplir con los parámetros de acuerdo con la normatividad vigente.
- Analizar los resultados por medio del software ETAP.
- Realizar un estudio económico.

1.5 JUSTIFICACIÓN

Gran parte de la sociedad no sabe de la existencia de las perturbaciones que existen en el sistema eléctrico, si se tuviera en cuenta, se pueden evitar problemas tanto técnicos como económicos para la empresa suministradora.

Al hacer el análisis del contenido armónico en una instalación eléctrica se debe realizar de manera precisa todo un procedimiento para detectar las perturbaciones y corregirlas, ya que hay normas para su regulación por el efecto que aparece en la calidad de la energía, afectando a todo el sistema.

Cada vez se tiene más acercamiento a la tecnología, a tener todo de manera digital y esta no es la excepción, en casos muy avanzados se muestran filtros que regulan y controlan de manera automática la presencia de los armónicos todo esto con ayuda de softwares especializados, con esto se evitan muchos problemas que con anterioridad se tenían que solucionar de manera física por parte de un especialista en la materia.

La magnitud de llevar a cabo un proyecto de este tipo es de gran trascendencia, ya que en general las industrias se evitarían penalizaciones por tener un desfavorable factor de potencia, ayudando a tener una mejor calidad de energía recibiendo beneficios por parte de la compañía suministradora. El ahorro económico por parte de la industria será de gran beneficio ya que se utilizará eficientemente la energía eléctrica evitando así problemas técnicos en el sistema eléctrico.

El hecho de llevar a cabo este trabajo es conocer acerca de los armónicos que se encuentran en el sistema, cómo es que se producen, cómo detectarlos, cómo controlarlos mediante filtros, cuál es el mejor punto para la colocación de los filtros, evitar multas o penalizaciones, y lo más importante, evitar problemas a quien padezca de estas perturbaciones.

1.6 ALCANCES

Se estimará el contenido armónico de los variadores de frecuencia (VFD) mediante el espectro armónico característico proporcionado por el software ETAP.

Una vez recabado los datos se procederá a evaluar si cumplen con los parámetros de desviaciones permisibles de onda de tensión y corriente indicados en el Código de Red.

A partir del análisis anterior se realizarán los cálculos necesarios para especificar las características del filtro pasivo, al igual que la ubicación de estos con el propósito de reducir los niveles de distorsión armónica a los valores recomendados por la normativa, esta etapa incluirá la determinación de los parámetros de los filtros mediante el software especializado.

1.7 ANTECEDENTES

Los armónicos son distorsiones en el sistema eléctrico, específicamente en la onda senoidal, tienen influencia en la calidad de la energía de la instalación eléctrica, esto hace que se provoquen distorsiones en una onda senoidal ideal, puede alterar su valor pico, el valor eficaz o los dos, causando alteraciones en los equipos que están integrados en esa instalación.

Un punto clave para saber si existen armónicos en un sistema eléctrico es: principalmente el factor de potencia, factor de cresta, potencia de distorsión, espectro en frecuencia, estos son indispensables para tomar acciones y corregir de manera efectiva la distorsión.

El estudio de los armónicos comenzó desde el año 1890 cuando se identificó que los motores y transformadores eran los elementos principales que provocaban distorsión de las ondas de tensión y corriente en la red eléctrica [1].

En 1885 William Stanley construyó el primer transformador de corriente alterna, este era laminado [1]. Para 1890 se empezaron a hacer experimentos con corriente alterna más a fondo, esto trajo muchas ventajas sobre la corriente directa ya que se podían hacer cambios en los niveles de diferencial de potencial y de corriente eléctrica, construir motores de corriente alterna era más económico y los generadores eran más simples.

Con esto se llegó a tener muchas frecuencias en el sistema hasta el año 1900, poco después se establecieron solamente dos, 50 Hz en Europa y 60 Hz en América ya que estas frecuencias eran más aceptables con base a las velocidades de las turbinas de vapor que se construían en ese entonces, rondando los 1800 a 3600 rpm [1].

En el año 1893 P. Steimetz y Hartford Conn realizaron estudios para los problemas de calentamiento de los motores utilizando un análisis armónico con un medidor de ondas (wave-meter), este instrumento producía las formas de onda de la diferencia de potencial en un punto del sistema eléctrico, una vez que se obtenía la onda se

hacía un análisis por medio de Fourier [1]. Para esa época la única solución para obtener una mejor onda senoidal fue mejorar el diseño de los transformadores, motores y generadores. Para la década de 1960 se empezaron a instalar bancos de capacitores para la mayoría de las empresas, con el fin de corregir el factor de potencia, dio grandes resultados en el momento y hasta nuestros días, pero la presencia de los armónicos fue incrementando porque en la misma década se implementaron los circuitos electrónicos, tales elementos como los diodos que solamente permiten el paso de la corriente eléctrica en un solo sentido y pueden rectificar la corriente de alterna a continua o directa, tiristores con los cuales también se obtiene una rectificación y una inversión de la señal. Con esto aparecieron más armónicos en los sistemas eléctricos, con ello más implementación de bancos de capacitores.

En la década de 1980, se introdujeron los tiristores GTO (Tiristor Bloqueable por Puerta) y IGBT (Tiristor Bipolar de Compuerta Aislada) a los sistemas eléctricos de potencia dando como resultado una nueva generación de dispositivos de mayor capacidad y a costos más bajos y así mismo produciendo perturbaciones en la calidad de la energía eléctrica [2].

Como bien se sabe en la actualidad abundan los elementos electrónicos en la vida diaria, esto por el impacto tecnológico que se está viviendo, pero traen problemas para la calidad de la energía, teniendo un factor de potencia bajo por las distorsiones provocadas.

El uso de los circuitos electrónicos como la computadora, nuevos sistemas de iluminación, impresoras, etc. y con el desarrollo de empresas vidrieras, de acero, manufactura entre otras, existe la necesidad de tener una mejor calidad de energía en nuestro sistema eléctrico, con esto el mercado energético se convirtió en un amplio generador de la economía con la construcción de mejores y más potentes redes de energía.

Dado todo esto es necesario tomar el control sobre la calidad de la energía y la propagación de los armónicos para toda la tecnología avanzada que es utilizada, como se sabe hay nuevos retos por resolver con esto, nuevas formas de transportar la energía para que sea eficiente el cambio, evitar disparos innecesarios de las protecciones para garantizar continuidad en el servicio, ahorros notables en el mantenimiento de los equipos utilizados, prevención de accidentes graves porque la seguridad es una prioridad.

Finalmente, los trabajos más recientes que se han encontrado a nivel nacional de acuerdo con el tema de interés son los siguientes:

En el año 2010, Adolfo Allende, José Manuel Méndez y Daniel Mauricio Reynada de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) realizaron una metodología para la evaluación de la calidad de la energía eléctrica, tomando como referencia la normativa IEEE-Std-519-1992, IEEE-1159-2009, CFE L0000-45 [3].

Así mismo en el trabajo “Solución a los problemas de corrientes y voltajes armónicos en los sistemas industriales”, realizado en el año 2012 por Enrique Olaf Morales y José Luis Rodríguez pertenecientes a la facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) se analizaron estas dos variables dando como resultado la ubicación de filtros armónicos de acuerdo con la normativa vigente en esos años de las cuales podemos mencionar la norma extranjera IEEE Std-519-1992 y la norma nacional L0000-45-1995 perteneciente a la Comisión Federal de Electricidad [4].

En el año 2015, Marcos Ricardo Alva y Uriel Muñoz realizaron un estudio de calidad de la energía en el edificio 2 de la ESIME Zacatenco enfocándose en el alumbrado, dicha evaluación tuvo como objetivo identificar los puntos en que el sistema de alumbrado no cumplía con la normatividad y proponiendo como trabajos futuros la implementación de filtros para mitigar las perturbaciones en la calidad de la energía de esta edificación [5].

Finalmente, en la Tesis del año 2017, presentada por José Misael Arenas de la Universidad Nacional Autónoma de México “Identificación de armónicos en una

subestación eléctrica de uso residencial” se trabajó el monitoreo de eventos de calidad de la energía, por medio de un módulo de adquisición, un módulo de análisis de datos, un módulo de almacenamiento y un módulo de visualización de información para proponer una solución. Se descubrió que los dispositivos que provocan más armónicos en la subestación son los dispositivos electrónicos, computadoras, lavadoras, elevadores, alumbrado fluorescente y de LEDs, fuentes de poder, balastros electrónicos, hornos de microondas, etc. la solución que se le da al problema es la colocación de un filtro armónico para mitigar los fenómenos de calidad de la energía [6].

1.8 ESTRUCTURA DE LA TESIS

CAPÍTULO 1. En este capítulo se presentan el planteamiento del problema, la justificación del trabajo, el objetivo general, así como los objetivos específicos, y finalmente, los antecedentes que darán pauta al desarrollo del trabajo.

CAPÍTULO 2. En este capítulo se abordan los fundamentos de las redes eléctricas, así como las perturbaciones eléctricas que pueden presentarse tanto en la tensión como en la corriente eléctrica.

CAPÍTULO 3. En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos de las perturbaciones de tipo armónico que se presentan en las redes eléctricas, los efectos que pueden presentarse en distintos equipos eléctricos, el origen de estas perturbaciones eléctricas, así como la normativa aplicable para su regulación.

CAPÍTULO 4. En este capítulo se analiza el contenido armónico en la estación de Selección de Residuos Sólidos San Juan de Aragón a través de tres casos de estudio, el primero, analizando la instalación sin ningún tipo de compensación reactiva, el segundo, agregando un banco de capacitores y, finalmente, se analiza la instalación considerando un filtro sintonizado simple, cada uno de estos casos se analiza el factor de potencia, el porcentaje de contenido armónico en tensión y corriente y un escaneo de frecuencia con la finalidad de advertir punto de resonancia en el sistema.

CAPÍTULO 5. En este capítulo se presenta un estudio económico que describe una estimación de los costos generados por el análisis, cálculo e implementación de un filtro sintonizado simple, una estimación por concepto de energía considerando un bajo factor de potencia en la instalación, así como una estimación considerando un alto factor de potencia.

CAPÍTULO 2
GENERALIDADES DE REDES ELÉCTRICAS

2.1 SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Para utilizar la energía que llega a hogares, escuelas, hospitales, comercios, industrias, por mencionar algunos, es necesario tres grandes procesos que van desde la generación, transmisión y distribución de la energía, que al actuar en conjunto pasa a denominarse Sistema Eléctrico Nacional (SEN).

El sistema de distribución es uno de los más complejos debido a la diversidad en la infraestructura con la que se cuenta, además, de que también es el área que más inversiones presenta puesto que se debe asegurar un suministro continuo y confiable a cada uno de los usuarios conectados [7].

Los elementos que conforman a este sistema son básicamente:

Las líneas primarias de distribución. Son los alimentadores que salen de las Subestaciones Eléctricas de distribución a tensiones normalizadas de 2.4, 4.16, 13.8, 23 y 34.5 kV de acuerdo con la NMX-J-098-ANCE, a estos niveles de tensión también se les denomina media tensión.

Transformadores de distribución. Son los encargados convertir las tensiones de distribución a valores comerciales más pequeños, también denominados baja tensión.

Las líneas secundarias de distribución. Son los alimentadores que salen del transformador de distribución a tensiones normalizadas de 220 Y/127, 480 Y/277 y 480 V.

Acometidas y medidores. Son los conductores provenientes de los transformadores de distribución que llegan a los equipos de medición de los usuarios y que son proporcionados por la compañía suministradora.

2.1.1 Sistema de distribución radial

Un sistema radial es aquel donde solo existe un camino para que la potencia fluya de la fuente a la carga por lo que al haber una falla en el sistema eléctrico el usuario podría verse afectado, este tipo de sistema es el que comúnmente se utiliza debido en parte a que su costo es menor comparado con un sistema mallado, como ya se mencionó ante una falla la continuidad del servicio puede verse interrumpida por lo que esta sería una de sus principales desventajas [7,8]. En la figura 2.1 se observa un ejemplo de un sistema radial.

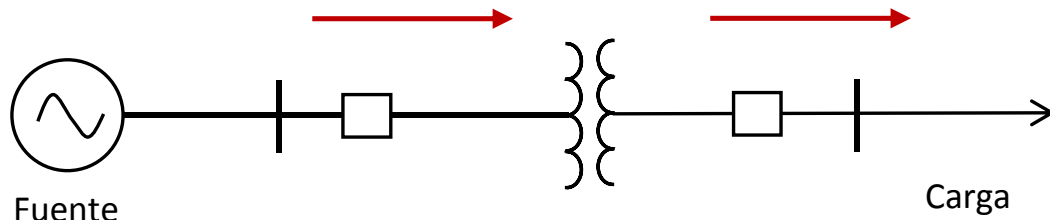


Figura 2.1 Sistema de distribución radial [9].

2.1.2 Sistema de distribución en anillo

Es un circuito cerrado donde el flujo de energía tiene más de un camino para distribuir la electricidad, por lo que este arreglo presenta una mayor confiabilidad con respecto al sistema radial y por consiguiente sus costos igual incrementan, debido a que una falla en el sistema no deja sin servicio al usuario ya que es posible suministrar la energía eléctrica mediante otra alimentación [7,8]. Un ejemplo se muestra en la Figura 2.2

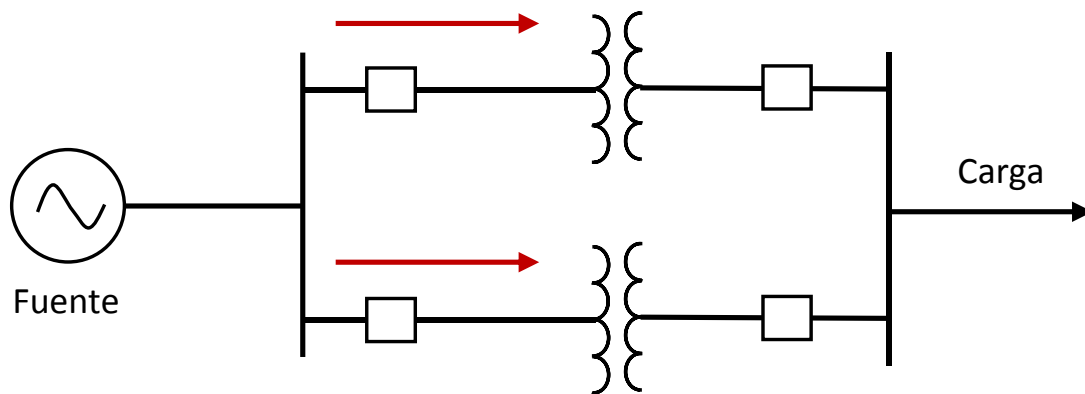


Figura 2.2 Sistema de distribución en anillo [9].

2.1.3 Sistema de distribución mallado

Este es el sistema más confiable y que presenta mayor confiabilidad en donde existe una gran densidad de carga ya que en muchos casos no es posible suspender el suministro de energía debido a que una interrupción puede resultar en pérdidas económicas o incluso poner en peligro vidas humanas como es el caso de grandes industrias o centros hospitalarios [7,8].

Este sistema cuenta con múltiples trayectorias que permite la transferencia de potencia entre fuentes y cargas como se observa en la Figura 2.3.

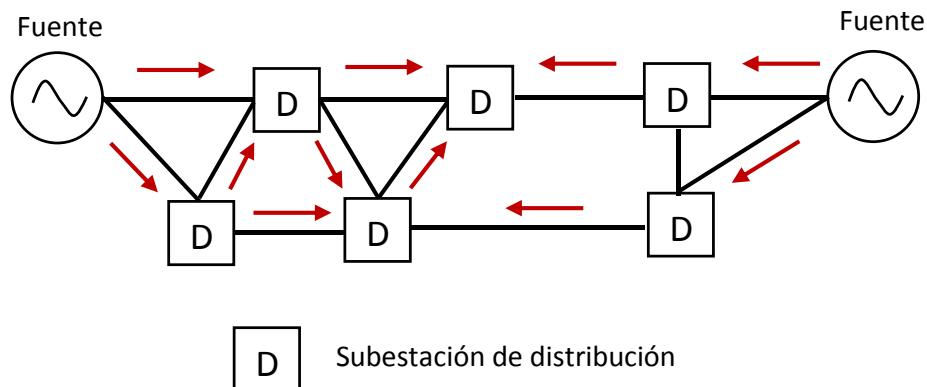


Figura 2.3 Sistema de distribución mallado [9].

2.1.4 Tipos de usuarios en sistemas de distribución

Para realizar un proyecto de distribución y por consiguiente su ejecución deben tomarse en cuenta aspectos técnicos como densidad de carga, el tipo de carga (residencial, comercial o industrial), localización geográfica, área de expansión y la continuidad del servicio [7]. La electrificación puede clasificarse en general de la siguiente manera:

- a) **Residencial.** Este tipo de sistema es la que menor densidad de carga representa comparándola con la comercial o industrial además la carga rural es menor que la urbana por lo que resulta poco económica la electrificación rural de ahí que se opte por otros métodos para proporcionar el suministro de energía a estas áreas como son sistemas monofásicos o plantas de energía solar o híbridas [7].

- b) **Comercial.** Son áreas céntricas, restaurantes, talleres, oficinas, centros y edificios comerciales. La densidad de carga en estos casos son mayores comparados con una carga residencial, este tipo de instalaciones debe de estar constituido por fundamentos normativos con el objetivo de dar seguridad a los usuarios y prevenir cualquier tipo de accidentes [7].

- c) **Industrial.** Las áreas industriales abarcan desde las pequeñas industrias hasta las grandes industrias, en las cuales existen aparatos o maquinaria de gran consumo de energía por lo que exige un dimensionamiento distinto al habitual, algunas veces la carga industrial se incluye en las cargas comerciales. La carga industrial en general puede tener grandes potencias por lo que el servicio de alimentación puede ser en alta tensión, como 115 kV o más [7].

Debido a sus grandes dimensiones y diversidad de componentes de algunas instalaciones eléctricas industriales estas deben garantizar la seguridad y respetar

siempre las características técnicas por lo que la planeación y ejecución de este tipo de áreas debe ser dirigido por personas calificadas.

2.2 CARGAS ELÉCTRICAS

Como se sabe la carga es cualquier componente de un circuito, ya sea la resistencia, los motores, equipo electrónico, transformadores, generadores etc. por lo que al conectarse a una fuente de alimentación se considera como una "carga" o consumidor de energía eléctrica, que en conjunto se tienen elementos resistivos, capacitivos e inductivos. La carga también se puede definir como la impedancia de entrada de un circuito.

2.2.1 Cargas lineales

Cuando se aplica una tensión eléctrica senoidal directamente a cargas tales como resistencias, inductores, capacitores o una combinación de ellos, se produce una corriente proporcional que también es senoidal como lo muestra la Figura 2.4, por lo que se les denominan cargas lineales [3,10].

La curva característica corriente-tensión de la carga define si es o no lineal su comportamiento y no se debe pensar que todos los equipos que tienen semiconductores por definición son no lineales [3,10].

La mayor parte de las cargas eléctricas se tipifican como cargas convencionales; estas se comportan de manera lineal, lo cual significa que al aplicar una tensión la forma de onda de la corriente conserva esa misma forma, aunque en general estará desplazada en el tiempo un ángulo.

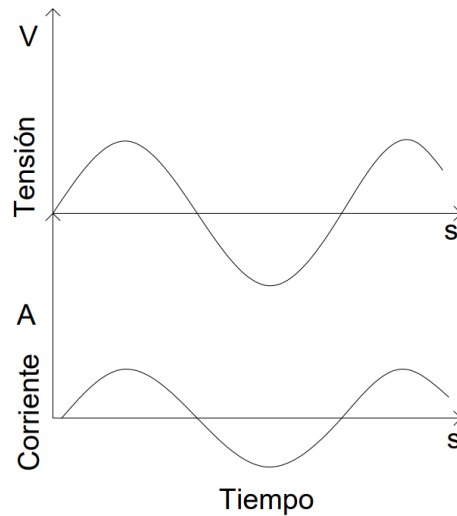


Figura 2.4 Oscilograma de tensión y corriente debidas a una carga lineal.

2.2.2 Cargas no lineales

Una carga se considera no lineal si su impedancia cambia con la tensión aplicada. El cambio en la impedancia se nota ante la corriente consumida debido a que esta no es de tipo sinusoidal tal como se aprecia en la Figura 2.5. Este tipo de corrientes contienen armónicos que interactúan con la impedancia del sistema, creando una distorsión en la tensión que puede afectar a todo el sistema y a las cargas que están conectadas a él [3,11].

Este problema surgió a finales de 1970 y principios de 1980 con el aumento del uso de dispositivos electrónicos en la industria cuando varios artículos técnicos advirtieron que las cargas no lineales estaban afectando la cantidad de corriente en el conductor neutro [3,11].

La definición de cargas no lineales según la NEC es: “Una carga donde la forma de onda de la corriente de estado estable no sigue la forma de onda de tensión aplicada”.

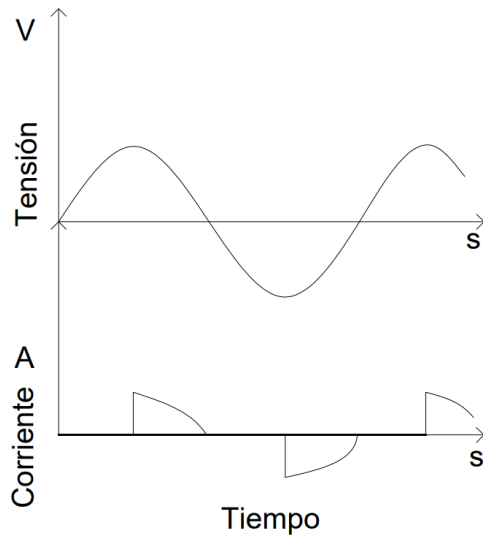


Figura 2.5 Oscilograma de tensión y corriente debidas a una carga no lineal.

Artículos en la NEC (1996) para cargas no lineales

La sección 210.4 (A) en notas informativas (FPN) cubre las corrientes armónicas altas de circuitos ramales para varios cables: “A 3 fases, 4 hilos, wye- el sistema de alimentación conectado utilizado para suministrar energía a cargas no lineales puede requerir que el diseño del sistema de alimentación permita la posibilidad de altas corrientes armónicas en el conductor neutro” [11].

En el artículo 220-22 de 1996 y que se reubicó en 220.61 en el 2005, cubre con una nota informativa el tamaño del conductor neutro y la aplicación de reducciones prohibidas en el tamaño de este conductor [11].

En el artículo 450.3 con una nota informativa dice “Las cargas no lineales pueden aumentar el calor en un transformador sin operar su dispositivo de protección contra sobrecorriente” [11].

En el artículo 310-4 y actualmente en el 310.10 (H) como nota informativa informa “bajo supervisión de ingeniería se permitirá instalar en paralelo 2 conductores neutros AWG y 1 AWG para instalaciones existentes”.

En el artículo 310.15(B)(5)(c) establece “En un circuito estrella de 4 hilos y 3 fases donde la mayor parte de la carga consiste en cargas no lineales, las corrientes

armónicas están presentes en el conductor neutro; por lo tanto, el conductor neutro se considerará un conductor que transporta corriente” [11].

2.2.3 Cargas sensibles

Son aquellas que requieren de un suministro de alta calidad, esto es, libre de variaciones de tensión o frecuencia. Los equipos electrónicos son más susceptibles a estos disturbios, que los equipos electromecánicos tradicionales [3,12].

Ejemplos de este tipo de cargas son: Equipos de instrumentación, de diagnóstico y tratamientos médicos, computadoras, domótica, máquinas herramientas con controles automáticos, robótica, telecomunicaciones, instalaciones para acondicionamiento de aire, etc. [12].

Como bien se sabe estas cargas son de gran importancia en la industria ya que por un error provocado por variaciones en la tensión o frecuencia puede que la maquinaria utilizada no haga su trabajo de la manera que se requiere. En hospitales puede variar los resultados de análisis, lo cual es inaceptable. Para el envío de mensajes por medio de ondas de radio puede afectar alguna frecuencia externa o interna, provocando un mal entendimiento de lo que se quiere dar a conocer.

2.2.4 Cargas críticas

Son aquellas que al dejar de funcionar ponen en peligro la vida humana, la seguridad del personal y ocasiona grandes perjuicios económicos [3,12].

Ejemplos de este tipo de cargas son: Salas de cirugía y/o de cuidados intensivos, centros de datos y control, telecomunicaciones vitales, sistemas de seguridad pública y privada, etc. [12].

Este tipo de cargas son de gran importancia ya que si existe un mal funcionamiento en estas y dejan de funcionar ponen en peligro la instalación o al personal. Un claro ejemplo son los hospitales, en áreas donde es de suma importancia que no fallen como lo son las salas de cirugía, donde por un error de estos se pueden perder vidas humanas.

2.3 TIPOS DE PERTURBACIONES EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

En los sistemas eléctricos se puede encontrar principalmente dos tipos de perturbaciones, tanto en la frecuencia como en la tensión, este último es el que más variantes presenta en cuanto a variaciones en la onda de tensión, se pueden clasificar como de corta duración (interrupciones, caídas y aumentos) y de larga duración (sobretensiones y subtensiones) así como también el denominado efecto de parpadeo o Flicker [17].

En los párrafos posteriores se mencionan una descripción detallada de los efectos más relevantes que se pueden presentar en una instalación eléctrica.

2.3.1 Variaciones de tensión

Al hablar de una variación de tensión de inmediato se sabe que hay una alteración en la amplitud de la onda y, por lo tanto, en el valor eficaz. Las variaciones de tensión se componen de tres puntos, el primero es el valor de partida o inicial, el segundo es el valor final y el tercero es la duración de la variación, es decir, el tiempo que tarda en recorrer la variación del valor inicial al final [13,14].

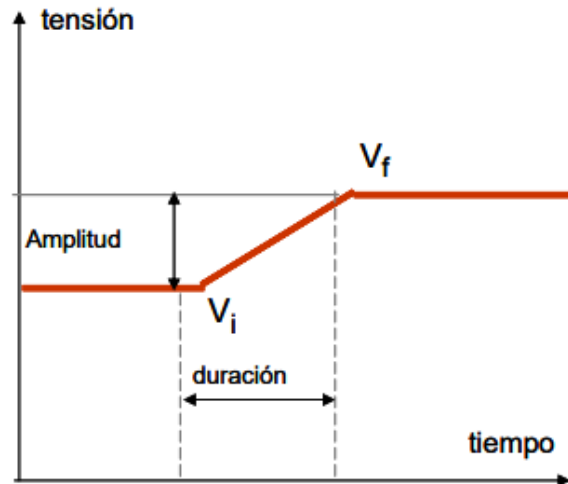


Figura 2.6 Variaciones de tensión, de [13].

Como se puede observar en la Figura 2.6, la amplitud y la duración son los parámetros característicos de una variación de tensión.

Existe una diferencia en las variaciones de tensión, las cuales se dividen en dos, una que son las variaciones lentas de tensión y las llamadas fluctuaciones. Las variaciones lentas de tensión abarcan los valores superiores a los diez segundos y las fluctuaciones son una variación sistemática de la forma de onda de tensión o una serie de cambios aleatorios de tensión, van de los milisegundos hasta los diez segundos y por lo general con una frecuencia por debajo de los 25 Hz [13-15,17].

a) Efecto *Flicker*

El efecto Flicker o parpadeo es la impresión subjetiva de fluctuación de la luminancia. Con base a la Comisión de Electrónica Internacional (CEI-555-1), es un fenómeno de origen fisiológico, visual que se presenta en los usuarios de lámparas alimentadas por una fuente común a los circuitos de iluminación y también a algún tipo de carga [13,15,16]. El origen del Flicker se encuentra en las fluctuaciones

bruscas de la tensión de la red y básicamente se consideran las fluctuaciones de amplitud menor al 10% y por periodos de tiempo inferiores a una hora [16].

Depende fundamentalmente de la amplitud, frecuencia y duración de las fluctuaciones de tensión que lo causan. Oscila entre los 0.5 Hz y los 30 Hz para una frecuencia de red de 50 HZ y una tensión nominal de 230 volts, y de 0.05 Hz a 42 Hz para una frecuencia de 60 HZ con una tensión nominal de 120 V [13,16].

Causas que originan el Efecto Flicker. Las fluctuaciones de tensión son originadas por los equipos conectados a la red cuya demanda de potencia no es constante en el tiempo [13,16].

Los principales dispositivos perturbadores son del tipo industrial, como lo son:

- Máquinas de soldadura por resistencia
- Molinos trituradores
- Hornos de arco
- Plantas de soldadura por arco
- Compresores
- Laminadoras
- Cargas controladas por impulsos.

Medición y Cuantificación del Flicker. Se han llevado a cabo estudios en distintos países ya que intervienen en forma simultánea factores técnicos, psicológicos y fisiológicos, estos estudios miden la sensación de molestia en las personas [16].

Los fenómenos que han permitido el estudio del efecto y que por ellos el Flicker es un efecto conocido son:

- Análisis experimental de las molestias en las personas
- Flicker instantáneo y dosis de Flicker como unidades de medida.
- Desarrollo del flickermetro
- Análisis estadístico de las mediciones

b) Caídas de tensión

En el idioma inglés este fenómeno es conocido de maneras distintas, para la IEC se prefiere usar el término DIP mientras que para la IEEE es más utilizado el término SAG en publicaciones técnicas. Puede definirse como un decremento de corta duración del valor rms de la tensión (con duración mayor a medio ciclo y menor a un minuto) en un punto del sistema eléctrico como se observa en la Figura 2.7, en la mayoría de los casos esta disminución ronda entre un 10 - 90 % de la tensión suministrada [17,18].

Entre las causas más comunes que provocan estas variaciones en la tensión se encuentran [17]:

- Fallas en los sistemas de transmisión y distribución.
- Aumento en la demanda de carga y arranque de motores de capacidades considerables.
- Fallas en la instalación del usuario.

Las consecuencias que puede provocar son, mal funcionamiento de equipo sensible como puede ser controladores lógicos programables (PLC) o arrancadores electrónicos los cuales tendrían como consecuencia paros en procesos industriales o disminución de la velocidad en los motores [17].

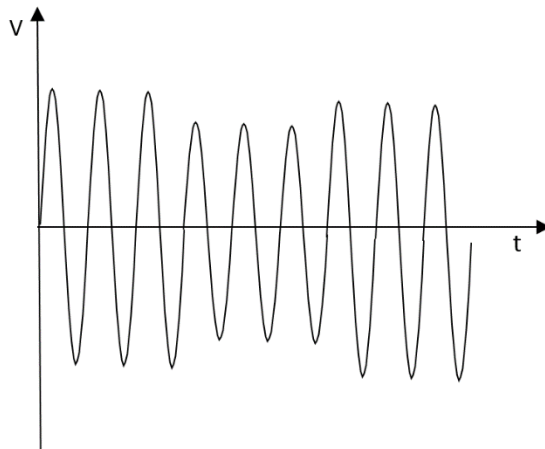


Figura 2.7 Caída de tensión. Tomado y modificado de [17].

c) Incrementos de tensión

En el idioma inglés es conocido bajo el nombre de SWELL y al igual que el fenómeno anterior, su duración es menor a un minuto, a este tipo de perturbaciones también se les denomina de corta duración, puede ser descrito como el incremento del valor eficaz de la tensión en un punto del sistema tal como lo representa la Figura 2.8, este aumento ronda entre 110 –180 % de la tensión suministrada [2,17].

Entre las causas más comunes que provocan estos incrementos en la tensión podemos mencionar [17]:

- Fuentes de energía mal dimensionadas.
- Transformadores mal regulados principalmente en horas de alta demanda u horas pico.
- Conmutación de carga y de condensadores.
- Puesta en marcha y paro de cargas eléctricas considerables.

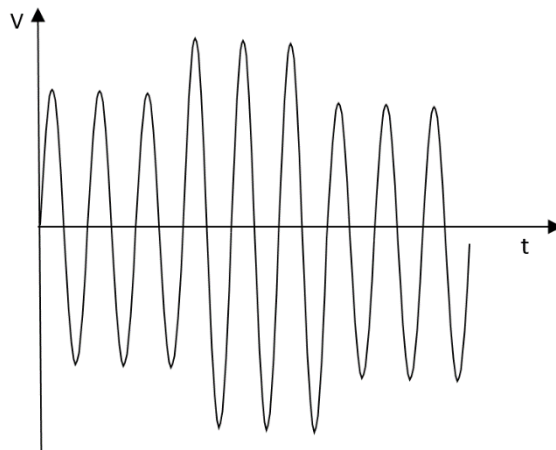


Figura 2.8 Incremento de tensión. Tomado y modificado de [17].

Como consecuencia de esta perturbación en una instalación podemos señalar el parpadeo de luces y pantallas, lo que podría ocasionar pérdidas de información o en casos donde el incremento sea muy alto, pérdida de equipos sensibles [17].

d) Otro tipo de variaciones

Hueco de tensión. Se refiere a la disminución drástica de la tensión de alimentación dada por un valor entre el 1% y el 90% de la tensión declarada, normalmente dicha variación va de los diez ms al minuto [15].

Interrupción de alimentación. Esta interrupción se da cuando en los puntos de suministro el porcentaje de la tensión declarada es menor al 1%, pasados los tres minutos se considera un efecto permanente, mientras que por debajo de los tres minutos se considera una interrupción breve [15].

Sobretensiones. Es el aumento o incremento de la tensión por encima del valor nominal, suelen suceder por maniobras, defectos o no linealidades [15,19].

Desequilibrio de tensión. Esto se puede en los circuitos trifásicos ya que el valor eficaz de las fases no es el mismo [15,19].

Armónicos. Los armónicos son distorsiones sinusoidales periódicas de la tensión de alimentación o la corriente de carga causadas por cargas no lineales. Los armónicos se miden en múltiplos enteros de la frecuencia de suministro fundamental. Las formas de onda de tensión o corriente asumen una forma no sinusoidal.

2.3.2 Variaciones de frecuencia

La variación de frecuencia es muy rara de observar en sistemas eléctricos estables. Cuando los sitios poseen generadores dedicados de reserva o una infraestructura pobre de alimentación, la variación de frecuencia se puede observar con gran claridad, especialmente si el generador se encuentra muy cargado. A los equipos informáticos no les afectan de gran manera ya que tienen una gran tolerancia a menores frecuencias del generador local. Lo que se ve más afectado en estos casos sería a los dispositivos que contengan motores o algunos dispositivos sensibles que dependan de la alimentación en un lapso largo de tiempo. Las variaciones de frecuencia logran que un motor gire de manera más rápida o más lento dependiendo

de la frecuencia de alimentación de entrada, esto haría que el motor trabaje ineficazmente provocando pérdidas por el calentamiento y la degradación del motor por una mayor velocidad [19].

La corrección que se le da es el cambio de los generadores de alimentación y demás fuentes de alimentación que provoquen la variación de frecuencia. Dicha perturbación se representa de manera gráfica en la Figura 2.9

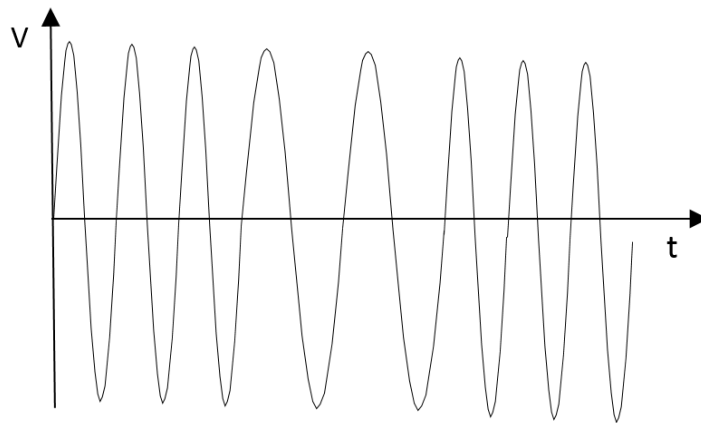


Figura 2.9 Variación de la frecuencia. Tomado y modificado de [17].

Está claro que las perturbaciones en los sistemas eléctricos pueden deberse a múltiples razones, desde fallas en los sistemas de distribución y transmisión, fallas en la instalación del usuario y hasta por equipos que se utilizan de manera cotidiana para distintas actividades dentro de los sectores industriales, comerciales y residenciales, provocando diversos efectos dentro de las instalaciones eléctricas como lo son incrementos o decrementos en la tensión, efecto Flicker, variaciones en la frecuencia o distorsión armónica, este último al ser el tema de estudio para este trabajo se examinará de manera más detallada en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO 3

ARMÓNICOS

3.1 ORIGEN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA

En la consideración de los efectos de la distorsión armónica, la electrónica de estado sólido es la mayor responsable, por lo tanto, es primordial centrar el análisis en dichas cargas (no lineales). Como bien se sabe, las cargas no lineales son las que más ocasionan las distorsiones en los sistemas eléctricos. No obstante, los elementos de generación, transporte y maquinaria también son generadores de armónicos, aun siendo cargas lineales [3,20]. En condiciones normales, el funcionamiento de máquinas rotativas y transformadores no causan elevadas distorsiones, pero se ven amplificadas durante procesos transitorios y con sobretensiones, ya que provocan distorsión en las corrientes magnetizantes [20].

Los equipos eléctricos están diseñados para operar con una onda sinusoidal de tensión a una frecuencia fija de 60 Hz para México, esto es por norma, aunque la mayoría de los elementos utilizados en México funcionan tanto para 50 Hz como para 60 Hz, esto porque los países que desarrollan y construyen estos elementos trabajan a otra frecuencia distinta a la de México. Sin embargo, algunos equipos no generan una corriente senoidal aun cuando son alimentados con una fuente de tensión perfectamente senoidal. Se dice que estas cargas son no lineales debido a que la relación instantánea entre la tensión y la corriente no es constante, lo que provoca la generación de las ondas llamadas armónicas [21].

3.2 CARACTERÍSTICAS

De acuerdo con la definición de la norma internacional IEEE-519, un armónico es una componente sinusoidal de una onda periódica o cantidad que posee una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental [22].

En otras palabras, a una onda fundamental se le suman otras ondas de menor magnitud pero con frecuencia cada vez mayor, por ejemplo, a una onda fundamental de tipo sinusoidal con una frecuencia de 60 Hz se le agrega una onda sinusoidal de

menor magnitud pero a una frecuencia del doble de la fundamental (120 Hz), a esta onda se le conoce como segundo armónico , un armónico de grado tres o tercer armónico es una onda de frecuencia triple a la fundamental (180 Hz) y así sucesivamente, tal y como se observa en la Figura 3.1.

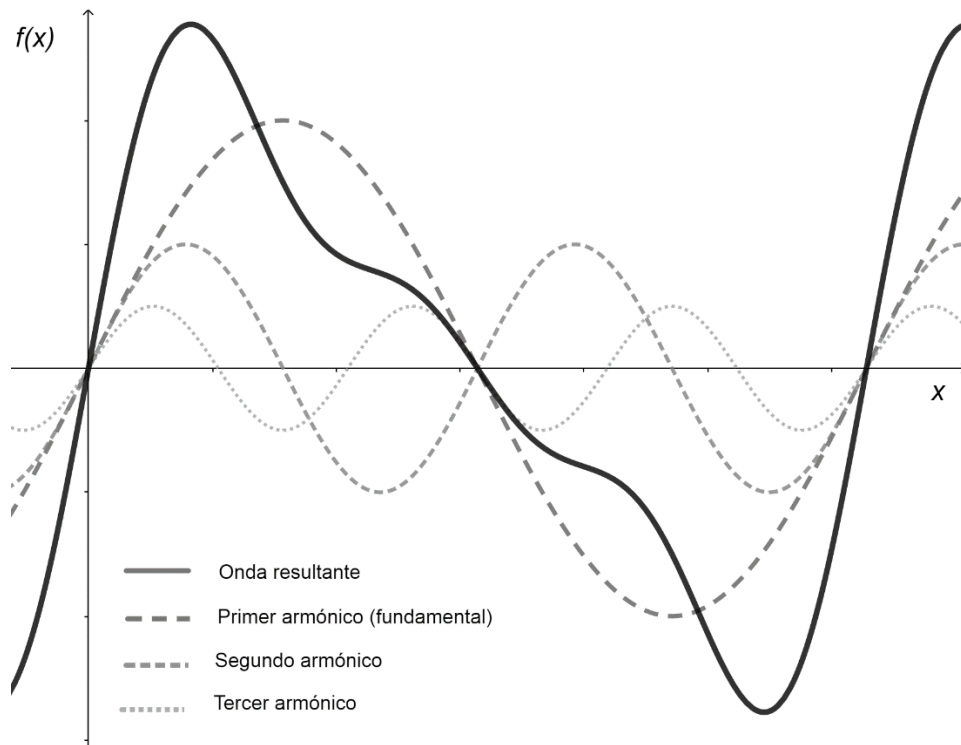


Figura 3.1 Onda resultante de la suma de los primeros tres armónicos.

Para analizar este tipo de ondas se hace uso de las Series de Fourier, para ello la función a analizar debe cumplir la siguiente condición:

$$f(t) = f(t + T) = f(t + 2T) = f(t + nT) \quad (3.1)$$

Esta condición indica si la función es periódica o no, una vez que esta restricción se cumple la función estudiada puede ser desarrollada mediante las Series de Fourier, la cual tiene la siguiente expresión matemática [22]:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + b_n \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \right) \quad (3.2)$$

Donde:

T = Periodo de la función.

n = Orden de la componente armónica

a_0 = Valor medio de la función, también es conocida como componente de DC

a_n, b_n = Coeficientes de la serie.

Los coeficientes a_0 , a_n y b_n son calculados de la siguiente manera:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt \quad (3.3)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad (3.4)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad (3.5)$$

Estas ecuaciones también pueden ser escritas en términos de frecuencia angular, considerando la siguiente expresión:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (3.6)$$

Las ecuaciones quedan de la siguiente manera:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \omega t d\omega t \quad (3.7)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \omega t \cos(n\omega t) d\omega t \quad (3.8)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \omega t \operatorname{sen}(n\omega t) d\omega t \quad (3.9)$$

También es posible representar la información de la Serie de Fourier de una manera más clara, haciendo uso de un espectro de frecuencias, este diagrama permite conocer de manera gráfica la cantidad presente de cada armónico en la función analizada, tal y como se aprecia en la Figura 3.2.

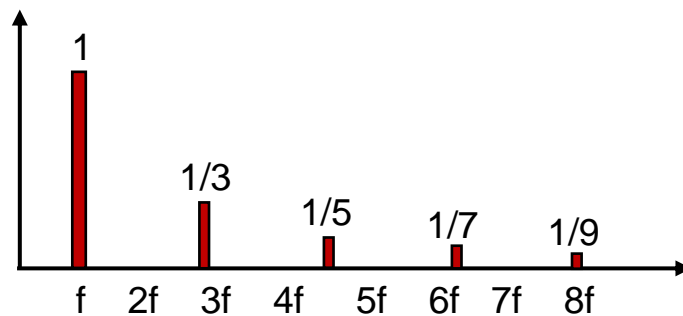


Figura 3.2 Espectro de frecuencias para una onda cuadrada, tomado y modificado de [22].

3.2.1 Factor de potencia y $\cos \phi$

Estos términos con frecuencia son utilizados indistintamente, la diferencia radica en el tipo de carga (lineal o no lineal) que se esté analizando.

Cuando se analiza una carga lineal con las características mostradas en la Figura 3.3 se observa que las ondas son fundamentales, es decir, sin presencia de armónicos.

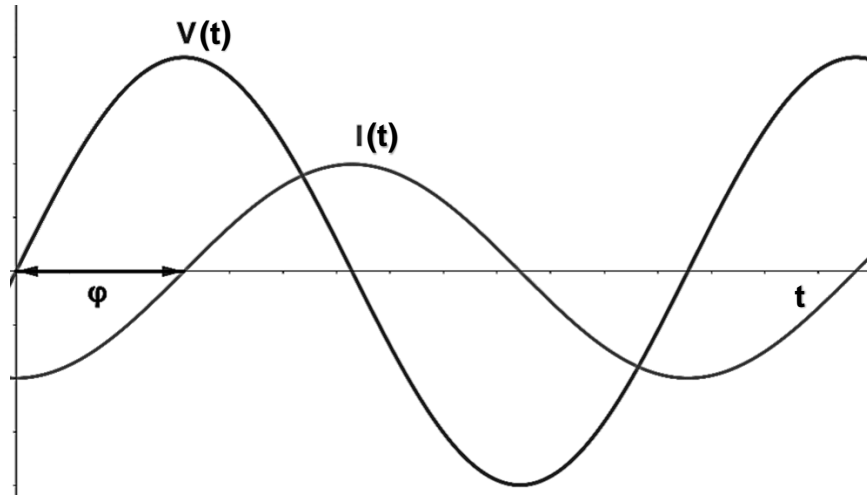


Figura 3.3 Ondas de tensión y corriente sinusoidales, tomado y modificado de [23].

Por lo que su potencia real o activa puede calcularse como:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) i(t) dt = V_{ef} I_{ef} \cos \varphi \quad (3.10)$$

Donde:

V_{ef} = Valor eficaz de tensión

I_{ef} = Valor eficaz de corriente

Así mismo la potencia reactiva tiene la siguiente expresión:

$$Q = V_{ef} I_{ef} \sin \varphi \quad (3.11)$$

Mientras que la potencia aparente:

$$S = V_{ef} I_{ef} \quad (3.12)$$

Y el factor de potencia

$$F.P. = \frac{P}{S} = \cos \varphi \quad (3.13)$$

Por lo tanto, la relación entre las potencias se expresa de la siguiente forma:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.14)$$

Actualmente, debido a la diversidad de cargas que se encuentran instaladas en las redes eléctricas las ondas de tensión y de corriente presentan cierta distorsión armónica, regularmente la onda de tensión es la que menos perturbaciones presenta, por lo que en el siguiente análisis se enfocará a la onda de corriente [23]. Suponiendo una carga que demanda una corriente con las características ilustradas en la Figura 3.4

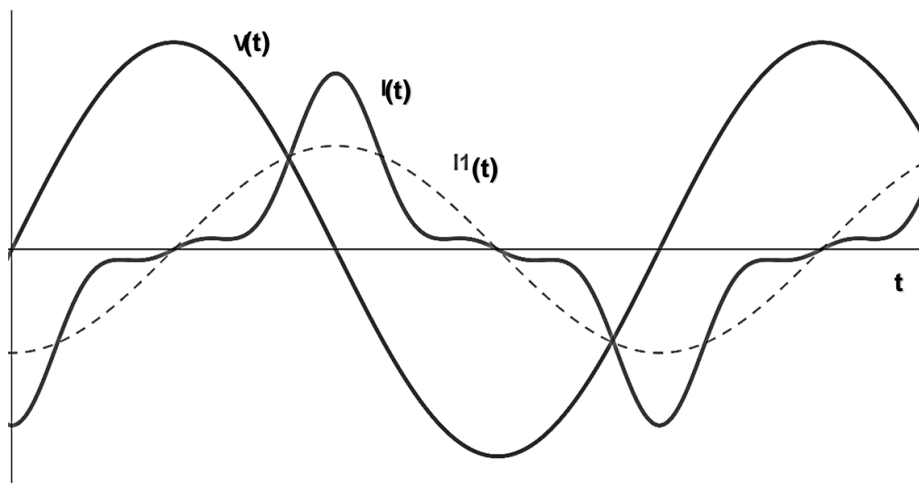


Figura 3.4 Onda de tensión sinusoidal y onda de corriente no sinusoidal, tomado y modificado de [23].

Se observa que en estas condiciones la potencia activa sigue el modelo matemático descrito en la ecuación 3.15.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) i(t) dt = V_{ef} I_{1ef} \cos \varphi_1 \quad (3.15)$$

De este modelo se puede inferir que los armónicos no contribuyen a la transferencia de energía.

Por otra parte, la potencia reactiva fundamental está expresada por:

$$Q_1 = V_{ef} I_{1ef} \sin \varphi_1 \quad (3.16)$$

Así mismo, la potencia aparente tiene la siguiente expresión:

$$S_1 = V_{ef} I_{1ef} \quad (3.17)$$

La corriente efectiva al estar compuesta por ondas múltiples de la frecuencia fundamental, tendrá la siguiente ecuación característica:

$$I_{ef} = \sqrt{I_{1ef}^2 + I_{2ef}^2 + I_{3ef}^2 + \dots + I_{nef}^2} \quad (3.18)$$

Por lo que la potencia aparente se reescribe como sigue:

$$S_1 = V_{ef} I_{1ef} = V_{ef} \sqrt{I_{1ef}^2 + I_{2ef}^2 + I_{3ef}^2 + \dots + I_{nef}^2} \quad (3.19)$$

La potencia reactiva está definida como:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (3.20)$$

Reemplazando términos se obtiene:

$$Q = \sqrt{(V_{ef} \sqrt{I_{1ef}^2 + I_{2ef}^2 + I_{3ef}^2 + \dots + I_{nef}^2})^2 - (V_{ef} I_{1ef} \cos \varphi_1)^2} \quad (3.21)$$

Simplificando y aplicando la identidad trigonométrica $\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$ en el segundo término, se obtiene:

$$Q = \sqrt{(V_{ef}^2 (I_{1ef}^2 + I_{2ef}^2 + I_{3ef}^2 + \dots + I_{nef}^2)) - (V_{ef}^2 I_{1ef}^2 \cos^2 \varphi_1)} \quad (3.22)$$

$$Q = \sqrt{(V_{ef}^2 (I_{1ef}^2 + I_{2ef}^2 + I_{3ef}^2 + \dots + I_{nef}^2)) - (V_{ef}^2 I_{1ef}^2 (1 - \sin^2 \varphi_1))} \quad (3.23)$$

$$Q = \sqrt{(V_{ef}^2 (I_{2ef}^2 + I_{3ef}^2 + \dots + I_{nef}^2)) + (V_{ef}^2 I_{1ef}^2 \sin^2 \varphi_1)} \quad (3.24)$$

De la ecuación 3.24 se puede deducir que, la potencia reactiva tiene dos componentes:

- La potencia reactiva fundamental Q_1
- La potencia reactiva de distorsión D , que se expresa de la siguiente manera

$$D = V_{ef} \sqrt{I_{2ef}^2 + I_{3ef}^2 + \dots + I_{nef}^2} \quad (3.25)$$

Finalmente se obtienen las siguientes relaciones:

$$Q = \sqrt{Q_1^2 + D^2} \quad (3.26)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q_1^2 + D^2} \quad (3.27)$$

Considerando este nuevo factor distorsionante ya no es posible representar las potencias mediante un triángulo rectángulo, por lo que pasa de una forma bidimensional a una tridimensional como se muestra en la Figura 3.5.

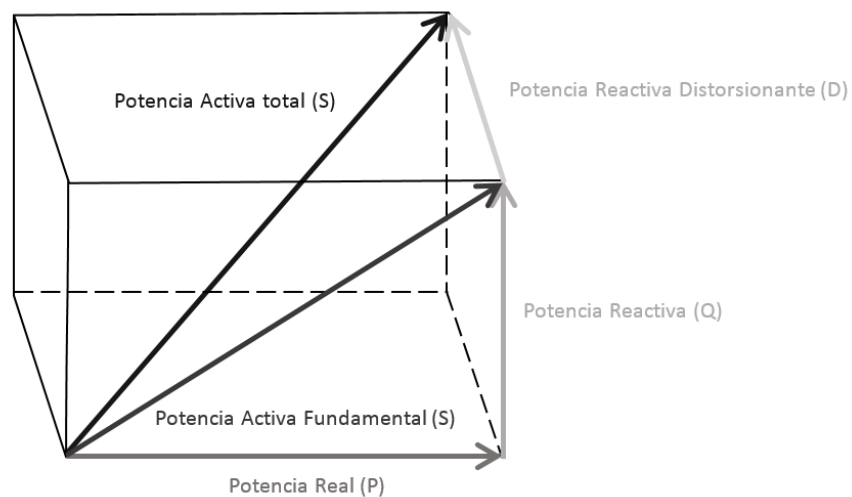


Figura 3.5 Representación de potencias en presencia de armónicos.

3.2.2 Cantidades que describen la distorsión de tensión y corriente

a) *Relación armónica de tensión y corriente*

Cualquier componente armónica tanto de tensión como de corriente puede ser representada como porcentaje de la onda fundamental, es decir, será la relación entre el valor eficaz real del armónico y el valor eficaz de la misma señal a frecuencia fundamental, a continuación, en la ecuación 3.28 se aprecia esta relación para el caso de tensiones [18].

$$D_{(n)} = \frac{V_{(n)}}{V_1} \quad (3.28)$$

Donde:

$V_{(n)}$ = Es el valor eficaz del armónico que se va a considerar.

V_1 = Es el valor eficaz de la componente fundamental.

b) *Factor Cresta*

Este parámetro será la relación entre la tensión pico y el valor rms de la señal, para ondas sin contenido armónico esta relación vale 1.4142 o lo que es lo mismo, $\sqrt{2}$, por lo que se podría considerar que este es un factor de deformación de la señal [18].

$$CF = \frac{V_{pico}}{V_{rms}} \quad (29)$$

c) Tasa de distorsión armónica (THD)

Es la relación entre los valores rms de las componentes armónicas y el valor rms de la componente fundamental por lo que se puede deducir que entre mayor sea este índice mayor contenido armónico presenta la señal, este parámetro tiene la siguiente forma para tensiones [18]:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=\infty} V_{h,rms}^2}}{V_{f,rms}} \quad (30)$$

Y para la onda de corriente:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=\infty} I_{h,rms}^2}}{I_{f,rms}} \quad (31)$$

Donde:

$I_{f,rms}$ y $V_{f,rms}$ Son las corrientes y las tensiones eficaces a frecuencia fundamental.

Regularmente el límite de la sumatoria es tomado hasta el factor 50 y en algunos casos donde el riesgo de resonancia para armónicos de mayor orden es bajo, la sumatoria puede ser limitada hasta el armónico de orden 25 [18].

3.3 EFECTOS DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA

Ya que se han establecido las definiciones de armónicos y sus características, se deben interpretar los efectos en el sistema eléctrico y la operación en el equipo utilizado.

Los principales efectos de corriente y tensión dentro de un sistema eléctrico son la resonancia tanto en serie como en paralelo, reducción de eficiencia, degradación del aislamiento en los conductores, mala operación del sistema por un mal funcionamiento de los componentes utilizados, etc.

3.3.1 Resonancia

La resonancia es un fenómeno que se produce en un circuito eléctrico a una frecuencia de resonancia particular cuando las impedancias o admitancias de los elementos del circuito se cancelan entre sí.

a) Resonancia Serie

La resonancia serie ocurre cuando una reactancia inductiva y capacitiva que están en serie son iguales, para alguna frecuencia. Ejemplo de dicha condición se muestra en la Figura 3.6 la cual ocurre como resultado de la combinación serie de un banco de capacitores y una línea o un transformador. La resonancia serie presenta una impedancia baja para las corrientes armónicas y suele atraer cualquier corriente armónica para la cual es sintonizada. La resonancia serie puede ocasionar grandes distorsiones de tensión entre los elementos inductivos y capacitivos del circuito [1,21].

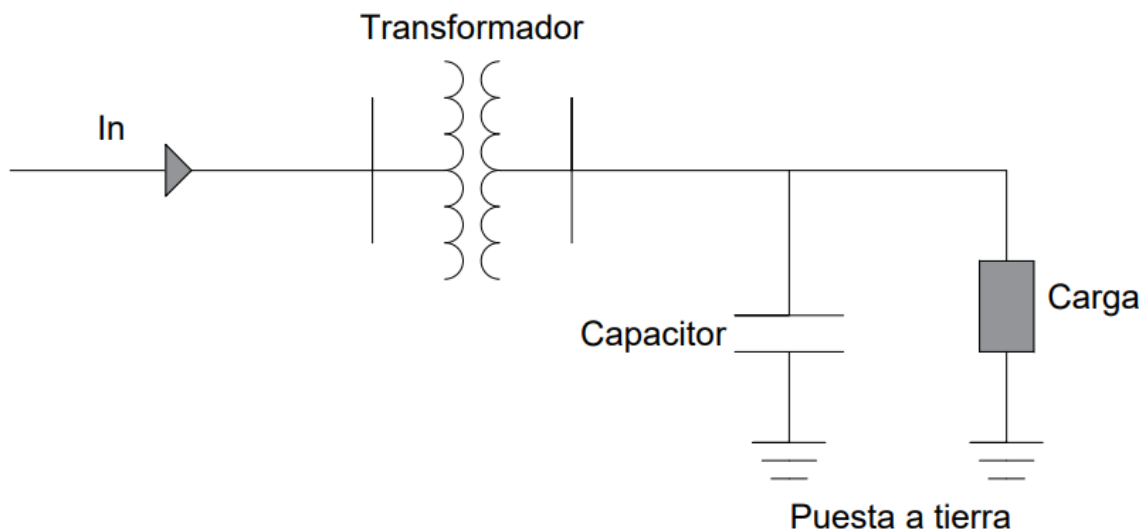


Figura 3.6 Circuito con resonancia serie, tomado y modificado de [1,21]

Para altas frecuencias la carga puede ser despreciada, debido a que la impedancia del capacitor reduce. Bajo estas circunstancias una condición resonante serie existirá cuando [1]:

$$f_r = \sqrt{\frac{S_t}{Q_{cap}Z_t} - \frac{S_l^2}{Q_{cap}^2}}(f_{FND}) \quad (3.32)$$

Donde:

S_t = Es la relación de transformación

Z_t = Es la impedancia del transformador por unidad

Q_{cap} = Son los MVAR del banco de capacitores

S_l = Es la relación de carga resistiva

f_{FND} = Es la frecuencia fundamental, es decir, 60 Hz.

b) Resonancia Paralela

La resonancia paralela resulta en una alta impedancia presentada a las fuentes de armónicas a la frecuencia resonante. La mayoría de las fuentes armónicas pueden ser consideradas como fuentes de corriente, esto resulta en tensiones armónicas incrementados y altas corrientes armónicas en cada rama de la impedancia paralelo [3]. Ejemplo de este fenómeno se pueden observar en los bancos de capacitores utilizados para corregir el factor de potencia puesto que se presentan en paralelo con la impedancia de cortocircuito del operador de red como lo muestra la Figura 3.7 [1,20,21].

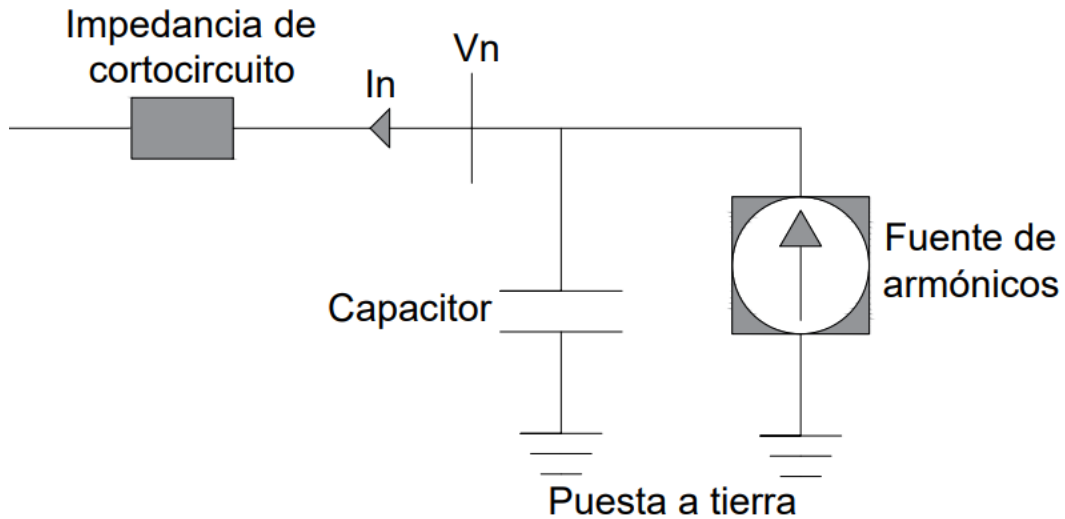


Figura 3.7 Circuito con resonancia en paralelo del capacitor con la impedancia de cortocircuito, tomado y modificado de [1].

La resonancia en paralela puede ser calculada de esta manera [1,20]:

$$f_r \sqrt{\frac{S_{SC}}{Q_{cap}}} = (f_{FND}) \quad (3.33)$$

Donde:

S_{SC} = Son los MVA de cortocircuito en el banco de capacitores

Q_{cap} = Son los MVAR del banco de capacitores

f_{FND} = Es la frecuencia fundamental, es decir, 60 Hz

3.3.2 Máquinas rotatorias

El efecto de los armónicos en los motores es similar al de las corrientes de secuencia negativa a frecuencia fundamental. Los flujos adicionales inducen

pérdidas adicionales. Las pérdidas en los conductores del motor son más grandes que las pérdidas asociadas con la resistencia DC generadas por las corrientes y el efecto piel. Dichas pérdidas son el efecto más importante de los armónicos sobre los motores ya que disminuye la eficiencia, y aumenta el calentamiento; con el calentamiento empieza la degradación de los conductores que componen a la máquina, del mismo modo afectando a los devanados que la componen, disminuyendo su vida útil y ocasionando un mal aprovechamiento. Si se tiene un devanado trifásico de una máquina rotativa suponiendo un entrehierro constante y la ausencia de saturación del acero, en un análisis de Fourier de la distribución de las fuerzas magnetomotrices (FMM) se observa que la FMM fundamental es una onda viajera moviéndose en la dirección positiva, los armónicos triples están ausentes y el quinto armónico es una onda viajera en la dirección negativa, el séptimo armónico viaja en la dirección positiva, etc. [1,21]

Como resultado del contenido armónico de la distribución de la FMM se producen armónicos en el tiempo que son dependientes de la velocidad. Estos armónicos inducen una FEM (fuerza electromotriz) en el estator a una frecuencia igual al cociente de la velocidad entre la longitud de onda. La vibración y el ruido son los síntomas típicos de las máquinas rotativas cuando se tienen armónicos inmersos en ellas [1,21].

Los armónicos generan pérdidas adicionales en las diferentes partes del motor [20]:

- A causa del efecto pelicular y de Foucault, las pérdidas del estator son superiores a las asociadas a la resistencia de la máquina.
- Los flujos de dispersión creados en los terminales del estator y rotor aumentan también las pérdidas.
- Altas frecuencias originan pérdidas en el entrehierro.

3.3.3 Transformadores

La presencia de tensiones armónicas incrementa la histéresis y las pérdidas por corriente de Eddy o Foucault las cuales son inducidas al transformador a través del material ferromagnético causando pérdidas adicionales que generan el calentamiento del transformador lastimando el aislamiento del transformador y su vida útil, esto sucede por estar sometido a un campo magnético variable en el tiempo. El flujo de corrientes armónicas incrementa las pérdidas de cobre; este efecto es el más importante en el caso de transformadores de convertidores ya que no se ve beneficiado por la presencia de filtros, los cuales son normalmente conectados en el lado de C.A. [1,20,21].

Cuando se incluye el efecto de histéresis, la corriente de magnetización no sinusoidal no es simétrica con respecto a su valor máximo tal como se muestra en la Figura 3.8. La distorsión que se observa se debe a los armónicos triples (3° , 9° , 12° , etc.), pero principalmente al 3° por lo que para mantener una alimentación de tensión es necesario proporcionar una trayectoria para estas armónicas triples, lo que generalmente se logra con el uso de devanados conectados en delta [1].

Las pérdidas en los transformadores aumentan con la frecuencia y, por lo tanto, los armónicos de orden elevado pueden influir en el calentamiento más que los de orden inferior, en cambio la amplitud de los armónicos de corriente se reduce generalmente con el aumento de la frecuencia, lo que contrarresta dicho efecto [1,20,21].

Otra consideración importante existe para la alimentación de un transformador con carga asimétrica. Si la corriente de carga contiene componentes de C.D. la resultante saturación del circuito magnético es grandemente incrementada en el nivel de todas las componentes armónicas de las corrientes de C.A. de excitación [21].

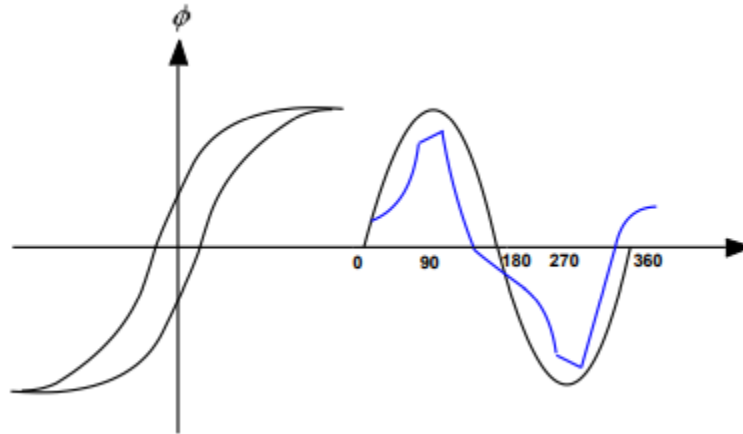


Figura 3.8 Corriente de magnetización con respecto al tiempo, tomado de [1]

3.3.4 Comunicaciones

Las comunicaciones es una parte fundamental que se debe someter a un arreglo si es que en el sistema se encuentran armónicos, ya que en casos extremos puede haber fallas que conllevarían a enormes gastos económicos, problemas en el área de salud, etc.

Las corrientes armónicas que fluyen por los sistemas de potencia pueden ocasionar interferencia en los circuitos de comunicación. Dichas corrientes se acoplan con los circuitos de comunicación mediante inducción o conducción directa. Las tensiones inducidas en los conductores paralelos mediante los armónicos frecuentemente caen dentro del ancho de banda de la comunicación telefónica, lo cual genera un problema perjudicial. Esto sucede cuando se alimentan cargas productoras de armónicos relativamente grandes desde un sistema de distribución y las líneas telefónicas y de distribución comparten el mismo derecho de vía, lo cual se resuelve de mejor manera tomando acción sobre la fuente de los armónicos [1].

3.3.5 Sobrecarga y degradación de los conductores

Las pérdidas adicionales de energía se deben al aumento del valor eficaz de la corriente. Además, el flujo de corrientes armónicas produce caídas de tensión adicionales. En el caso de los conductores, el efecto pelicular se ve agravado con el aumento de la frecuencia [20].

El desgaste de los conductores por calentamiento es muy común cuando en el sistema se encuentran este tipo de perturbaciones, lo que más afecta es el aumento de la corriente sobre estos y, el aumento y disminución de la tensión.

El flujo de corrientes armónicas en una red produce pérdidas adicionales en las líneas y cables debido al incremento del valor rms de la corriente y el efecto piel. El incremento en el desgaste del dieléctrico acorta la vida útil del cable, incrementa el número de fallas y además el costo de reparaciones. Como consecuencia del flujo de corrientes armónicas por los cables, se genera un incremento de temperatura en los mismos [1].

3.3.6 Sistemas de protección

Uno de los puntos más preocupantes cuando existen armónicos en el sistema, en este caso son las protecciones, ya que en su mayoría estos elementos trabajan con valores eficaces. Cuando existen armónicos se encuentran picos en las formas de onda, lo que ocasiona que los elementos de protección no respondan de buena manera en caso de algún cortocircuito, dejando el sistema desprotegido y en riesgo constantemente.

Las armónicas pueden distorsionar o degradar las características operativas de los relevadores de protección, fusibles, interruptores y sistemas digitales de protección dependiendo de los aspectos de diseño y de los principios de operación. Los relevadores digitales y los algoritmos de relés en un muestreo de datos o en un cruce de cero, son particularmente propensos a error cuando la distorsión armónica

está presente. Principalmente se ven afectados aquellos dispositivos digitales basados en el muestreo de información y en los cruces por cero de la onda de tensión y corriente. Esta operación incorrecta puede ir desde la sobreprotección del equipo hasta la desprotección de este por la no operación ante una forma de onda que podría dañarlo de forma severa [1,20,21].

Se puede dar el caso de encontrar picos en forma de onda, lo que ocasiona que los dispositivos no detecten los cambios extremos, lo cual conlleva a no proteger los equipos ya que los dispositivos de protección están hechos para responder ante los valores r.m.s de la forma de onda.

Actualmente se considera que el funcionamiento de relevadores de señales múltiples es menos previsible y varía dependiendo del fabricante y lote. En general tienden a funcionar más lentamente y, siendo elementos de protección de baja frecuencia, son muy sensibles a la presencia de armónicos. Factores de distorsión del 10% al 20% son críticos para su funcionamiento [20].

3.4 FUENTES DE ARMÓNICOS

Dentro de los sistemas eléctricos se tienen conectadas una gran variedad de equipos eléctricos y electrónicos que pueden introducir contenido armónico, cabe aclarar que estos equipos generan una mayor o menor distorsión armónica dependiendo del diseño y hasta del principio de funcionamiento, de esto obtenemos información para decir que existen una gran variedad de fuentes de armónicos dentro de los sistemas eléctricos [24]. Se encuentran como fuentes de armónicos principalmente a los dispositivos electrónicos, que se introdujeron a los sistemas eléctricos desde la década de los sesenta, como medios de conmutación y los equipos con relaciones no lineales de tensión y corriente.

Los equipos eléctricos y electrónicos que son fuentes de armónicos se clasifican en dos categorías en específico:

- Armónicos característicos

Son aquellos armónicos, que tienen una frecuencia múltiplo entero de la fundamental, por ejemplo 120 Hz, 180 Hz, 240 Hz, 300 Hz, etc. y son generadas por los equipos eléctricos bajo condiciones normales de operación.

- Armónicos no característicos

Son aquellos armónicos, que tienen una frecuencia que no es múltiplo entero de la fundamental. Las armónicas no características se encuentran en dos categorías.

Interarmónicos. Son aquellos armónicos que tienen una frecuencia que no es múltiplo entero de la frecuencia fundamental, normalmente se manifiestan a frecuencias discretas o a lo largo de un ancho de banda. La principal fuente de Interarmónicos son los cicloconvertidores, sin embargo, los inversores, hornos de inducción y hornos de arco eléctrico, también generan interarmónicos.

Subarmónicos. Son aquellas armónicas que tienen una frecuencia múltiplo entero por debajo de la fundamental. Por ejemplo, si la frecuencia fundamental es 60Hz, entonces las componentes subarmónicas serán 30 Hz, 20 Hz, 15 Hz, etc.

3.4.1 Convertidores estáticos

Estos equipos incluyen principalmente la electrónica de potencia ya que son más eficientes y de menor costo económico, como controles de velocidad variable en C.A. y C.D., inversores, hornos de inducción, equipos de cómputo y otros equipos eléctricos de oficina, como lo son las impresoras, fax, etc. Además de que estos equipos son la principal fuente de armónicos, también son algunos de los más sensibles a éstas [21], ya que en cualquier momento se puede dañar internamente por introducir los armónicos a la red.

3.4.2 Equipo electrónico

En este tipo de categoría se encuentran todos los tipos de convertidores estáticos de potencia, cómo lo son los rectificadores e inversores.

Rectificador. Los rectificadores son usados para convertir potencia de C.A (corriente alterna) a potencia de C.D (corriente directa) [24].

Inversor. Es un dispositivo que cambia o transforma una tensión de entrada de corriente continua a una tensión simétrica de salida de corriente alterna [24].

3.4.3 Equipos no lineales de corriente y tensión

En este caso, como se ha mencionado anteriormente, hay equipos lineales que a veces son fuentes de armónicos, como lo pueden ser los transformadores, máquinas rotatorias, hornos de arco, lámparas de gas, etc. para un claro ejemplo de esto a partir del año 1890 se identificó que los motores y transformadores eran los principales equipos que distorsionaban la onda tanto de tensión y corriente en la red eléctrica, cabe aclarar que en estos años aún no existían los elementos electrónicos.

3.4.4 Equipos ferromagnéticos

Estos incluyen transformadores, motores y equipo magnético. Los transformadores en general producen distorsión no mayor al 1 %, pero como en un sistema eléctrico existen muchos transformadores el efecto del conjunto puede ser muy alto, especialmente si se encuentran saturados, en cuyo caso aumenta considerablemente su efecto [21], en su mayoría los transformadores se encuentran saturados en zonas no controladas, por un uso ilícito de la energía eléctrica.

3.4.5 Transformadores

Los armónicos en los transformadores son generados durante la energización del transformador y por la saturación del núcleo magnético. Sin embargo, los armónicos generados durante la energización del transformador son momentáneas y de baja magnitud. Los armónicos más representativos generados por un transformador se originan por la saturación del núcleo magnético, el cual comienza cuando el flujo en el núcleo entra en la región no lineal de la curva de magnetización [24]. Introducir armónicos a la red por medio de los transformadores se puede evitar de una manera muy sencilla con la conexión adecuada de este.

3.4.6 Motores eléctricos

En los motores síncronos se presentan diversos problemas ya que estos tienden a ser sensibles por los dispositivos electrónicos y microelectrónicos utilizados para el control del sistema. La aparición de los armónicos es debido al desbalance ya que generan corrientes de secuencia negativa en el estator, en la mayoría de las ocasiones se encuentran armónicos impares múltiplos de 3 en el estator del motor. Otra situación es cuando se crea una saturación en el núcleo magnético, cuando sucede esto aparecen los armónicos [24].

En el caso de los motores de inducción aparecen los armónicos cuando las bobinas del estator no están distribuidas uniformemente, pero esto es un poco raro que suceda, al igual que cuando el motor está en reposo o la carga mecánica acoplada varía, haciendo que el motor no se adapte por la variación de las frecuencias [24].

3.4.7 Hornos de arco

Los hornos de arco son encontrados comúnmente en plantas de acero. Los hornos de arco transforman la energía eléctrica en calor, para la fusión de los

metales [24]. Debido a la naturaleza del arco eléctrico y del proceso de fusión, las armónicas generadas por los hornos de arco son impredecibles, debido a que el arco varía de un ciclo a otro, esto hace que el porcentaje de contenido armónico aumente en diferentes frecuencias. Como la corriente del arco no es periódica, los hornos de arco generan armónicas con frecuencias, múltiplos enteros y no enteros de la fundamental.

3.5 SOLUCIONES A LOS ARMÓNICOS

3.5.1 Filtro Pasivo

Los filtros pasivos están compuestos únicamente de componentes pasivos utilizados para la cancelación de la energía reactiva y la distorsión armónica.

Para la compensación reactiva de carácter inductivo se trata de la conexión en paralelo de condensadores a la barra de alimentación de las cargas, cuya capacidad varía de forma escalonada para adaptarse al consumo variable de energía reactiva.

Cuando la presencia de armónicos es elevada, se minimiza la circulación de corriente por el sistema capacitivo de compensación.

Consiste en la instalación de una inductancia serie a los condensadores de forma que la frecuencia de resonancia del conjunto L-C no coincida con ningún armónico posible.

a) Filtro Serie

Evitan el paso de una componente de frecuencia particular, desde la carga emisora o parte del sistema de alimentación, mediante la instalación de una gran impedancia serie a la frecuencia específica [20].

b) Filtro paralelo

Proveen un paso alternativo de muy baja impedancia para las frecuencias armónicas, consistiendo en una rama resonante serie, compuesta por elementos RLC en conexión paralela con el sistema de alimentación [20].

El filtrado paralelo es más económico, solo transporta corrientes armónicas de orden igual al diseñado y proporciona parte de potencia reactiva al sistema.

c) Filtro paralelo de paso alto

Este tipo de filtro tiene un factor de calidad bajo, además de originar problemas de resonancia paralela, pérdidas resistivas elevadas y necesidad de ser diseñado para mayor potencia reactiva [20].

d) Filtro paralelo sintonizado simple

Elimina una armónica determinada consistiendo en una batería de condensadores en serie con un inductor.

En este caso se muestra el proceso del cálculo del filtro paralelo sintonizado simple.

$$\omega_h = (2)(\pi)(f)(h) \quad (3.34)$$

Donde:

h = Es el armónico por eliminar

ω = Es la frecuencia angular

f = Es la frecuencia del sistema

$$X_c = \frac{1}{(\omega)(C)} = \frac{|V|^2}{Q_c} \quad (3.35)$$

Donde:

X_c = Es la reactancia capacitiva

Q_c = Es la potencia reactiva que suministrará el filtro en la rama

V = Es la tensión nominal del sistema

$$C_F = \frac{1}{(2)(\pi)(f)(X_c)} \quad (3.36)$$

$$L_F = \left(\frac{1}{(2)(\pi)(f)(\sqrt{C_F})} \right)^2 \quad (3.37)$$

$$X_{Lh} = (\omega_h)(L_F) \quad (3.38)$$

$$R_F = \frac{X_{Lh}}{Q} \quad (3.39)$$

Donde:

C_F = Es la capacitancia del filtro

L_F = Es la inductancia del filtro

Q = Es el factor de calidad del filtro

R_F = Es la resistencia interna del inductor

X_{Lh} = Es la reactancia inductiva del filtro

El filtro se sintoniza a la frecuencia armónica, h determinada a eliminar, de manera que para dicha frecuencia las reactancias capacitivas e inductivas son iguales y se anulan, así el filtro absorberá la corriente armónica contaminante causando únicamente las pérdidas de la resistencia. En la Tabla 3.1 se presenta una comparación entre los distintos tipos de filtros pasivos descritos anteriormente.

Tabla 3.1 Comparación de filtros pasivos, tomado y adaptado de [20].

Tipo de filtro	Frecuencia filtrada	Ventajas	Desventajas
Filtro armónico Pasa Bajos	Todas las frecuencias de armónicos.	<ul style="list-style-type: none"> -Minimiza todas las frecuencias. -No introduce resonancia. -No importan los armónicos de otras fuentes. -No requiere análisis de potencia del sistema -Mejora el factor de potencia. 	<ul style="list-style-type: none"> -Únicamente para cargas no lineales. -Debe manejar la máxima corriente de carga.
Filtro armónico serie	Frecuencia específica de armónico.	<ul style="list-style-type: none"> -Alta impedancia de filtrado. -Utilizado para una sola fase para el tercer armónico. -No introduce resonancia. -No requiere análisis de potencia. -Mejora el factor de potencia 	<ul style="list-style-type: none"> -Debe manejar la máxima corriente de carga. -Poco eficaz si no se ajusta de manera adecuada al armónico determinado. -Únicamente para cargas no lineales.
Filtro armónico paralelo	Frecuencia específica de armónico.	<ul style="list-style-type: none"> -Baja impedancia de filtrado. -Muy efectivo para el armónico seleccionado. -Solamente diseñado para la corriente del armónico. -Mejora el factor de potencia. 	<ul style="list-style-type: none"> -Solo filtra el armónico determinado. -Puede introducir resonancia. -Afectan los armónicos de otras fuentes. -Requiere un análisis para su diseño. -Se requieren varios filtros para mayor efectividad.
Reactancia serie	Todas las frecuencias de armónicos.	<ul style="list-style-type: none"> -Bajo costo. - Pequeño tamaño. -No introduce resonancia. -Protege frente a perturbaciones de alta tensión. 	<ul style="list-style-type: none"> -Debe manejar la máxima corriente de carga. -La reducción de los armónicos se encuentra entre el 30% y 40%. -Reduce muy poco el factor de potencia.

3.5.2 Filtro Activo

Los filtros activos son sistemas automáticos de compensación de armónicos y energía reactiva que se adaptan en función de las variaciones que se produzcan en el suministro [20]. Este filtrado está formado por convertidores estáticos de la energía, conectados a la carga contaminante en serie o paralelo, que actúan como fuente de tensión y corriente, anulando instantáneamente los armónicos mediante algoritmos de control. Además, tienen la capacidad de compensar la energía reactiva, equilibrar las corrientes de fase y cancelar la corriente del neutro. En la Figura 3.9 se puede observar un diagrama unifilar básico que contiene cargas lineales como no lineales, así como un sistema de compensación reactiva.

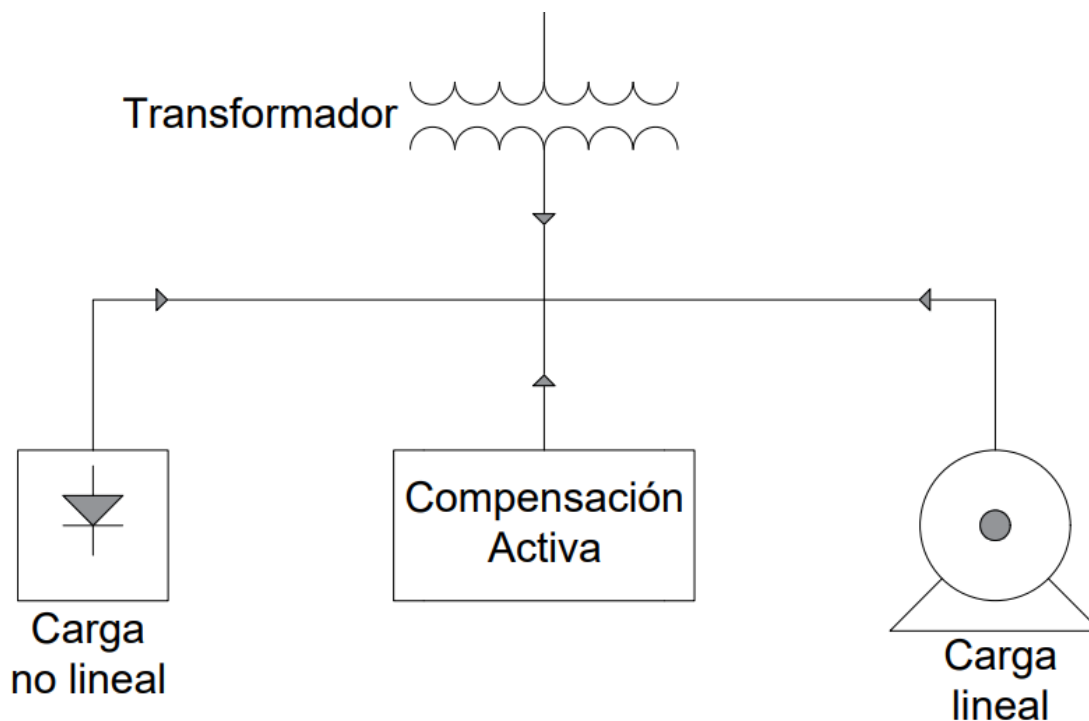


Figura 3.9 Conexión de filtro activo, tomado y modificado de [20].

Para el funcionamiento de estos dispositivos es necesaria la medición de los niveles de tensión y corriente distorsionada en el punto de conexión, con esto, el sistema consigue la compensación mediante la inyección de corrientes armónicas iguales a las producidas en el sistema, pero en sentido inverso. La gran desventaja de este

tipo de filtro es su costo económico por los elementos que lo componen y el control que utiliza.

3.5.3 Factor K en transformadores

Es un factor opcional utilizado en transformadores, el cual nos indica la capacidad que tiene el equipo para manejar corrientes del tipo no sinusoidales y esta expresado de la siguiente manera [2]:

$$Factor\ K = \sum_{h=1}^{\infty} I_h(pu)^2 h^2 \quad (3.40)$$

Donde:

$I_h(pu)$ = Corriente de valor eficaz para la armónica de orden h , la cual debe estar en por unidad.

h = Valor que corresponde al orden de la componente armónica

En la Tabla 3.2 se presenta una clasificación para distintos valores del *Factor K*, lo que nos permite determinar qué tipo de carga puede ser instalada al transformador.

Tabla 3.2 Clasificación del factor K para transformadores, tomado y modificado de [26].

Factor K	Tipo de carga
K-1	Lámparas incandescentes (sin dimmers de estado sólido), motores (sin controladores de estado sólido), transformadores de control, dispositivos electromagnéticos de control, motor generador (sin controladores de estado sólido).
K-4	Lámparas de descarga, UPS con filtros de entrada opcional, equipos de calefacción inductivos, PLC y controladores de estado sólido.

Tabla 3.2 Clasificación del factor K para transformadores, tomado y modificado de [26] (continuación).

K-13	Equipos de comunicaciones, UPS sin filtros de entrada.
K-20	Servidores de computadora, controladores de estado sólido (variadores de frecuencia), conectores multiconductor para instalaciones de salud, escuelas. etc., conectores multiconductor para alimentadores de equipos de inspección o prueba para líneas de producción.
K-30	Conectores multiconductor para circuitos industriales, médicos y laboratorios educacionales, conectores multiconductor para circuitos comerciales, pequeños servidores.
K-40	Otras cargas identificadas como productores de grandes cantidades de armónicos.

3.6 NORMATIVIDAD APLICABLE

3.6.1 Especificación CFE L0000-45, Desviaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente en el suministro y consumo de energía eléctrica.

Esta especificación se publicó en enero de 2005, basándose de normas de la IEC. El objetivo de esta especificación es establecer las desviaciones máximas permisibles en las formas de onda de tensión, corriente en el suministro y consumo de energía eléctrica, en el punto de acometida en el que la Comisión Federal de Electricidad participe. Esta aplica tanto al suministrador como a los consumidores que estén conectados a la red eléctrica de CFE.

En la sección 4 del punto número 9 nos da la definición de armónica “Componente senoidal de una onda periódica no senoidal llamada fundamental, que tiene una frecuencia correspondiente a un número múltiplo entero de la onda de frecuencia fundamental”.

3.6.2 Código de Red

Como bien se sabe el código de red se publicó a través del Diario Oficial de la Federación (DOF) el 8 de abril de 2016 conforme al artículo 12, fracción XXXVII de la Ley de la Industria Eléctrica (LIE) por parte de la Comisión Reguladora de Energía (CRE).

El primer punto que toca el Código de Red acerca de los armónicos es en el capítulo 3 “Criterios de observancia para el proceso de planeación” en el punto 3.3 “Criterios de calidad, confiabilidad, continuidad y seguridad de observancia para la planeación”, donde menciona la distorsión armónica de ondas de corriente y tensión permitidos en el Código de Red.

En el capítulo 8 “Requerimientos generales de Calidad de la energía” se basa completamente en armónicos, en el punto 8.5 “Requerimientos generales de contenido armónico máximo” explica el cálculo para la tasa de distorsión armónica (THD).

3.6.3 IEC 61000-4-30

A través de esta norma se definen una gran serie de procedimientos para la medida de los parámetros eléctricos con los cuales se determina la calidad de energía eléctrica suministrada para obtener resultados comparables, fiables y repetibles [19]. Los parámetros eléctricos son los siguientes:

- La frecuencia de la tensión de alimentación
- La magnitud de la tensión de alimentación
- El efecto Flicker
- Los armónicos
- Los Interarmónicos
- La oscilación de la tensión de alimentación
- Los desequilibrios en la tensión de alimentación
- Sobretensiones en la tensión de alimentación

3.6.4 IEEE 519

Con base en esta norma y la IEC 61000-4-30 se basan tanto el Código de Red cómo la especificación de CFE L0000-45. En esta norma se basa el diseño de los sistemas eléctricos que incluyen principalmente a las cargas no lineales sin embargo no dejan fuera a las cargas lineales. Describe las ondas de tensión y corriente del sistema que se analiza, así como los límites de distorsión de estas [22].

Enfatiza el Punto de Conexión Común (Point Common Coupling, PCC) ya que es el punto de conexión entre la instalación del usuario con el sistema eléctrico, además que es el punto con menor impedancia y donde se debe anular el paso de armónicos. Con base en esto se establecen los límites permitidos para el control de armónicos entre los usuarios y la compañía suministradora [27].

Cabe aclarar que las tablas y datos mencionados en esta especificación y en el Código de Red se basan en la norma IEEE 519 al igual que en la norma IEC 61000-4-30.

En la Tabla 3.3 se observa los límites máximos permitidos para la distorsión armónica en la onda de corriente hasta 69 kV.

Tabla 3.3 Distorsión armónica máxima permitida en corriente hasta 69 kV, tomado de [22,25].

Impedancia relativa o razón de cortocircuito (I_{CC}/I_L)	Límites para componentes armónicas impares en % de I_L					Distorsión armónica total de demanda en % (%DATD)
	<11	11 a 16	17 a 22	23 a 34	>34	
$(I_{CC}/I_L) < 20$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < (I_{CC}/I_L) < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < (I_{CC}/I_L) < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < (I_{CC}/I_L) < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
$(I_{CC}/I_L) > 1000$	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Al igual que la onda de corriente, la onda de tensión también puede verse afectada por perturbaciones de tipo armónicas por lo que también se establecen límites máximos de distorsión los cuales se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Límites máximos de distorsión armónica total en la tensión, tomado de [22,25].

Tensión en PCC	Armónico individual [%]	Distorsión armónica total THD [%]
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5	8
$1.0 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3	5
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1	1.5

De este capítulo se puede observar que un armónico no es más que una onda a la que se le han agregado otras de menor proporción, pero a frecuencias cada vez más altas, ocasionando que, la onda resultante deje de ser sinusoidal, por lo que para su análisis se requiere fundamentos matemáticos distintos a los utilizados en el estudio de ondas fundamentales o sinusoidales. Dentro de la gran variedad de cargas que se pueden encontrar en las instalaciones eléctricas existen equipos que producen y son afectados por los armónicos, como el caso de los transformadores o los motores, mientras que otros solo son afectados por este tipo de perturbaciones, provocando, mal funcionamiento, reducción de la vida útil, sobrecalentamiento y en el peor de los casos, pérdida del equipo. Esto conduce a que sea necesario su normalización y mitigación, esta última, mediante el uso de filtros activos o pasivos.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE CONTENIDO ARMÓNICO

4.1 INTRODUCCIÓN

Una estación de selección de residuos sólidos es la encargada de separar los desechos por categorías como lo puede ser PET, metal, cartón, plásticos, vidrio, papel y Tetrapak, los cuales provienen de distintos puntos de la Ciudad de México y del Estado de México, una vez que estos materiales son recuperados los restantes (materiales no recuperados o rechazados) se transportan a los sitios de disposición final. La operación de las plantas de selección se realiza de manera coordinada entre la Dirección General de Servicios Urbanos de la Secretaría de Obras y Servicios y los gremios recolectores. Actualmente la Ciudad de México cuenta con tres plantas de selección de residuos sólidos, las cuales son, San Juan de Aragón, Santa Catarina y Azcapotzalco.

4.2 DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

La unidad de selección de residuos sólidos San Juan de Aragón se localiza en la Alcaldía Gustavo A. Madero, situada entre las Avenidas 608 y 412.

Esta planta de selección está alimentada a través de una tensión de 23 kV proporcionados por la Comisión Federal de Electricidad, la acometida está compuesta por tres conductores de 3/0 de aluminio los cuales se conectan a un transformador de 1500 kVA con conexión delta-estrella, obteniendo tensiones en el lado secundario de 460/265 V.

Su principal carga instalada pertenece a motores eléctricos que se encargan del proceso de selección y compactación de los residuos sólidos, para el proceso de selección se tienen 31 motores, divididos a su vez en grupos que realizan subprocesos como puede ser la etapa de rompe bolsas, separación de metales a través de electroimanes, bandas transportadoras, etc., dicha carga equivale a 243 HP, los cuales son controlados a través de variadores de velocidad. En la Figura 4.1 se muestra una parte del diagrama unifilar.

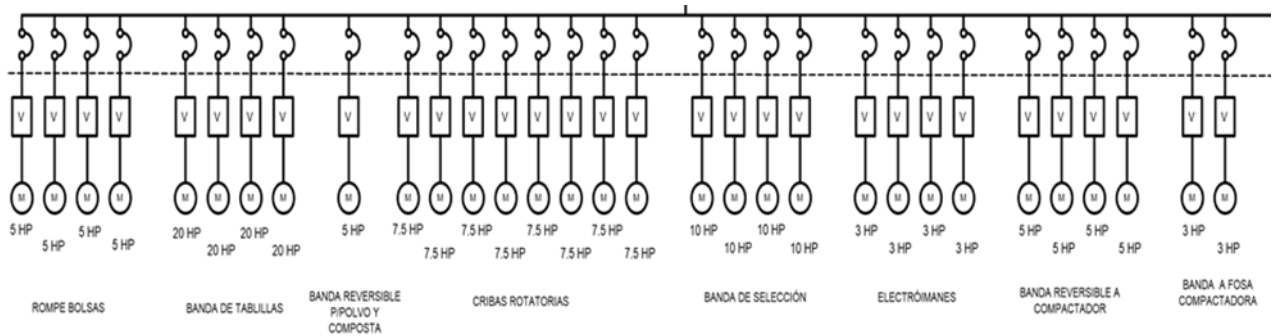


Figura 4.1 Motores que conforman el proceso de selección de residuos

Finalmente, para la etapa de compactación se cuenta con una carga de 780 HP pertenecientes a dos compactadoras controladas a través de control electromagnético, puesto que ambas compactadoras poseen las mismas características, en la Figura 4.2 se muestra cómo está conformada dicha carga, si se desea observar con mejor detalle las cargas que conforman esta planta de selección, así como su distribución y demás cargas menores se recomienda consultar el ANEXO 3.

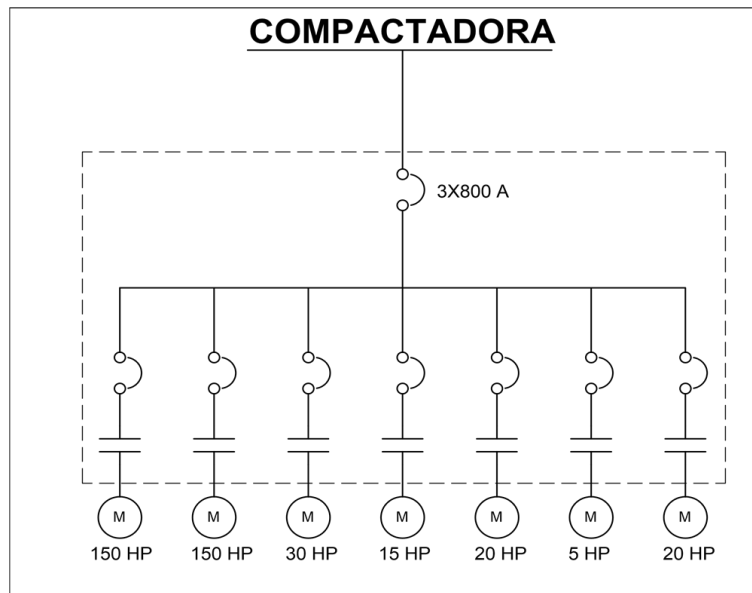


Figura 4.2 Motores que conforman el proceso de compactación

4.3 METODOLOGÍA

Para esta etapa se plantean tres casos de estudio, el primer caso corresponde a un análisis de la carga sin compensación reactiva, para el segundo caso se analiza el comportamiento de la instalación con la compensación reactiva proporcionada únicamente por un banco de capacitores calculado a un factor de potencia adecuado, finalmente, el tercer caso consistirá en el comportamiento de la instalación cuando existe compensación reactiva y un filtro sintonizado simple para un nivel armónico determinado. Cada uno de los casos de estudio incluirá el análisis del factor de potencia, niveles de distorsión armónica de corriente y tensión y un escaneo de frecuencia, este último con la finalidad de advertir puntos resonantes.

4.3.1 Primer caso: Sistema sin compensación reactiva

Una vez modeladas las cargas en el software especializado ETAP y haciendo uso de la función flujos de carga se procede a determinar el factor de potencia existente en la instalación, obteniendo un factor de potencia de 85.64% en el PCC-2, como se muestra en la Figura 4.3.

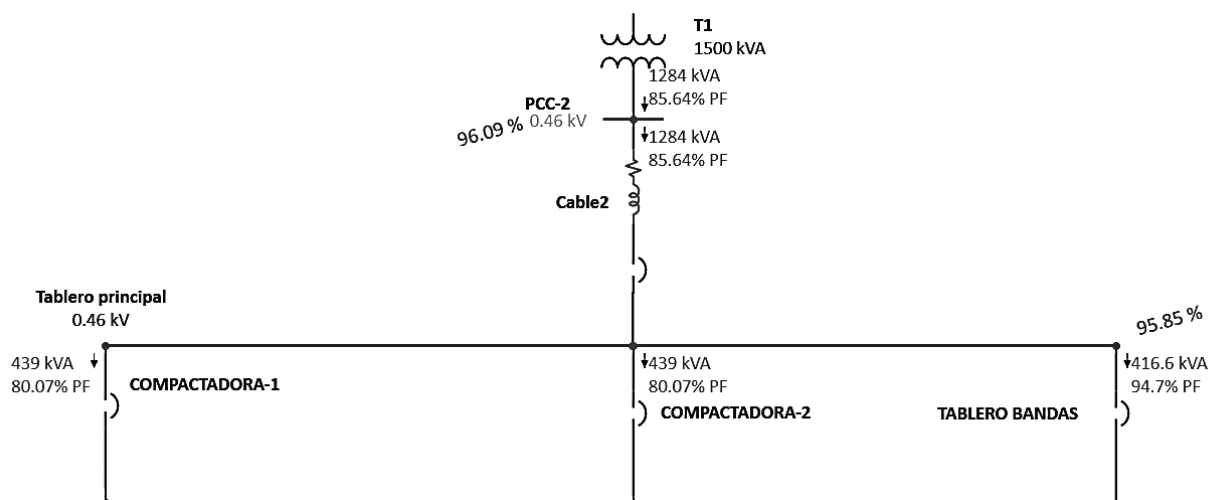


Figura 4.3 Flujo de potencia sin compensación reactiva.

A continuación, se procede a realizar un flujo de carga armónica para conocer los niveles de distorsión que se encuentran presentes debido a los variadores de frecuencia. En la Figura 4.4 se muestra la forma de onda y contenido armónico presente en el Tablero Principal.

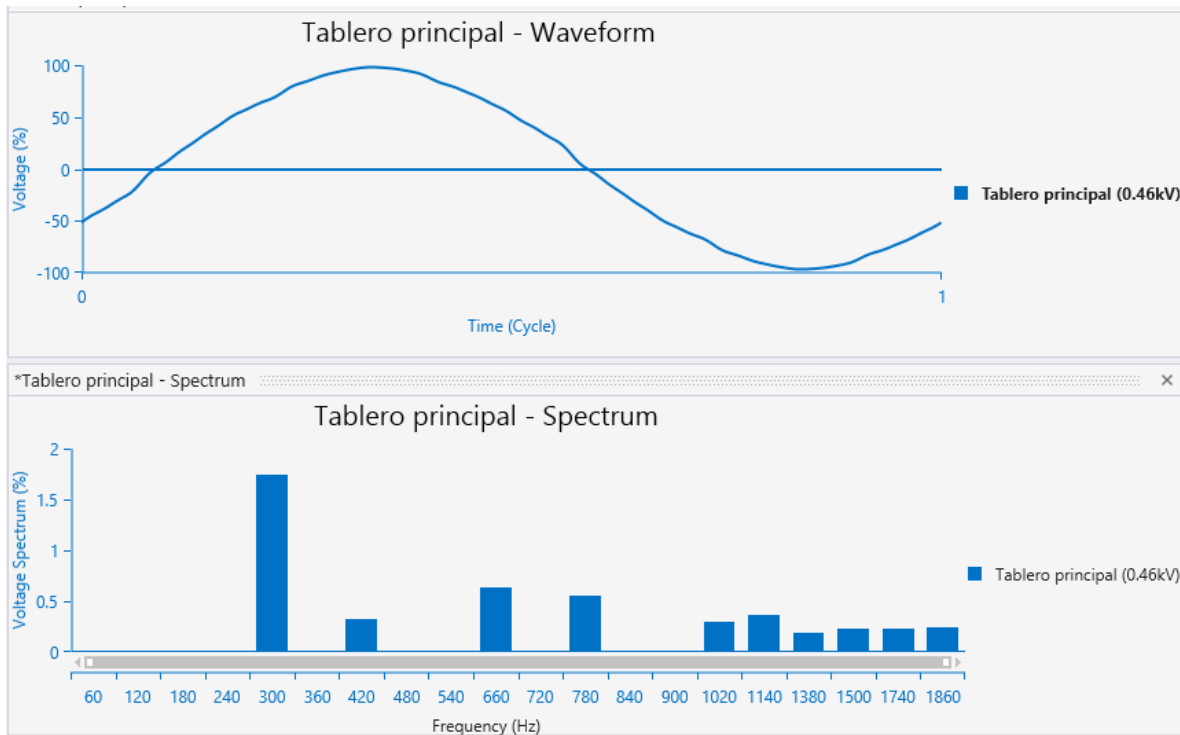


Figura 4.4 Onda y espectro armónico resultante en el Tablero Principal.

De la Figura 4.5 se observa de acuerdo con su espectro armónico que la corriente armónica predominante en el transformador principal del lado de media tensión es la quinta armónica.

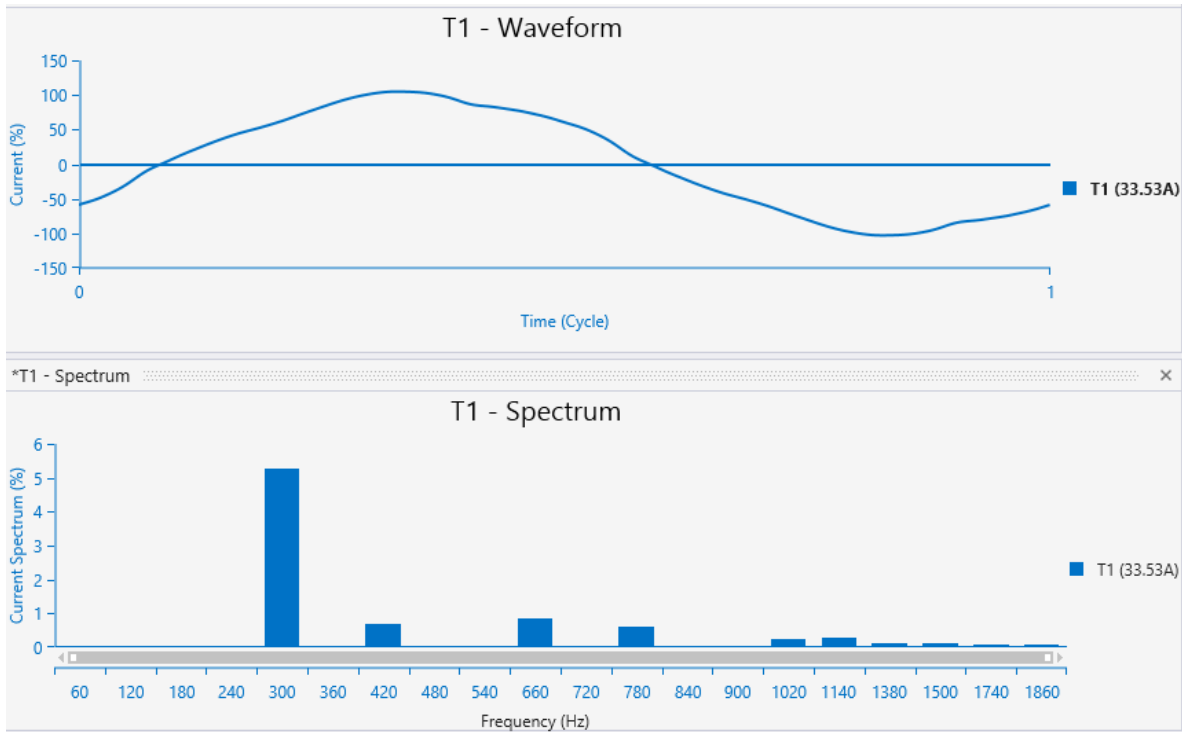


Figura 4.5 Onda y espectro armónico resultante en el transformador principal.

Posteriormente al realizar un escaneo de frecuencia en el Tablero Principal de la instalación se observa que no hay presencia hasta el momento de algún punto resonante, la resonancia serie tendría lugar si, la reactancia inductiva y capacitiva se anularan para una determinada frecuencia, ocasionando un nivel mínimo de impedancia, de manera gráfica se observaría como un valle, por otra parte, la resonancia paralelo también ocasionaría que las reactancias capacitivas e inductivas se anulen para una frecuencia específica, ocasionando en este caso. un nivel máximo de impedancia la cual estaría representado por un pico en la gráfica.

En la Figura 4.6 se observa que la impedancia del sistema tiene un comportamiento casi lineal puesto que hasta el momento solo están interactuando la resistencia y reactancia inductiva en el punto de análisis.

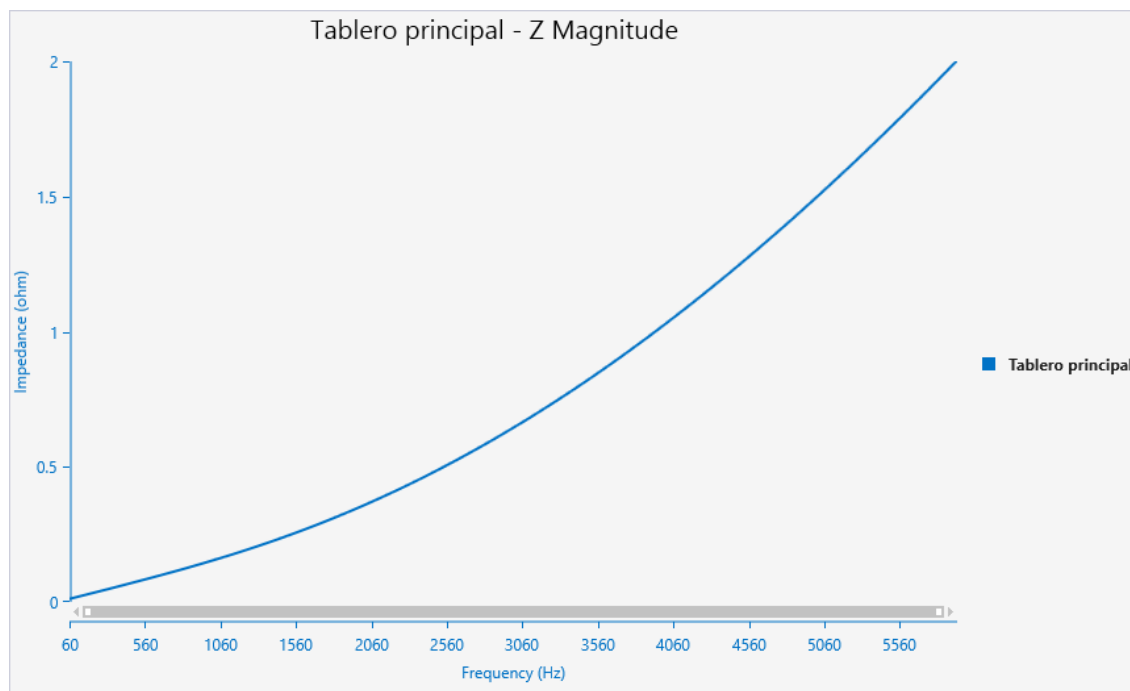


Figura 4.6 Escaneo de frecuencia en el Tablero Principal

4.3.2 Análisis de resultados para el primer caso de estudio

De este primer caso se pueden resumir los parámetros más relevantes como se muestra en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Parámetros de THD y factor de potencia para el primer caso de estudio.

Parámetro	Porcentaje [%]
THD _V -PCC-1	0.113
THD _I -PCC-1	5.44
THD _V -Tablero Principal	2.09
Factor de potencia	85.64

De acuerdo con las Tabla 4.2 y Tabla 4.3 se procede a evaluar los límites de distorsión armónica permisibles en corriente y tensión.

Tabla 4.2 Distorsión armónica máxima permitida en corriente hasta 69 kV, tomado de [22,25].

Impedancia relativa o razón de cortocircuito (I_{CC}/I_L)	Límites para componentes armónicas impares en % de I_L					Distorsión armónica total de demanda en % (%DATD)
	<11	11 a 16	17 a 22	23 a 34	>34	
$(I_{CC}/I_L) < 20$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < (I_{CC}/I_L) < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < (I_{CC}/I_L) < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < (I_{CC}/I_L) < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
$(I_{CC}/I_L) > 1000$	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Para el cálculo de impedancia relativa o razón de cortocircuito se considera un valor de I_{CC} de 9.03 kA y un valor I_L de 33.5 A, obteniendo:

$$\frac{I_{CC}}{I_L} = \frac{9030}{33.5} = 269.55$$

Para esta razón de cortocircuito se permite hasta un 12% de distorsión armónica en corriente considerando componentes del tipo impar y menores a la onceava armónica para tensiones menores o iguales a 69 kV de acuerdo con la Tabla 4.2

De acuerdo con la Tabla 4.1 la distorsión armónica total de la corriente en la instalación es de 5.44% por lo que se encuentra dentro del límite permisible recomendado por la normatividad.

Para el caso de la tensión, los valores obtenidos en el primer caso de estudio se encuentran dentro de los límites permitidos, tal como lo muestra la Tabla 4.3, puesto que para un nivel de tensión menor a 1 kV se permite una distorsión armónica de 8% y para valores mayor a 1 kV y menor a 69 kV se permite 5% y, de acuerdo con la Tabla 4.1 se obtienen valores de 2.09% y 0.133% respectivamente.

Tabla 4.3 Límites máximos de distorsión armónica total en la tensión, tomado de [22,25].

Tensión en PCC	Armónico individual [%]	Distorsión armónica total THD [%]
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5	8
$1.0 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3	5
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1	1.5

Finalmente, el factor de potencia encontrado en la instalación se considera bajo conforme a lo establecido por el suministrador de energía, en este caso Comisión Federal de Electricidad, debido a que para evitar recargos en la facturación se debe mantener un factor de potencia promedio mínimo de 90%.

4.3.3 Segundo caso: Sistema con compensación reactiva

Como se observó en el primer caso, el factor de potencia se encuentra en un nivel bajo provocando un recargo por parte de la compañía suministradora, además de una distorsión considerable en el lado de media tensión, por lo que se recurre a calcular un banco de capacitores para un factor de potencia de 98%.

Conociendo que la carga instalada es de 1100 kW y que el factor de potencia actual en la instalación es de 85.64%, se presenta a continuación el cálculo de la potencia reactiva necesaria en la instalación de acuerdo con el fundamento matemático siguiente:

$$Q_C = P(\tan(\cos^{-1}FP_1) - \tan(\cos^{-1}FP_2))$$

$$Q_C = 1100(\tan(\cos^{-1}(0.85)) - \tan(\cos^{-1}(0.98)))$$

$$Q_C = 1100(0.619744 - 0.203058)$$

$$Q_C = 1100(0.416686)$$

$$Q_c = 458.3546 \text{ [kVAR]}$$

$$Q_c \approx 480 \text{ [kVAR]}$$

El banco de capacitores de valor comercial es de 480 kVARs, una vez seleccionado este valor se procede a analizar la instalación.

Al incluir el banco de capacitores a la instalación y al ejecutar la función de flujos de carga se observa que el factor de potencia se aproxima al calculado, dando un valor de 97.67% de acuerdo con la Figura 4.7.

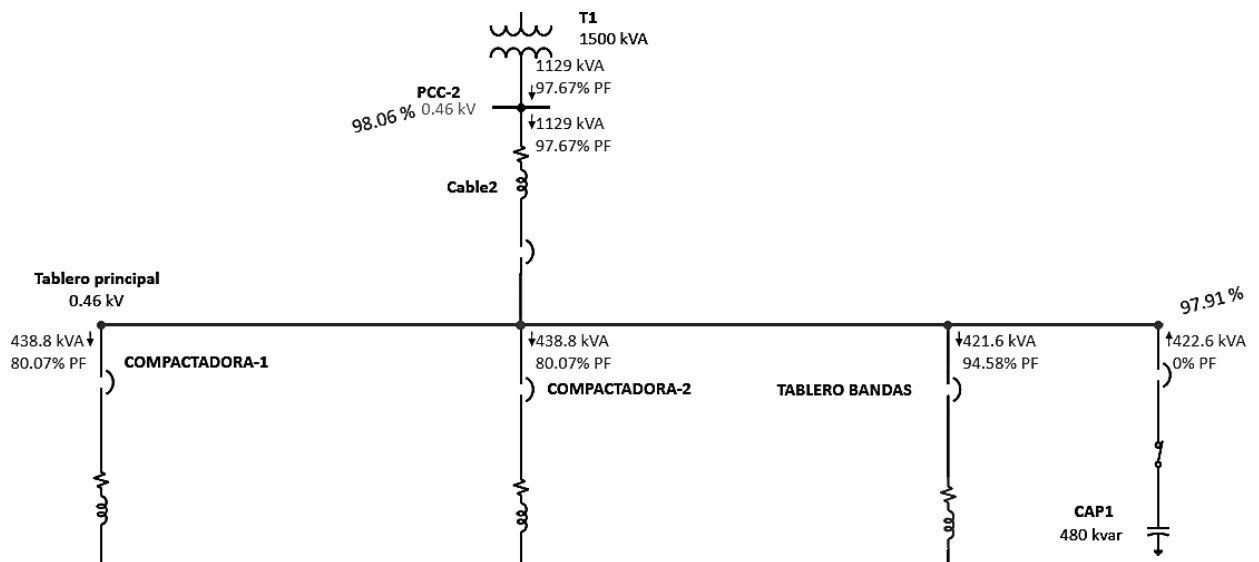


Figura 4.7 Flujo de potencia con compensación reactiva.

Al realizar el flujo de potencia armónica se observa en la Figura 4.8 que existe un incremento en los niveles de distorsión armónica en la onda de tensión del Tablero Principal, alcanzando un %THD de 3.48.

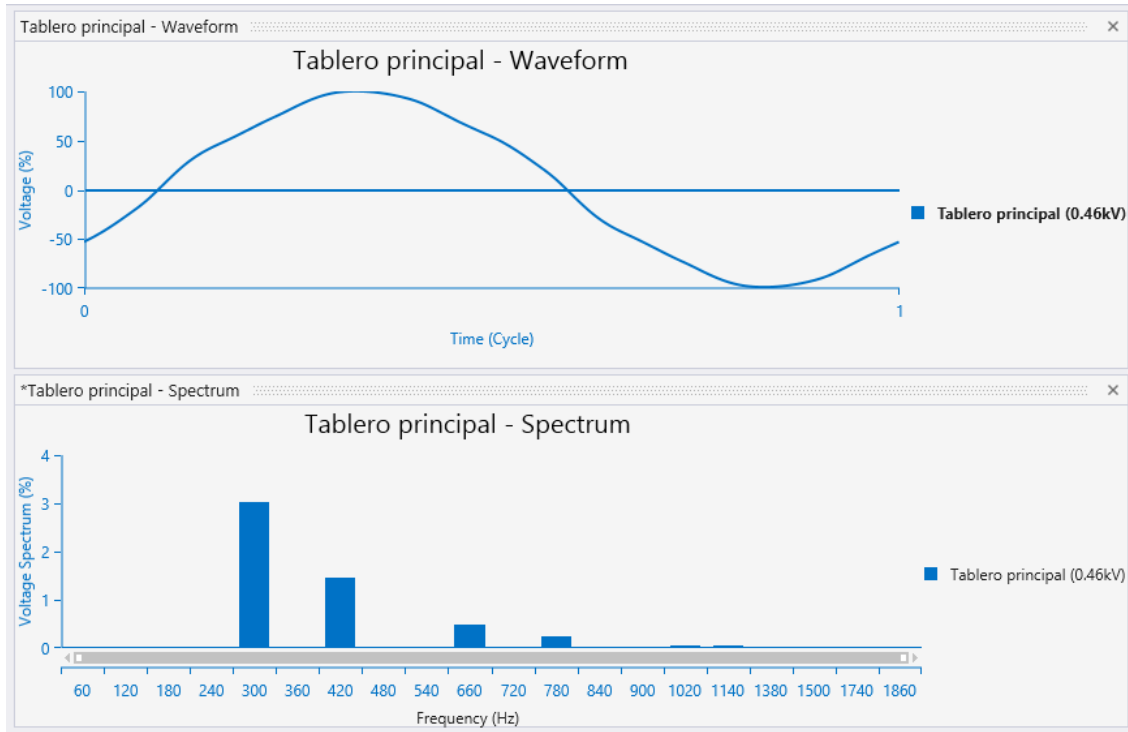


Figura 4.8 Onda y espectro armónico resultante en el Tablero Principal, elaboración propia.

El incremento más notorio se presenta en la onda de corriente, la cual incrementó casi al doble su %THD, alcanzando un valor de 11.25%, esto fue provocado por la inserción del banco de capacitores a la instalación obteniendo como resultado que la armónica quinta sea la que presente la mayor amplificación de acuerdo con el espectro armónico mostrado en la Figura 4.9.

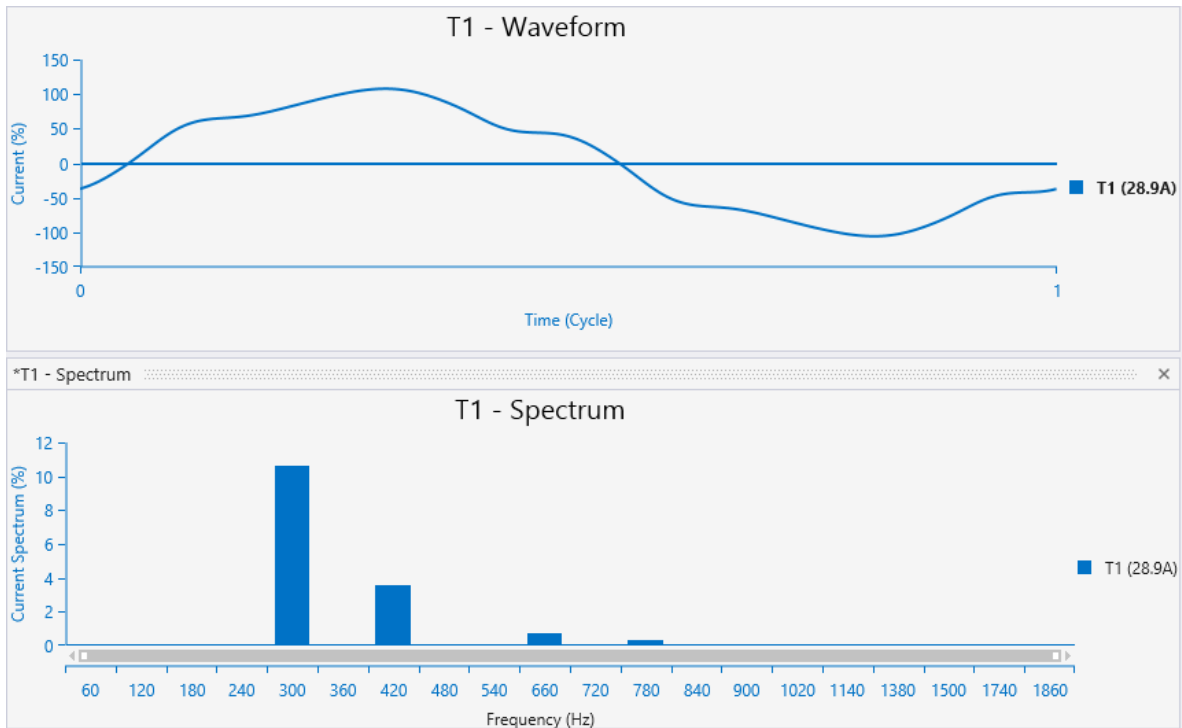


Figura 4.9 Onda y espectro armónico resultante en el transformador principal.

Al incluir una potencia reactiva de tipo capacitiva al sistema se suma a la instalación una reactancia capacitiva, la cual al interactuar con la impedancia equivalente en el punto de conexión ocasiona que para alguna frecuencia estas reactancias se anulen provocando un punto de resonancia paralelo. Al realizar un escaneo de frecuencia en el Tablero Principal (Figura 4.10) se aprecia que en la séptima armónica o a una frecuencia de 420 Hz. se presenta un punto de resonancia paralelo.

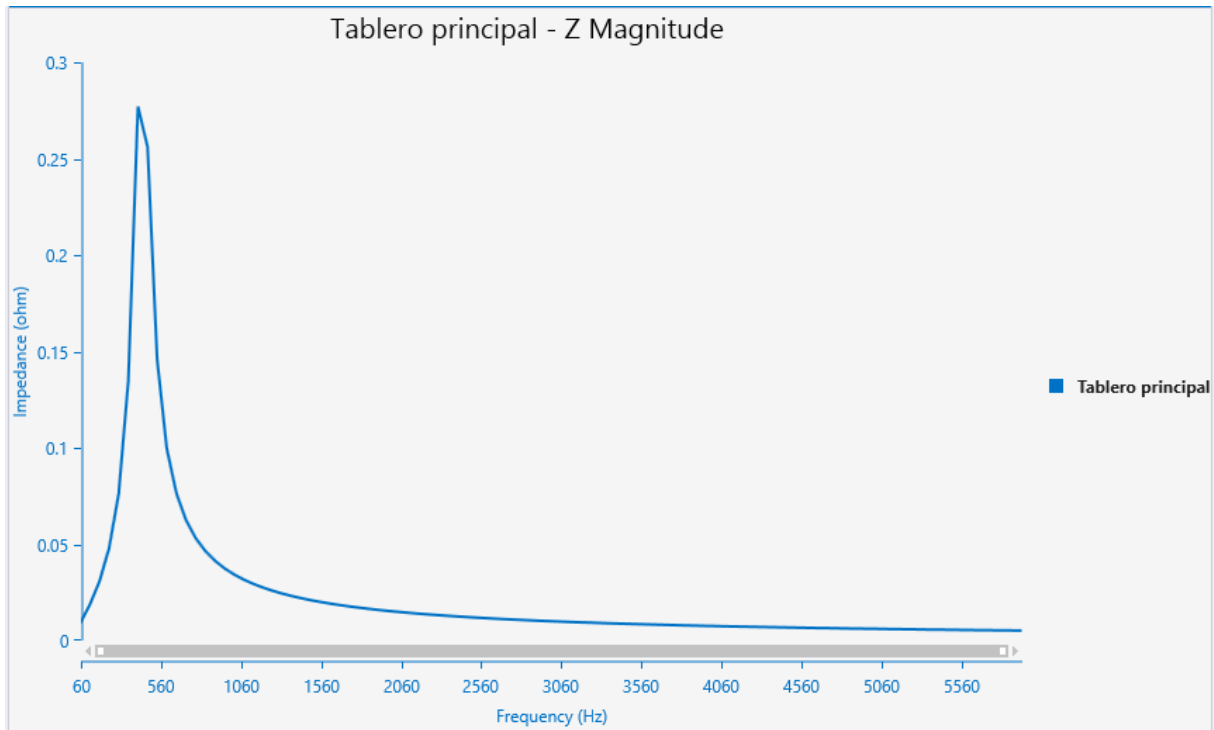


Figura 4.10 Escaneo de frecuencia en el Tablero Principal.

En la Figura 4.11 se presenta una amplificación del punto resonante paralelo presentado en la Figura 4.10, con el fin de observar con mayor claridad a que frecuencia se presenta dicha resonancia así como también el valor de impedancia en dicha condición.

Si se examina el espectro armónico de la Figura 4.9 se observa que, a la frecuencia de 420 Hz se tiene un componente armónico del 4%, lo que podría provocar que el punto de resonancia paralelo tenga lugar en la instalación ocasionando una sobretensión en la instalación, lo que se traduciría, en el menor de los casos, afectación en el funcionamiento en los equipos instalados.

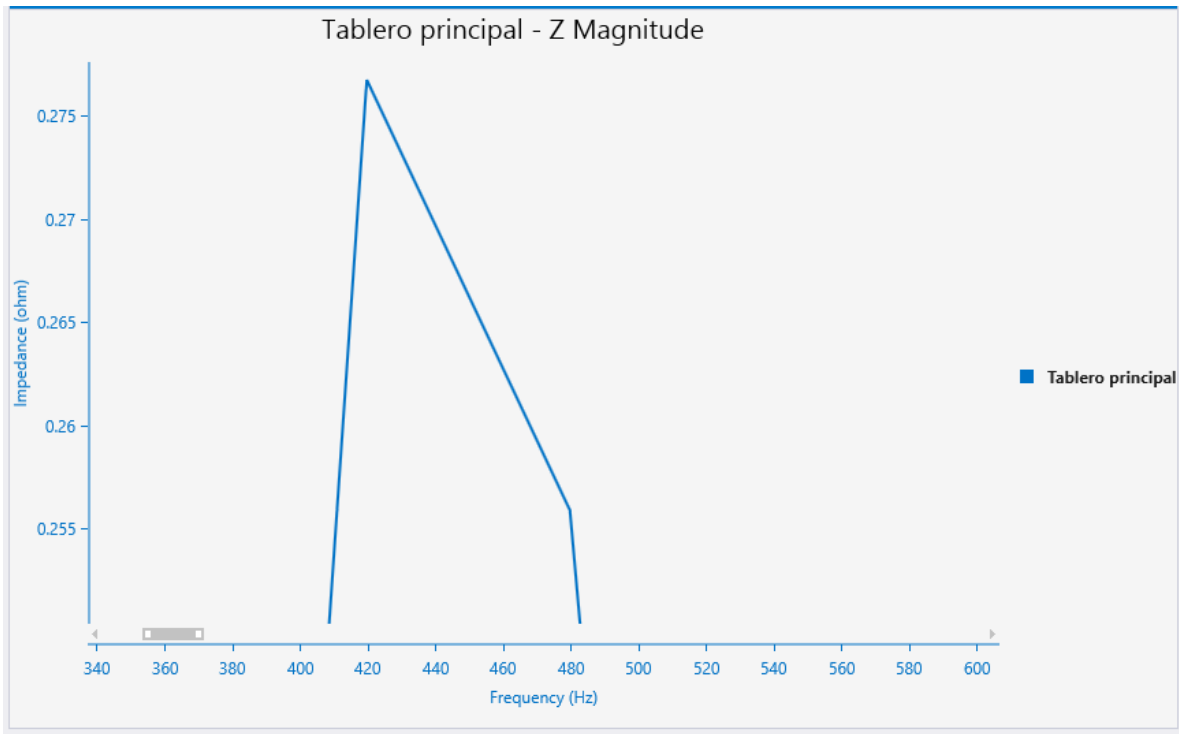


Figura 4.11 Amplificación del punto resonante paralelo presente en el Tablero Principal.

4.3.4 Análisis de resultados para el segundo caso de estudio

Para el segundo caso los aspectos más relevantes se resumen como se muestra a continuación en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Parámetros de THD y factor de potencia para el segundo caso de estudio.

Parámetro	Porcentaje [%]
THD _V -PCC-1	0.191
THD _I -PCC-1	11.25
THD _V -Tablero Principal	3.48
Factor de potencia	97.67

Para el cálculo de impedancia relativa se considera ahora un valor de I_{cc} de 9.03 kA y un valor I_L de 28.9 A, obteniendo:

$$\frac{I_{cc}}{I_L} = \frac{9030}{28.9} = 312.5$$

El valor resultante se sitúa en los rangos de mayor a 100 y menor a 1000 de impedancia relativa de acuerdo con la Tabla 4.2, permitiéndonos, como se mencionó anteriormente, hasta un 12% de distorsión armónica en corriente en el lado de media tensión, en los resultados obtenidos con la instalación compensada solamente por el banco de capacitores se obtiene un valor mayor al 11%, provocando que la instalación llegue a superar en algún momento los valores permitidos por la normatividad.

Para el caso de la tensión a un nivel de 460 V también se observa un incremento de menor proporción en el contenido armónico, alcanzando un porcentaje de distorsión armónica de 3.48%, por debajo del 8% permitido de acuerdo con la Tabla 4.3, así mismo, a un nivel de 23 kV se permite un porcentaje de distorsión armónica del 5% obteniendo en la instalación un valor de 0.191%.

Por otra parte, la inserción del banco de capacitores eleva el factor de potencia a un nivel de 97.67%, lo que resulta en evitar una penalización por parte de la Comisión Federal de Electricidad y, más importante aún, se obtendría una bonificación por mantener este parámetro por encima del 90%.

De este caso de estudio se puede concluir que, si bien la adición de potencia reactiva mejora el factor de potencia en la instalación de igual manera incrementa los niveles de distorsión armónica en la Planta de Selección de Residuos Sólidos por lo que esta solución no es la más viable.

4.3.5 Tercer caso: Sistema con compensación reactiva más filtro sintonizado simple.

Para la selección del filtro pasivo se debe tomar en cuenta las necesidades y características de la instalación eléctrica, para este caso de estudio la mejor opción es un filtro de sintonización simple, debido a que, el nivel más predominante en la planta es la quinta armónica y este tipo de filtro proporciona una máxima atenuación para una determinada armónica, además, a frecuencia fundamental entrega la potencia reactiva necesaria para el incremento del factor de potencia.

Del segundo caso de estudio se retoma el cálculo de la potencia reactiva y se presenta a continuación el cálculo de los parámetros del filtro sintonizado a la quinta armónica.

Cálculo de la reactancia capacitiva a frecuencia fundamental

$$X_{C1} = \frac{V_{filtro}^2}{VARS} = \frac{480^2}{480 \times 10^3} = 0.48 \Omega$$

Reactancia capacitiva para la quinta armónica:

$$X_{C5} = \frac{X_{C1}}{h} = \frac{0.48}{5} = 0.096 \Omega$$

Cálculo de la reactancia inductiva requerida a frecuencia fundamental:

$$X_{L1} = \frac{X_C}{h^2} = \frac{0.48}{5^2} = 0.0192 \Omega$$

Una vez calculados los valores del filtro sintonizado y verificado que el funcionamiento del capacitor se encuentra dentro de los límites recomendados por la normativa americana IEEE-18 (consultar ANEXO 1 para verificar el cumplimiento de dichos valores) se trasladan estas variables a ETAP.

El factor de potencia en PCC-2 de la planta de selección de residuos se mantiene en el valor calculado de acuerdo con la Figura 4.12.

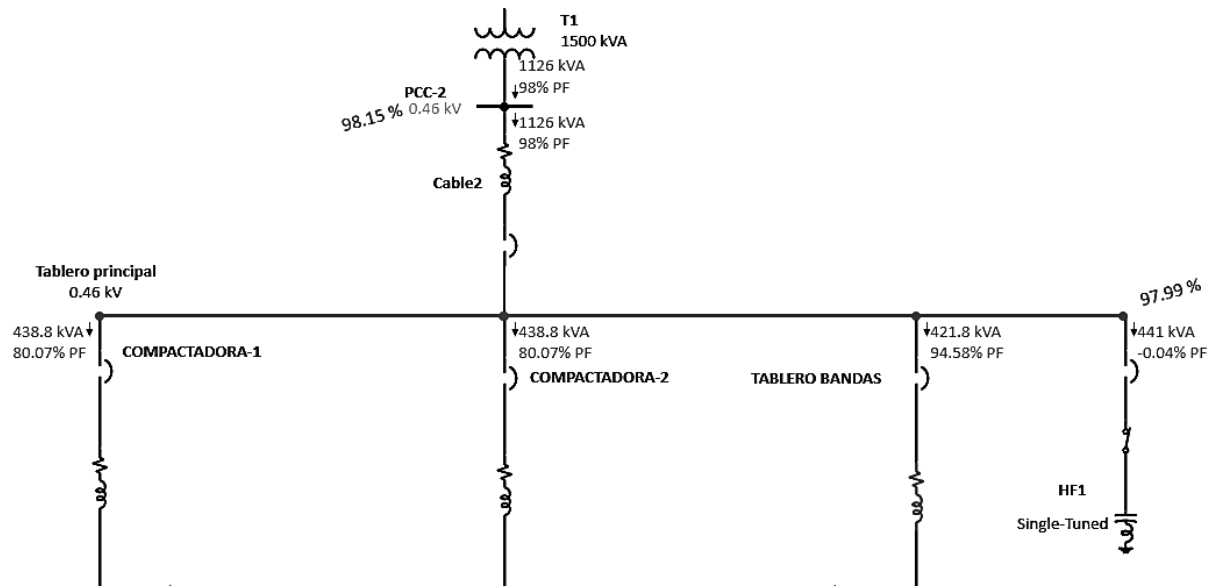


Figura 4.12 Flujo de potencia con compensación reactiva más filtro sintonizado simple.

El contenido armónico en la onda de tensión del Tablero Principal presenta una disminución debido al efecto del filtro sintonizado, de acuerdo con el espectro armónico presentado en la Figura 4.13.

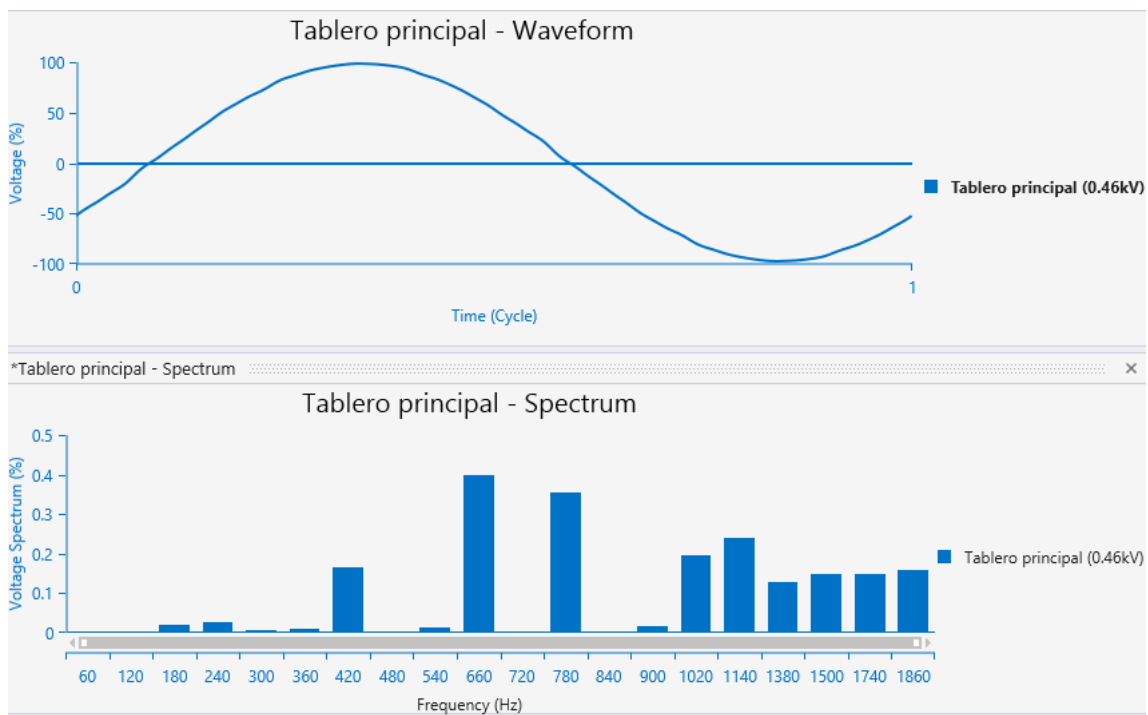


Figura 4.13 Onda y espectro armónico resultante en el Tablero Principal.

La distorsión armónica del lado de media tensión del transformador también presenta una disminución significativa, asumiendo una forma casi senoidal como se aprecia en Figura 4.14.

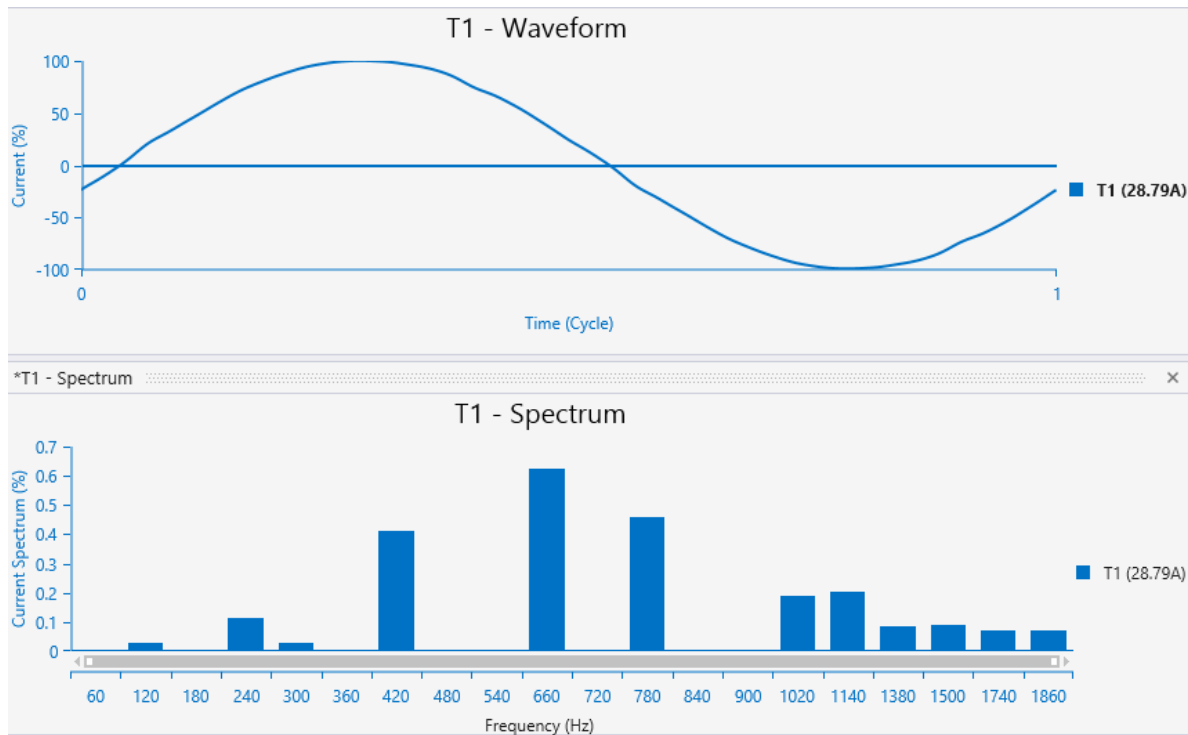


Figura 4.14 Onda y espectro armónico resultante en el transformador principal

Posteriormente al realizar un escaneo de frecuencia se observan dos puntos resonantes, uno serie, presente en la quinta armónica, esto significa que la corriente a esa frecuencia encontrará un camino de baja impedancia yéndose directamente al filtro y no al sistema, el otro punto resonante corresponde a un tipo paralelo que ocurre entre el filtro y el sistema.

Si se examina el espectro armónico presentado en la Figura 4.14 se observa que, a la frecuencia de 420 Hz, la cual corresponde al punto resonante paralelo, existe un nivel armónico con un valor de aproximadamente 0.4%, si bien, la presencia de este armónico puede ocasionar una sobretensión en la instalación al ser un valor por debajo de 1% este riesgo se reduce.

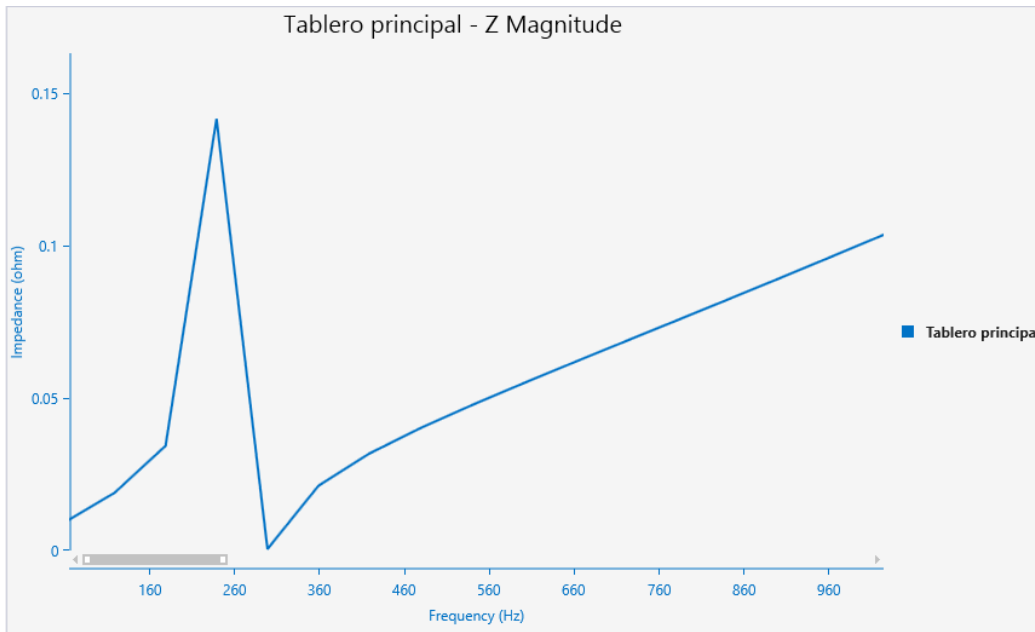


Figura 4.15 Escaneo de frecuencia en el Tablero Principal.

En la Figura 4.16 se observa una ampliación de la Figura 4.15 con la finalidad de tener una mejor apreciación del punto resonante serie y paralelo.

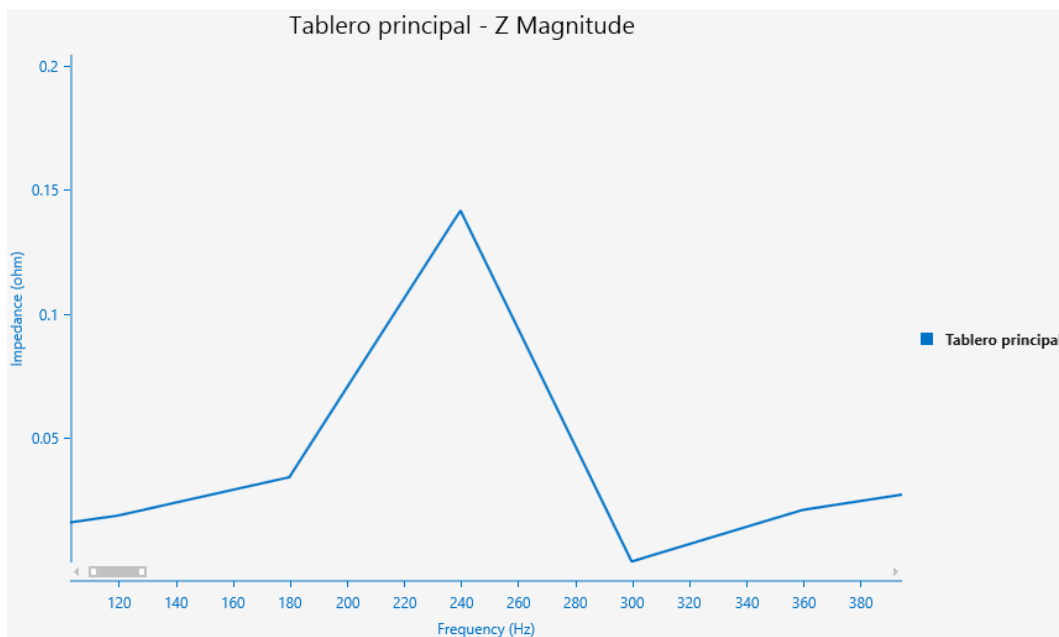


Figura 4.16 Amplificación de los puntos resonantes presentes en el Tablero Principal.

4.3.6 Análisis de resultados para el tercer caso de estudio

Para el tercer y último caso los aspectos más relevantes se resumen como se muestra en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Parámetros de THD y factor de potencia para el tercer caso de estudio.

Parámetro	Porcentaje [%]
THD _V -PCC-1	0.034
THD _I -PCC-1	0.941
THD _V -Tablero Principal	0.0698
Factor de potencia	98

De acuerdo con el software ETAP la corriente de carga toma ahora un valor de 28.8 A. por lo que la relación de cortocircuito queda de la siguiente manera:

$$\frac{I_{CC}}{I_L} = \frac{9030}{28.8} = 313.55$$

Como en los casos anteriores, este valor se sitúa en la cuarta fila de la Tabla 4.2, permitiendo una distorsión armónica en corriente del 12% en el Punto de Acoplamiento Común, como se observa en la Tabla 4.3 este valor se encuentra muy por debajo del límite, alcanzando un porcentaje menor a 1%

Por otra parte, el porcentaje de distorsión armónica en tensión del lado de media tensión presenta una disminución alcanzando un valor de 0.034%, así mismo, en el tablero principal con tensión de 460 V. existe un decremento de este parámetro, posicionándose en 0.0698% que de acuerdo con la Tabla 4.3 estos valores se encuentran dentro de los límites permisibles.

Finalmente, el factor de potencia se mantiene en un valor de 98% lo que significaría una bonificación mensual por parte de la compañía suministradora y se evitaría una penalización por contenido armónico de acuerdo con el Código de Red.

De los tres casos de estudio analizados se puede concluir que, la mejor opción para la mitigación de componentes armónicos y el incremento del factor de potencia es cuando a la instalación se le agrega un filtro pasivo, puesto que a frecuencia fundamental entrega la potencia reactiva necesaria para elevar el factor de potencia y, además, presenta una máxima atenuación para la quinta armónica.

Una vez seleccionado el filtro pasivo como la mejor opción para solucionar los problemas encontrados en la Estación de Selección de Residuos Sólidos vale la pena analizar los gastos que generaría la selección, compra, instalación y demás gastos relacionados al filtro armónico, por lo que en el siguiente capítulo se presenta un estudio económico, con la finalidad de evaluar la rentabilidad del proyecto.

CAPÍTULO 5 ESTUDIO ECONÓMICO

5.1 Estimación de costos

En las siguientes tablas se muestra detalladamente una lista de todas las actividades que se realizaron, tomando en cuenta el día de trabajo de un ingeniero electricista para poder analizar la planta de residuos sólidos y el equipo necesario para llevar a cabo esta acción, así como también costos de licencias de los softwares, costos y comparaciones de los equipos utilizados.

Para tener un aproximado del costo que se llevará a cabo en la Tabla 5.1 se toma en cuenta el sueldo promedio de un ingeniero electricista y de un técnico electricista.

Para México en el 2021 el salario mínimo mensual de un ingeniero electricista recién egresado es de \$10486 aproximadamente y de un ingeniero electricista con una amplia experiencia es de \$40069.85 aproximadamente [28].

Obteniendo un promedio de los dos casos, obtenemos:

$$\textit{Promedio sueldo ing} = \frac{\textit{sueldo mínimo} + \textit{sueldo máximo}}{2}$$

$$\textit{Promedio sueldo ing} = \frac{10486 + 40069.85}{2} = 25277.925 \approx \$25278$$

Para México en el 2021 el sueldo mínimo mensual de un técnico electricista es de \$3727 aproximadamente y el sueldo máximo es de \$11077 [1].

Obteniendo un promedio de los dos casos, obtenemos:

$$\textit{Promedio sueldo téc} = \frac{\textit{sueldo mínimo} + \textit{sueldo máximo}}{2}$$

$$\textit{Promedio sueldo téc} = \frac{3727 + 11077}{2} = \$7402$$

Tomando en cuenta que tanto el ingeniero como el técnico trabajan 8 horas al día, 5 días a la semana (lunes a viernes) y aproximadamente 20 días al mes.

Tabla 5.1 Costos totales de la visita de la instalación.

Actividad	Concepto	Horas empleadas	Costo (MXN)
*1	Realización del recorrido de la instalación	8	\$1634
*2	Levantamiento de datos de placa de los equipos en la instalación	8	\$1634
**3	Elaboración del diagrama unifilar en software AutoCAD	4	\$185.05
**4	Elaboración del diagrama unifilar en el software ETAP	4	\$185.05
**5	Elaboración de un informe del análisis, así como también una memoria de cálculo	16	\$740.2

* La actividad la realizó un ingeniero en compañía de un técnico electricista.

**La actividad la realizó un técnico electricista

$$\text{Actividad 1} - 2 = \frac{25278}{20} + \frac{7402}{20} = \$1634$$

$$\text{Actividad 3} - 4 = \frac{\frac{7402}{20}}{2} = \$185.05$$

$$\text{Actividad 5} = \left(\frac{7402}{2}\right)(2) = 740.2$$

$$\text{Total Act} = \text{Actividad 1} - 2(2) + \text{Actividad 3} - 4(2) + \text{Actividad 5} = \$4378.30$$

Para la Tabla 5.2 se muestra el costo de las licencias de los softwares que se utilizaron para la elaboración del diagrama unifilar y en este caso el análisis del contenido armónico por medio del software ETAP.

Tabla 5.2 Costo de las licencias de los softwares utilizados.

Software	Costo de la licencia (MXN)	Costo de la licencia en dólares
AutoCAD	\$28026.00 por año más IVA	\$1378.36
*ETAP	\$229819.20 más IVA	\$11298.87

* El software ETAP es de por vida con una sola licencia

Se toma el 16% de IVA para las licencias, en la cotización del Software AutoCAD ya viene incluido y en el software ETAP no.

$$P_{\text{dolares}} = \frac{\text{Costo de la licencia AutoCAD}}{20.34} = \frac{28036.00}{20.34} = \$1378.36 \text{ dolares}$$

$$P_{\text{dolares}} = \frac{\text{Costo de la licencia ETAP}}{20.34} = \frac{229819.20}{20.34} = \$11298.87 \text{ dolares}$$

El tipo de cambio de dólares estadounidenses a pesos mexicanos para el día 16 de octubre de 2021 de acuerdo con la Figura 5.1 es:



Figura 5.1 Tipo de cambio de dólares estadounidenses a pesos mexicanos, obtenido de Google.

En el caso de los softwares se tomará en cuenta el precio de la licencia conforme a los días que se utilizaron para desarrollar el sistema de caso de estudio, así como también correcciones y visualizaciones que se realizaron. Para el software ETAP se sabe que es de por vida con una sola licencia, en este caso se basa conforme a la vida útil de la computadora donde se puede instalar el software, teniendo una media de vida útil de computadoras en el país de 5 años.

Tabla 5.3 Costos de la utilización de los softwares

Software	Días que se utilizaron	Costo total (MXN)	Costo total en dólares
AutoCAD	5	\$383.91	\$18.87
ETAP	30	\$3777.84	\$185.73

$$\text{Software AutoCAD} = \left(\frac{28026.00}{365} \right) (5) = \$383.91$$

$$\text{Software ETAP} = \left(\frac{229819.20}{365(5)} \right) (30) = \$3777.84$$

En la Tabla 5.4 se analiza la cotización realizada para un banco de capacitores de 450 kVAR en conjunto con un reactor de rechazo para el quinto armónico, esto con la intención de tener los dos equipos en uno solo y observar la amortización económica en el caso más extremo.

Tabla 5.4 Cotización del banco de capacitores de 450 kVAR con reactor de rechazo en el 5to armónico

Concepto	Costo
Costo del banco de capacitores de 450 kVAR	429011.00
*Instalación del banco de capacitores	-
Subtotal	429011.00
**Precio total (MXN) más IVA	497652.76
Precio total en dólares	24466.70

*La instalación del banco de capacitores está dentro del costo.

** Se toma el 16% del IVA del subtotal.

$$P_{\text{dolares}} = \frac{P \text{ total más IVA}}{20.34} = \frac{497652.76}{20.34} = \$24466.70 \text{ dolares}$$

Para el caso de la Tabla 5.5 se observan las cotizaciones del alimentador para conectar el banco de capacitores en conjunto con el filtro sintonizado simple, con base a la corriente que se obtuvo se opta por escoger un conductor 350 MCM, tomando en cuenta que se determinan 3 conductores por fase ya que un solo conductor 350 MCM soporta 310 amperes y por medio de la longitud se determina

que son 5 metros por conductor, teniendo así un total de 45 metros totales del alimentador que se va a utilizar ya que son 3 conductores por fase.

$$\text{Longitud alimentador} = ((\text{Longitud conductor})(3))(3) = ((5)(3))(3) = 45 \text{ metros}$$

$$\text{Costo total conductor} = (540.10)(45) = \$24304.5$$

Tabla 5.5 Cotización del conductor 350 MCM

*Conductor	350 MCM
Precio total (MXN)	\$540.10
Precio en dólares	\$26.55

**El costo del conductor se base en la longitud de 1 metro.*

Con forme a la Tabla 5.6 se observa el precio de dos interruptores termomagnéticos de la marca Square D para la protección del equipo.

Tabla 5.6 Cotización de interruptor termomagnético.

Interruptor	3x1000A 35 kA 480 V
Precio total (MXN)	\$64341.16
Precio en dólares	\$3163.28

En el caso de la Tabla 5.7, se toman en cuenta los equipos de cómputo utilizados para hacer los diagramas por medio del software AutoCAD y analizar el contenido armónico por medio del software ETAP.

Especificaciones del equipo de cómputo 1:

- Marca: DELL
- Modelo: Inspiron 17 7000 2 – in – 1
- Procesador: Intel Core i7
- Tarjeta gráfica MX250
- Tamaño de pantalla: 17.3” full HD
- Convertible Laptop
- Precision Touchpad
- Multifunción
- Dell cinema

Costo aproximado del equipo en pesos mexicanos \$40000

Especificaciones del equipo de cómputo 2:

- Marca: Toshiba
- Modelo: Satellite C45-C4322K
- Procesador: Intel Core i3
- Tamaño de la pantalla: 14”
- Memoria RAM: 4GB

Costo aproximado en pesos mexicanos: \$9000

Para realizar el trabajo terminal se toma en cuenta el equipo de cómputo de principio a fin ya que en promedio se utilizaban 15 horas a la semana para realizar esta labor por cada equipo. Teniendo en total 52 semanas del total de los 2 semestres que se estudió el caso.

Con base a estos datos obtenemos un total de 780 horas utilizadas por equipo.

Tabla 5.7 Precios del equipo utilizado externo para realizar el análisis del contenido armónico

Equipo de computo	DELL INSPIRON	TOSHIBA SATELLITE
Precio en pesos (MXN)	\$712.32	\$152.05
Precio en dólares	\$35.02	\$7.47

$$Total\ equipo\ 1 = \left(\frac{40000}{365(5)}\right)\left(\frac{780}{24}\right) = \$712.32$$

$$Total\ equipo\ 1\ dls = \frac{712.32}{20.34} = \$35.02$$

$$Total\ equipo\ 2 = \left(\frac{9000}{365(5)}\right)\left(\frac{780}{24}\right) = \$152.05$$

$$Total\ equipo\ 2\ dls = \frac{152.05}{20.34} = \$7.47$$

Finalmente, una vez determinado los principales gastos se procede a resumirlos como lo muestra la Tabla 5.8.

Tabla 5.8 Resumen de gastos.

CONCEPTO	PRECIO (MXN)
Visita a la instalación	\$ 4378.30
Softwares especializados	\$ 4161.75
Banco de capacitores y reactor	\$ 497652.76
Conductor eléctrico	\$ 23604.5
Protección eléctrica	\$ 64341.16
Equipo de computo	\$ 864.37
TOTAL	\$ 595 000.84

5.2 Penalización por bajo factor de potencia

Un proyecto de este tipo se puede justificar de acuerdo con las penalizaciones existentes, por una parte, se tiene los recargos obtenidos por CFE por tener un factor de potencia promedio menor al 90% , de acuerdo a este esquema la penalización puede alcanzar hasta un 120% de la facturación (con un factor de potencia de 30%), así mismo, el Código de Red establece que este parámetro se debe mantener a un 95% un 95% del tiempo, es decir, que no se considera un promedio mensual de dicho valor, sino que se tiene que evitar que este parámetro decaiga por debajo de lo permitido por más de 36 horas en un mes, además, esta normativa también considera penalizaciones por distorsión armónica en el Punto de Acoplamiento Común entre la instalación y la compañía suministradora, estas penalizaciones van desde los 50 mil hasta los 200 mil salarios mínimos o desde el 2% hasta el 10% de los ingresos brutos percibidos.

Para ejemplificar con más detalle la información descrita en el párrafo anterior se procede a realizar una estimación por concepto de energía que estaría aplicando a esta Planta de Selección de Residuos Sólidos, se opta por una estimación en vista de que no fue posible obtener el recibo proporcionado por CFE.

De acuerdo con los datos conocidos de esta instalación se sabe que su tarifa es Gran Demanda en Media Tensión Horaria (GDMTH), como su nombre lo indica, el costo de la energía estará definida por horarios establecidos conocidos como periodos Base, Intermedia y Punta, en la Figura 5.2 se muestran los horarios que abarcan estos periodos.

PERIODOS DE PUNTA, INTERMEDIA Y BASE			
Regiones: CENTRAL, NORESTE, NORTE, PENINSULAR Y SUR			
Del primer domingo de abril al sábado anterior al último domingo de octubre.			
Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 20:00 22:00 - 00:00	20:00 - 22:00
sábado	0:00 - 7:00	7:00 - 00:00	-
domingo y festivo	0:00 - 19:00	19:00 - 00:00	-

Figura 5.2 Periodos de base, intermedia y punta, elaboración propia.

Considerando que la planta de selección labora durante un periodo de 11 horas diarias durante 26 días y, que es en este horario cuando existe la demanda máxima de carga en la instalación se procede a realizar el cálculo de los kWh mensuales.

$$kWh = kW * dias * horas = 1100 * 26 * 11 = 314\ 600\ kWh$$

Y, contemplando que en la instalación sin compensación reactiva el factor de potencia promedio es del 85% se calcula los kVARh con la siguiente expresión:

$$kVARh = \sqrt{\left(\frac{kWh}{f.p.}\right)^2 - kWh^2} = \sqrt{\left(\frac{314\ 600}{0.85}\right)^2 - 314\ 600^2} = 194\ 971\ kVARh$$

Para realizar un cálculo más preciso se consideran los cargos que se aplica a este tipo de tarifa como lo son cargos fijos, por capacidad, por distribución, por transmisión, etc. Estos valores se publican mensualmente por la Comisión Reguladora de Energía (CRE), para esta estimación se tomó en consideración las tarifas de septiembre del 2021 las cuales se desglosan en la Figura 5.3.

Cargos de las tarifas finales del suministro básico			
Int. Horario	Cargo	Unidades	2021
-	Fijo	\$/mes	542.53
Base	Variable (Energia)	\$/kWh	0.7291
Intermedia	Variable (Energia)	\$/kWh	1.229
Punta	Variable (Energia)	\$/kWh	1.343
-	Distribucion	\$/kW	55.81
-	Capacidad	\$/kW	354.23
-	Transmision	\$/kWh	0.1663
-	Operación CENACE	\$/kWh	0.0078
-	Servicios conexos no MEM	\$/kWh	0.0054

Figura 5.3 Cargos de las tarifas finales del suministro básico, elaboración propia.

Tomando en cuenta los valores conocidos y con ayuda de una hoja de cálculo, se obtiene un aproximado del costo de la energía como lo muestra la Figura 5.4

Concepto	Lect. Act.	Lec. Ant.	Diferencia	Energia	Precio MXN	Subtotal MXN
kWh Base			0	0		
kWh Intermedio			314600	314600		
kWh Punta			0	0		
				314600		
kW Base	0			0		
kW Intermedio	0			0		
kW Punta	0			0		
**kW Max Año Movil				794		
KVArh			194971	194971		
% Factor de potencia				85.00		

Costo de la energía en el Mercado Electrico Mayorista					Desglose del importe a pagar	
Concepto	Cargo Fijo	Demanda	Consumo	Importe MXN	Concepto	Importe MXN
	\$	\$/kW	\$/kWh			
Suministro	542.53	0	0	542.53	Cargo fijo	\$ 542.53
Distribucion	0	44337.94444	0	44337.94444	Energia	\$ 768868.10
*Transmision	0	0	52317.98	52317.98	Medicion en BT	\$ -
*CENACE	0	0	2453.88	2453.88	Cargo por FP:	\$ + 27155.27
Generacion B	0	0	0	0	Subtotal:	\$ 796565.90
Generacion I	0	0	386643.4	386643.4	IVA 16%	\$ 127450.54
Generacion P	0	0	0	0	D A P	\$ -
Capacidad	0	281416.0556	0	281416.0556	Otros cargos	\$ -
*SCnMEM	0	0	1698.84	1698.84	Total MXN	\$ 924016.45
Total	542.53	325754	443114.1	769410.63		

Figura 5.4 Estimación por concepto de energía con bajo factor de potencia, elaboración propia.

En el apartado *Desglose del importe a pagar* se observa que en el concepto *Cargo por F.P.* de la Figura 5.4 se aplica una penalización por bajo factor de potencia alcanzando un 3.5% de cargo extra en la facturación, lo que se traduce en \$27 155.

5.3 Bonificación por alto factor de potencia

A continuación, se presenta el caso en donde se recibe una bonificación por mantener el factor de potencia por encima del 90%, en este caso la potencia reactiva es proporcionada por los capacitores del filtro armónico.

Se considera el valor de 314 600 kWh calculados anteriormente y se procede a calcular los kVARh considerando un factor de potencia de 98%.

$$kVARh = \sqrt{\left(\frac{kWh}{f.p.}\right)^2 - kWh^2} = \sqrt{\left(\frac{314\ 600}{0.98}\right)^2 - 314\ 600^2} = 63882.25\ kVARh$$

Llevando estos valores a la hoja de cálculo se obtiene las siguientes estimaciones de costos de energía las cuales son presentadas en la Figura 5.5.

Del apartado *Cargo por F.P.* perteneciente a *Desglose del importe a pagar* de la Figura 5.5 se observa que ahora se obtiene una bonificación del 2.04% lo que equivale a \$15 702 de ahorro mensual.

Considerando que por un alto factor de potencia se obtendría una bonificación mensual, dicha bonificación se puede considerar para amortizar el costo que generaría la instalación de un filtro armónico.

Concepto	Lect. Act.	Lec. Ant.	Diferencia	Energía	Precio MXN	Subtotal MXN
kWh Base			0	0		
kWh Intermedio			314600	314600		
kWh Punta			0	0		
				314600		
kW Base	0			0		
kW Intermedio	0			0		
kW Punta	0			0		
**kW Max Año Movil				794		
KVArh			63882	63882		
% Factor de potencia				98.00		

Costo de la energía en el Mercado Electrico Mayorista				
Concepto	Cargo Fijo \$	Demanda \$/kW	Consumo \$/kWh	Importe MXN
Suministro	542.53	0	0	542.53
Distribucion	0	44337.94444	0	44337.94444
*Transmision	0	0	52317.98	52317.98
*CENACE	0	0	2453.88	2453.88
Generacion B	0	0	0	0
Generacion I	0	0	386643.4	386643.4
Generacion P	0	0	0	0
Capacidad	0	281416.0556	0	281416.0556
*ScnMEM	0	0	1698.84	1698.84
Total	542.53	325754	443114.1	769410.63

Desglose del importe a pagar	
Concepto	Importe MXN
Cargo fijo	\$ 542.53
Energía	\$ 768868.10
Medicion en BT	\$ -
Cargo por FP:	\$ - 15702.29
Subtotal:	\$ 753708.34
IVA 16%	\$ 120593.34
D A P	\$ -
Otros cargos	\$ -
Total MXN	\$ 874301.68

Figura 5.5 Estimación por concepto de energía con alto factor de potencia, elaboración propia

Conforme a la Tabla 5.8 los costos totales ascienden a \$ 595 000.84 y considerando un ahorro mensual por alto factor de potencia en la instalación de \$15 702 el punto de equilibrio se alcanza en el mes 38 equivalente a 3 años 2 meses.

En la Figura 5.6 se muestra de manera gráfica dicha amortización, también cabe destacar que una vez alcanzado el punto de equilibrio los meses siguientes representaran ganancias para la Planta de Selección de Residuos Sólidos.



Figura 5.6 Gráfica de punto de equilibrio.

CONCLUSIONES

De la estimación y análisis del contenido armónico de la Estación de Selección de Residuos Sólidos realizados en este trabajo, de la aplicación de la normatividad vigente y la utilización del software especializado se puede concluir lo siguiente:

- Al analizar las ondas de tensión y de corriente en el punto de acoplamiento común por medio del software especializado, el porcentaje de contenido armónico de tensión y de corriente se encontraba dentro de normativa puesto que en corriente alcanzó un valor de 5.44% teniendo como máximo permisible 12%, mientras que la distorsión armónica en tensión se posicionó en 2.09 % del lado de baja tensión y 0.113 % en media tensión encontrándose por debajo del 8% permitido, finalmente, el factor de potencia se encontró en 85.64%. Para estar dentro de lo establecido del Código de Red estipula que se debe tener un factor de potencia arriba de 95%, el cual en esta Estación se encuentra por debajo de este valor.
- Para solucionar el problema del factor de potencia se optó por instalar un banco de capacitores con una capacidad de 480 kVARs, el problema se solucionó, sin embargo, el porcentaje de contenido armónico de corriente presento el mayor incremento alcanzando un valor del 11.25% y con la carga que se tiene proyectada en el corto plazo, esta Estación estaría fuera de norma.
- Como solución final se calculó y seleccionó un filtro sintonizado simple para eliminar el porcentaje introducido al sistema de la quinta armónica, con esto se logró mantener un factor de potencia de 98% y el contenido armónico dentro de los parámetros admisibles indicados en la normativa, alcanzando valores de distorsión armónica en corriente de 0.941% por debajo del 12%

establecido, mientras que en tensión se establece un 8% de distorsión obteniendo 0.034% y 0.0698% en baja y media tensión respectivamente..

- Con la implementación del filtro sintonizado simple la planta de selección de residuos sólidos evitará penalizaciones mensuales estimadas por \$27 155 debido a un bajo factor de potencia y por inyección de contenido armónico a la red, además, a partir del mes 38 el costo por la implementación del filtro estaría cubierto lo que representaría ganancias después de dicho plazo.

RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Por medio de la metodología de este trabajo terminal y para una futura aplicación dentro de la industria, se recomienda:

- Analizar por medio de un analizador de redes la instalación eléctrica de esta Estación de Selección de Residuos Sólidos para poder observar y monitorear los parámetros reales, y por medio de esto tener un completo estudio de calidad de la energía, con esto se brindará una mayor seguridad de la recolección de datos.
- Del mismo modo rectificar los datos reales al igual que las ondas senoidales o señales distorsionadas obtenidas y comparar estos datos por medio del software especializado, para así poder hacer una comparación de los datos reales y las estimaciones hechas.
- Se recomienda hacer una amortización económica la cual se obtenga lo invertido en el tiempo menor posible, para esto se requiere hacer un estudio económico por medio de otras opciones de cotizaciones.

- Tomar en cuenta los datos reales del recibo gubernamental para determinar una exacta amortización económica a través del estudio económico.
- Tener un conocimiento extenso de las normas que aplican, así mismo siempre estar pendientes a estas por posibles cambios o actualizaciones.

REFERENCIAS

[1] J. M. Ruiz Vallejo y F. H. Ortiz Quintero, "Metodologías para identificar fuentes armónicas en sistemas eléctricos," Tesis de licenciatura, Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, 2007.

[2] G. Enríquez Harper, *El ABC de la calidad de la energía eléctrica*, 1ra edición, México D.F., Limusa, 2004.

[3] A. Allende Rubio, J. M. Méndez Vizueth y D. M. Reynada Ramos, "Metodología para realizar un estudio de la calidad de la energía eléctrica," Tesis de Licenciatura, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, ESIME Unidad Profesional Zacatenco Adolfo López Mateos, México, Ciudad de México, 2010.

[4] E. O. Morales García y J. L. Rodríguez González, "Solución a los problemas de corrientes y voltajes armónicos en los sistemas industriales," Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, México, Ciudad de México, 2012.

[5] M. R. Alva Benítez y U. Muñoz Zúñiga "Estudio de calidad de la energía al sistema de alumbrado del edificio 2 de la ESIME Zacatenco," Tesis de Licenciatura, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, ESIME Unidad Profesional Zacatenco Adolfo López Mateos, México, Ciudad de México, 2015.

[6] J. S. Arenas Figueroa, "Identificación de armónicos en una subestación eléctrica de uso residencial," Tesis de Licenciatura, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, ESIME Unidad

Profesional Zacatenco Adolfo López Mateos, México, Ciudad de México, 2017.

[7] J.D. Juárez Cervantes, *Sistema de distribución de energía eléctrica*, 1ra edición, México D.F., Universidad Autónoma Metropolitana, 1995

[8] R. Espinosa y Lara, *Sistemas de distribución*, 1ra edición, México D.F., Limusa, 1990

[9] CFE, “Líneas y redes de distribución”, Gerencia de distribución, México, marzo 1997.

[10] B. R. Ríos, “Incidencias de cargas no lineales en transformadores de distribución”, Universidad del Cono Sur de las Américas (UCSA), Asunción Paraguay, 2014.

[11] Eléctricaplicada 2021, Disponible en <<https://www.electricaplicada.com/cargas-no-lineales/>> [Accedió: 21-abril-2021]

[12] CATER, Tecnología en Componentes Bobinados, “Cargas críticas y cargas sensibles”, Documento CATER DEVICE S.A. energía segura en instalaciones.

[13] Medición de la calidad de la energía, “Análisis sobre la calidad de la energía en redes eléctricas”, Artículo.

[14] CFE, “Calidad de la energía: características y límites de las perturbaciones de los parámetros de la energía eléctrica”, guía CFE L0000-70, México, agosto 2009.

[15] Automática e Instrumentación, “Calidad de onda en el servicio eléctrico”, Causas y efectos de las perturbaciones, Artículo, marzo 2005.

[16] H.R. Pila, M. I. Zambrano, “Estudio del Flicker en una instalación eléctrica”, Tesis de licenciatura, Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil, Facultad de Ingenierías, Ecuador, 2010.

- [17] S. Mikkili y A. Kumar, "Power Quality Issues: Current harmonics", 1ra edición, New York, CRC Press, 2015.
- [18] A. Baghini, "Handbook of Power Quality", 1ra edición, Inglaterra, Wiley, 2008.
- [19] J.S. Terry, "Los siete tipos de problemas en el suministro eléctrico", Schneider Electric APC, Informe interno.
- [20] D. M. Morato, "Estudio de armónicos y propuesta de soluciones en el taller de chapistería de SEAT MARTORELL", Trabajo final de grado, Universidad Politécnica de Catalunya, España, Barcelona, 2012.
- [21] O. R. Padilla, "Estudio de frecuencias armónicas", Tesis para obtener título de Maestro en Ciencias, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, México, Nuevo León, 1995.
- [22] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, IEEE- 519, 2014
- [23] A. Llamas Torres, S. Acevedo Porras, J. A. Báez Moreno, J. A. de los Reyes Pérez, *Armónicas en sistemas eléctricos industriales*. México, Innovación Editorial Lagares de México, 2004.
[En línea]. Disponible en [https://es.scribd.com/read/403974791/ArmonicasinSistemas-
Electricos-Industriales](https://es.scribd.com/read/403974791/ArmonicasinSistemasElectricos-Industriales)
- [24] E. T Segovia, "Definición y caracterización de los armónicos en un nodo de carga", Tesis de Licenciatura, Instituto Politécnico Nacional, ESIME Unidad profesional Zacatenco Adolfo López Mateos, México, Ciudad de México, 2014.
- [25] CFE, "Desviaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente en el suministro y consumo de energía eléctrica", guía CFE L0000-45, México, 2005.

- J. M. Astorga Gómez, R. A. Aróstica Córdova y Y. A. Iriarte Salinas,
[26] (2016). Estimación del factor K en transformadores de distribución usando modelos de regresión lineal. Revista Tecnura, 20(48), 29-40.
- J. D. Franco Franco, J. N. Echeverry Muñetonez, “Presencia de
[27] armónicos en redes de baja tensión”, Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Pereira, 2018.
- [28] [En línea] Disponible en <https://www.glassdoor.com.mx>

ANEXO 1
MEMORIA DE CÁLCULO

CÁLCULO DEL BANCO DE CAPACITORES		
CIRCUITO	ORIGEN	DESTINO
	TABLERO PRINCIPAL	BANCO DE CAPACITORES
DATOS GENERALES		
<p>Transformador: 1500 [kVA], 460-265 [V], ZETRAK Carga instalada: 1100 [kW] Número de fases: 3 Frecuencia: 60 [Hz] Tensión del sistema en media tensión: 23 [kV] Tensión máxima del sistema: 25.8 [kV] Tensión del sistema en baja tensión: 460 [V] Tipo de sistema: 3F-4H Conexión: DELTA-ESTRELLA Material de los conductores: COBRE Y ALUMINIO Factor de potencia: 0.8587 Factor de demanda: 1</p> <p>Se desea llegar a un factor de potencia arriba de 0.95</p>		
CARGAS UTILIZADAS EN EL SISTEMA		
<p>Tablero general de distribución 1 (compactadora 1)</p> <p>Número de motores de 150 CP: 2 Número de motores de 30 CP: 1 Número de motores de 20 CP: 2 Número de motores de 15 CP: 1 Número de motores de 5 CP: 1</p>		

CORRIENTE TOTAL DEL TABLERO GENERAL DE DISTRIBUCIÓN 1

Determinando la corriente a plena carga de motores trifásicos de corriente alterna con base a la NOM-001-SEDE-2012-ANCE, en la sección 430-6 (a), tabla 430-250.

kW	hp	Tipo de inducción de jaula de ardilla y de rotor devanado. (amperes)							Tipo sincrónico de factor de potencia unitario* (amperes)			
		115 volts	200 volts	208 volts	230 volts	460 volts	575 volts	2300 volts	230 volts	460 volts	575 volts	2300 volts
0.37	½	4.4	2.5	2.4	2.2	1.1	0.9	—	—	—	—	—
0.56	¾	6.4	3.7	3.5	3.2	1.6	1.3	—	—	—	—	—
0.75	1	8.4	4.8	4.6	4.2	2.1	1.7	—	—	—	—	—
1.12	1½	12	6.9	6.6	6	3	2.4	—	—	—	—	—
1.5	2	13.6	7.8	7.5	6.8	3.4	2.7	—	—	—	—	—
2.25	3	—	11	10.6	9.6	4.8	3.9	—	—	—	—	—
3.75	5	—	17.5	16.7	15.2	7.6	6.1	—	—	—	—	—
5.6	7½	—	25.3	24.2	22	11	9	—	—	—	—	—
7.5	10	—	32.3	30.8	28	14	11	—	—	—	—	—
11.2	15	—	48.3	46.2	42	21	17	—	—	—	—	—
14.9	20	—	62.1	59.4	54	27	22	—	—	—	—	—
18.7	25	—	78.2	74.8	68	34	27	—	53	26	21	—
22.4	30	—	92	88	80	40	32	—	63	32	26	—
29.8	40	—	120	114	104	52	41	—	93	41	33	—
37.3	50	—	150	143	130	65	52	—	104	52	42	—
44.8	60	—	177	169	154	77	62	16	123	61	49	12
56	75	—	221	211	192	96	77	20	155	78	62	15
75	100	—	285	273	248	124	99	26	202	101	81	20
93	125	—	359	343	312	156	125	31	253	126	101	25
112	150	—	414	396	360	180	144	37	302	151	121	30
150	200	—	552	528	480	240	192	49	400	201	161	40
187	250	—	—	—	—	302	242	60	—	—	—	—
224	300	—	—	—	—	361	289	72	—	—	—	—
261	350	—	—	—	—	414	336	83	—	—	—	—
298	400	—	—	—	—	477	382	95	—	—	—	—
336	450	—	—	—	—	515	412	103	—	—	—	—
373	500	—	—	—	—	590	472	118	—	—	—	—

Tablero general de distribución 2 (compactadora 2)

Número de motores de 150 CP: 2

Número de motores de 30 CP: 1

Número de motores de 20 CP: 2

Número de motores de 15 CP: 1

Número de motores de 5 CP: 1

CORRIENTE TOTAL DEL TABLERO GENERAL DE DISTRIBUCIÓN 2

Determinando la corriente a plena carga de motores trifásicos de corriente alterna con base a la NOM-001-SEDE-2012-ANCE, en la sección 430-6 (a), tabla 430-250.

kW	hp	Tipo de inducción de jaula de ardilla y de rotor devanado. (amperes)							Tipo sincrónico de factor de potencia unitario* (amperes)			
		115 volts	200 volts	208 volts	230 volts	460 volts	575 volts	2300 volts	230 volts	460 volts	575 volts	2300 volts
0.37	½	4.4	2.5	2.4	2.2	1.1	0.9	—	—	—	—	—
0.56	¾	6.4	3.7	3.5	3.2	1.6	1.3	—	—	—	—	—
0.75	1	8.4	4.8	4.6	4.2	2.1	1.7	—	—	—	—	—
1.12	1 ½	12	6.9	6.6	6	3	2.4	—	—	—	—	—
1.5	2	13.6	7.8	7.5	6.8	3.4	2.7	—	—	—	—	—
2.25	3	—	11	10.6	9.6	4.8	3.9	—	—	—	—	—
3.75	5	—	17.5	16.7	15.2	7.6	6.1	—	—	—	—	—
5.6	7 ½	—	25.3	24.2	22	11	9	—	—	—	—	—
7.5	10	—	32.3	30.8	28	14	44	—	—	—	—	—
11.2	15	—	48.3	46.2	42	21	17	—	—	—	—	—
14.9	20	—	62.1	59.4	54	27	22	—	—	—	—	—
18.7	25	—	78.2	74.8	68	34	27	—	53	26	21	—
22.4	30	—	92	88	80	40	32	—	63	32	26	—
29.8	40	—	120	114	104	52	41	—	93	41	33	—
37.3	50	—	150	143	130	65	52	—	104	52	42	—
44.8	60	—	177	169	154	77	62	16	123	61	49	12
56	75	—	221	211	192	96	77	20	155	78	62	15
75	100	—	285	273	248	124	99	26	202	101	81	20
93	125	—	359	343	312	156	125	31	253	126	101	25
112	150	—	414	396	360	180	144	37	302	151	121	30
150	200	—	552	528	480	240	192	49	400	201	161	40
187	250	—	—	—	—	302	242	60	—	—	—	—
224	300	—	—	—	—	361	289	72	—	—	—	—
261	350	—	—	—	—	414	336	83	—	—	—	—
298	400	—	—	—	—	477	382	95	—	—	—	—
336	450	—	—	—	—	515	412	103	—	—	—	—
373	500	—	—	—	—	590	472	118	—	—	—	—

Tablero de bandas 3

Número de motores de 20 CP: 4

Número de motores de 10 CP: 4

Número de motores de 7.5 CP: 7

Número de motores de 5 CP: 9

Número de motores de 3 CP: 6

CORRIENTE TOTAL DEL TABLERO DE BANDAS

Determinando la corriente a plena carga de motores trifásicos de corriente alterna con base a la NOM-001-SEDE-2012-ANCE, en la sección 430-6 (a), tabla 430-250.

kW	hp	Tipo de inducción de jaula de ardilla y de rotor devanado. (amperes)							Tipo sincrónico de factor de potencia unitario* (amperes)			
		115 volts	200 volts	208 volts	230 volts	460 volts	575 volts	2300 volts	230 volts	460 volts	575 volts	2300 volts
0.37	½	4.4	2.5	2.4	2.2	1.1	0.9	—	—	—	—	—
0.56	¾	6.4	3.7	3.5	3.2	1.6	1.3	—	—	—	—	—
0.75	1	8.4	4.8	4.6	4.2	2.1	1.7	—	—	—	—	—
1.12	1½	12	6.9	6.6	6	3	2.4	—	—	—	—	—
1.5	2	13.6	7.8	7.5	6.8	3.4	2.7	—	—	—	—	—
2.25	3	—	11	10.6	9.6	4.8	3.9	—	—	—	—	—
3.75	5	—	17.5	16.7	15.2	7.6	6.1	—	—	—	—	—
5.6	7½	—	25.3	24.2	22	11	9	—	—	—	—	—
7.5	10	—	32.3	30.8	28	14	11	—	—	—	—	—
11.2	15	—	48.3	46.2	42	21	17	—	—	—	—	—
14.9	20	—	62.1	59.4	54	27	22	—	—	—	—	—
18.7	25	—	78.2	74.8	68	34	27	—	53	26	21	—
22.4	30	—	92	88	80	40	32	—	63	32	26	—
29.8	40	—	120	114	104	52	41	—	93	41	33	—
37.3	50	—	150	143	130	65	52	—	104	52	42	—
44.8	60	—	177	169	154	77	62	16	123	61	49	12
56	75	—	221	211	192	96	77	20	155	78	62	15
75	100	—	285	273	248	124	99	26	202	101	81	20
93	125	—	359	343	312	156	125	31	253	126	101	25
112	150	—	414	396	360	180	144	37	302	151	121	30
150	200	—	552	528	480	240	192	49	400	201	161	40
187	250	—	—	—	—	302	242	60	—	—	—	—
224	300	—	—	—	—	361	289	72	—	—	—	—
261	350	—	—	—	—	414	336	83	—	—	—	—
298	400	—	—	—	—	477	382	95	—	—	—	—
336	450	—	—	—	—	515	412	103	—	—	—	—
373	500	—	—	—	—	590	472	118	—	—	—	—

CÁLCULO DEL BANCO DE CAPACITORES

A continuación, se describe el cálculo de la compensación reactiva para el sistema eléctrico.

Utilizando la siguiente ecuación:

$$Q_c = P(\tan(\cos^{-1}FP_1) - \tan(\cos^{-1}FP_2))$$

$Q_c = ?$

$P = 1100 \text{ [kW]}$

$FP_1 = 0.85$

$FP_2 = 0.98$

$$Q_c = 1100(\tan(\cos^{-1}(0.85)) - \tan(\cos^{-1}(0.98)))$$

$$Q_c = 1100(0.619744 - 0.203058)$$

$$Q_c = 1100(0.416686)$$

$$Q_c = 458.3546 \text{ [kVAR]}$$

$$Q_c \approx 480 \text{ [kVAR]}$$

CÁLCULO DE FILTRO SINTONIZADO SIMPLE

DATOS GENERALES

Orden de la armónica a filtrar: Quinta armónica

Tensión nominal del filtro: 480 Volts

Tensión nominal del sistema: 460 Volts

kVA CARGA: 1129 kVA

kVARS necesarios para f.p. de 0.98: 480 kVARS

Cálculo de la reactancia capacitiva a frecuencia fundamental

$$X_{C1} = \frac{V_{filtro}^2}{VARS} = \frac{480^2}{480 \times 10^3} = 0.48 \Omega$$

Reactancia capacitiva para la quinta armónica:

$$X_{C5} = \frac{X_{C1}}{h} = \frac{0.48}{5} = 0.096 \Omega$$

Cálculo de la reactancia inductiva requerida a frecuencia fundamental:

$$X_{L1} = \frac{X_C}{h^2} = \frac{0.48}{5^2} = 0.0192 \Omega$$

Verificar que el funcionamiento del condensador se encuentra dentro de los límites recomendados por IEEE-18

Corriente r.m.s. a través del filtro:

$$I_1 = \frac{V_{L-N}}{X_C - X_L} = \frac{1.05 \left(\frac{460}{\sqrt{3}} \right)}{0.48 - 0.0192} = 605.16 \text{ Amperes}$$

Asumiendo que la corriente armónica de la carga es inversamente proporcional a la corriente fundamental, obtenemos:

$$I_5 = \frac{1}{h} \cdot \frac{kVA_{CARGA}}{\sqrt{3} V_{Sistema}} = \frac{1}{5} \cdot \frac{1129 \times 10^3}{\sqrt{3} \cdot 460} = 283.40 \text{ Amperes}$$

$$I_C = \sqrt{I_1^2 + I_5^2} = \sqrt{605.16^2 + 283.40^2} = 668.23$$

$$\frac{I_{C \text{ rms}}}{I_{C \text{ nominal}}} = \frac{668.23}{\frac{480 \times 10^3}{\sqrt{3} \cdot 480}} = \frac{668.23}{577.35} = 1.157$$

(Por debajo del límite de 1.35 establecido en la IEEE-18).

Tensión pico a través del capacitor:

$$V_{C \text{ pico}} = \sqrt{2}(X_{C1} \cdot I_1 + X_{C5} \cdot I_5) = \sqrt{2}(0.48 \cdot 605.16 + 0.096 \cdot 283.4)$$

$$V_{C \text{ pico}} = \sqrt{2}(290.48 + 27.2) = 449.27 \text{ Volts}$$

$$\frac{V_{C \text{ pico}}}{V_{C \text{ pico F-N}}} = \frac{449.27}{\frac{480}{\sqrt{3}} \sqrt{2}} = \frac{449.27}{391.92} = 1.14$$

(Por debajo del límite de 1.2 establecido en la IEEE-18).

Tensión r.m.s a través del capacitor:

$$V_{C \text{ rms}} = \sqrt{V_{C1}^2 + V_{C5}^2} = \sqrt{(X_{C1} \cdot I_1)^2 + (X_{C5} \cdot I_5)^2}$$

$$V_{C \text{ rms}} = \sqrt{(290.48)^2 + (27.2)^2} = 291.8 \text{ Volts}$$

$$\frac{V_{C \text{ rms}}}{V_{C \text{ nominal}}} = \frac{291.8}{\frac{480}{\sqrt{3}}} = \frac{291.8}{277.12} = 1.053$$

(Por debajo del límite de 1.1 establecido en la IEEE-18).

La potencia reactiva entregada por el banco de capacitores es:

$$kVARS_{\text{por fase}} = \frac{V_{C \text{ rms}} \cdot I_{C \text{ rms}}}{1000} = \frac{291.8 \cdot 668.23}{1000} = 194.98 \text{ kVARS}$$

La potencia trifásica del capacitor es:

$$kVARS_{\text{trifasicos}} = 3 \cdot kVARS_{\text{por fase}} = 3 \cdot 194.98 = 584.94 \text{ kVARS}$$

La salida total del condensador se reducirá debido a que el banco de capacitores es de una clase de tensión más alta:

$$kVARS_{\text{reducidos}} = kVARS \left(\frac{V_{\text{sistema}}}{V_{\text{equipo}}} \right)^2 = 584.94 \left(\frac{460}{480} \right)^2 = 440.83 \text{ kVARS}$$

$$\frac{kVARS_{\text{trifasicos}}}{kVARS_{\text{reducidos}}} = \frac{584.94}{440.83} = 1.327$$

(Por debajo del límite de 1.35 establecido en la IEEE-18).

**ANEXO 2
COTIZACIONES**



Teléfono
999 925 1885
CEL. 999 278 6202

Sitio Web
generandowatts.com

Email
direccion@generandowatts.com
gadalu2002@gmail.com

COTIZACIÓN


BANCO DE CAPACITORES AUTOMÁTICO TRIFÁSICO MARCA WEG 450 KVAR CON REACTOR DE RECHAZO ARMÓNICO EN LA 5ta ARMÓNICA AL 7% EN 480 V,

DATOS

Jesus Robles

FOLIO **Vendedor** **Fecha**
15 de octubre, 2021

Ciudad de México, México, México

Productos	Precio	#	Total
 <p>BANCO DE CAPACITORES AUTOMÁTICO TRIFÁSICO MARCA WEG 450 KVAR CON REACTOR DE RECHAZO ARMÓNICO EN LA 5ta ARMÓNICA AL 7% en 480 V,</p> <p>BANCO DE CAPACITORES AUTOMÁTICO TRIFÁSICO MARCA WEG 450 KVAR CON REACTOR DE RECHAZO ARMÓNICO SINTONIZADO EN EL 5to ARMÓNICO AL 7% en 480 V, en gabinete metálico, grado de protección nema 1(IP55) color y acabado RAL7035 modelo BCAW-NH 450-480-7R integrado por 9 pasos de 50 KVAR, conformado con las siguientes características:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacitores auto-regenerativos cilíndricos con resistencias de descarga incluidas • Reactor de Rechazo armónico al 7% de Z. • Contactores especiales para cargas capacitivas, con resistencias de precarga • Fusibles cerámicos para cada capacitor tipo NH tipo gLgG • Porta fusibles seccionadores de policarbonato • Controlador de KVAR de 6 pasos (mide FP, I, V en tiempo real, FP promedio semanal y mensual, THD-I y THD-V, auto detección de celdas capacitivas, display de LCD 128x64 pixeles, multilinguaje. • Rejillas de ventilación y filtros anti-polvo • Transformador de corriente toroidal tipo dona de núcleo cerrado. • Transformador de control 480-240/127 Vca • Gabinete Auto soportado color y acabado RAL 7035 con certificación <p>SE INCLUYE EL SERVICIO DE CONFIGURACIÓN Y PUESTA EN SERVICIO DE BANCOS DE CAPACITORES EN SITIO</p> <p>De click en el Link y baje la ficha técnica: [Link]</p>	\$429,011.00	1	\$429,011.00

Método de pago: TRANSFERENCIA BANCARIA

Subtotal \$429,011.00

Notas:

ENVÍO LA COTIZACIÓN SOLICITADA - LE COMENTO QUE PARA ESTA CAPACIDAD, NO SE MANEJAN EQUIPOS FIJOS, SIEMPRE DEBEN SER AUTOMÁTICOS - LE ESTOY COTIZANDO DE 450 KVAR PARA 9 PASOS DE 50 KVAR, SI REQUIERE QUE LA CAPACIDAD SEA MAYOR, LE PUEDO COTIZAR DE 500 KVAR, PARA 10 PASOS DE 50 KVAR, SU COSTO SUBIRÁ PERO MUY POCO; USTED YA DIRÁ

+IVA (16%) Más IVA

Total \$497,652.76 MXN

Datos Bancarios:

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.



October 21, 2021

Ref.- JESUSROBLES - New 100Bus SA SC LF Star – 2021OCT21
Jesus Robles

Estimado Jesus Robles, por este conducto les enviamos un cordial saludo. De acuerdo con su reciente solicitud, presentamos a su consideración la siguiente propuesta de las soluciones ETAP:

ETAP New License – 1 Single Commercial SA, 100 Bus

- Base Module - Multi-Dimension Digital-Twin Platform, Revisions, Libraries, Wizards
 - Load Flow - AC - Load Flow Analysis, 3-Phase & 1-Phase systems, Voltage Drop, Result Analyzer
 - Panel Schedules & Calculations - 3-Phase & 1-Phase, NEC, IEC
 - Renewables - Wind Turbine Generator, PV Array - PV Pro™, Controls, Libraries, Profiles
 - HVDC Transmission Link - Control schemes, dynamic modes, Rectification, Inversion
 - Short-Circuit ANSI & IEC - Balanced, 3/1 Phase, Duty Evaluation, Analyzer
 - Star™ - Protective Device Protection, Selectivity, Sequence of Operation
 - Star Auto-Evaluation - Auto-Evaluation of Protection, Selectivity, Zone, Arc Flash*
- One Year of Free Upgrades & User-Support

Total (MXN) \$198,120.00

Additional suggested modules for your consideration (per copy):

Arc Flash, AC - IEEE 1584 2018 & NFPA 70E 2021 - Analyzer, Work Permit, Safety Labels	\$36,480.00
Harmonic Analysis - Harmonic Load Flow, Frequency Scan, Harmonic Filters & Sizing	\$58,080.00
Motor Acceleration - Dynamic & Static, Seq of Op, Scripts, Result Analyzer	\$39,120.00
Transformer Sizing & Tap Optimization - 3-Phase, 1-Phase, ANSI, IEC	\$13,920.00

***Todos los precios están expresados en Moneda Nacional (MXN) y no incluyen IVA.**

Con más de 32 años en el mercado global, le reiteramos nuestro compromiso para continuar desarrollando soluciones innovadoras de alto valor que contribuyan al éxito de sus proyectos.

El estricto Programa de Aseguramiento de Calidad ETAP garantiza que nuestro software cumple con los más altos estándares y regulaciones. Ya sea que trate de Arco Eléctrico, Corto Circuito o el Sistema de Gestión de Energía, todos los módulos y aplicaciones ETAP están totalmente verificados y validados. Encontrará más información en: <https://etap.com/software/quality-assurance>

Quedamos a sus órdenes.

Atentamente,



www.euroelectrica.com.mx



EUROELECTRICA SA DE CV
EUR930324493
Sucursal: Iztapalapa

Av Año de Juarez 253
Col. Granjas de San Antonio, C.P. 09070
Ciudad de México, Ciudad de México Mex
Tel. (55)5804-7800, (55)5445-2300

Expedida el : **jueves, 21 de octubre de 2021**

Cliete :

RFC :

Nombre :

Dirección :

Cotización : I1187068

Moneda : Pesos
Condición : Contado Especial
Referencia :
Atentamente :

Artículo	Descripción	Cantidad	Unidad	Tiempo Entrega	Precio	Importe
THWLS00	CABLE THWLS VINANEL XXI CAL. 500 MCM. 600V. 90° COLOR NEGRO - CONDUMEX	1	METRO		\$766.74	\$766.74
THWLS400	CABLE THWLS VINANEL XXI CAL. 400 MCM. 600V. 90° COLOR NEGRO - CONDUMEX	1	METRO		\$616.18	\$616.18
THWLS350	CABLE THWLS VINANEL XXI CAL. 350 MCM. 600V. 90° COLOR NEGRO - CONDUMEX	1	METRO		\$540.10	\$540.10

OBSERVACIONES :

Existencias salvo previa venta / L.A.B.

No se aceptan cambios ni devoluciones.

Precios sujetos a cambios sin previo aviso.

Vigencia de la cotización 15 días naturales.

Tiempo de entrega expresado en días hábiles.

En cortes de cable no hay cambios ni devoluciones.

Cotizamos bajo nuestro mejor entendimiento según la petición del cliente.

Importe:	\$1,923.02
Impuestos:	\$307.68
Importe Total:	\$2,230.70

Banco	Sucursal	Cuenta	CLABE

GRUPO COMERCIAL ACOMEE S.A. DE C.V. - www.EIPVapler.com

Cotización



Sucursal: ACOMEE
Almacén: ACOMEE

Vendedor:

Nombre:	_____	Fecha:	25/10/2021
Dirección:	_____	Ref:	_____
		RFC:	GCA900118AX6

Documento
No. 0211319
UD3501-0211319

Cantidad	Unidad	Clave	Stock	Descripción	T. Entrega	Monto	Importe
15	PZA H87	PJA36100U41A 39122200	N	SQUARE D INT TERMOMAG I-LINE 3X1000A 65KA 480VAC M	28 Días	64,341.16	965,117.40
1	PZA H87	MGL36600 39121616	S	SQUARE D INT ELECTRONICO C/ZAPATA 3X600 35KA 480VA	Inmediato	33,077.22	33,077.22

***UN MILLON CIENTO CINCUENTA Y SIETE MIL NOVECIENTOS CINCO PESOS 76/100 M.N.

PRECIOS SUJETOS A CAMBIOS SIN PREVIO AVISO

Condiciones:

Las asignadas a su cuenta, en caso de NO tener una línea de crédito con nosotros el pago deberá ser forzosamente de RIGUROSO CONTADO.

Notas:

* Todos nuestros precios son unitarios, más IVA.

* Tiempo de Entrega: El indicado en cada partida (salvo previa venta).

* En compras MAYORES a \$5,000.00 MXN + IVA, NO se cobra flete, sino que el costo del envío corre por nuestra cuenta. En caso contrario (para compras menores a dicho monto), el costo del flete es ADICIONAL o bien, se puede enviar la mercancía con el flete POR COBRAR, o con cargo a cuenta del cliente. Aplican restricciones. **Ver términos y condiciones en <https://www.acomee.com.mx/entrega-domicilio.php>**

* Precios sujetos a cambio SIN previo aviso (Vigencia de nuestras cotizaciones: 1 semana).

* Para el caso de material de NON-STOCK (aquel que NO llevamos en stock y que aparece con una "N") se requiere al menos el 50% de anticipo para poder procesar su pedido, independientemente de que tenga o no una línea de crédito, en cuyo caso el 50% restante podrá ser pagado en el plazo de crédito otorgado.

Peso Total (KG)	13.1
Subtotal	998,194.62
Descuento	0.00
Flete	0.00
Subtotal	998,194.62
IEPS	0.00
IVA	159,711.14
TOTAL	1,157,905.76

ANEXO 3
DIAGRAMA UNIFILAR

