



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA Y
ELIMINACIÓN DE CORRIENTES
ARMÓNICAS EN SISTEMAS DE BAJA
TENSIÓN**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Eléctrico y Electrónico

P R E S E N T A

Alejandro Ortega Hernández

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Alberto Cortez Mondragón



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017

AGRADECIMIENTOS

A MIS PADRES

El valor de la crianza, el desempeño diario que obliga a ser la versión más completa de ti, la disciplina, la tolerancia y todas las ilusiones en el sueño por cambiar el destino de la familia que hoy se ven reflejadas como el fruto de todo el esfuerzo de tanto tiempo recorrido para el éxito, son la mejor herencia que me pudieron dar y que también les quiero agradecer por educarme con el mismo empeño todos los días.

Te agradezco Mama.

A PAPÁ

“Por qué no intentas entrar a la Universidad “palabras necesarias que me hizo pensar que en cualquier momento necesitamos aprender, gracias por tener ese gran espíritu y fuerza de voluntad para hacer que cada día cuente y se haga el cambio individual que necesitamos para poder cambiar el curso de nuestra vida.

A MIS HERMANOS

Por haber estado ahí dando ejemplo el uno para el otro y ser cómplices de la infancia y de la vida compartiendo esos bellos momentos gracias en verdad espero les pueda ayudar esto tanto como a mí. Reconociendo el logro de sueños y el ejemplo nos hicieron agarrarnos de las manos para no desistir.

Omar

Por tomarse el tiempo de enseñarme la nueva faceta que iba a enfrentar con el ejemplo, por ser además de mi hermano un amigo y mostrarme como mejorar.

A MIS HIJOS

Francisco y Emilio

Por haberme enseñando la inocencia de la vida, por despertar y ver su carita reír sentir lo que nunca pude sentir, es su luz, en ustedes pongo mi esperanza semillas de nuestra sangre por creer que el mundo tiene remedio y ese les toca a ustedes mantenerlo tanto como a mí, les entrego este presente para la contribución de todos los logros en su vida. Por haberme dado a dos hijos maravillosos que me cambiaron la vida y permitieron esforzarme día a día, por enseñarles también el valor del estudio.

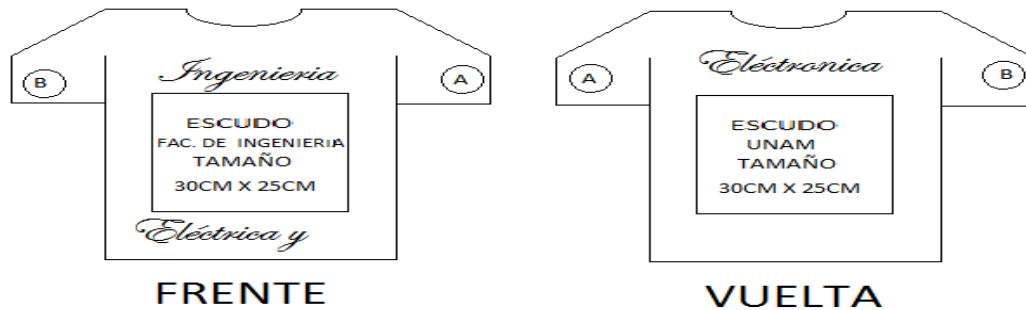
A LA UNIVERSIDAD A TRAVÉS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Por atender las necesidades del país mediante la educación y hacer el esfuerzo, por creer en nosotros para llegar a lugares de primer nivel, enriquecer la libertad de los individuos y alimentar con realidad los sueños.

Bueno es necesario en esta celebración hacerte saber una vez más que estoy muy orgulloso de haberte conocido y que además soy tu admirador, felicidades por el logro y el pequeño presente que te doy es porque tu esfuerzo hoy quiero que tenga un valor agregado.

Estas playeras son solo el comienzo de lo bien que me va a ir como Ingeniero, tuve un sueño o una visión de mi paso por la facultad de Ingeniería y me es grato y me llena de júbilo saber que haya una escuela que me haga obtener uno de mis sueños y que además tuve la fortuna de conocerla y decirle que hoy ya no es un sueño sino son las palabras más reales que se estamparon y son de las pocas cosas que te dan la fuerza necesaria en esos tiempos de hambre, malpasadas, sacrificios y de tantas desveladas, ahora en esta nueva faceta, en esos momentos difíciles de la carrera basta con un vistazo al closet y esta playera dará la fuerza necesaria cuando me la coloque como una armadura “la Prueba de la inteligencia” esta abajo y a la izquierda donde late el corazón, la Facultad de Ingeniería está en el estómago que es el motor a punto de arrancar, tu carrera es todo tu poder, todo tu amor, todo tu coraje, toda tu pasión, tu mejor herramienta, la más grande aliada, tu característica particular... en fin tu mejor facultad para la resolución de un problema, la UNAM es la que me ha acompañado estos últimos años para recordarme que el águila y el cóndor despiertan y América continente consiente despierta, la gran responsabilidad social como humanística de “POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU” y reencontrar tantos kilómetros recorridos de ese camino si es que algún día se perdieran, del lado derecho las iniciales de la persona que comienza su revolución y trata de inyectar ideas frescas a estos tiempos, la combinación blanco-negro es porque hay que mantener el equilibrio en nuestro mundo y hacia nuestra persona, hay tantas cosas que se pueden complicar pero antes muerto que dejar de soñar.

DISEÑO DE PLAYERA DE FACULTAD DE INGENIERIA



- PRUEBA DE INTELIGENCIA**
- (A) La verdadera prueba de inteligencia es tener dos ideas opuestas en la cabeza y seguir funcionando, aceptar que las cosas no tienen solución y sin embargo seguir decidido a cambiarlo.
 - (B) ING. AOH

Escudos



A MIS PROFESORES

Por la dedicación y el optimismo pedagógico para poder transmitir el conocimiento, por todas las atenciones, por la gran oportunidad de poderme enseñar dentro y fuera de ellas.

Alfredo López Tagle

Por darse el tiempo de dirigir y creer en mí trabajo luego de sus múltiples ocupaciones, pero él entiende el llamado de un colega a otro, por terminar una carrera de docente con este trabajo que de entre tantas aportaciones durante su trayectoria se despide y nos deja una última aportación para recordarnos la gran responsabilidad que tenemos como Ingenieros, en verdad gracias.

Alfredo Arenas

Por tomarse el tiempo para enseñarme y entender el significado que tiene la vida en los universitarios, por creer que ningún alumno se merece estar agobiado por los problemas existenciales, por mostrar el camino cuando uno no piensa con claridad, ese empeño y confianza hoy están reflejados, gracias por tantos consejos.

José Arturo Martínez

Por atender algunos proyectos que me ayudaron a desarrollarme en el ámbito profesional, por transmitirme sus conocimientos y consejos para el desarrollo de este trabajo, y por qué a la fecha podemos seguir trabajando después de las aulas.

A MIS MAESTROS EN EL TRABAJO

Por qué los conocimientos en la escuela son importantes, pero existen otros más que son saberlos aplicar en el trabajo y me gusto esa analogía que me permitió desarrollarme mejor y complementar mis conocimientos.

Luis Adán González Villegas

Por conseguir en mí ser hiperactivo por generarme mis propias áreas de oportunidad, saber emplearme, por crear una plaza que difícilmente se puede eliminar, por mejorar las estrategias de trabajo.

José Luis Marmolejo Malpica

En esos momentos donde no se veía por donde alguien me dijo “tú no eres un estudiante normal, eres un estudiante diferente” y que solo debía saber dónde estaba parado para poder proseguir aclarando mis ideas y darme esa visión de poder llegar más lejos, que el dejar de soñar no es una opción, que todos somos hombres de palabra y la ayuda a alcanzar un sueño apoyando a la revisión de este trabajo.

José Ángel Apolonio Bautista

“Maestro si quiere que no le critiquen su trabajo y dormir tranquilo, hágalo bien” aquellas palabras que sin ningún fin lucrativo inculcaron la honestidad, profesionalismo y el trabajo en equipo, entender que todos en el trabajo somos iguales y debemos ser honestos con nosotros mismos para dar ese plus que hace que duermas tranquilo todos los días.

A MIS AMIGOS DE LA FACULTAD

David

Por ser el cómplice de tantas aventuras dentro y fuera de la escuela, por ese apoyo incondicional que hizo que confiáramos a resolver nuestros proyectos.

A MIS AMIGOS DE LAS ROCAS

Ese compañerismo, esa persuasión, ese espíritu PUMA de saber esperar cuando llegue nuestro momento y estar al pendiente para darnos esas palabras de aliento, gracias compañeros en verdad a todos.

A MIS GRUPOS DE ROCK FAVORITOS

Por darme aliento en esas noches de maldita soledad, de mucha desvelada en este gran circo, de malas pasadas, por acompañarme en mis sueños, por enseñarme que la música es el puente donde siendo distintos nos podemos encontrar, por tantos y tantos kilómetros recorridos pero antes muerto que dejar de soñar, como decía el abuelo no basta pensar hacer lo que sueñas, hablar de verdad, no sé por qué me llaman criminal es mi derecho poder trabajar no hay ser humano que sea ilegal la tierra entera es mi hogar trabajadores internacionales, se acabó, el baile y el salón, la medicina, viento, dioses ocultos, esta vez, la visita, manía cardiaca somos ajenos si tú me quisieras tu tanta falta de querer... bueno fortalecer mis ideales y crear una armonía en mi camino.

FELICITAS AVENDAÑO GARCIA-Al amor de mi vida

“Andábamos sin buscarnos, pero sabiendo que andábamos para encontrarnos” (Rayuela, Julio Cortázar) Por haberte encontrado y que en este tiempo me hiciste creer que aunque nada es por siempre o después de un final todo vuelve a comenzar, por ser la persona que me hizo entender que todo cuenta aceptando mi pasado y que mejoro mi presente con ese apoyo incondicional y querer verme feliz para poder llegar al futuro tomados de la mano quizá o frente a una chimenea riéndonos del pasado con algún café.

ÍNDICE

Introducción.....	1
1. Elementos y conceptos eléctricos básicos.....	4
1.1 Resistencia eléctrica	5
1.1.1 Construcción.....	6
1.1.2 Magnitud de la resistencia	6
1.1.3 Conexión	7
1.2 Capacitor eléctrico	8
1.2.1 Construcción.....	9
1.2.2 Magnitud de la Capacitancia	9
1.2.3 Conexión	10
1.3 Inductor eléctrico	12
1.3.1 Construcción.....	12
1.3.2 Magnitud de la Inductancia	13
1.3.3 Conexión	13
1.4 Conceptos básicos de Potencia	15
1.4.1 Potencia Real o Activa.....	15
1.4.2 Potencia Reactiva	16
1.4.3 Potencia Aparente	16
1.4.4 Triángulo de Potencias	16
1.4.5 Factor de potencia	17
1.5 Corrección del factor de potencia por medio del capacitor	18
1.5.1 Compensación individual	19
1.5.2 Compensación en grupo.....	20
1.5.3 Compensación centralizada	21
2. Conceptos teóricos de las corrientes armónicas.....	23
2.1 Armónicos.....	23
2.1.1 Orden armónico.....	23
2.1.2 Secuencia de los armónicos	25

2.2	Corrientes armónicas	26
2.2.1	Existencia de corrientes armónicas	26
2.3	Distorsión armónica THD total en corriente y en voltaje	27
2.3.1	Distorsión de demanda total TDD	27
2.3.2	Potencia promedio con distorsión en voltaje y corriente	28
2.3.3	Potencia aparente con distorsión en voltaje y corriente	28
2.4	Fuentes de Armónicas y sus soluciones para disminuir su efecto	29
2.4.1	Efectos de las armónicas	29
2.5	Factor de potencia cuando existen armónicas de voltaje y corriente	31
2.5.1	Factor de potencia de distorsión cuando existen armónicas de voltaje y corriente ..	32
2.5.2	Factor de potencia total en presencia de corrientes armónicas.....	32
2.5.3	Factor k	33
2.5.4	Resonancia	33
2.5.5	Factor Q.....	36
3	Medición y control de armónicos	37
3.1	Instrumentos para medición de armónicos	38
3.2	Sitios donde debe realizarse el registro	39
3.3	Selección de equipo a utilizar.....	39
3.4	Conexión y uso del analizador de redes AR5-L para análisis de gráficas y resultados en el sistema eléctrico.....	41
4	Normas sobre el control de armónicas	45
4.1	IEEE-519.....	45
4.2	Limites aplicables al usuario	45
4.3	Limites aplicables a la compañía suministradora	50
4.4	Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica	53
4.5	Tarifas de suministro de energía eléctrica	54
4.5.1	Tarifa 3	54
4.5.2	Tarifa OM	55
4.5.3	Tarifa HM	57
5	Parámetros medidos, así como los costos por consumo en una instalación comercial o industrial a través del recibo de CFE.....	58
5.1	Como cobra CFE	60
5.2	Ejercicio real de los cobros de CFE.....	61

5.3	Como interpretar los conceptos y la obtención de costos	67
5.4	Obtención del F.P. de acuerdo a lo registrado en el recibo.....	69
6	Medidas correctivas	70
6.1	Filtros de potencia.....	71
6.1.1	Diseño y operación de filtros	71
6.1.2	Usos y ventajas	74
6.1.3	Desventajas	77
6.2	Reactores de choque	77
6.2.1	Diseño y operación de los reactores de choque.....	78
6.2.2	Usos y ventajas	78
6.2.3	Desventajas	79
6.3	Transformadores estrella-delta.....	79
6.3.1	Diseño y operación	80
6.3.2	Usos y ventajas	80
6.3.3	Desventajas	80
6.4	Transformadores en Zig-Zag	80
6.4.1	Diseño y operación	81
6.4.2	Usos y ventajas	81
6.4.3	Desventajas	82
6.5	Transformadores tipo k	82
6.5.1	Diseño y operación	82
6.5.2	Usos y ventajas	83
6.5.3	Desventajas	83
6.6	Sobredimensionamiento del hilo de neutro	83
6.6.1	Diseño y operación	83
6.6.2	Usos y ventajas	83
6.6.3	Desventajas	83
7	Metodología para realizar un estudio de calidad de energía eléctrica en presencia de armónicas.	84
7.1	Plan de trabajo.....	84
7.2	Como explorar la red eléctrica del usuario	85
7.2.1	Visita a campo	85

7.2.2	Levantamiento eléctrico y recolección de datos	85
7.3	Interpretación de explorar la red eléctrica del usuario.....	88
7.3.1	Mediciones efectuadas	88
7.3.2	Equipo utilizado	89
7.4	Análisis, Ingeniería, reporte y recomendaciones a todos los problemas	89
7.4.1	Análisis.....	89
7.4.2	Reporte técnico y recomendaciones	89
8	Aplicación practica	91
8.1	Propuesta técnica económica de aplicación práctica 1.....	91
8.1.1	Tipo de propuesta.....	91
8.1.2	Datos generales	92
8.1.3	Alcance.....	92
8.2	Reporte.....	92
8.2.1	Levantamiento y recolección de datos para la valoración de instalaciones y optimización de los consumos de energía.....	94
8.2.2	Recibo de la compañía suministradora CFE	95
8.3	Selección de medida correctiva.....	96
8.3.1	Cálculos	96
8.3.2	Análisis y escenarios	98
8.4	Estimación de costos y retorno de inversión.....	102
8.5	Instalación de propuesta aceptada y resultados	103
8.5.1	Resultados obtenidos en recibo.....	107
8.6	Propuesta técnica económica de aplicación práctica 2.....	108
8.6.1	Datos generales	108
8.6.2	Reporte	108
8.6.3	Levantamiento y recolección de datos para la valoración de instalaciones y optimización de los consumos de energía.....	110
8.6.4	Selección de medida correctiva	111
8.6.4.1	Cálculos	111
8.6.4.2	Análisis y escenarios	112
8.6.5	Estimación de costos y retorno de inversión	114
8.6.6	Instalación de propuesta aceptada y resultados.....	115
8.6.6.1	Resultados obtenidos.....	120

8.7 Otros aspectos técnicos y su impacto económico.....	121
9.Conclusiones.....	122
10.Bibliografía.....	124
11. Glosario.....	126

Introducción

La intención de este trabajo, es juntar los conocimientos teóricos y técnicos aplicados a un proyecto de campo lo más actualizado que sea posible viéndolo del lado del usuario o suministrado en baja tensión, así también, el planteamiento de una metodología para dar solución a problemas de factor de potencia bajo o a los originados por corrientes armónicas.

El uso cotidiano de las instalaciones eléctricas en cualquier inmueble se convierte en una necesidad del ser humano, por ello la existencia de entender sus orígenes y la familiaridad que como sociedad tenemos con el uso de la electricidad y nuestras tareas diarias, además, debemos crear una conciencia adecuada acerca de esto, a continuación, el presente documento se comprende de diferentes conceptos que nos ayudarán con la explicación de este trabajo.

Capítulo 1

El proceso para la obtención de la energía eléctrica depende de las distintas fuentes primarias, las cuales, junto con los sistemas de generación, transmisión, distribución y consumo constituyen el sistema eléctrico de potencia, este sistema viéndolo de manera elemental es la conexión de elementos resistivos, inductivos y capacitivos conectados en serie o paralelo, debido a sus fenómenos electromagnéticos generan potencia eléctrica real o activa, reactiva y aparente, estos conceptos se pueden demostrar con el triángulo de potencias donde se da a conocer el factor de potencia que nos indica el aprovechamiento o la eficiencia de la energía eléctrica, actualmente los suministrados en sus empresas o compañías se preguntan por qué corregir el factor de potencia y una medida correctiva efectiva para esto es el banco de capacitores.

Capítulo 2

Actualmente la operación de todos los sistemas eléctricos del mundo se ve afectada por la distorsión en las formas de onda de las tensiones y corrientes producida principalmente por el uso cada vez mayor de dispositivos electrónicos no-lineales en los sistemas de potencia. La distorsión de una señal se expresa en términos de componentes armónicos o armónicos simplemente. En una señal eléctrica, un armónico es definido como un componente cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia original del sistema.

Capítulo 3

Para entender lo que está pasando en el sistema, debemos de contar con equipos de medición que nos proporcione datos como potencia eléctrica, corriente, tensión, factor de potencia, distorsión armónica entre otros parámetros que estos equipos especializados nos ofrecen al medir, para dar un buen uso a estos equipos y conocer el sistema se deben escoger adecuadamente los sitios donde debe realizarse el registro, en esta parte me enfocare en el medidor ARL-5 de Circutor y la forma de conectarlo al sistema, por lo general, el suministrado pone atención en esto debido a los diversos efectos nocivos ocasionados en los equipos y maquinaria que ocupan para su producción afectando sobre todo a industrias y grandes centros comerciales.

Capítulo 4

Cuando se conoce entre otros aspectos la magnitud y tipo de los armónicos presentes en la red y la fuente que los produce, se puede determinar si hay una buena calidad en el servicio de energía eléctrica. Las compañías suministradoras con el fin de determinar la medida correctiva más apropiada compensan económicamente a los suministrados a que disminuyan la potencia reactiva y manteniendo los niveles de distorsión en valores normalizados bonificando un porcentaje de lo facturado en la utilización de potencia real, en caso contrario, existe una penalización induciendo a los suministrados a que corrijan sus instalaciones y que consuman un mínimo de esta potencia para reducir el costo de consumo de energía eléctrica, los suministrados con tarifas de suministro de energía eléctrica 3, OM o HM son las que se ven en esta situación.

Para tal efecto en esta sección, se muestran las diferentes normas con las magnitudes de operación que satisfagan las características de un sistema eléctrico, así los equipos estandarizados para las sobretensiones por efecto de armónicos no filtrados sean tolerables. Tanto para los usuarios del servicio como las compañías suministradoras deben cumplir con los límites indicados un aspecto que finalmente se relaciona con la especificación apropiada de los elementos de acuerdo con la norma correspondiente, se muestran fragmentos importantes de las normas nacionales como la especificación CFE L-000045 y la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, así como las normas internacionales IEEE-519.

Capítulo 5

Las compañías suministradoras verifican que el consumo de potencia reactiva sea el mínimo a través del factor de potencia, cuando más cercano sea a la unidad, en este caso el sistema tiene un aprovechamiento óptimo. Existen multas o costos que pueden ascender hasta un 120 por ciento en penalización y de 2.5 por ciento en bonificación, este análisis se puede ver en el recibo de consumo de energía eléctrica, en México actualmente la Comisión Federal de Electricidad es la que proporciona este tipo de parámetros medidos, así como sus costos, se analiza un caso real de un suministrado de una empresa de comercio que cuenta con distintos puntos de ventas alrededor del País donde se muestra la forma de leer estos cargos así como la obtención de los mismos.

Capítulo 6

Para solucionar los problemas de factor de potencia bajo o con presencia de armónicos, las medidas correctivas que han minimizado o eliminado estos problemas son los bancos de capacitores y los filtros de potencia respectivamente, sin embargo, esto no es limitativo pues hoy en día se cuentan con equipos que van evolucionando, en esta parte menciono las medidas correctivas más ocupadas en las industrias o comercios, sus usos, ventajas y desventajas.

Capítulo 7

Para elegir la medida correctiva que se adapte al sistema que se vea afectado por esto en el campo laboral, hay empresas dedicadas a realizar estudios y mediciones de estos parámetros, estos reciben el nombre de

calidad de la energía eléctrica, para tener una mejor aceptación, son muchas las cosas que se deben de revisar del sistema eléctrico, por lo que propongo una metodología para tener un panorama claro de las áreas que se deben tomar en cuenta para su análisis, esto puede generar un plan de trabajo, donde se conocen los equipos principales de la instalación que nos proporcione la información necesaria para detectar el problema a solucionar.

Capítulo 8

Aquí presento la selección de un banco de capacitores y un filtro de corrientes armónicas que parte del método propuesto en el capítulo anterior, de los parámetros eléctricos, así como de la información de los diagramas unifilares y el recibo por consumo de energía eléctrica de los servicios que para nuestros casos están en tarifa HM, se realiza el análisis y los escenarios posibles para la medida correctiva apropiada.

Para el banco:

Las mediciones en campo nos darán los parámetros del sistema necesarios para identificar la potencia reactiva y factor de potencia bajo que afecta, en el análisis se hace el dimensionamiento del banco de capacitores que minimice el problema.

Para el filtro:

Las mediciones nos indican la potencia reactiva y los niveles de las armónicas que predominan, con esto se dimensiona la capacidad del filtro que minimice el problema de factor de potencia bajo y la distorsión armónica a niveles que no excedan los tolerables del capítulo 4, en caso de ser excedidos se modifican los cálculos de los parámetros iniciales realizando nuevas corridas hasta que se obtengan valores satisfactorios.

Para ambos casos se presenta en un formato de propuesta técnica y económica viable, también se analiza los costos por la instalación de estos equipos y el retorno de inversión, muchas veces el usuario se ve muy renuente en la adquisición de estos equipos por que los costos los consideran muy elevados, en este capítulo trataré de dar un panorama de esto, sobre todo de los beneficios técnico-económicos que deja la mejora de las instalaciones. El procedimiento es ilustrado en dos plantas industriales del usuario, aunque puede ser usado igualmente en sistemas de distribución asociados a compañías suministradoras.

Finalmente, todas estas herramientas nos ayudaran a comprender mejor lo que es calidad de la energía eléctrica. Actualmente la razón más importante por la que el suministrado necesita el estudio de calidad de energía eléctrica es la búsqueda del aumento de productividad y competitividad de las empresas.

1. Elementos y conceptos eléctricos básicos

Los elementos eléctricos se derivan de la propiedad de los materiales conductores, un conductor es un elemento que no opone resistencia cuando las partículas están en movimiento¹ al paso de la electricidad, a esto se debe su nombre.

Esto produce campo eléctrico² o magnético³, potencial eléctrico⁴ o diferencia de potencial⁵ debido a una fuente externa que llamaremos fem o fuente de fuerza electromotriz conectada a dos piezas metálicas que llamaremos terminales, también esta fuente puede ser algún elemento capaz de almacenar energía.

Las propiedades de estos elementos se pueden clasificar por su:

Construcción. - Estas pueden actuar como oposición del paso de la corriente (resistencia), como electrodos separados a cierta distancia por un dieléctrico (capacitor) o como un campo magnético variable que induce una tensión en ese campo de separación (inductor).

Magnitud. – Se refiere a la medida o su valor de cada uno de estos, la resistencia, capacitancia e inductancia eléctrica son los nombres que toman por los fenómenos electromagnéticos que se producen cuando están operando en fragmentos de los sistemas eléctricos.

Conexión. - Cualquier conexión de elementos a través de los cuales puede circular corriente en forma permanente o transitoria es un circuito eléctrico. La definición anterior da lugar a la ley de ohm que dice:

¹ Movimiento=Corriente, capacidad por la cual circula un Amper [A] a través de un conductor en su superficie

²El campo eléctrico es un campo físico que se representa, mediante un modelo que describe la interacción entre cuerpos y sistemas con propiedades de naturaleza eléctrica. Se describe como un campo vectorial en el cual una carga eléctrica puntual de valor que sufre los efectos de una fuerza. Capítulo 2 a 7. (JARAMILLO M., 2001)

³ Producido por la ley de Faraday y Oersted, capítulo 2 a 7 (JARAMILLO M., 2001)

⁴ Es el trabajo que debe realizar un campo electrostático para mover una carga positiva desde dicho punto hasta el punto de referencia capítulo 2 a 7 (JARAMILLO M., 2001)

⁵ Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos de un circuito. La diferencia de potencial se mide en volts [V]capítulo 2 a 7 (JARAMILLO M., 2001)

“En un circuito eléctrico cerrado, la intensidad de la corriente eléctrica [I] que circula por un conductor eléctrico es directamente proporcional a la diferencia de potencial [V] aplicada e inversamente proporcional a la resistencia [R] del mismo.”⁶

$$I = \frac{V}{R} [A] \dots\dots\dots (1)$$

La asociación de más de un elemento del mismo tipo o diferente conectado al circuito pueden ser de tipo serie, paralelo o dual, que es la combinación de ambas.

Pueden ser lineales o no-lineales, fijos o variables, polarizados y no polarizados, por la conexión, algunos son de uso especial que depende de las necesidades que se requieran en el sistema.

Cualquier circuito eléctrico está conformado por: resistencias, inductancias y capacitancias, elementos pasivos que disipan o almacenan energía eléctrica o magnética, como ejemplo las resistencias se encuentran en los calentadores de agua, el foco incandescente, hornos para secado de pintura o para hornear alimentos; los capacitores los podemos encontrar en las bombas de agua para arranque, filtros de corrientes armónicas, banco de capacitores o balastos; los inductores los tenemos en motores de bombas de agua, electroimanes para puertas, transformadores y generadores eléctricos. La misión que desempeñan, en cada caso, depende de cómo sea el circuito; si están conectados a una fuente de corriente alterna o continua, en este trabajo nos enfocaremos en el análisis de la corriente alterna.

1.1 Resistencia eléctrica

Propiedad del material para conducir o no la corriente eléctrica, se caracteriza por el efecto joule que se produce (calentamiento del material). Un resistor se destruye por calentamiento excesivo.⁷

⁶Ley de Ohm en honor del profesor de enseñanza secundaria George Simón Ohm (1787-1854). capítulo 2 a 7 (JARAMILLO M., 2001)

⁷ (JARAMILLO M., 2001)

1.1.1 Construcción

Todos los materiales, en mayor o menor grado, presentan resistencia al paso de la corriente eléctrica. En la figura 1 se muestra este efecto. Un resistor se construye combinando diversos materiales, dependiendo del grado de oposición al paso de la corriente que se necesite.

A.- *Electrones fluyendo por un buen conductor eléctrico, que ofrece baja resistencia.*

B.- *Electrones fluyendo por un mal conductor eléctrico, que ofrece alta resistencia a su paso. En ese caso los electrones chocan unos contra otros al no poder circular libremente y, como consecuencia, generan calor.*

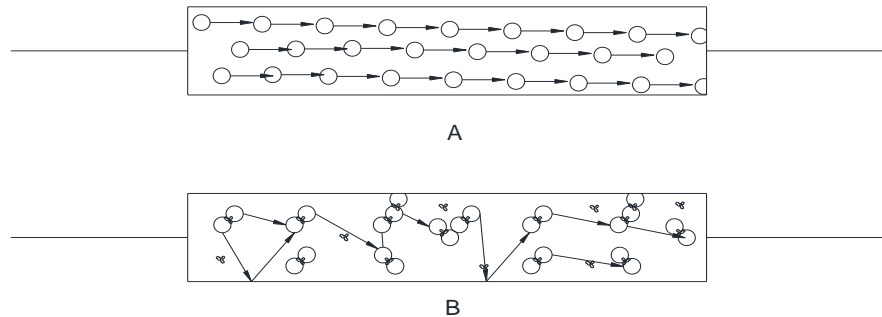


Figura 1. Resistencia eléctrica.

Fuente Electricidad y Magnetismo Jaramillo 2001

1.1.2 Magnitud de la resistencia

El valor de la magnitud de una resistencia eléctrica “R” es directamente proporcional a la longitud del conductor, a la resistividad del material denotado por la letra griega ρ (se lee rho) e inversamente proporcional a su sección transversal.

$$R = \rho \frac{l}{S} [\Omega] \dots\dots\dots (2)$$

Donde:

R: resistencia eléctrica [Ω].

ρ : Resistividad del material [$\Omega \cdot m$].

l : Longitud del conductor [m].

S : Sección transversal del conductor [m^2].

La unidad de la resistencia eléctrica es el ohmio (Ω), en honor del profesor de enseñanza secundaria George Simón Ohm (1787-1854).

Por otro lado, de acuerdo con la ley de Ohm, de la ecuación 1 despejando la resistencia de un material puede definirse como la razón entre la diferencia de potencial eléctrico y la corriente en que atraviesa dicha resistencia, así:

$$R = \frac{V}{I} [\Omega] \dots\dots\dots (3)$$

Donde:

R: resistencia eléctrica [Ω].

V: tensión eléctrica [V].

I: intensidad de corriente [A].

1.1.3 Conexión

Si conectamos una fuente externa de corriente alterna (CA) senoidal a las terminales de un resistor lineal mediante el circuito de la figura 2, obtenemos que:

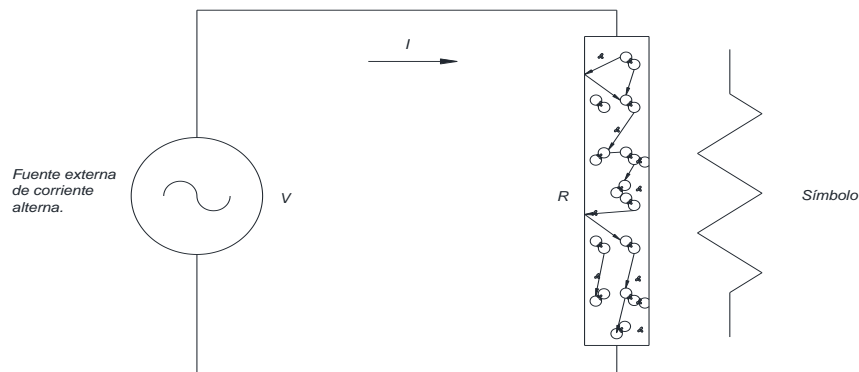


Figura 2. Conexión de una resistencia a una fuente.

Los fenómenos físicos del comportamiento en el tiempo de la resistencia en CA no provocan desfases entre la tensión y la corriente.

En la figura 3 se puede observar el comportamiento en el tiempo de la resistencia eléctrica, entre los 0° y los 90° $V(t)$, $V(R)$ e $I(c)$. En cada instante la corriente es directamente proporcional a la tensión e inversamente proporcional a la resistencia.

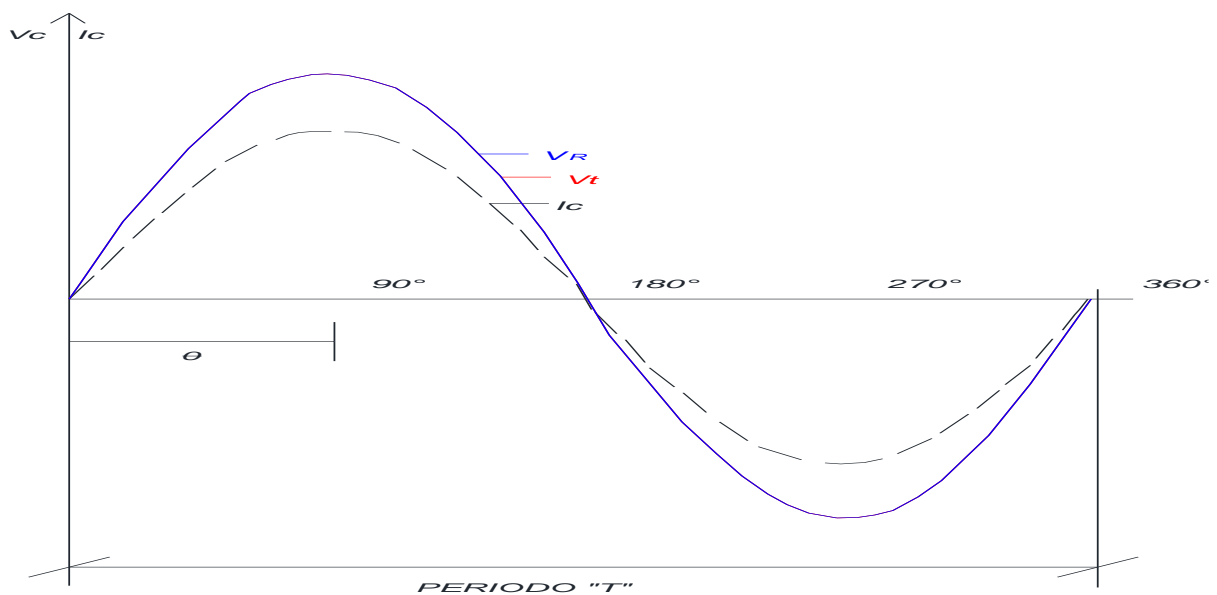


Figura 3. Comportamiento en el tiempo de la resistencia eléctrica.

Fuente: Electricidad y Magnetismo Jaramillo 2001

- No hay desfase entre la tensión del circuito V_t con la de resistencia V_R .
- En una resistencia la corriente está en fase con la tensión. -

1.2 Capacitor eléctrico

El capacitor es uno de los elementos pasivos de la red eléctrica, su importancia radica en que es un dispositivo que permite almacenar carga eléctrica que se genera de la fuerza electromotriz (Fem) y/o diferencia de tensión (voltaje) que recibe durante el periodo de carga y descarga.⁸

⁸ (JARAMILLO M., 2001)

1.2.1 Construcción

El capacitor en su expresión más simple se conforma de dos placas planas y paralelas separadas por un material dieléctrico como el de la figura 4.

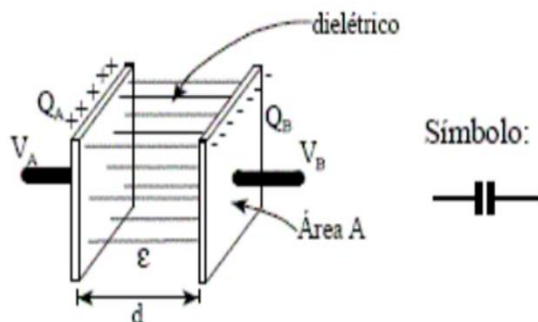


Figura 4. Capacitor Eléctrico.

Fuente: Electricidad y Magnetismo Jaramillo 2001

1.2.2 Magnitud de la Capacitancia

El valor de la magnitud de la capacitancia “C” de un capacitor es directamente proporcional al área de sus placas e inversamente proporcional a la distancia que las separa. Es decir, cuanto mayor sea el área de las placas, mayor será el valor de la capacitancia, expresada en Faradios [F], y cuanto mayor sea la distancia entre las placas, mayor será la tensión de trabajo del capacitor expresada en [V], aunque el valor de la capacitancia disminuye proporcionalmente cuanto más las placas se separan, Ec. 4 o 4a

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad \text{Ó} \quad C = \frac{1}{4\pi K} \frac{A}{d} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$C = \frac{Q}{V_{ab}} \quad \dots\dots\dots (4a)$$

Donde:

C: capacitancia en Faradios [F]

ε: Permitividad en el vacío o constante dieléctrica en [F/m]

A: área en [m²]

d: distancia de separación en [m]

Q: Carga en Coulomb [C]

K: Constante de coulomb 9×10^9 [N·m²/C²]

V_{ab}: tensión entre terminales [V]

1.2.3 Conexión

Si conectamos una fuente externa de corriente alterna (CA) senoidal a las terminales de un capacitor ideal mediante el circuito de la figura 5, obtenemos que:

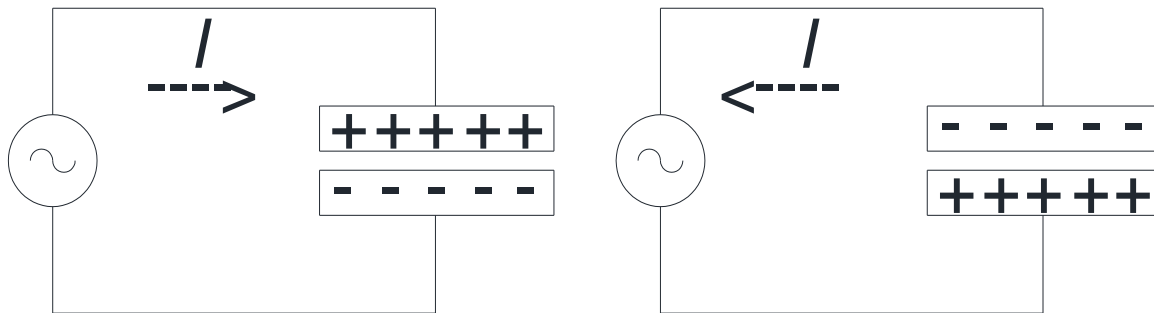


Figura 5. Conexión de un capacitor a una fuente.

Fuente: Electricidad y Magnetismo Jaramillo 2001

Los fenómenos físicos del comportamiento en el tiempo del capacitor en CA provocan desfases entre la tensión y la corriente.

En la figura 6 se puede observar el comportamiento en el tiempo del capacitor en CA, entre los 0° y los 90° I(c) va aumentando desde cero a su valor máximo positivo a medida que aumenta su voltaje de carga Vc (t), llegando a ser nula cuando alcanza el valor máximo negativo a los 90°, puesto que la suma de tensiones es cero (Vc (t)+ V (t) = 0) en ese momento. Entre los 90° y los 180° V (t) disminuye, y el capacitor comienza a descargarse, disminuyendo por lo tanto Vc (t). En los 180° el capacitor está completamente descargado, alcanzando I(c) su valor máximo negativo. De los 180° a los 360° el razonamiento es similar al anterior.

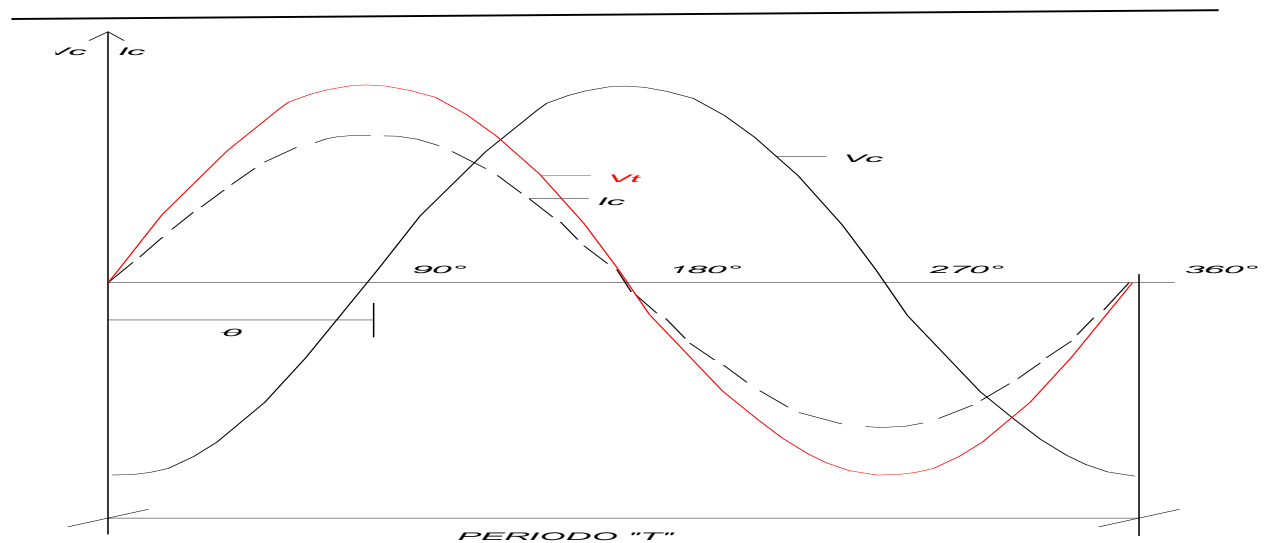


Figura 6. Comportamiento en el tiempo del capacitor eléctrico

Fuente: Electricidad y Magnetismo Jaramillo 2001

- El capacitor debido a la carga y descarga la corriente sufre un desplazamiento de fase. -
- La corriente en un capacitor se adelanta 90° con respecto a su tensión. -
- Entonces hay una relación entre la tensión y la corriente
- El capacitor actúa como si fuera una resistencia en corriente alterna llamada reactancia capacitiva.
- La reactancia se mide en ohmios y su notación es Xc

Xc depende del valor del capacitor y de la frecuencia de la tensión CA

$$Xc = \frac{1}{2\pi f * c} = \frac{1}{\omega C} \dots\dots\dots (5)$$

Si la pulsación se expresa en radianes por segundo (rad/s) y la capacitancia en faradios (F), la reactancia resultará en ohmios.

1.3 Inductor eléctrico

Un inductor, bobina o reactor es un componente pasivo de un circuito eléctrico que, debido al fenómeno de la autoinducción, almacena energía en forma de campo magnético.⁹

1.3.1 Construcción

A diferencia de lo que ocurre con los resistores y capacitores, la fabricación de inductores es más complicada, en la figura 7 se muestra un inductor, según el núcleo o soporte tenemos los toroides, núcleo de aire: el devanado se realiza sobre un soporte de material no magnético como fibra o plástico.

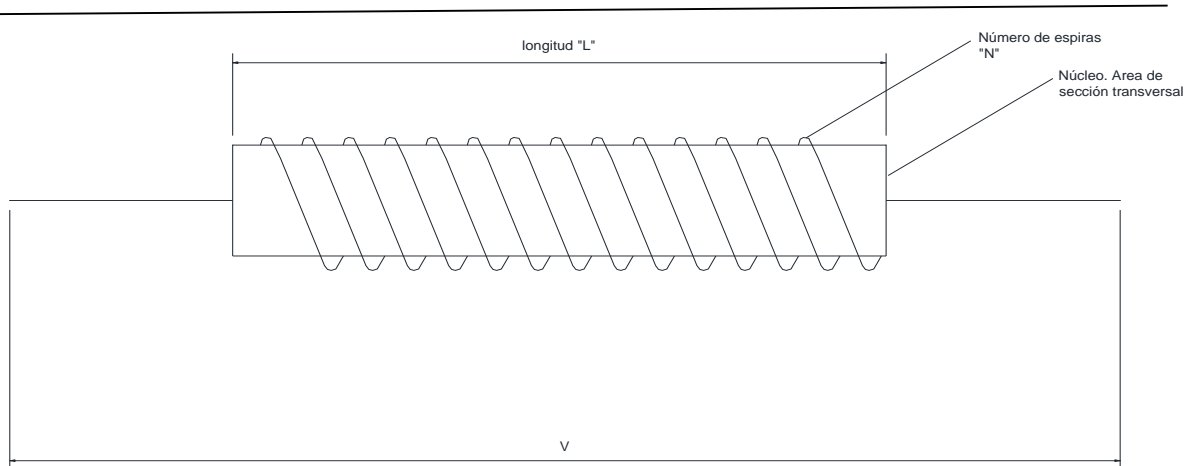


Figura 7. Inductor eléctrico

Fuente: Electricidad y Magnetismo Jaramillo 2001

En los casos donde no se utiliza soporte, la bobina queda conformada sólo debido a la rigidez mecánica del conductor. En los casos del núcleo: el de hierro como tiene mayor permeabilidad que el aire, aumenta el valor de la inductancia, sin embargo, sólo se emplea en bajas frecuencias porque a altas frecuencias las pérdidas son elevadas; el de ferrita: las ferritas son óxidos de metales magnéticos, de alta permeabilidad que además son dieléctricos. Existe una gran variedad en el mercado en función de la frecuencia de trabajo.

⁹ (JARAMILLO M., 2001), (JOSEPH A. EDMINISTER, 1998)

1.3.2 Magnitud de la Inductancia

El valor de la magnitud de la inductancia “L” viene determinado exclusivamente por las características geométricas de la bobina y por la permeabilidad magnética del espacio donde se encuentra. Así, para un solenoide, la inductancia, viene determinada por:

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l} \text{ [H]} \dots\dots\dots (6)$$

Donde

L: inductancia en henrio [H]

μ : permeabilidad en el vacío $4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]

N: número de espiras [1]

A: área de la sección transversal del bobinado [m²]

l : Longitud del inductor [m]

El cálculo de L es bastante complicado a no ser que la bobina sea toroide y, aun así, resulta difícil si el núcleo presenta distintas permeabilidades en función de la intensidad que circule por la misma. En este caso, la determinación se realiza a partir de las curvas de imantación.

1.3.3 Conexión

Si conectamos una fuente externa de corriente alterna (CA) senoidal a las terminales de un inductor lineal mediante el circuito de la figura 8, obtenemos que:

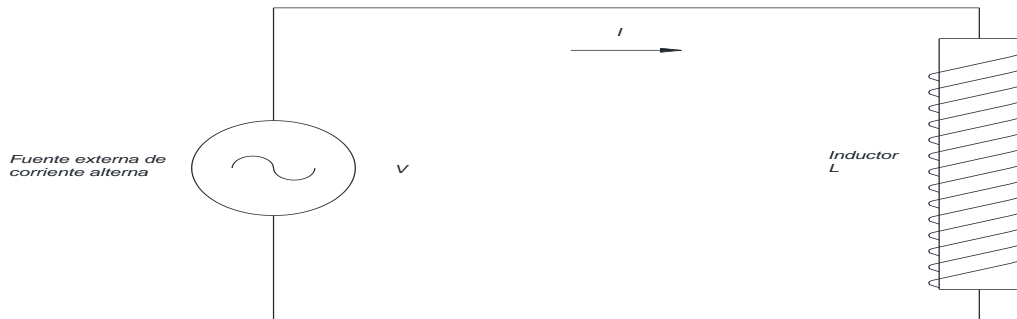


Figura 8. Conexión de un inductor a una fuente.

Fuente: Electricidad y Magnetismo Jaramillo 2001

La tensión en el inductor mantiene la forma, pero desfasada.

En la figura 9. De igual forma que la imagen anterior, el comportamiento en el tiempo del inductor en CA, al conectar una onda sinusoidal $V(t)$ a una bobina aparecerá una corriente $I(t)$, también sinusoidal, esto es, variable, aparecerá una fuerza contra electromotriz, $-V(i)$, cuyo valor absoluto puede demostrarse que es igual al de $V(t)$. Por tanto, cuando la corriente $I(t)$ aumenta, $V(i)$ disminuye para dificultar dicho aumento; análogamente, cuando $I(t)$ disminuye, $V(i)$ aumenta para oponerse a dicha disminución. Esto puede apreciarse en la figura. Entre 0° y 90° la curva $I(t)$ es negativa, disminuyendo desde su valor máximo negativo hasta cero, observándose que $V(i)$ va aumentando hasta alcanzar su máximo negativo. Entre 90° y 180° , la corriente aumenta desde cero hasta su valor máximo positivo, mientras $V(i)$ disminuye hasta ser cero. Desde 180° hasta los 360° el razonamiento es similar al anterior.

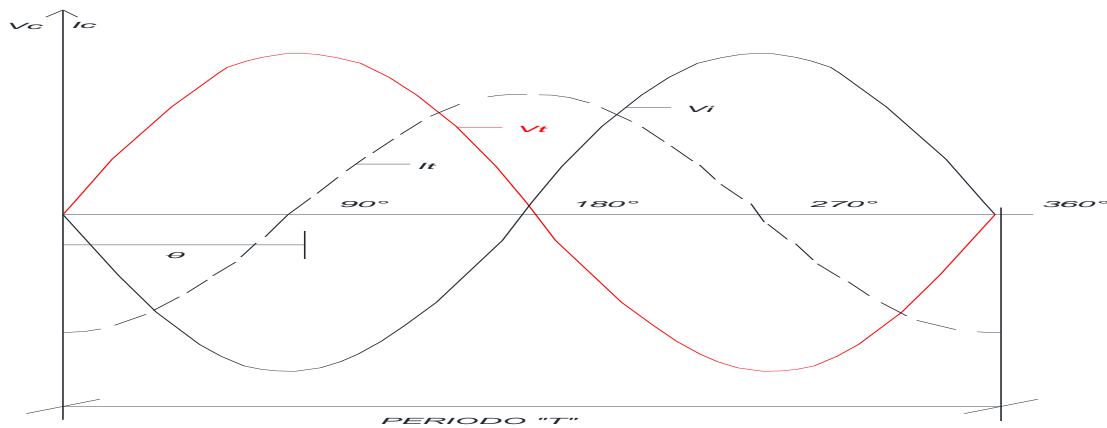


Figura 9. Comportamiento en el tiempo del inductor eléctrico.

Fuente: Electricidad y Magnetismo Jaramillo 2001

- El inductor debido al campo magnético que se genera en el conductor la corriente sufre un desplazamiento de fase. -
- La corriente en un inductor se retrasa 90° con respecto a su tensión. -
- Hay una relación entre la tensión y la corriente
- El inductor actúa como si fuera una resistencia en corriente alterna llamada reactancia inductiva
- La reactancia se mide en ohmios y su símbolo es X_L

X_L depende del valor del inductor y de la frecuencia de la tensión CA

$$X_L = 2\pi f * L = \omega L \quad \dots\dots\dots (7)$$

Si la pulsación se expresa en radianes por segundo (rad/s) y la capacidad en Henrios (H), la reactancia resultará en ohmios.

1.4 Conceptos básicos de Potencia

Todos los aparatos eléctricos que consumen potencia como un motor de una bomba en una cisterna, es similar, a todos los aparatos eléctricos que entregan potencia como un generador a la cual estan conectados. Ahora veremos cómo esta potencia consumida se denomina real o activa, la cual los medidores de la compañía suministradora registra y es facturada al suministrado. Algunos aparatos debido a su principio de funcionamiento, toman de la fuente una cantidad mayor a la que registra el medidor, una parte es la ya mencionada real y la restante no es en realidad consumida sino entretenida entre el aparato y la red a esta se le denomina potencia reactiva. La potencia total formada por la activa y la reactiva es tomada de la red, se denomina aparente y es la que finalmente debe ser transportada hasta el punto de consumo.

De acuerdo a las propiedades de los elementos eléctricos, existe un defasamiento de 90° entre la corriente y el voltaje, además, este defasamiento es simétrico entre si de manera que se puede analizar a través de un triángulo rectángulo, a este se le llama triángulo de potencias y cumple con la identidad pitagórica, en este participan la potencia activa, reactiva y aparente, a partir de este planteamiento encontramos en la relación un concepto importante que se conoce como el factor de potencia "F.P."

El hecho de transportar una potencia mayor a la que realmente se consume, modifica el factor de potencia e impone la necesidad de que los conductores, transformadores y demás dispositivos que participan en el suministro de esta potencia sean más robustos, y esto implica otros costos en el sistema y eleva los precios de distribución.

1.4.1 Potencia Real o Activa

Es la potencia eléctrica que se aprovecha para realizar un trabajo, se simboliza con la letra "P" y su unidad es el Watt [W].¹⁰

$$P = V * I * \cos \phi = I^2 * R \dots\dots\dots (8)$$

¹⁰ (Chapman, 2016)

1.4.2 Potencia Reactiva

Además de utilizar potencia activa para producir un trabajo, los motores, transformadores y demás equipos similares requieren un suministro de potencia reactiva para generar el campo magnético necesario para su funcionamiento.

La potencia reactiva no produce por si misma ningún trabajo, pero cuando se hace pasar una corriente por un conductor, el campo magnético es producto de esta se simboliza con la letra “Q” y su unidad es el Volt-Amper Reactivo [VAR].¹¹

$$Q = V * I * \text{sen } \phi = I^2 * X = I^2 * (X_L - X_C) = S * \text{sen } \phi \quad \dots\dots\dots (9)$$

1.4.3 Potencia Aparente

La potencia total o aparente es la suma geométrica de la potencia activa y reactiva, o bien, el producto de la corriente y el voltaje, Esta potencia es la que realmente suministra una planta eléctrica se simboliza con la letra “S” y su unidad es el Volt-Amper [VA].¹²

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad \dots\dots\dots (10)$$

1.4.4 Triángulo de Potencias

El triángulo de potencias es el que forman la potencia activa, la potencia reactiva y la potencia aparente, Fig. 10.¹³

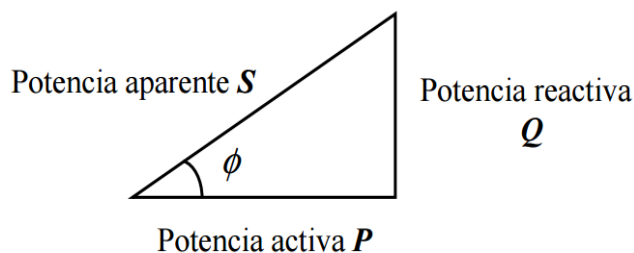


Figura 10. Triángulo de potencias

Fuente El ABC de la calidad de la energía eléctrica

¹¹ (Chapman, 2016) p.47

¹² Ídem p.47

¹³ (Eléctrica, 2004)El ABC de las corrientes armónicas Capitulo.4

De la figura 10, se puede conocer la potencia aparente a partir del teorema de Pitágoras aplicado en el triángulo de potencias.

$$s = \sqrt{P^2 + Q^2} \dots\dots\dots (11)$$

1.4.5 Factor de potencia

El factor de potencia se define como la relación entre la potencia activa (kW) usada en un sistema y la potencia aparente (kVA).

En la figura 10. El ángulo ϕ nos indica si la tensión o la corriente se encuentran en fase, dependiendo del tipo de carga, el factor de potencia (F.P.) puede ser adelantado, retrasado o igual a 1.¹⁴

$$\cos \phi = \frac{P}{S} \dots\dots\dots (12)$$

Por lo tanto $\cos \phi = \text{F.P.}$

- Para el caso cuando $\phi = 0$, se tiene un factor de potencia unitario.- Esto nos dice que tanto la corriente como la tensión están en fase, esto se presenta por lo regular en cargas resistivas como lámparas incandescentes.-
- Para el caso cuando $\phi < 0$, se tiene un factor de potencia retrasado.- Esto nos dice que la corriente se encuentra atrasada respecto a la tensión, esto se presenta por lo regular en cargas inductivas como motores o transformadores.-
- Para el caso cuando $\phi > 0$, se tiene un factor de potencia adelantado.- Esto nos dice que la corriente se encuentra adelantada respecto a la tensión, esto se presenta por lo regular en cargas capacitivas como banco de capacitores.

¹⁴ (Eléctrica, 2004) El ABC de la calidad de la energía eléctrica Capitulo.4

1.5 Corrección del factor de potencia por medio del capacitor

De acuerdo con el triángulo de potencias, el factor de potencia se modifica cuando se consume potencia real y aparente, los motores eléctricos y transformadores están formados por la combinación de resistencia e inductancia para magnetizar sus devanados produciendo potencia reactiva que también afecta, en México, las normas y reglamentos nos dan una referencia del factor de potencia en el sistema aceptable de 0.90, si el valor está por debajo de este se considera factor de potencia bajo y se debe corregir, sin embargo, si el valor está por arriba se considera factor de potencia óptimo.

Técnicamente se considera un factor de potencia bajo cuando una cantidad de corriente de la red se incrementa en la medida que el factor de potencia disminuya, por ejemplo, con un factor de potencia igual a 0.5, la cantidad de corriente para la carga será dos veces la corriente útil, en cambio para un factor de potencia igual a 0.9 la cantidad de corriente será de 10% más alta que la corriente útil. Esto significa que a bajos factores de potencia los transformadores y cables de distribución pueden sobrecargarse, y que las pérdidas en ellos se incrementarán en proporción al cuadrado de la corriente, afectando a la red tanto en alta como en baja tensión.¹⁵

Otros factores que afectan en un factor de potencia bajo se deben principalmente por los siguientes puntos:

- Aumento de las pérdidas por efecto Joule, las cuales son en función del cuadrado de la corriente, estas pérdidas se manifestarán en:
 - Los cables entre medidor y el usuario
 - Los embobinados de los transformadores de distribución
 - Dispositivos de operación y protección
- Un incremento en la caída de tensión resultando en un suministro inadecuado en las cargas (motores, lámparas fluorescentes, etc.); esta caída de tensión afecta a:
 - Los embobinados de los transformadores de distribución
 - Los cables de alimentación
 - Sistemas de protección y control
- Incremento de la potencia aparente, con lo que se reduce la capacidad de carga instalada. Esto es importante en el caso de los transformadores de distribución.
- Estas pérdidas afectan al productor y distribuidor de energía eléctrica, por lo que se penaliza al usuario.

Las instalaciones eléctricas cuya carga está compuesta principalmente por motores de inducción tienen un factor de potencia atrasado, por esta razón resulta necesario compensar la carga inductiva con carga capacitiva, además de realizar modificaciones o acciones para que los motores

¹⁵ (Eléctrica, 2004) op. Cit., Capítulo 4

operen en condiciones de carga adecuadas (75 - 100%) para mejorar el factor de carga del mismo y de la instalación total.

Los capacitores han sido la solución más práctica y económica comparados con otros medios de generación de potencia reactiva debido a su fácil manejo y mantenimiento bajo, ahora existen varias configuraciones para compensar la potencia reactiva, los capacitores se conectan siempre en paralelo entre sí, a su vez, en paralelo con la carga a corregir, si esto no es suficiente se pueden agregar más secciones conectadas en paralelo, hay tres tipos principales de compensación con capacitores en baja o alta tensión, a continuación se describen estos.

1.5.1 Compensación individual

La compensación individual se utiliza en equipos que tienen un ciclo continuo de operación y cuyo consumo de potencia reactiva es considerable, principalmente motores eléctricos y transformadores. El capacitor puede conectarse directamente o por medio de un desconectador electromecánico que se instala en cada una de las cargas de manera que los únicos conductores afectados por la potencia reactiva son los que unen la carga con el capacitor.¹⁶

Las ventajas de esta configuración son:

- La potencia reactiva queda atrapada entre el capacitor y la carga, quedando el resto de las líneas libres de potencia reactiva.
- Los capacitores entran en servicio sólo cuando la carga está conectada, ya que el arrancador puede servir como interruptor del condensador de manera que no son necesarios otros sistemas de regulación.

Aunque esta configuración está recomendada para estos casos también presenta algún inconveniente como, por ejemplo:

- El precio de varios capacitores por separado es mayor que el de uno mayor equivalente.
- En cargas que no son usadas con frecuencia ocasiona que los capacitores puedan estar sobredimensionados.

En la figura 11. se muestra un arreglo típico de una compensación individual donde se coloca por lo regular donde se encentra la carga.

¹⁶ (CRESPO., 2001) Banco de Capacitores



Figura 11. Compensación Individual de motores

Fuente Banco de Capacitores, Dr. Alfredo Navarro Crespo

1.5.2 Compensación en grupo

La configuración de compensación en grupo se recomienda cuando un grupo de cargas, ya sean iguales o diferentes, se conectan simultáneamente y demandan una cantidad de potencia reactiva constante.

La configuración en grupo tiene las siguientes ventajas:

- Pueden instalarse en el centro de control de motores
- Se utilizan solo cuando las cargas están en funcionamiento

Esta suele ser también la mejor opción, si se pretende aumentar la capacidad de carga activa de los transformadores, o mejorar los niveles de voltaje, regularmente estos equipos están divididos en secciones desconectables que entren y salgan de operación por un medio de control automático.¹⁷

En la figura 12. se muestra un arreglo típico de una compensación en grupo donde se puede colocar por lo regular donde se encuentre el alimentador principal de las cargas.

¹⁷ (CRESPO., 2001) BANCO DE CAPACITORES

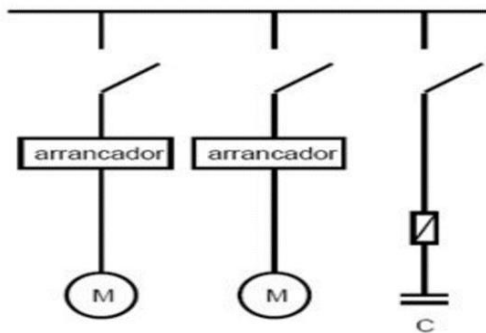


Figura 12. Compensación en grupo de motores

Fuente Banco de Capacitores, Dr. Alfredo Navarro Crespo

Si la carga de la instalación no está sujeta a fuertes variaciones, basta con instalar un banco de capacitores fijo que en condiciones de plena carga corrija el factor de potencia general, a un valor ligeramente más elevado que el mínimo admitido por la compañía suministradora.

En casos de cargas muy variables, en que se pretenda corregir el factor de potencia a un valor próximo a la unidad para cualquier condición de carga, la compensación en grupo de accionamiento automático nos podrá ayudar a elevar el factor de potencia.

1.5.3 Compensación centralizada

La capacidad del banco de capacitores se instala en la acometida, cerca de los tableros de distribución, nuevamente el banco está dividido en secciones desconectables que entran y salen de operación con el equipo de control según el consumo de potencia reactiva que se presente.

La compensación centralizada presenta las siguientes ventajas:

- Mayor aprovechamiento de la capacidad de los capacitores. -
- Mejor regulación de voltaje en el sistema eléctrico. -
- Adecuación de la potencia del banco de capacitores según los requerimientos de cada momento.

La desventaja de corregir el factor de potencia con una configuración centralizada es que los alimentadores no son descargados de potencia reactiva, además de la necesidad del controlador automático en la instalación.¹⁸

¹⁸ (CRESPO., 2001) BANCO DE CAPACITORES

En la figura 13. se muestra un arreglo típico de una compensación centralizada donde se puede colocar por lo regular donde se encuentre la subestación eléctrica o cuarto eléctrico.

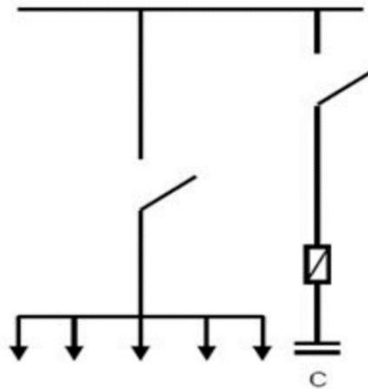


Figura 13. Compensación centralizada

Fuente Banco de Capacitores, Dr. Alfredo Navarro Crespo

Para las compañías suministradoras, se cuentan con dispositivos de compensación estática de reactivos con una configuración tiristorizada de respuesta rápida. Es un equipo eléctrico usado para brindar una compensación de potencia reactiva de rápida acción en redes de transmisión de electricidad de alta tensión. Estos dispositivos brindan soluciones a problemas de estabilidad y control de la tensión de forma rápida y eficiente, además son una alternativa para superar situaciones de transporte de energía eléctrica y calidad de suministro.

2. Conceptos teóricos de las corrientes armónicas

En sistemas eléctricos de corriente alterna, los armónicos son, igual que en acústica, frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental de trabajo del sistema y cuya amplitud va decreciendo conforme aumenta el múltiplo.

Los componentes armónicos¹⁹ se definen como un componente de orden superior a 1 de la serie de Fourier de una cantidad periódica.

2.1 Armónicos

Cuando se habla de los armónicos en las instalaciones de energía (perturbaciones en la red), son los armónicos de corriente los más preocupantes, puesto que son corrientes que generan efectos negativos. Es habitual trabajar únicamente con valores correspondientes a la distorsión armónica total (THD).

2.1.1 Orden armónico

En la figura 14, se muestra el orden del armónico y es el número entero de veces que la frecuencia de ese armónico es mayor que la de la componente fundamental. Por ejemplo, el armónico de orden 3 es aquel cuya frecuencia es 3 veces superior a la de la fundamental, o lo que es lo mismo, si la fundamental es de 60 Hz el armónico de orden 3 tendría una frecuencia de 180 Hz. El armónico fundamental se considera de orden 1.

Los armónicos se pueden clasificar en dos tipos, los impares y los pares. Los armónicos impares son los que se encuentran habitualmente en las instalaciones eléctricas industriales y edificios comerciales.

“los armónicos no característicos son producidos por equipos convertidores semiconductores en el curso de la operación normal.”²⁰

En un convertidor de 6 pulsos (caso típico) el orden de las armónicas es

$$h = kq \pm 1 \dots\dots\dots (13)$$

Donde:

h=orden de armonica

k= es un entero (1,2,3,...)

¹⁹ Comisión Electrotécnica Internacional (IEC 60050)

²⁰ (IEEE, 1992)., Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia., p.3

q= numero de pulsos del convertidor estatico de potencia

La amplitud teorica de las armonicas es:

$$I_h = \frac{I_1}{h} \dots\dots\dots (14)$$

Donde:

I_h = es la magnitud de la corriente armonica [A]

I_1 = magnitud de la corriente fundamental [A]

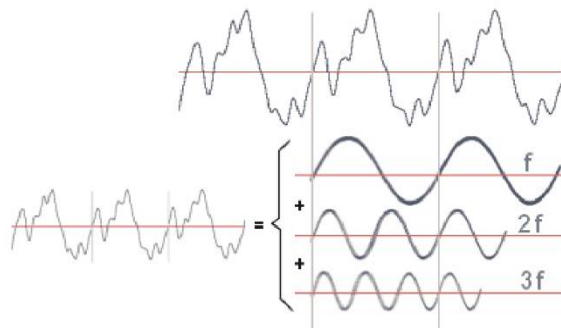


Figura 14. Orden Armónico

Fuente El ABC de la calidad de la energía eléctrica Capitulo.3

La figura 15, representa el espectro armónico, este permite descomponer una señal en sus armónicos y representarlo mediante un gráfico de barras, donde cada barra representa un armónico, con una frecuencia, un valor eficaz, magnitud y desfase.

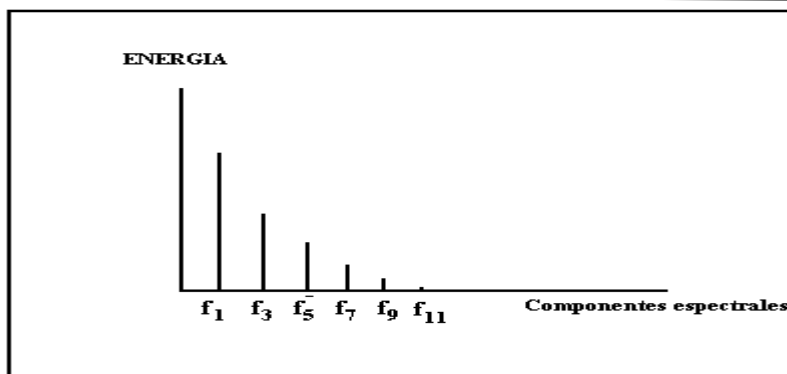


Figura 15. Orden Armónico

Fuente El ABC de la calidad de la energía eléctrica Capitulo.3

El espectro armónico es una representación en el dominio de la frecuencia de la forma de onda que se puede observar con un osciloscopio. Cada barra representa un armónico, pudiendo tener armónicos de orden 3, 5, 7, 9, 11, 13, etc. como se ve en la figura 15. El espectro armónico de una señal deformada llega hasta el infinito, sin embargo, por convenio se limita el número de armónicos que se analizan, ya que por encima del orden 40 raras veces se tienen armónicos de un valor significativo que pueda perturbar el funcionamiento de los equipos y elementos conectados a la instalación eléctrica.

En una instalación eléctrica, donde por ella sólo circula corriente alterna, el espectro está formado por componentes armónicos de orden impar. Los armónicos de orden par aparecen principalmente cuando circulan tensiones o corrientes con componente continua.

2.1.2 Secuencia de los armónicos

Para los sistemas trifásicos balanceados en condiciones normales, las ondas de corriente o tensión tienen un desfase entre sí de 120° , y su secuencia de fases es positiva (A, B, C). Los armónicos de cada una de las fases, dado que su frecuencia es un múltiplo de la frecuencia fundamental, presentan unos ángulos de desfase diferentes a las formas de onda fundamentales, por lo cual estos pueden presentar diferentes secuencias de fase.²¹

La Tabla 2.1.2 muestra la regla que sigue la secuencia de fases de los diferentes armónicos.

No.armónico	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Secuencia	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Fuente (Dr. ALFREDO NAVARRO CRESPO, 2001) Corrientes Armónicas Anexo 38

La secuencia seguida por los armónicos es importante para analizar sus efectos, obteniéndose las siguientes conclusiones:

- En sistemas trifásicos, los armónicos de orden $3n$ de corriente solo se pueden propagar cuando es posible un retorno por neutro.
- Los armónicos de orden $(3n + 1)$ en tensión generan en los motores un campo giratorio en el mismo sentido de la componente fundamental.
- Los armónicos de orden $(3n - 1)$ en tensión generan en los motores un campo giratorio en sentido contrario al generado por la componente fundamental.

²¹ (Dr. ALFREDO NAVARRO CRESPO, 2001) Corrientes Armónicas Anexo 38

Debe tenerse en cuenta que las conclusiones sobre secuencia de los armónicos solo son válidas cuando el sistema trifásico está balanceado y las formas de onda de las tres fases son idénticas. En la práctica, pueden encontrarse diferencias entre las tres fases del sistema. Lo anterior conduce a que los armónicos puedan tener componentes de diferentes secuencias a las obtenidas en el caso ideal planteado.

2.2 Corrientes armónicas

Una corriente armónica es una corriente senoidal cuya frecuencia es múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la fuente de alimentación. Según Fourier, cualquier señal periódica, por compleja que sea, se puede descomponer en suma de señales senoidales cuya frecuencia es múltiplo de la fundamental.²²

$$s(t) = \sum_{1 \rightarrow \infty} (A_0 + A_1 * \text{sen}(2\pi * f_1) + A_2 * \text{sen}(2\pi * 2f_1) + \dots + A_n * \text{sen}(2\pi * nf_1)) \dots (15)$$

Esta expresión matemática permite descomponer cualquier señal en suma de señales senoidales, donde f_1 es la frecuencia de la componente fundamental y A_0, A_1, A_2, \dots , son las amplitudes de las distintas señales cuya expresión matemática para calcularlas también están definidas en las series de Fourier.

Es de destacar el análisis armónico, lo que es lo mismo un análisis de Fourier, es un modelo matemático de las señales de tensión y corriente. La onda distorsionada que actualmente fluye a través del circuito no es un grupo de ondas senos de diferentes frecuencias. *“La distorsión armónica es una forma de ruido eléctrico. Es la sobre posición de señales en múltiplos de la frecuencia fundamental de la potencia sobre la onda senoidal de la misma.”*²³

2.2.1 Existencia de corrientes armónicas

En general, los armónicos son producidos por cargas no lineales, lo cual significa que su impedancia no es constante (está en función de la tensión). Estas cargas no lineales a pesar de estar alimentadas con una tensión senoidal absorben una intensidad no senoidal, haciendo que la corriente quede desfasada un ángulo Φ respecto a la tensión.²⁴

Para simplificar a la hora de hacer cálculos, se considera que las cargas no lineales se comportan como fuentes de intensidad que inyectan armónicos en la red. Los componentes que suelen originar armónicos son: los variadores de velocidad, convertidores, balastos electrónicos, equipos informáticos y en general cualquier tipo de carga con componentes activos, tales como diodos, transistores, tiristores, etc. Las características que definen a los armónicos son las amplitudes de cada armónico y el orden del armónico.

^{22, 23 y 24} (IEEE, 1992) Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia., p.1

Las corrientes armónicas pueden causar calentamiento en máquinas rotatorias. Las corrientes armónicas de orden $kq+1$ son corrientes de fase positiva y las corrientes de orden $kq-1$ son corrientes de fase negativa. En máquinas síncronas, esas dos corrientes se suman directamente causando un calentamiento adicional en el rotor.

2.3 Distorsión armónica THD total en corriente y en voltaje

De acuerdo con la IEEE-519 se puede decir que la distorsión armónica es el promedio de todas las señales senoidales que se generan de la onda fundamental, en la Ecuación 16. Muestra cómo toda señal periódica no senoidal $i(t)$ puede descomponerse en la suma de su componente fundamental $i_1(t)$ (componente a la frecuencia de red, que en México es de 60 Hz) y de sus h componentes armónicas $i_h(t)$ (componentes cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la fundamental).²⁵

$$i(t) = i_1 + \sum_{h=2}^{\infty} i_h(t) \dots\dots\dots (16)$$

La distorsión armónica de una forma de onda representa el contenido en armónicos que tiene esa señal, también de la amplitud de la señal, de ahí que el factor de potencia se ve afectado por esta causa. La cantidad de distorsión que presenta una forma de onda de tensión o corriente se cuantifica mediante un índice llamado distorsión armónica total (THD), definido para tensiones y corrientes por las ecuaciones 2.3.A y 2.3.B, donde V_1 y I_1 son las componentes fundamentales de tensión y corriente respectivamente y V_h y I_h los armónicos de h , todos en términos eficaces.

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad \text{y} \quad THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \dots\dots\dots (17) \text{ y } (18)$$

2.3.1 Distorsión de demanda total TDD

Las corrientes armónicas para cada usuario son evaluadas en la acometida y los límites se establecen en base a la relación entre la corriente de corto circuito y la demanda máxima de corriente de la carga del usuario.²⁶

La distorsión de demanda total TDD está definida como:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \dots\dots\dots (19)$$

²⁵ ²⁶ (Dr. ALFREDO NAVARRO CRESPO, 2001) Corrientes Armónicas Anexo 38

Donde

- I_h Magnitud de la armónica individual
- I_L Demanda máxima de la corriente fundamental de la carga
- h Orden armónico impar

2.3.2 Potencia promedio con distorsión en voltaje y corriente

$$PPDvi = \sum_{i=1,2,3}^{\infty} V_i * I_i * \cos\phi_i \dots\dots\dots (20)$$

Donde

V_i Es la tensión RMS de la armónica i

I_i Es la corriente RMS de la armónica i

ϕ_i Es el desfaseamiento entre la armónica i de voltaje y la armónica i de corriente

Si solo existen armónicas de corriente y el voltaje solo tiene la componente de frecuencia fundamental la ecuación 20²⁷ Se simplifica a:

$$PPDvi = V_i * I_i * \cos\phi_i \dots\dots\dots (21)$$

2.3.3 Potencia aparente con distorsión en voltaje y corriente

$$PADvi = V_s I_s \dots\dots\dots (22)$$

Donde

$$V_s = \sqrt{\sum_{i=1,2,3}^{\infty} (V_i^2)}; \quad y \quad I_s = \sqrt{\sum_{i=1,2,3}^{\infty} (I_i^2)} \dots\dots\dots (23) \text{ y } (24)$$

²⁷ (Dr. ALFREDO NAVARRO CRESPO, 2001) Corrientes Armónicas Anexo 38

Si solamente existen armónicas de corriente t el voltaje solo tiene la componente de frecuencia fundamental la ecuación de PADvi ²⁸se simplifica a:

$$PADvi = V_1 I_s \dots\dots\dots (25)$$

2.4 Fuentes de Armónicas y sus soluciones para disminuir su efecto

La norma IEEE 519-2014, relativa a “prácticas recomendadas y requerimientos para el control de armónicas en sistemas eléctricos de potencia “agrupa a las fuentes emisoras de corrientes armónicas en cuatro categorías diferentes:

- A) Dispositivos electrónicos de potencia (ciclo convertidores o convertidores, rectificadores, drives, etc.).
- B) Dispositivos productores de arcos eléctricos (hornos de arco, luz fluorescente, maquinas soldaduras).
- C) Dispositivos ferromagnéticos (transformadores, electroimanes, etc.)
- D) Motores eléctricos que mueven cargas con un par de arranque bruscamente variable (molinos de laminación, trituradores, maquinas rotativas, etc.)²⁹

2.4.1 Efectos de las armónicas

Como se menciona en los puntos anteriores, la existencia de cualquier señal que circule por la instalación eléctrica, ya sea de corriente o de tensión, y cuya forma de onda no sea senoidal, puede provocar daños en ella o en los equipos conectados a la misma.

- a) Equipos electrónicos

Los equipos que tengan electronica de potencia pueden tener mal funcionamiento ante la presencia de distorsiones armónicas, ya que muchos de estos equipos para su correcto funcionamiento depende de las señales del cruce por cero, y *“La distorsión armónica puede resultar en un cambio en el cruce por voltaje cero o en el punto en el cual un voltaje de fase a fase se vuelve mayor que otro voltaje de fase a fase.”*³⁰

²⁸ (Dr. ALFREDO NAVARRO CRESPO, 2001) Corrientes Armónicas Anexo 38

²⁹ (Dr. ALFREDO NAVARRO CRESPO, 2001) Anexo 38

³⁰ (IEEE, 1992)., Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el control de Armónicas en Sistemas Eléctricos de Potencia., p.31

b) Calentamientos (conductores, hilo de neutro y otros dispositivos)

El calentamiento es uno de los efectos más importantes de los armónicos. Se puede producir en los devanados de los transformadores, motores, conductores en general y especialmente en el hilo de neutro.

Debido al efecto piel, a medida que la frecuencia de la tensión o corriente aumenta, ésta tiende a circular por el exterior del conductor desaprovechando parte de la sección, lo que significa que aumenta la resistencia del cable. Esta mayor resistencia, unida a la circulación por el exterior provoca un aumento de la temperatura del cable, con el consiguiente peligro de dañar el aislamiento del mismo y llegar, en ciertos casos, a generar un foco de incendio, en especial si el cable no está protegido contra el fuego. Los conductores de neutro se ven especialmente perjudicados porque es habitual diseñarlos con una sección igual a la mitad de la sección de los conductores de fase, ya que cuando el sistema está equilibrado la corriente por el neutro debería ser cero.

c) Salto de protecciones

Las señales con armónicos pueden tener un valor de corriente eficaz rms muy pequeño y sin embargo alcanzar un valor de pico muy grande. Este hecho hace que equipos de protección, termomagnéticos y diferenciales puedan saltar.

d) Resonancia

Un condensador en paralelo con una bobina forma un circuito resonante, capaz de amplificar las señales de una determinada frecuencia. Este circuito resonante puede amplificar ciertos armónicos, pudiendo hacer que los efectos de estos sean todavía más perjudiciales, llegando a quemar las baterías de condensadores.

e) Vibraciones y acoplamientos

Las altas frecuencias de los armónicos y las subidas y bajadas rápidas de las señales distorsionadas provocan interferencias electromagnéticas que pueden ser radiadas o conducidas. Las interferencias electromagnéticas pueden provocar: vibraciones en cuadros eléctricos y transformadores, y/o acoplamientos en redes de comunicación como las de telefonía o redes de ordenadores.

f) Deterioro de la forma de onda de tensión (achataamiento)

Cuando una instalación eléctrica tiene una gran cantidad de armónicos, la corriente distorsionada generada por las cargas puede provocar una deformación de la forma de onda de tensión, llegando a presentar aplanamiento en la parte superior e inferior de la forma de onda cuando la distorsión es importante. Este achatamiento hace que la señal no alcance el valor de pico adecuado, provocando el mal funcionamiento de los puentes de diodos, que se encuentran en fuentes de alimentación, o en convertidores de frecuencia, que consumen corriente cuando la señal de tensión alcanza su valor máximo.

g) Tensión entre neutro y tierra distinto de cero

La circulación de corriente por el conductor de neutro provoca una caída de tensión entre neutro y tierra, ya que la resistencia del cable de neutro no es cero. Esta tensión perjudica la calidad de la red y puede tener efectos nefastos sobre la instalación. Por ello, además de mantener la tensión entre neutro y tierra a cero,

es recomendable tener un buen sistema de tierras y que las conexiones de los equipos no formen lazos entre ellos para evitar la circulación de corrientes parásitas y disminuir el riesgo de daños en los equipos.

h) Motores asíncronos

La circulación de corrientes armónicas por los devanados del motor provocan calentamientos en los mismos, lo que pone en peligro el aislamiento térmico del arrollamiento. También puede producirse una pérdida de rendimiento y reducción de la vida del motor.

i) Capacitores

Éstos disminuyen su impedancia con la frecuencia, con lo que cuanto mayor sea la frecuencia mayores posibilidades de corrientes parásitas, acoplamiento entre cables, mal funcionamiento de las protecciones y relés. Hay peligro de sobrecarga por el efecto de la resonancia.

“Una solución para este problema consiste en agregar una inductancia en serie con el capacitor de compensación reactiva”³¹

j) Transformadores

Los armónicos producen varios efectos sobre los transformadores. Calienta el bobinado, aumenta la impedancia de fuente y produce pérdidas debidas a las corrientes de Foucault. La impedancia del transformador aumenta con la frecuencia, con lo que la distorsión armónica total de voltaje (THDv) también aumenta.

“El incremento de pérdidas depende de la frecuencia y, por lo tanto, los componentes armónicos de alta frecuencia pueden ser más importantes que las componentes armónicas de baja frecuencia causando calentamiento al motor.”³²

2.5 Factor de potencia cuando existen armónicas de voltaje y corriente

Por la presencia de las armónicas modificando la frecuencia fundamental f_1 que se originan en el sistema que se esté analizando, surgen algunos otros conceptos que en este apartado estaré mencionando donde la corriente y el voltaje se modifiquen tanto en amplitud como en desplazamiento debido a la carga instalada de carácter inductivo como capacitivo que predomine en el sistema.

$$F.P.v-i = \frac{\sum_{i=1,2,3}^{\infty} V_i * I_i * \cos\phi_i}{\sqrt{\sum_{i=1,2,3}^{\infty} (V_i^2)} * \sqrt{\sum_{i=1,2,3}^{\infty} (I_i^2)}} = \frac{PPDvi}{PADvi} \dots\dots\dots (26)$$

³¹ (IEEE, 1992)., Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia., p.35

³²Idem., p.33

Si solamente existen armónicas de corriente y el voltaje solo tiene la componente de frecuencia fundamental, la ecuación se simplifica a:

$$F.P.v-i = \frac{V_1 I_1 \cos \phi_1}{V_1 I_s} = \frac{I_1}{I_s} * \cos \phi_1 \dots\dots\dots (27)$$

Ahora el $\cos \phi_1$ es el ángulo de desfase entre la tensión y corriente y el factor de potencia de desplazamiento con distorsión armónica en corriente y se puede definir como el producto del cociente de $\frac{I_1}{I_s}$ y el factor de potencia de desplazamiento (F.P. des) como se muestra en la siguiente ecuación:

$$F.P. des = \frac{I_s}{I_1} * F.P. \dots\dots\dots (28)$$

El factor de potencia está íntimamente ligado a la distorsión armónica. A mayor distorsión armónica mayor es la corriente total I_s respecto a la componente fundamental I_1 (ya que el resto son armónicos), de modo que el factor de potencia disminuye. Por lo tanto, la presencia de armónicos en la corriente tiene un efecto muy negativo sobre la eficiencia con la que el equipo proporciona potencia a la red y es un aspecto muy importante a controlar, no sólo a nivel de seguridad sino también de efectividad.

2.5.1 Factor de potencia de distorsión cuando existen armónicas de voltaje y corriente

$$F.P. dist = \frac{F.P}{F.P. des} = \frac{P}{V * I * \cos(\theta_{v1} - \theta_{i1})} \dots\dots\dots (28a)$$

Desarrollando la ecuación anterior nos queda

$$F.P. dist = \frac{V * I_1 * \cos(\theta_{v1} - \theta_{i1})}{V * I * \cos(\theta_{v1} - \theta_{i1})} = \frac{1}{\sqrt{1 + THDi^2}} \dots\dots\dots (29)$$

Donde:

F.P.dist: factor de potencia de distorsión (incluyendo el contenido armónico)

THDi: Distorsión armónica total en corriente

Productos de los campos electromagnéticos se origina esta distorsión y por lo general las corrientes armónicas modifican la onda senoidal fundamental.

2.5.2 Factor de potencia total en presencia de corrientes armónicas

Como ya conocemos el F.P. des y el F.P.dist, entonces el factor de potencia total (F.P.tt) como lo conocemos, se modifica por el producto de estos dos factores.

$$F.P. tt = F.P. desp * F.P. dist \dots\dots\dots (30)$$

Cuando analizamos a las cargas no lineales, no es suficiente compensar el factor de potencia por desplazamiento, ya que, aunque compensamos el factor de potencia por desplazamiento de toda la componente fundamental, el factor de potencia total será inferior a 1, pues no se ha compensado el factor de potencia generado por los armónicos.

Hay que tener en mente que al compensar el factor de desplazamiento cuando se encuentran presentes cargas no lineales generadoras de grandes armónicas, estas pueden causar resonancia en paralelo con los capacitores colocados para a compensación.

Los equipos destinados a ese fin se denominan filtros de armónicas y su función es disminuir en la red el contenido de las corrientes armónicas, que la carga no lineal introduce, atenuando de esta forma los efectos mencionados.

2.5.3 Factor k

Indica la capacidad de un transformador para alimentar cargas no lineales sin sobrecalentarse³³, se calcula de la siguiente manera:

$$k = \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 h^2 \dots\dots\dots (31)$$

Donde:

I_h Es el valor efectivo de la corriente armónica h en pu del valor efectivo de la corriente total

Si se tienen los datos de las corrientes armónicas en PU de la fundamental, el factor k se puede calcular mediante la siguiente expresión.

$$k = \left(\frac{I_1}{I}\right)^2 * \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 h^2 \dots\dots\dots (32)$$

2.5.4 Resonancia

Cuando la distorsión de la línea es muy elevada, existe un problema más importante que es la resonancia, cuando la reactancia inductiva del sistema y la reactancia capacitiva son iguales a la misma frecuencia como:

³³ (Eléctrica, 2004) El ABC de la Calidad de la Energía Eléctrica, Enríquez Harper

$$X_l = X_c; \text{ 2.5.4. Y en frecuencia } f_r = f * \sqrt{\frac{X_c}{X_l}} \dots\dots\dots (33)$$

En una misma red puede darse el caso de una resonancia en serie y en paralelo al mismo tiempo. La resonancia paralela es una impedancia muy elevada para el flujo de corriente armónica, mientras que la resonancia serie es una impedancia baja para el flujo de corriente armónica, a continuación, representamos el arreglo de estos.

- **Resonancia Paralelo**

“La resonancia paralela se ve en la figura 16, ocurre cuando la reactancia inductiva del sistema y las reactancias capacitivas son iguales a la frecuencia”³⁴.

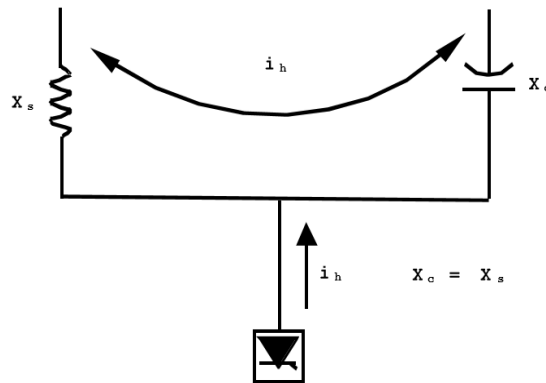


Figura 16. Resonancia paralelo

Fuente IEEE 1992

La combinación de bancos de compensadores y la inductancia del sistema resultan en una resonancia paralelo cercana a los armónicos característicos generados por una carga no lineal cuya corriente armónica excitara el circuito “tanque”, este provocara una corriente amplificada que oscilara entre la energía almacenada en la inductancia y la energía almacenada en la capacitancia. Esta alta oscilación de corriente puede causar distorsión de voltaje e interferencia telefónica cuando los circuitos de distribución y los circuitos de telefonía están físicamente próximos.

La impedancia total X_T queda de la siguiente forma

$$\frac{1}{X_T} = \frac{1}{X_l} - \frac{1}{X_c} \dots\dots\dots (34)$$

³⁴ (IEEE, 1992)., Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia., p.25

desarrollando la ecuacion anterior

$$X_T = \frac{X_l(-X_c)}{X_l - X_c} \dots\dots\dots (35)$$

Cuando $X_l = X_c$ ocurre una frecuencia resonante en paralelo, entonces:

$$X_T = \frac{-X_l X_c}{0} = \infty \dots\dots\dots (36)$$

- **Resonancia Serie**

“Es el resultado de varias combinaciones tanto de bancos de capacitores con alimentadores o inductancia de los transformadores”³⁵.

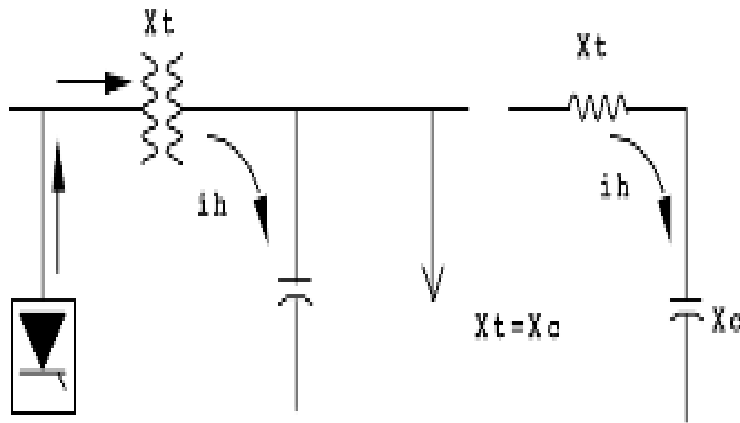


Figura 17. Resonancia serie

Fuente (IEEE, 1992).,

La resonancia serie presenta un camino de baja impedancia para las corrientes armónicas y por lo regular “atrapan” alguna corriente armónica a la cual esta se ha ajustado. La resonancia serie puede resultar en niveles de distorsión de alto voltaje entre la inductancia y la capacitancia del circuito serie. Un ejemplo de este es un transformador centro de carga con bancos de capacitores conectados en el secundario de la figura 17. En este aparece en serie visto desde el primario.

La impedancia total X_T queda de la siguiente forma

$$X_T = X_l - X_c \dots\dots\dots (37)$$

³⁵ (IEEE, 1992)., Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia., p.25

Cuando $X_L = X_C$ ocurre una frecuencia resonante en serie, entonces:

$$X_T = 0$$

La frecuencia de resonancia f_r también se puede hallar con la siguiente ecuación:

$$f_r = \frac{1}{2*\pi*\sqrt{L*C}} \dots\dots\dots (38)$$

2.5.5 Factor Q

Este se refiere al factor de calidad que en inglés es Quality que nos ayuda a comprobar la calidad de un sistema resonante, regularmente es utilizado en la electrónica para comprobar la calidad de los filtros paso bandas, bajas o paso-bandas, pero este concepto en potencia es importante, pues como vimos, se puede presentar resonancia a la hora de instalar los filtros de corrientes armónicas. Estos filtros sirven para ver lo selectivos que son, es decir, para ver el ancho de banda. En principio, un filtro con menor ancho de banda (mayor Q), será mejor que otro con más ancho. También, es más difícil hacer filtros de calidad (porque requieren una Q mayor) a alta frecuencia que a baja frecuencia.

Para determinar el valor de Q, este se puede hallar mediante:

$$factor\ Q = \frac{f_r}{f_1-f_2} \dots\dots\dots (39)$$

Donde:

f_r Es la frecuencia de resonancia

f_1-f_2 es el ancho de banda

En este caso f_1 es la frecuencia fundamental y f_2 es la frecuencia de resonancia.

3 Medición y control de armónicos

En un sistema eléctrico es importante conocer; la corriente, el voltaje o tensión, frecuencia, F.P., potencia activa y reactiva, temperatura, etc. Es recomendable definir las zonas de medición las cuales son encaminadas para indicar los parámetros antes mencionados. Hasta hace algunos años la energía eléctrica en gran medida fue tomada con mucha indiferencia por los consumidores domésticos e industriales. Esta ha sido entregada por las compañías de suministro y usada para hacer funcionar aplicaciones de maquinaria pesada en las industrias, las cuales generalmente fueron inmunes a la calidad de la energía eléctrica. Cuando las formas de onda de voltajes y corrientes fueron observadas, se dieron cuenta que éstas no eran puramente senoidales debido a la presencia de armónicos, la principal preocupación fue con los efectos de esta distorsión sobre los motores de inducción y la interferencia en las líneas telefónicas. Más importantes en esos tiempos fueron las fluctuaciones en los niveles de voltaje tales como las sobretensiones. Hoy en día la revolución electrónica ha cambiado todo eso. Las variaciones de voltaje son todavía de gran interés, pero la libertad de la distorsión armónica viene a ser otra preocupación para muchos usuarios comerciales de potencia.

La definición de la calidad de la energía es algo indeterminado, pero, aun así, se podría definir como una ausencia de interrupciones, sobre tensiones y deformaciones producidas por armónicas en la red y variaciones de voltaje RMS suministrado al usuario; esto referido a la estabilidad del voltaje, la frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico. Actualmente, la calidad de la energía es el resultado de una atención continua; en años recientes esta atención ha sido de mayor importancia debido al incremento del número de cargas sensibles en los sistemas de distribución, las cuales por sí solas, resultan ser una causa de la degradación en la calidad de la energía eléctrica.

Debido a ello el caso que nos ocupa de controlar los armónicos es un concepto que se está fortaleciendo y es precisamente lo que abordaremos en este capítulo tratando de reforzar con un ejemplo de la industria en el cual se vea el panorama real de la red y la solución una vez instalado el equipo y se reflejen las mejoras del control de armónicos.

Teniendo en cuenta todos los problemas que ocasionan las corrientes armónicas en los sistemas de distribución, en los equipos de medición y control, a las compañías de suministro y a los usuarios, es necesario reducirlas a niveles aceptables, de manera que se puedan controlar los problemas antes mencionados. La norma IEEE Std 519 92 recomienda los límites de corrientes armónicas para diferentes tipos de consumidores. El tipo o el tamaño del consumidor se calculan con base a una relación entre la corriente de corto circuito (SCC) del sistema, medida en el punto de acoplamiento común (PCC) del consumidor, con la máxima corriente de la carga del consumidor. Los límites individuales de las corrientes armónicas se muestran más adelante en las tablas de dicha norma.

3.1 Instrumentos para medición de armónicos

EL ANALIZADOR DE REDES. Como se conoce hoy en día nos sirve para determinar la calidad, cantidad, el flujo y optimización de redes eléctricas, son instrumentos capaces de analizar diferentes parámetros, es decir, especialmente aquellas propiedades asociadas con la reflexión y la transmisión de señales eléctricas, conocidas como parámetros de dispersión (Parámetros-S).

Los analizadores de redes son más frecuentemente usados en altas frecuencias, que operan entre los rangos de 9 kHz hasta 110 GHz. Actualmente existen Analizadores de redes multifuncionales de nueva generación que mejoran sustancialmente las prestaciones:

Precisión: Algunos equipos tienen una clase de precisión de 0,06%.

Robustez: Avalada por 4 años de garantía.

Conectividad: Se trata de los medidores con mayores opciones de conectividad del mercado

ANALIZADORES DE PERTURBACIONES. Los Perturbógrafos (Analizadores de Perturbaciones) son instrumentos desarrollados específicamente para mediciones de energía, permiten medir una amplia variedad de perturbaciones en el sistema desde transitorios de tensión de muy corta duración hasta fluctuaciones o interrupciones de suministro, el cual puede configurar los registros de disturbios por un periodo de tiempo determinado. La información generalmente se registra en papel, pero muchos dispositivos permiten también guardar los datos en memoria, de tal suerte que el software permite emitir un informe de lo sucedido en la línea del análisis de dichos eventos. **ANALIZADORES DE ARMÓNICAS.** Estos son analizadores más potentes ya que incluyen un módulo que permite calcular rápidamente las transformadas de Fourier para determinar el menor orden de armónicas. Es por ello que las mediciones de Armónicas requieren de instrumentos diseñados para el análisis espectral, los cuales requieren de:

- La capacidad necesaria para medir en forma simultánea la tensión, la corriente y el contenido de Armónicas o espectral.
- La capacidad para medir el ángulo de fase de cada componente Armónica individual, así mismo es requerida para el cálculo de potencia.
- La capacidad de sincronización y alta tasa de muestreo para la adecuada medición de componentes.
- La capacidad de detección, de acuerdo a la naturaleza estadística de los niveles de distorsión Armónica.

Los registros son entregados normalmente como tablas de datos y formas de onda, los cuales incluyen la siguiente información:

- Tabla resumen con parámetros de los seis canales (tres voltajes y tres corrientes) registrados. Los parámetros son: valor RMS, THD, TIF, It y desbalance NEMA.

- Tabla con distribución espectral en magnitudes por armónico, de los seis canales y la corriente del neutro.
- Tabla con distribución espectral en ángulo de fase por armónico, de los seis canales y la corriente del neutro.
- Formas de onda para cada uno de los seis canales.
- Espectro de frecuencia para cada uno de los seis canales.

Típicamente los rangos de operación para los canales de voltaje y corriente son 0-750 VAC y 5-15 A, respectivamente.

Para efectuar mediciones en puntos de alto voltaje, 1 kV o mayores, se requiere de la utilización de transformadores de potencial y de corriente. En tales situaciones debe prestarse atención al hecho que los transformadores de potencial pueden variar su relación de transformación a frecuencias superiores a la fundamental. Esta variación puede introducir errores en la medición.

3.2 Sitios donde debe realizarse el registro

Se deben escoger los sitios donde se encuentren cargas generadoras de armónicos o se tengan instalados elementos pasivos tales como capacitores que puedan estarse convirtiendo en alguna resonancia para los armónicos generados en otros sitios.

Regularmente en el secundario de transformadores, en donde se encuentre algún convertidor de CA-CD o viceversa, en el PCC, alumbrado y en general donde se detecte alguna anomalía o un fenómeno raro en la instalación que necesite de este estudio.

El conocimiento de estas características facilita la determinación de los sitios donde se deben efectuar medidas, el tipo de medidas que debe hacerse y los resultados que se esperan.

3.3 Selección de equipo a utilizar

Hay muchas empresas dedicadas a este tema, Fluke, Circutor, ABB Schneider por citar algunas, nos ofrecen una gama de equipos que si bien todos tienen sus particularidades que los distinguen, ofrecen equipos que permiten realizar un estudio más detallado a la red, en esta parte pondremos de ejemplo el Analizador AR5.

A continuación, se presentan las imágenes del equipo de medición a utilizar, así como su aspecto físico



A. Equipo apagado. B. Equipo encendiendo. C. Pantalla de equipo para grabar mediciones



D. Equipo con accesorios

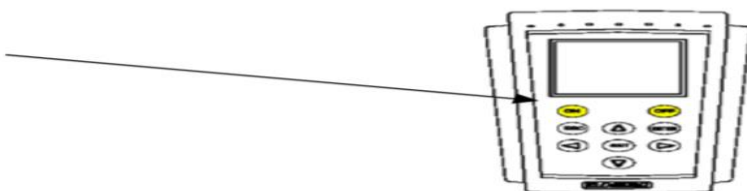
Independientemente de la solución que requiera cualquier sistema eléctrico, debemos estar familiarizados con estos equipos, también los fabricantes ofrecen capacitaciones para poder tener el conocimiento adecuado en la utilización de estos, en la siguiente sección muestro como se puede ocupar este equipo tratando de explicar su funcionamiento y la forma en que se programa para que nos pueda registrar todos los parámetros eléctricos (Tensiones, Corrientes, Potencias, energías, etc.) y armónicos incluidos en una red eléctrica trifásica con neutro.

3.4 Conexión y uso del analizador de redes AR5-L para análisis de gráficas y resultados en el sistema eléctrico

Para ello se deben de seguir los siguientes pasos:

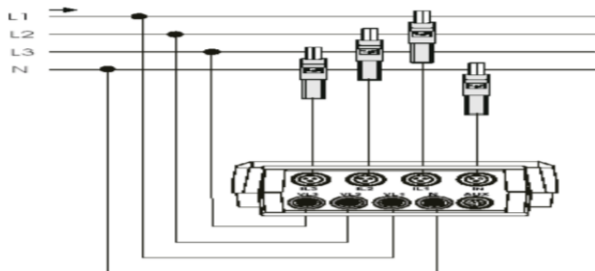
0.- ANTES DE EMPEZAR LA MEDIDA. Si se utiliza el equipo con la batería interna, esta debe haber sido recargada al máximo con anterioridad (para ello hay que tener le AR5-L³⁶ conectado y en ON mientras se cargue la batería, si no, no se cargará). Esta batería tiene una autonomía de entre 4 y 6 horas y tarda unas 12 horas en cargarse, por lo tanto, siempre es recomendable usar el alimentador mientras se realiza una medida. También es recomendable borrar la memoria interna del AR5-L (opción FORMAT), borrar máximos y mínimos y energía acumulada (Opción BORRAR). Será necesario poner en hora el equipo (Opción FECHA) y detener una posible grabación en curso (Opción STOP)

1.- Puesta en marcha del analizador (botón ON)



Fuente Guia Circutor

2.- Conectar los 4 cables de tensión (tres fases + neutro (si lo hay)) así como las 4 pinzas amperimétricas (tres fases + neutro (si lo hay)). Es importante respetar el color de cada fase, ya que, si no lo hacemos, las medidas obtenidas pueden ser incorrectas.



Fuente Guia Circutor

³⁶ Guía rápida, Puesta en marcha de analizador AR5-L Circutor (Circutor, 2005)

En el caso de las pinzas de corriente, estas llevan en un lado una flecha que indica el sentido que sigue la corriente. Hay que tener en cuenta esta flecha, de lo contrario, el analizador interpretará potencia generada en vez de consumida. Para otros tipos de conexión a redes eléctricas, consulte el manual del equipo.

3.- Una vez conectado el analizador, vaya a la pantalla de datos en tiempo real y verifique que los datos mostrados son coherentes o dentro del rango esperado. En caso contrario, repase el conexionado de los cables y pinzas de medida a la red.

4.- Una vez comprobado que en el display vemos datos coherentes y que el equipo está correctamente instalado, procedemos a programar el analizador. Para ello entre en el menú SETUP pulsando la tecla SET. En ese momento el equipo pedirá el PASSWORD que es la combinación de las siguientes teclas ◀ SET ▲ SET

5.- Una vez dentro del SETUP de programación, configuraremos cada opción de acuerdo al tipo de medida que vamos a realizar:

TIPO DE CONEXIÓN.

Para el ejemplo propuesto, se ha seleccionado una red trifásica a cuatro hilos, por tanto, siga el siguiente acceso a los menús:

SETUP -> CONFIG -> MEDIDA -> CIRCUITO -> 3Φ 4HILOS

Para otras conexiones de la medida consulte el manual del equipo.

RELACIONES DE TRANSFORMACIÓN

En este apartado, se programarán los transformadores que se utilicen en la medida:

SETUP -> CONFIG -> MEDIDA -> PT/CT –

- De tensión: PRIM V y SEC V son el primario i secundario de los transformadores de tensión, en caso de utilizar estos. Si no es el caso, se programará la relación PRIM V = 1, SEC V = 1.
- De corriente: en este apartado se programa la escala de las pinzas de corrientes, tanto de las fases como la de neutro. Las pinzas de las fases siempre tendrán la misma relación. La pinza de neutro puede tener una escala diferente de las pinzas de fase. En caso de utilizar esta última, será necesario programar este dato.

PERIODO

El período de registro indica al equipo cada cuanto tiempo debe registrar datos en memoria. El equipo integra todos los valores obtenidos cada segundo, pero los almacenará en la memoria cada cuando se programe este parámetro.

SETUP -> CONFIG -> GRABAR ->

El mínimo periodo de registro es de 1 segundo, de forma que en cada segundo se obtendrá un valor medio, máximo y mínimo de cada parámetro del analizador. Como más pequeño sea el período menos tiempo de registro se programe, menor tiempo de registro total tendremos.

NOMBRE DEL ARCHIVO

Programaremos el nombre del archivo donde se guardan los datos registrados:

SETUP -> CONFIG -> GRABAR -> FICHERO

En este ejemplo, nombraremos al archivo ELECTRIC, la extensión del archivo es configurada automáticamente por el AR5L. En este apartado, programaremos también el tipo de memoria que nos interese ya sea:

- Lineal. Si queremos que el AR5L pare de registrar cuando la memoria esté llena.
- Circular Si queremos que el AR5L siga registrando cuando la memoria se llene, en cuyo caso se borran los registros más antiguos de la memoria.

PARÁMETROS A REGISTRA POR EL EQUIPO

El analizador selecciona de forma automática los parámetros a registrar una vez seleccionado el tipo de medida. En caso de querer optimizar la memoria de registro, podemos quitar parámetros de la lista de registro mediante esta opción.

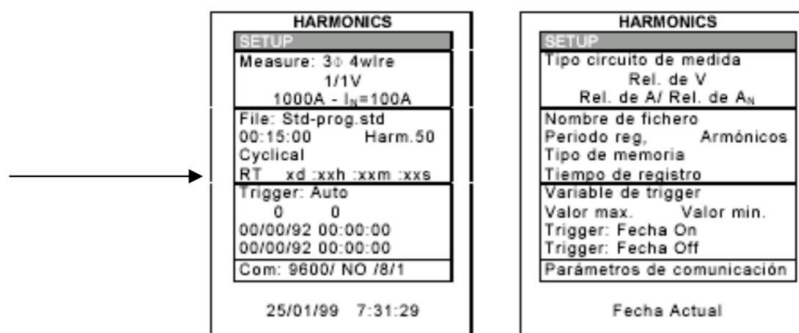
SETUP -> CONFIG -> GRABAR -> PARAM

En las siguientes opciones seleccionaremos que valores instantáneos, así como máximos o mínimos queremos registrar. Para pasar de una pantalla a la siguiente se podrá hacer situando el cursor en la parte superior izquierda y pulsando la tecla SET. Del mismo modo podemos seleccionar que armónicos queremos registrar tanto en tensión como en corriente.

6.- Hasta aquí, ya tenemos programado el AR5-L para registrar. En función del tipo de registro, es necesario programar la unidad para tal efecto. Recuerde que programar un período de registro muy bajo, penaliza el tiempo total de la medida. Como norma general un período de 15 minutos es suficiente para tener registros de 3 a 4 días, en función de los datos escogidos para el registro.

El equipo muestra una estimación del tiempo de registro con la configuración programada. Para acceder a esta pantalla de resumen, salga de la configuración SETUP y cuando la unidad le pregunte acepte los

cambios. Vaya a la pantalla de datos en tiempo real para pulsar la tecla ESC hasta visualizar la pantalla resumen. En el apartado RT, se mostrará el tiempo total que podemos registrar con la configuración actual. Para incrementar este tiempo, deberá aumentar el período de registro o eliminar variables a registrar.



Fuente Guia Circutor

7.- Una vez programada la unidad AR5-L con todas las opciones de registro y verificada la cantidad de tiempo disponible para el mismo, se pondrá en marcha la unidad para la grabación con la opción RUN del menú principal.

SETUP -> GRABAR ->ACTIVAR

Cuando salga del menú SETUP, verá en la parte inferior del display el mensaje GRAB, significa que la unidad ya está registrando datos.

8.- Cuando se acabe la medida que está realizando, deberá entrar en el menú SETUP y parar el analizador. Para ello entre en el menú siguiente

SETUP -> GRABAR -> DESACTIVAR

9.- Llegados a este punto, el analizador dejará de registrar datos. Los registros obtenidos podrán ser descargados a un PC mediante el software PowerVision actualmente la versión 1.8 que está disponible en la página web de Circutor.

La interface entre el equipo y el software es mediante un cable de tipo serial el cual viene incluido en el equipo, actualmente, los equipos de cómputo como laptop no vienen preparados para recibir esta información mediante puerto serial por lo que es recomendable tener un convertidor de puerto serial a USB lo que facilita la transferencia de datos a tu computadora.³⁷

³⁷ (Circutor, 2005)

4 Normas sobre el control de armónicas

Para especificar las medidas adecuadas que presentan una relación balanceada costo/beneficio, es preciso establecer criterios prácticos sobre los niveles permisibles, tanto en el sistema eléctrico de una planta industrial como en los límites de distorsión armónica que pueden fluir en las líneas de transmisión y distribución de una compañía suministradora.

Resulta especialmente delicado establecer un criterio que normalice la relación suministrado/compañía suministradora, ya que esta última tiene derecho a exigir al usuario que trate de no contaminar su sistema de transmisión y distribución, y el usuario tiene también derecho de exigir el suministro de una energía de buena calidad. Para lograr estos fines, algunos países han establecido límites de distorsión armónica tratando de mejorar la calidad de la energía.

A continuación, se presentan las normas y reglamentos que en México se utilizan para regular los niveles permisibles sobre control de factor de potencia, así como sus límites aplicables en usuario y compañía suministradora.

4.1 IEEE-519

Los límites de distorsión que los armónicos pueden producir se miden en la frontera entre la empresa suministradora de energía y el usuario en el PCC o punto de acoplamiento común, que en inglés es point of comoncoupling, por eso sus iniciales PCC.

La distorsión que el usuario produce a la empresa de energía depende de las corrientes armónicas que le inyecte y de la respuesta de impedancia del sistema a estas frecuencias. En ese sentido se ha establecido que los límites de distorsión armónica permitidos a los usuarios se midan en corrientes.

La distorsión que la empresa de energía le produce al usuario se mide en la forma de onda de la tensión en el punto de frontera entre ambos. Aunque existen varios índices para establecer el grado de contaminación armónica en un punto de frontera, los índices más usados son la distorsión armónica individual y la distorsión armónica total tanto en tensión como en corriente.

4.2 Límites aplicables al usuario

En general el usuario debe verificar que:

- a. No existan sobrecargas en capacitores dentro de la planta.
- b. No ocurran resonancias series o paralelo a las frecuencias generadas.

- c. El nivel de armónico en el punto de frontera con la empresa de energía no sobrepase los límites establecidos.

La filosofía de establecer límites de distorsión armónica al usuario, busca:

- Limitar la inyección de armónicos de cada usuario individual para que no produzca distorsiones inaceptables de la tensión en funcionamiento normal.
- Evitar que el efecto producido por dicha inyección se refleje en otros usuarios a través de una onda de tensión distorsionada.
- Evitar que entre todos los usuarios se vaya presentando un efecto acumulativo de distorsión de la forma de onda de tensión inaceptable.

Los índices armónicos aplicables a los usuarios recomendados por la norma ANSI/IEEE-519 de 1992, son:

- Profundidad de las hendiduras y área total de las hendiduras del voltaje de la barra donde se conectan cargas conmutadas (aplicable en baja tensión). Este concepto se ilustra en Figura 18.

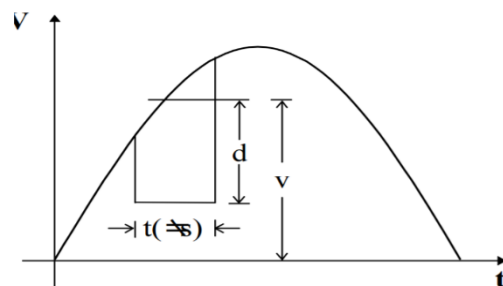


Figura 18. Hendidura en una onda de tensión³⁸

Fuente (IEEE, 1992),.

$$\% \text{ profundidad de la hendidura} = d/v * 100$$

$$A_N = td [=] \mu s \times \text{volt}$$

Donde A_N = Área de la hendidura

Este índice se sugiere aplicable en bajas tensiones donde el área de la hendidura es fácilmente medible con un osciloscopio.

³⁸ (IEEE, 1992). *Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia.*

La Tabla 4.2. Muestra los límites permitidos por la norma ANSI/IEEE para este índice.

Tabla 4.2. Límites de distorsión y clasificación de sistemas en baja tensión para usuarios³⁹

	Aplicaciones Especiales	Sistemas Generales	Sistemas dedicados
Profundidad de la hendidura	10%	20%	50%
THD (voltaje)	3%	5%	10%
Área de la hendidura (A_N) (V. ÷ 6)	16400	22800	36500

Fuente (IEEE, 1992).

Nota: El valor de A_N para tensiones diferentes de 480 V se obtiene multiplicando los valores de la tabla por V/480.

Distorsión individual y total de tensión. La tabla 4.2.A ilustra los límites de dicha distorsión en sistemas que pueden caracterizarse por una impedancia equivalente de cortocircuito.

Tabla 4.2.A. Límites de distorsión individual de tensión para usuarios⁴⁰

Icc/In	Máxima tensión Armónica (%)	Suposición relacionada
10	2,5 - 3,0	Sistema dedicado
20	2,0 - 2,5	1 ó 2 grandes usuarios
50	1,0 - 1,5	Pocos grandes usuarios
100	0,5 - 1,0	5 a 20 medios usuarios
1000	0,05 - 0,10	Muchos pequeños usuarios

NOTA: Icc/In es la relación entre la corriente de cortocircuito del sistema y la corriente nominal de la carga, en el punto de frontera.

Fuente (IEEE, 1992).

³⁹ (IEEE, 1992). *Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia.*

⁴⁰ (IEEE, 1992)

Los límites de distorsión total armónica máxima son iguales para usuarios como para suministradores y se muestran en la Tabla 4.2.B.

Tabla 4.2.B. Límites de distorsión armónica total de tensión para usuarios y suministradores

Tensión en la frontera	Distorsión individual de tensión %	Distorsión armónica de Tensión THD (%)
69 kV o menos	3,0	5,0
69 a 161 kV	1,5	2,5
Más de 161 kV	1,0	1,5

Fuente (IEEE, 1992).

Nota: Distorsión armónica individual y total de corriente, las cuales son una medida de la cantidad de armónicos que el sistema debe absorber por causa del usuario. Las plantas de generación son consideradas también en estos límites.

Los límites de distorsión armónica de corriente se presentan en la Tabla 4.2.C, Tabla 4.2.D y Tabla 4.2.E.

Tabla 4.2.C. Límites de distorsión de corrientes para sistemas de distribución (120V a 69 kV)

Isc/I _L	Armónicos Individuales (%)					TDD
	<11	11 h<17	17 h<23	23 h<35	35 h	
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Fuente (IEEE, 1992).

Tabla 4.2.D. Límites de distorsión de corrientes para sistemas de subtransmisión (69 a 161 kV)

I_{cc}/I_L	Armónicos Individuales (%)					TDD
	<11	11 h<17	17 h<23	23 h<35	35 h	
<20	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20<50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50<100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100<1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
>1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0

Fuente (IEEE, 1992).

Tabla 4.2.E. Límites de distorsión de corrientes para sistemas de transmisión (> 161 kV)

I_{sc}/I_L	Armónicos Individuales (%)					THD
	<11	11 h<17	17 h<23	23 h<35	35 h	
<50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
≥ 50	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Fuente (IEEE, 1992).

En la mayoría de las industrias las tablas aplicables corresponden a la Tabla 4.2.C y Tabla 4.2.D, es decir, que el índice a evaluar es el TDD y no el THD.

Para comprender mejor las diferencias entre el TDD y el THD se tienen las siguientes consideraciones:

- La mayoría de los medidores que se consiguen en el mercado no miden realmente el TDD sino el THD, ya que las medidas son instantáneas con corrientes a frecuencia fundamental diferentes del promedio de los últimos 12 meses (TDD). Por esa razón las medidas deben llevarse de porcentajes a amperes y posteriormente dividir las por I_L para convertirlas.
- La solución para calcular el TDD consiste en llevar las mediciones de armónicos en porcentaje a amperes, y luego dividir por la corriente demandada.

4.3 Límites aplicables a la compañía suministradora

La calidad de la tensión que suministra la empresa de energía con respecto a los armónicos, se mide en términos de la pureza de la onda sinusoidal, por lo que el índice que la define es el THD de voltaje y los índices de distorsión armónica individual de tensión.

Las tablas 4.2.B hasta la E también aplican para las compañías suministradoras. A continuación, se presentan las tablas 1 a 7 de la especificación de CFE L0000-45.

Tabla 1-CFE L0000-45. Límites de variaciones de tensión.

Indicador	Límite
P _{st}	≤ 1
P _{It}	≤ 0.65
dt	≤ 3.3% Durante el cambio de tensión para más de 500 ms
dc	≤ 3.3%
d _{max}	≤ 4 % Sin condiciones adicionales. ≤ 6 % Para equipo que es conmutado manualmente o con una frecuencia mayor a 2 veces por día y también con arranque retardado de más de 10 s, o arranque manual después de una interrupción en el suministro de energía. ≤ 7 % Para equipo que es conmutado hasta dos veces al día.

Fuente CFE-L0000-45

Notas:

1. P_{st} y P_{It} no aplica para cambios de tensión por conmutación manual que ocurre una vez cada día y los límites dt, dc y d_{max} deben aplicarse con las tensiones previas multiplicadas por el factor 1.33.
2. Los límites no aplican a conmutaciones por interrupciones de emergencia.

Tabla 2-CFE L0000-45. Límites máximos de distorsión armónica total en tensión y de CAIMT en el punto de acometida.

Tensión kV	Componente armónico individual máximo de tensión (CAIMT) %	Distorsión armónica total de tensión (DATT) %
Menor de 1	6	8
de 1 a 35	5	6,5
Mayor de 35	2	3

Fuente CFE-L0000-45

Tabla 3-CFE L0000-45. Distorsión armónica máxima permitida en corriente para baja, media y alta tensión hasta 69 kV.

Impedancia relativa (lcc / IL)	Componente armónico individual máximo de corriente, para armónicas impares (CAIMC) %					Distorsión armónica total de demanda (DATD) %
	h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	h≥35	
(lcc / IL) < 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20 ≤ (lcc / IL) < 50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50 ≤ (lcc / IL) < 100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100 ≤ (lcc / IL) < 1 000	12	5,5	5	2	1	15
(lcc / IL) ≥ 1 000	15	7	6	2,5	1,4	20

Fuente CFE-L0000-45

Tabla 4-CFE L0000-45. Distorsión armónica máxima permitida en corriente para alta tensión (mayor de 69 kV y hasta 161 kV).

Impedancia relativa (lcc / IL)	Componente armónico individual máximo de corriente, para armónicas impares (CAIMC) %					Distorsión armónica total de demanda (DATD) %
	h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	
(lcc / IL) < 20	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
20 ≤ (lcc / IL) < 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4
50 ≤ (lcc / IL) < 100	5	2,25	2	0,75	0,35	6
100 ≤ (lcc / IL) < 1000	6	2,75	2,5	1	0,5	7,5
(lcc / IL) ≥ 1000	7,5	3,5	3	1,25	0,7	10

Fuente CFE-L0000-45

Tabla 5-CFE L0000-45. Distorsión armónica máxima permitida en corriente para alta tensión mayor de 161 kV.

Impedancia relativa (lcc / IL)	Componente armónico individual máximo de corriente, para armónicas impares (CAIMC) %					Distorsión armónica total de demanda (DATD) %
	h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	
(lcc / IL) < 50	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
(lcc / IL) ≥ 50	3	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Fuente CFE-L0000-45

Notas de tablas 3, 4 y 5:

1. En el caso de armónicas pares los límites se reducen al 25% de los correspondientes a armónicas impares.
2. Los límites mostrados en la tabla 3 deben ser utilizados como el caso más desfavorable de operación normal. Para arranque de hornos eléctricos de arco, que toman un tiempo máximo de un minuto, se permite exceder los límites de la tabla en 50%.
3. En ningún caso se permiten corrientes de carga con componentes de corriente directa.

Tabla 6-CFE L0000-45. Desbalance máximo permitido en la tensión en el punto de acometida.

Tensión kV	Desbalance %
Menor de 1	3
Mayor o igual de 1	2

Fuente CFE-L0000-45

Tabla 7-CFE L0000-45. Desbalance máximo permitido en la corriente en el punto de acometida.

Impedancia relativa (I_{cc} / I_L)	Desbalance %		
	Menor a 1 kV	De 1 kV a 35 kV	Mayor a 35 kV
$(I_{cc} / I_L) < 20$	5	2,5	2,5
$20 \leq (I_{cc} / I_L) < 50$	8	4	3
$50 \leq (I_{cc} / I_L) < 100$	12	6	3,75
$100 \leq (I_{cc} / I_L) < 1000$	15	7,5	4
$(I_{cc} / I_L) \geq 1000$	20	10	5

Fuente CFE-L0000-45

El valor de distorsión armónica total de tensión (THDv) en la norma IEEE es de 5% mientras que la recomendación de CFE es de 8%.

Estos valores de distorsión armónica en tensión son ocasionados por la alimentación de la compañía suministradora, ya que el comportamiento de la distorsión armónica en voltaje es independiente a la carga del circuito.

Los valores de distorsión armónica total en corriente (THDi) provocan una sobre corriente en el sistema lo cual, si es así, representa un riesgo para la instalación eléctrica.

4.4 Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica

“Para los suministros en que intervenga el factor de potencia, el usuario conservará éste en la operación de su instalación entre noventa centésimos atrasados y uno, de acuerdo con las Disposiciones complementarias a las tarifas para suministro y venta de energía eléctrica. Cuando el factor de potencia tenga un valor igual o superior a noventa centésimos atrasados, el suministrador tendrá obligación de bonificar al usuario la cantidad que resulte de aplicar a la factura el porcentaje de bonificación. Cuando el factor de potencia durante cualquier período tenga un promedio menor de noventa centésimos atrasados el suministrador tendrá derecho a cobrar al usuario la cantidad que resulte de aplicar al monto de la facturación el porcentaje de recargo que se determine. El usuario no podrá regresar energía activa o reactiva a las líneas del suministrador, excepto cuando celebre con éste convenio al respecto. La contravención de esta disposición hará procedente la aplicación de sanciones en los términos de la Ley y de este Reglamento”⁴¹.

La CFE ha establecido que el valor del factor de potencia mínimo aceptable el cual debe ser de 0.90 (90%). En el caso de que los usuarios demanden la potencia eléctrica con un factor de potencia menor al 0.90 (90%) se hacen acreedores a sanción económica por penalización (%R) que deben pagar en su factura eléctrica por “Cargo por Factor de Potencia” (CFP) que más adelante lo describiremos, el cobro de este cargo se calcula de la siguiente manera:

$$\%R = \frac{3}{5} * \left(\left(\frac{90}{F.P} \right) - 1 \right) * 100 \quad \dots\dots\dots (40)$$

Si el factor de potencia es mayor a 90%, la CFE bonifica un porcentaje del total de los importes de la demanda, energía y 2% baja tensión generados, que puede ser hasta un 2.5%. El cobro por CFP de esta bonificación se hace mediante:

$$\%B = \frac{1}{4} * \left(1 - \left(\frac{90}{F.P} \right) \right) * 100 \quad \dots\dots\dots (40a)$$

Donde

%R Porcentaje de penalización

%B Porcentaje de bonificación

Los valores máximos de acuerdo a las formulas anteriores son

- FP = 0.30 Penalización máxima; 120% del cargo por consumo de energía y cargo por demanda.
- FP = 1.00 Bonificación máxima; 2.5% del cargo por consumo de energía y cargo por demanda.

⁴¹ El reglamento de la ley del servicio público de la energía eléctrica en el art 64. Reformado en el DOF el 24/08/2012

4.5 Tarifas de suministro de energía eléctrica

De acuerdo con el instructivo para la interpretación y aplicación de las tarifas para el suministro y venta de energía eléctrica noviembre de 2004 que publica la CFE, nos explica de manera clara la tarifa con la cual se celebra un contrato de servicio de energía eléctrica.

En este apartado mostrare los intervalos en cuanto a la carga que se tiene instalada la tarifa que aplica y la forma en que se hacen los cobros por cada concepto que CFE cobra en el recibo.

4.5.1 Tarifa 3

Servicio general para más de 25 kW de demanda esta tarifa se aplicará a todos los servicios que destinen la energía eléctrica en baja tensión a cualquier uso, con demanda de más de 25 kW (veinticinco) kilowatts, excepto a los servicios para los cuales se fija específicamente su tarifa.

Se recomienda orientar a quien solicite se le suministre el servicio en esta tarifa, para que considere la conveniencia de instalar su propia subestación y contrate el servicio en tarifa o-m, en los casos que le resulte más favorable.

- A) Tensión de suministro. Estos servicios se suministrarán en baja tensión.
- B) Carga y demanda por contratar. La carga por contratar será la suma de las potencias en kilowatts de los equipos, aparatos y dispositivos que el usuario manifiesta tener conectados.

La demanda por contratar la fijará inicialmente el usuario; su valor no será menor de 60% (sesenta por ciento) de la carga total conectada, ni menor de 25 (veinticinco) kilowatts o de la capacidad del mayor motor o aparato instalado. Cualquier fracción de kilowatt se tomará como kilowatt completo.

- C) A continuación, la figura 19. Se muestra el cálculo de la tarifa 3

Figura 19. Calculo de tarifa general 3⁴²

**TARIFA GENERAL
PARA MÁS DE 25 kW DE DEMANDA**

CLASIFICACIÓN	COBRO/ DEMANDA	COBRO POR ENERGÍA KWh	RECARGO O BONIFICACIÓN F. P.	I. V. A.	D. A. P. U OTROS
GENERAL B. T. TARIFA 03	$\$/kw \times kw +$	$\$/kwh \times kwh$	$+ \% R$ $- \% B$	$+ 15\% \text{ ó } 10\%$ \times FNE	$+ \% \text{ AUTORI.}$ \times FB
\leftarrow FACTURACIÓN BÁSICA = FB \rightarrow \leftarrow FACTURACIÓN NORMAL = FN \rightarrow \leftarrow FACTURACIÓN NETA = FNE \rightarrow \leftarrow FACTURACIÓN TOTAL = FT \rightarrow					
<small>3 EN CASO DE OCURRIR UN RECARGO O BONIFICACIÓN POR F.P. SE APLICARÁN LAS FÓRMULAS ESTABLECIDAS EN LA DISPOSICIÓN COMPLEMENTARIA No. DE LAS TARIFAS EN VIGOR.</small> <small>MÍNIMO MENSUAL.- SI AL APLICAR LAS CUOTAS ESTABLECIDAS EN LA ESTRUCTURA DE ESTA TARIFA, LA FACTURACIÓN RESULTA INFERIOR AL MÍNIMO MENSUAL, SE APLICARÁ ESTE ÚLTIMO.</small> <small>NOTA: LA APLICACIÓN DEL 10% ó 15% DE I.V.A. ES DE ACUERDO A LO ESTABLECIDO EN LA LEY DEL IMPUESTO AL VALOR AGREGADO, PUBLICADA EN EL DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN EL DÍA 31 DE MARZO DE 1995.</small>					

Fuente CFE-Instructivo interpretación de tarifas Nov.

4.5.2 Tarifa OM

Ordinaria para servicio general en media tensión con demanda menor de 100 [kW] esta tarifa se aplicará a los servicios que destinen la energía en media tensión a cualquier uso con una demanda menor a 100 (cien) kilowatts.

A) tensión de suministro

Estos servicios se suministrarán en media tensión.

B) Carga y demanda por contratar

La carga por contratar será la suma de las potencias en kilowatts de los equipos, aparatos y dispositivos que el usuario manifiesta tener conectados.

La demanda por contratar la fijará inicialmente el usuario, su valor no será menor del 60% (sesenta por ciento) de la carga total conectada, ni menor de 10 (diez) kilowatts o de la capacidad del mayor motor o aparato instalado.

En caso de que el 60% (sesenta por ciento) de la carga total conectada exceda la capacidad de la subestación del usuario, sólo se tomará como demanda contratada la capacidad de dicha subestación a un factor de potencia de 90% (noventa por ciento).

⁴²<http://www.delrealenergy.com/documentacion/Instructivo Interpretacion de tarifas NOV04.pdf>

C) Cambio de tarifa O-M a H-M cuando la demanda máxima medida exceda de 100 (cien) kilowatts, el usuario deberá solicitar al suministrador su incorporación a la tarifa hm, de no hacerlo, al tercer mes consecutivo en que exceda la demanda de 100 (cien) kilowatts, será reclasificado por el suministrador en la tarifa HM, notificándole al usuario de este cambio. con este propósito se anexará al recibo del usuario un mensaje cada vez que registre una demanda máxima superior a 100 kW y al segundo mes consecutivo que esto ocurra, se deberá efectuar la modificación al equipo de medición para que permita la obtención de los parámetros necesarios, a fin de que en el mes siguiente a que ocurra la tercera demanda máxima consecutiva superior a 100 kW, se proceda a su facturación en la tarifa H-M, efectuando la reforma de contrato requiriéndole el pago de aportación de acuerdo al reglamento de la ley del servicio público de energía eléctrica, en materia de aportaciones, si rebasó la demanda contratada, elaborando además nuevo contrato actualizando el importe del depósito de garantía por la diferencia en tarifa HM.

Se autoriza al suministrador para que celebre con los usuarios de tarifa OM que así lo soliciten, convenio que les permitan incorporarse a la tarifa HM, aun cuando su demanda máxima no rebase los 100 kW.

D) A continuación, la figura 20. Se muestra el cálculo de la tarifa OM

Figura 20. Calculo de tarifa general OM⁴³

SERVICIO GENERAL EN
MEDIA TENSIÓN CON DEMANDA MENOR A 100 kW

CLASIFICACIÓN	COBRO POR DEMANDA	COBRO POR ENERGÍA kWh	CARGO M. B. T.	RECARGO O BONIFICACIÓN F. P.	I. V. A.	D. A. P. U OTROS
TARIFA OM	$kw \times \$/kw$	$\frac{kWh}{\$/kWh}$	$2\% \times FBA$	$\frac{\% R}{\% B} \times FN$	$15\% \text{ ó } 10\% \times FNE$	$\% \text{ AUTORI.} \times FB$
<p>← FACTURACIÓN BÁSICA = FB →</p> <p>← FACTURACIÓN NORMAL = FN →</p> <p>← FACTURACIÓN NETA = FNE →</p> <p>← FACTURACIÓN NETA = FT →</p> <p>MÍNIMO MENSUAL.- SI AL APLICAR LAS CUOTAS ESTABLECIDAS PARA ESTA TARIFA, LA FACTURACIÓN RESULTA MENOR AL MÍNIMO MENSUAL, SE APLICARÁ ESTE ÚLTIMO.</p> <p>EN CASO DE OCURRIR UN RECARGO O BONIFICACIÓN POR F.P. SE APLICARÁN LAS FÓRMULAS ESTABLECIDAS EN LA DISPOSICIÓN COMPLEMENTARIA No. 3 DE LAS TARIFAS EN VIGOR.</p> <p>NOTA: APLICACIÓN DEL 10% ó 15% DE I.V.A. ES DE ACUERDO A LO ESTABLECIDO EN LA LEY DEL IMPUESTO AL VALOR AGREGADO, PUBLICADA EN EL DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN EL DÍA 31 DE MARZO DE 1995.</p>						

Fuente CFE-Instructivo interpretación de tarifas Nov.

⁴³<http://www.delrealenergy.com/documentacion/Instructivo Interpretacion de tarifas NOV04.pdf>

4.5.3 Tarifa HM

Horaria para servicio general en media tensión con demanda de 100 kW o más y tarifa H-MC.- horaria para servicio general en media tensión con demanda de 100 kW o más para corta utilización.

Estas tarifas se aplicarán a los servicios que destinen la energía en media tensión a cualquier uso, con una demanda de 100 kW (cien) kilowatts o más.

- A) Tensión de suministro estos servicios se suministrarán en media tensión.
- B) Carga y demanda por contratar la carga por contratar será la suma de las potencias en kilowatts de los equipos, aparatos y dispositivos que el usuario manifiesta tener conectados. la demanda por contratar la fijará inicialmente el usuario, su valor no será menor del 60% (sesenta por ciento) de la carga total conectada, ni menor de 100 (cien) kilowatts o de la capacidad del mayor motor o aparato instalado. en caso de que el 60% (sesenta por ciento) de la carga total conectada exceda la capacidad de la subestación del usuario sólo se tomará la capacidad de dicha subestación a un factor de potencia de 90% (noventa por ciento). cualquier fracción de kilowatt se tomará como kilowatt completo.
- C) Otras opciones tarifarias se autorizan al suministrador para que celebre con los usuarios de esta tarifa que así lo soliciten, convenir su facturación bajo la opción de demandas contratadas.
- D) Cambio de tarifa h-m a o-m cuando el usuario mantenga durante 12 (doce) meses consecutivos, tanto una demanda máxima medida en período de punta, intermedia y base inferior a 100 (cien) kilowatts, podrá solicitar al suministrador su incorporación a la tarifa OM.
- E) Demanda facturable es el resultado de aplicar la fórmula indicada en el punto no. 5.6. considerando las demandas máximas medidas en los períodos de punta, intermedia y base.
- F) A continuación, la figura 21. Se muestra el cálculo de la tarifa HM

Figura 20. Calculo de tarifa general HM⁴⁴

CLASIFICACIÓN	COBRO POR DEMANDA FACTURABLE	COBRO POR ENERGÍA			CARGO M.B.T.	RECARGO O BONIFICACIÓN F. P.	I. V. A.	D. A. P. U OTROS
		kWh PUNTA	kWh INTERMEDIA	kWh BASE				
TARIFA HM	$kW \times \$/kW + x \$/kWhp$	$kWhp \times x \$/kWhp$	$kWhi \times x \$/kWhi$	$kWhb \times x \$/kWhb + 2\% \times FB$	$+ \% R$ $- \% B$	$15\% \text{ o } 10\%$ $+ \text{ AUTORI.}$	$\%$ $\times FB$	
<p>← FACTURACIÓN BÁSICA = FB →</p> <p>← FACTURACIÓN NORMAL = FN →</p> <p>← FACTURACIÓN NETA = FNE →</p> <p>← FACTURACIÓN TOTAL = FT →</p> <p><small>MINIMO MENSUAL.- SI AL APLICAR LAS CUOTAS ESTABLECIDAS PARA ESTA TARIFA SEGUN LA REGION QUE CORRESPONDA, LA FACTURACION RESULTA MENOR AL MINIMO MENSUAL, SE APLICARA ESTE ULTIMO.</small></p> <p><small>EN CASO DE OCURRIR UN RECARGO O BONIFICACION POR F.P. SE APLICARAN LAS FORMULAS ESTABLECIDAS EN LA DISPOSICION COMPLEMENTARIA No. 3 DE LAS TARIFAS EN VIGOR.</small></p> <p><small>NOTA: APLICACION DEL 10% O 15% DE I.V.A. ES DE ACUERDO A LO ESTABLECIDO EN LA LEY DEL IMPUESTO AL VALOR AGREGADO, PUBLICADA EN EL DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACION EL DIA 31 DE MARZO DE 1995.</small></p>								

Fuente CFE-Instructivo interpretación de tarifas Nov.

⁴⁴<http://www.delrealenergy.com/documentacion/Instructivo Interpretacion de tarifas NOV04.pdf>

5 Parámetros medidos, así como los costos por consumo en una instalación comercial o industrial a través del recibo de CFE

El recibo de CFE nos da un histórico de los distintos parámetros eléctricos como los kW, kVA, kVAr y F.P., a lo largo de un periodo mensual así como su precio en ese periodo, con esto podemos verificar que el costo por consumo eléctrico del mes sea el correcto, por otro lado podemos ver las distintas áreas de oportunidad en el recibo, en el que me enfocare en esta sección es en el “cargo por factor de potencia” que depende directamente del valor del factor de potencia en ese mes, como vimos en el tema anterior, CFE calcula ese cargo y depende de las instalaciones si este es a favor o en contra. Cualquiera que fuera el caso este nos da el ejemplo de poder mejorar los costos en procesos y ser más productivos o eficientes en nuestro negocio.

A continuación, en la figura 21. Anexo el formato del recibo de CFE, en la zona AVISO RECIBO y en la parte superior izquierda se ve el nombre o razón social, dirección, población y entidad federativa donde se proporciona el servicio.



Figura 21. Zona aviso recibo, parte superior izquierda.

Fuente CFE-Conoce tu recibo

La figura 22. En la parte superior derecha, se encuentra el número de servicio, total a pagar y la fecha límite para pago.



Figura 22. Zona aviso recibo, parte superior derecha

Fuente CFE-Conoce tu recibo

La zona que sigue figura 23., se encuentra el periodo en que se efectuó la medición, el número de medidor, la tarifa en la cual la empresa está clasificada de acuerdo con la carga conectada en kW y la demanda contratada kW y si ésta es Tarifa 3, Tarifa O-M o Tarifa H-M y el multiplicador dependiendo la zona.

Ruta	Periodo	No. Medidor	Tarifa	Carga conectada kW	Demanda contratada kW	Multiplicador
82DL60C010100080	30 ABR 15 A 31 MAY 15		HM	3095	2476	3000

Figura 23. Zona aviso recibo, periodo de facturación y tipo de tarifa, etc.

Fuente CFE-Conoce tu recibo

Figura 24. La función y periodo muestra los dos parámetros que componen la facturación en su periodo base, intermedio y punta.

- Consumo kWh
- Demanda kW
- Los reactivos totales kVarh
- Factor de potencia en %

En la sección que sigue esta la parte de cálculos de la facturación donde se apoyan de los valores medidos en la parte de función y periodo, así como el precio unitario en cada periodo.

Función y periodo	Lectura actual	Lectura anterior	Diferencia	Totales
kWh base				90,412
kWh intermedia				321,948
kWh punta				20,511
kW base				1,136
kW intermedia				1,179
kW punta				1,022
kVarh				217,478
Factor de potencia %				89.36
			Totales	Precios unitarios
Energía en base kWh			90,412	0.74840
Energía en intermedio kWh			321,948	0.89510
Energía en punta kWh			20,511	1.84830
Demanda facturable kW			1,070	167.41000

Figura 24. Zona aviso recibo, parte función y periodo

Fuente CFE-Conoce tu recibo

La figura 25. Trae la parte de datos históricos contempla facturaciones de doce meses anteriores a la fecha de emisión del recibo, estos datos también nos indican el comportamiento de la instalación eléctrica, nos da la referencia para encontrar las mejores opciones para la reducción de costos en cuanto al consumo de energía eléctrica, más adelante lo explicare con un ejercicio.

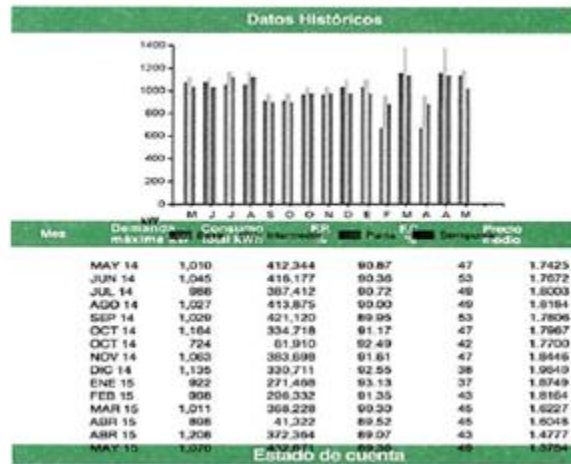


Figura 25. Zona aviso recibo, datos históricos

Fuente CFE-Conoce tu recibo

Los conceptos facturables son DEMANDA, ENERGÍA, CARGO POR FACTOR DE POTENCIA (BONIFICACIÓN Y PENALIZACIÓN), 2% BAJA TENSIÓN y DAP (Derechos de alumbrado público), por último, los importes por cada uno de los conceptos, figura 26.

Figura 26. Zona de conceptos facturables.

Conceptos	Importe \$
Energía	323,750.48
Demanda Facturable	200,526.70
Cargo Factor de Potencia	2,377.11
Subtotal	590,654.29
IVA 16%	95,465.00
Facturación del Periodo	682,121.29
Aduedo Anterior	715,196.17
Su Pago	-715,196.00
Total	\$662,121.46

Fuente CFE-Conoce tu recibo

5.1 Como cobra CFE

Con lo anterior CFE considera las siguientes definiciones para generar los recibos

- **ENERGÍA:** Cantidad de kWh que los equipos consumen por hora, al estar encendidos y trabajando, a este término se le conoce como (CE).
- **DEMANDA:** es en general la coincidencia de cargas eléctricas en un intervalo de tiempo. Más específicamente, es la medida promedio de la tasa de consumo eléctrico (kWh) en un periodo determinado de tiempo. Se determina mensualmente por medio de instrumentos de medición (medidor), que indican la DEMANDA en kilowatts, durante cualquier intervalo de 15 minutos, en el cual el consumo de energía eléctrica sea mayor que en cualquier otro intervalo de 15 minutos en el

periodo de facturación (30 días por lo general). Cualquier fracción de kilowatt de demanda facturable se toma como kilowatt completo. PUEDE REPRESENTAR HASTA UN 60% DEL TOTAL DE SU RECIBO DE LUZ (antes de impuestos) y por lo tanto es el concepto que necesariamente se tiene que ADMINISTRAR, a este término se le conoce como (CD´).

- **FACTOR DE POTENCIA:** Una de las medidas de eficiencia que aumenta o disminuye dependiendo del tipo de cargas conectadas (motores, iluminación fluorescente, etc.), Con frecuencia, los usuarios inscritos en tarifas comerciales/industriales como OM o HM encuentran en su facturación una leyenda de “Cargo por Factor de Potencia “(CFP) la cual es un importe a favor o en contra dependiendo del F.P. en muchas ocasiones este es un importe muy elevado. Generalmente, el cliente desconoce el motivo de tal cargo.

$$CFP = (CE + CD') * \% R \quad \dots\dots\dots (41)$$

$$CFP = (CE + CD') * \% B \quad \dots\dots\dots (41a)$$

- **2% BAJA TENSIÓN:** (cargo por medición en baja tensión) Se obtiene del 2% de la suma de los importes por cargos de ENERGÍA Y DEMANDA. Cualquier aumento o disminución en estos conceptos, modifica el valor de este cargo. El 2% se cobra por las pérdidas de transformación que existen cuando la medición se hace en baja tensión y que no registra el medidor este por lo regular es en tarifa 3 y OM.
- **DAP Derechos de Alumbrado Público** es un cargo que no en todos los estados o municipios existe solamente en los que así lo han convenido con la CFE.
- **SUB TOTAL:** La suma de los importes de todos los anteriores conceptos, antes del Impuesto al Valor Agregado (IVA).
-

5.2 Ejercicio real de los cobros de CFE

Luego de atender los trabajos correspondientes al cambio de Razón Social para los diferentes puntos de venta de una empresa transnacional dedicada al comercio, identificamos que algunos puntos de venta presentan un bajo (F.P.), razón por la cual me tome a la tarea de revisar más a detalle la situación que hasta mayo de 2015 presentan algunos puntos del cual se obtiene lo siguiente:

- Tenemos 67 puntos de venta que los llamare L o F.F más la ubicación general

- La tabla 5.2 nos muestra siete puntos de venta que presentan factor de potencia menor a 90 por ciento (Penalización)

Tabla 5.2. Puntos de venta con factor de potencia menor a 90 por ciento.

Punto de venta	f.p.
L. Ecatepec I	0.8936
F.F. Cuautla	0.8827
L. Cd. Del Carmen	0.9
L. Linda vista	0.8987
L. Tuxpan	0.89
L. Parque Delta	0.8905
L. Polanco	0.8741

En la figura 26 se ocupa el recibo de L Ecatepec 1 para identificar el factor de potencia bajo, el cargo por este concepto que se le aplico en el mes que se facturo.

(SEISCIENTOS NOVENTA Y DOS MIL CIENTO VEINTIUN PESOS 00/100 M.N.)

Fecha limite de pago:

12 JUN 2015

Ruta	Periodo	No. Medidor	Tarifa	Carga conectada kW	Demanda contratada kW	Multiplicador
82DL60C010100080	30 ABR 15 A 31 MAY 15		HM	3095	2476	3000

Descripción y periodo	Lectura actual	Lectura anterior	Diferencia	Totales
kWh base				90,412
kWh intermedia				321,948
kWh punta				20,511
kW base				1,136
kW intermedia				1,179
kW punta				1,022
kVAh				217,478

Mes	Demanda máxima kW	Consumo Total kWh	FP Intermedia	FP Punta	FP Semorota	Precio medio
MAY 14	1,010	412,344	90.87	47	1.7425	
JUN 14	1,045	416,177	90.36	53	1.7672	
JUL 14	988	387,412	90.72	49	1.8003	
AGO 14	1,027	413,875	90.00	49	1.8184	
SEP 14	1,029	421,120	89.95	53	1.7806	
OCT 14	1,164	334,718	91.17	47	1.7867	
NOV 14	724	61,910	92.49	42	1.7700	
DIC 14	1,135	330,711	92.55	38	1.8640	
ENE 15	922	271,468	93.13	37	1.8749	
FEB 15	968	296,332	91.35	43	1.8164	
MAR 15	1,011	368,228	90.30	45	1.6227	
ABR 15	898	41,322	89.52	45	1.6048	
MAY 15	1,208	372,364	89.07	43	1.4777	
MAY 15	1,070	432,871	89.36	49	1.3784	

Factor de potencia %	Totales	Precios unitarios
Energía en base kWh	90,412	0.74840
Energía en intermedia kWh	321,948	0.89510
Energía en punta kWh	20,511	1.84830
Demanda facturable kW	1,070	187.41000

Avisos Importantes

- Corte a partir de 13 JUN 2015.
- Nos transformamos para servirte mejor.
- Servicio a Clientes Teléfono 071.

Datos Fiscales del Receptor		Conceptos		Importe \$
TDL771001P43		Energía		393,750.48
Serie: LA Folio: 000072010592		Demanda Facturable		200,528.70
Folio Fiscal: 37AS3BDD-39AF-4EFF-A00E-A00CF49C0FCE		Cargo Factor de Potencia		2,377.11
N. Certificado del SAT: 00001000000300494968		Subtotal		596,656.29
No. certificado del CSO: 00001000000300470059		IVA 16%		95,465.00
Fecha y Hora de certificación: 2015-05-02T07:59:58		Facturación del Periodo		892,121.29
Unidad de medida: No Aplica		Adeudo Anterior		715,196.17
Forma de pago: No Identificado		Su Pago		-715,196.00
Régimen Fiscal: TÍTULO III DEL RÉGIMEN DE LAS PERSONAS MORALES CON FINES NO LUCRATIVOS		Total	PENALIZACION	\$692,121.46

Figura 26. Zona de conceptos facturables.

Fuente CFE. Recibo de consumo de energía eléctrica.

Las pérdidas reales que se obtienen, se pueden obtener las penalizaciones en función de lo que se factura, es decir, si facturamos \$594,277.18 se tiene una penalización de \$2,377.11 por lo que el importe del subtotal es \$596,656.29 para este caso.

- La tabla 5.2.A. nos muestra veintidós puntos de venta que presentan factor de potencia entre 90.1 a 95 por ciento, que se mencionara como bonificación media debido a que pueden alcanzar hasta 100.

Tabla 5.2.A. Puntos de venta con factor de potencia de 90.1 a 95 por ciento.

Punto de venta	f.p.
F.F. Sol	0.9200
L. Metepec	0.9200
F.F. Tepic	0.9200
F.F. Villahermosa	0.9300
L. el Dorado	0.9290
L. León Sur	0.9250
L. Mazatlán	0.9157
L. Mérida	0.9120
L. Morelia Américas	0.9219
L. Querétaro Antea	0.9353
L. Querétaro	0.9336
L. Veracruz	0.9284
L. Playa del Carmen	0.9387
L.Mocambo	0.9164
L. Peri norte	0.9251
L. Santa Fe	0.9299
L. Villahermosa	0.9339
F.F. Poza Rica	0.9225

En la figura 27 se ocupa el recibo de F.F. Sol para identificar el factor de potencia con bonificación media, el cargo por este concepto que se le aplico en el mes que se facturo.

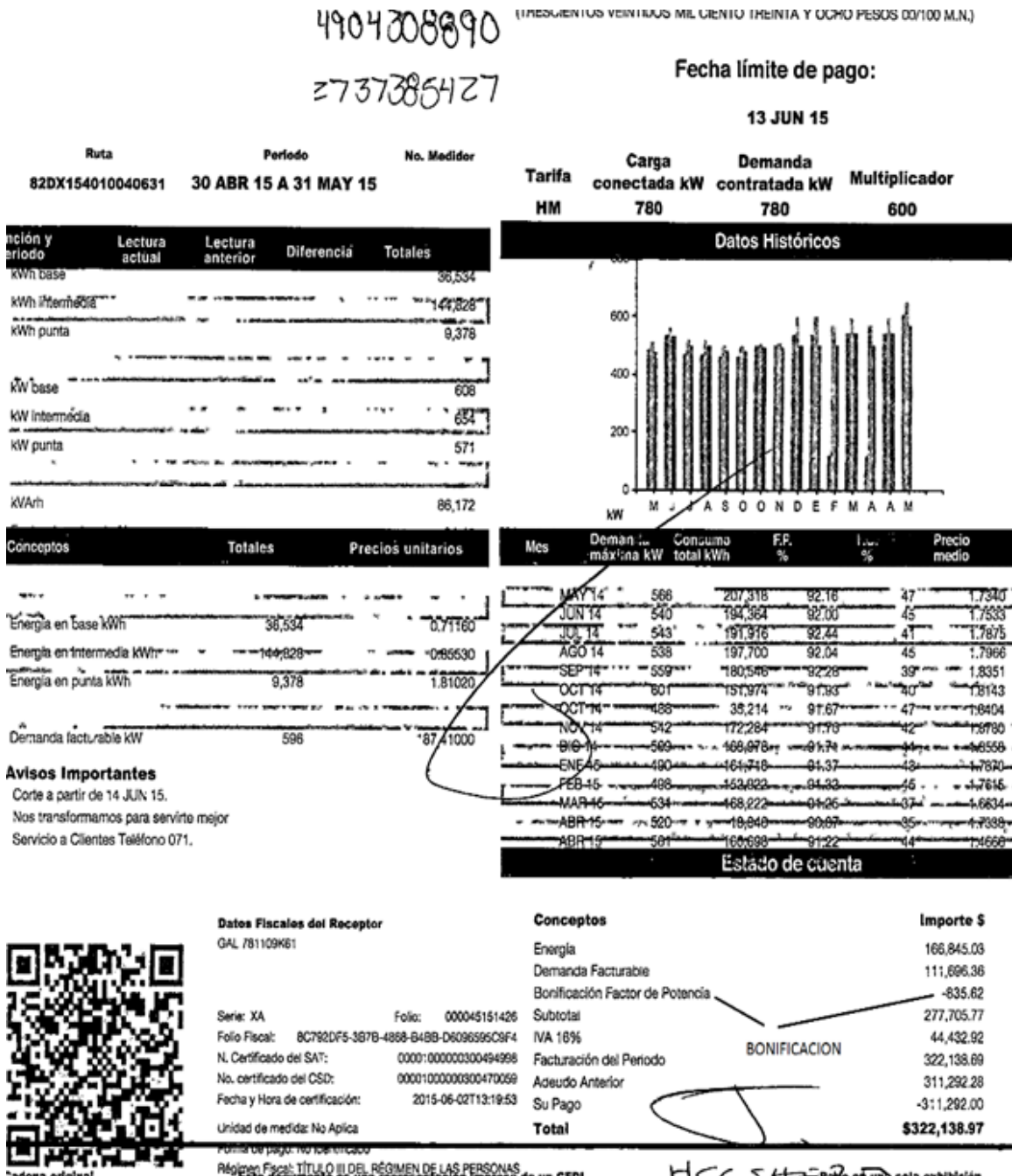


Figura 27. Recibo de F.F. Sol

Fuente CFE. Recibo de consumo de energía eléctrica.

La figura 28 muestra el caso donde el factor de potencia esta entre 95 a 100 por ciento para identificar el factor de potencia con bonificación máxima, el cargo por este concepto que se le aplico en el mes que se facturo. Se ilustra con el mejor f.p. que se obtuvo y fue de F.F. Cd. Juárez que obtuvo en un mes 100 por ciento.

Figura 28. Recibo de F.F. Cd. Juárez.



Fuente CFE. Recibo de consumo de energía eléctrica.

Las bonificaciones reales que se obtienen se muestran con el signo menos “-” en función de lo que se factura, es decir, si facturamos \$218,890.4 se tiene una bonificación de \$1,970.01 por lo que el importe del subtotal es \$216,920.39 para este caso.

5.3 Como interpretar los conceptos y la obtención de costos

Como primera medida, del recibo tomamos los conceptos (CE) y (CD'), para el caso de cargo por factor de potencia debemos saber en qué caso nos encontramos si este es:

Para penalización. Tomando de nueva cuenta el de L. Ecatepec tenemos que

- Para el concepto de energía en el recibo tenemos

Energía en base kWh	90,412	0.74840
Energía en intermedia kWh	321,948	0.89510
Energía en punta kWh	20,511	1.84830

CE= (90,412*0.74840+321,948*0.89510+20,511*1.84830) lo que nos da \$ 393,750.48

- Para el concepto de demanda facturable en el recibo tenemos

Demanda facturable kW	1,070	187.41000
-----------------------	-------	-----------

CD' = 1,070 kW el precio es de 187.41 lo que nos da \$ 200,528.70

- Para el cargo de factor de potencia de la ecuación 40

kVArh		217,478
Factor de potencia %	Totales	Precios unitarios 89.36

Sustituyendo valores

$$\%R = \frac{3}{5} * \left(\left(\frac{90}{89.36} \right) - 1 \right) * 100$$

$\%R = 0.42$ 0.004297 pero CFE toma valores enteros y adimensionales, por lo tanto

$$\%R = 0.004$$

Sustituyendo valores en la ecuación 41

$$CARGO POR FACTOR DE POTENCIA = (393,750.48 + 200,528.70) * 0.004$$

$$CFP = \$ 2,377.11$$

Conceptos	Importe \$
Energía	393,750.48
Demanda Facturable	200,528.70
Cargo Factor de Potencia	2,377.11
Subtotal	596,656.29
IVA 16%	95,465.00
Facturación del Periodo	692,121.29
Adeudo Anterior	715,196.17
Su Pago	-715,196.00
Total	\$692,121.46

Las pérdidas reales se obtienen de las penalizaciones en función de lo que se factura, con esto se abre un área de oportunidad para mejoras del sistema, es decir, si analizamos el comportamiento del sistema, este puede ser más eficiente agregando al sistema un equipo que nos ayude a abatir estos problemas, más adelante mencionaremos algunas medidas correctivas que nos pueden ayudar a mejorar los consumos de energía.

Para la bonificación. Tomando de nueva cuenta el de F.F Cd. Juárez tenemos que

- Para el concepto de energía en el recibo tenemos

Conceptos	Totales	Precios unitarios
Energía en base kWh	33,320	0.68230
Energía en intermedia kWh	129,430	0.83920
Energía en punta kWh	5,810	1.71940

$$CE = (33,320 * 0.68230 + 129,430 * 0.83920 + 5,810 * 1.71940) \text{ lo que nos da } \$ 141,341.60$$

- Para el concepto de demanda facturable en el recibo tenemos

Demanda facturable kW	448	173.10000
-----------------------	-----	-----------

$$CD' = 448 \text{ kW el precio es de } 173.10 \text{ lo que nos da } \$ 77,548.80$$

- Para el cargo de factor de potencia de la ecuación 40 A

Factor de potencia %	93.43
----------------------	-------

Sustituyendo valores

$$\%B = \frac{1}{4} * \left(1 - \left(\frac{90}{93.43} \right) \right) * 100$$

$\%B = 0.9177$ o 0.009177 CFE toma valores enteros y dimensionales, por lo tanto

$$\%P = 0.009$$

Sustituyendo valores en la ecuación 41A

Conceptos	Importe \$
Energía	141,341.60
Demanda Facturable	77,548.80
Bonificación Factor de Potencia	-1,970.01
Subtotal	216,920.39
IVA 16%	34,707.26
Facturación del Período	251,627.65
Derecho de Alumbrado Público	10,000.00
Adeudo Anterior	226,277.90
Su Pago	-226,277.00
Total	\$261,628.55

$$CARGO POR FACTOR DE POTENCIA = (141,341.6 + 77,548.80) * 0.009$$

$$CFP = - \$ 1,970.01$$

Las bonificaciones reales que se obtienen se muestran con el signo menos “-“ en función de lo que se factura, es decir, si existe un ahorro mensual y que también el sistema es más eficiente para este caso, se podría mejorar el factor de potencia pero en términos generales está por arriba del mínimo y en el histórico muestra que el F.P. ha llegado a la unidad.

5.4 Obtención del F.P. de acuerdo a lo registrado en el recibo

Para obtener el factor de potencia debemos identificar los valores de consumo total en el recibo para la obtención del F.P. la ecuación que vimos en el tema uno que es igual a $\frac{P}{S}$ obtenemos del recibo

$$F.P. = \frac{kWh}{\sqrt{kWh^2 + kVArh^2}} \dots\dots\dots (41)$$

Los términos se ven afectados por el tiempo, sin embargo, con solo tener en cuenta las unidades con las que estamos trabajando, estas variables no tienen problemas de trabajarse así, de lo contrario habría que cambiarlas por sus respectivas conversiones que en este caso se tendrían que dividir por las horas de cada mes, es decir 720 horas para meses de 30 días y 744 horas para meses de 31 días.

- Para el caso de penalización

Sustituyendo valores

$$F.P. = \frac{432,871}{\sqrt{432,871^2 + 217,478^2}} ; F.P. = 0.8936 \text{ o } 89.36\%$$

Mes	Demanda máxima kW	Consumo total kWh	FP %	Punta %	Sempunto %	Precio medio
MAR 15	1,011	368,228	90.30	45		1.6227
ABR 15	898	41,322	89.52	45		1.6048
ABR 15	1,208	372,364	89.07	43		1.4777
MAY 15	1,070	432,871	89.36	49		1.3784

kVArh 217,478

Factor de potencia %	Totales	Precios unitarios
		89.36

- Para el caso de bonificación

Sustituyendo valores

$$F.P. = \frac{168,560}{\sqrt{168,560^2 + 64,330^2}} ; F.P. = 0.9343 \text{ o } 93.43\%$$

kVArh					64,330
Factor de potencia %					93.43
Mes	Demanda máxima kW	Consumo total kWh	F.P. %	P.C. %	Factor medio
MAR 15	371	98,490	98.34	38	1.2257
ABR 15	345	13,230	96.29	38	1.5546
ABR 15	417	120,960	94.40	40	1.3713
MAY 15	448	168,560	93.43	41	1.2868

6 Medidas correctivas

El recibo nos ayuda mucho a saber en qué condiciones se encuentran nuestras instalaciones y la forma en que estas aprovechan la energía de la compañía suministradora, pero además, con el conocimiento de la existencia de armónicos, la medida correctiva adecuada para solucionar estos problemas de factor de potencia bajo o con presencia de armónicos es analizado de mejor forma, antes las medidas correctivas que se tomaban para evitar que su presencia afectara las instalaciones eléctricas del sistema era en muchas ocasiones sobredimensionar el sistema aumentando los valores nominales de las fuentes, equipos o las secciones transversales de los cables, lo que provoca que las instalaciones se salieran de norma y por consiguiente no fueran seguras y confiables, también, instalando transformadores delta-estrella o tipo K que ayuden a abatir este problema, la otra forma es eliminando parcial o totalmente utilizando equipo especializado, esto último se viene aplicando con éxito para resolver o minimizar este tipo de problemas, de lo que podemos clasificar básicamente en tres tipos:

- Medidas que tienden a bloquear el paso de las corrientes armónicas hacia los equipos especialmente sensibles, quedando estos protegidos de la influencia de las mismas, aunque estas corrientes armónicas sigan circulando por el resto de la red.
- Medidas que tienden a bloquear y/o absorber las corrientes armónicas, confiándolas a circular por zonas limitadas por la red, preferentemente circunscritas a los focos emisores de las mismas.
- Medidas tendientes a sobredimensionar, recurriendo incluso hasta diseños especiales, los equipos y conductores sometidos al flujo de corrientes armónicas con objeto de minimizar los efectos nocivos provocados en los mismos.

A continuación, se expondrá una serie de medidas correctivas cada una de ellas clasificable en alguno de los incisos anteriores:

6.1 Filtros de potencia

Cuando la distorsión armónica excede ciertos valores produce los problemas que se han escrito anteriormente, es necesario en ciertos casos diseñar dispositivos para eliminar esta distorsión o minimizar de acuerdo a las tablas de límites aplicables, estos dispositivos se conocen como filtros. Un filtro lineal, está compuesto de componentes lineales, tales como resistencias, inductores y capacitores; en la industria estos filtros los conocemos como de choque o rechazo, absorción o bloqueo de la tercera armónica.

6.1.1 Diseño y operación de filtros

- **No sintonizados**

Estos están diseñados para dejar pasar la frecuencia fundamental (60 Hz) y atenúan otras frecuencias, las cuales pueden presentarse en forma de ruido, los diseños especiales pueden también atenuar armónicas, algunos filtros son circuitos sintonizados, lo cual significa que están direccionados a un pequeño rango de frecuencias, a continuación, la figura 29 y 29 Amuestra el arreglo típico de filtros que no son sintonizados, estos son el filtro paso bajo simple y el filtro de paso alto simple respectivamente.

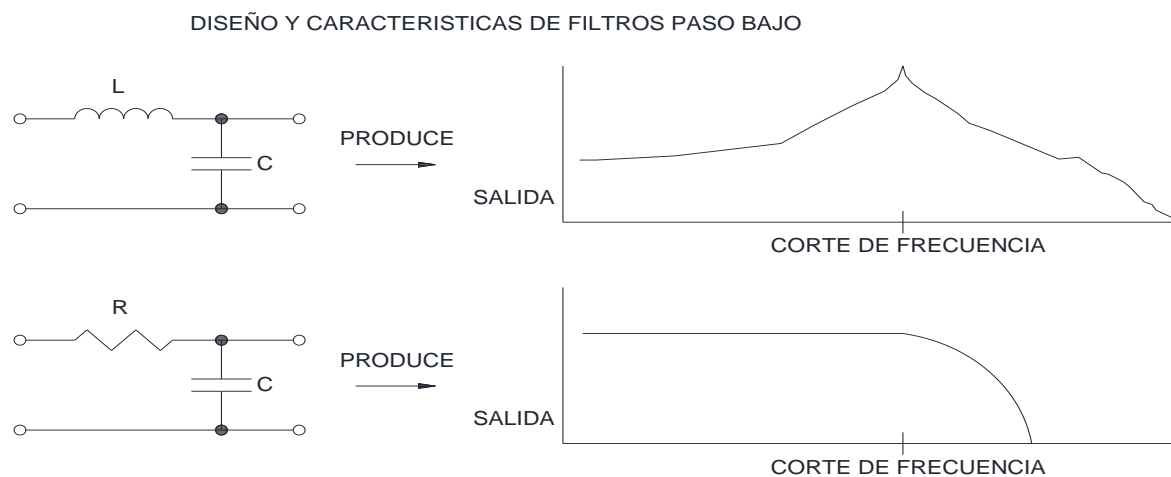


Figura 29. Arreglo típico de filtros no sintonizados

DISEÑO Y CARACTERISTICAS DE FILTROS PASO ALTO

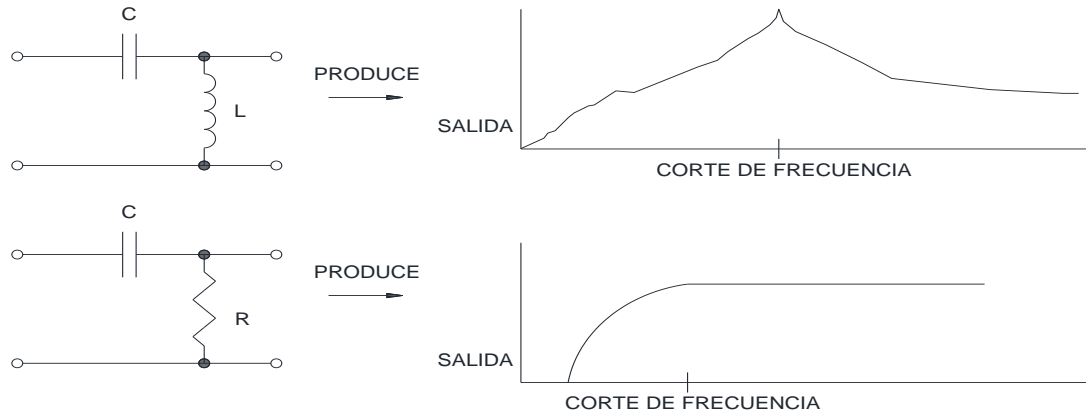


Figura 29 A. Arreglo típico de filtros no sintonizados

Fuente El ABC de la Calidad de la energía eléctrica. Capítulo 3

- **Sintonizados**

Dos tipos de filtros sintonizados son: filtros en serie y en paralelo, los elementos principales son inductores y capacitores en serie uno con el otro, además pueden estar conectados en paralelo (Shunt) con la fuente de energía. Un circuito conectado en serie, es un circuito que está totalmente en serie con la fuente de energía, el arreglo típico de estos filtros se muestra en la figura 30.

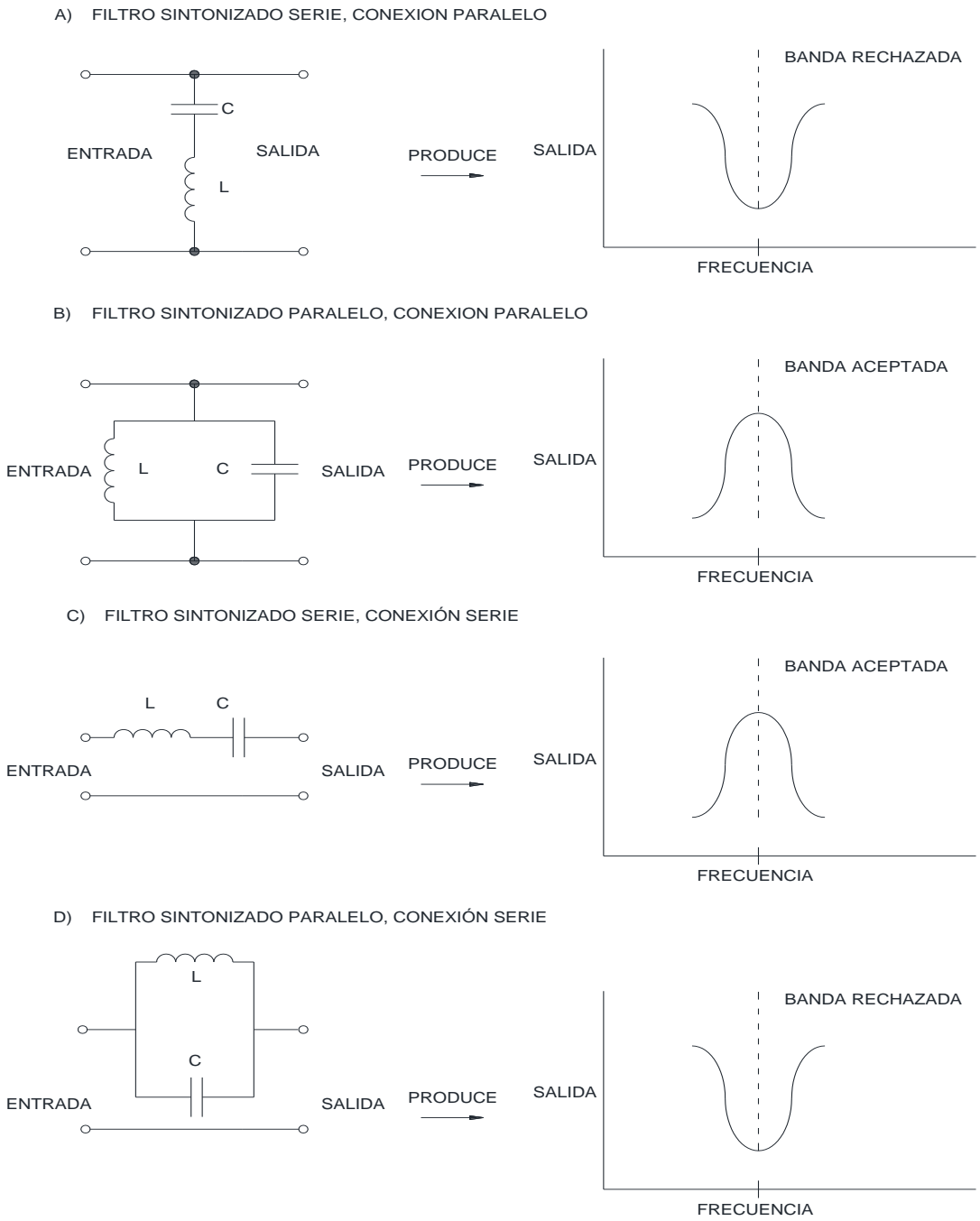


Figura 30. Arreglo típico de filtros sintonizados

6.1.2 Usos y ventajas

Todos los arreglos anteriores de las figuras 29, 29 A y 30 toman algunos nombres característicos que comercialmente tienen distintos usos según las necesidades de la red, a continuación, se describen estos como:

- A. **Filtros de choque o rechazo.** Un filtro Sintonizado a una frecuencia inferior a la de la armónica significativa que se quiera rechazar; por ejemplo, para mitigar la quinta armónica, el reactor se sintoniza con el capacitor alrededor de la cuarta armónica (normalmente a la 4.2; es decir, a una frecuencia de $4.2 \times 60 \text{ Hz} = 252 \text{ Hz}$). Esta composición permite el rechazo e impide que los capacitores absorban una corriente armónica excesiva; esto evitará resonancias que amplifican los niveles de distorsión armónica y elevará el FP de la red eléctrica, propiciando el mejor aprovechamiento de la energía que entrega la CFE al usuario. Así, se evitan recargos por un FP inferior a 90 por ciento y podrá obtener bonificaciones por valores superiores a dicho porcentaje. Estos equipos se manufacturan usualmente en pasos o bloques estándar de 12.5 kVAr, 25 kVAr, 50 kVAr, 75 kVAr o 100 kVAr, que al adicionarse entre sí proveen la potencia total que requiere el arreglo. Ver Figura 29 o 29 A.

- B. **Los Filtros de absorción.** En este caso se instalan reactores en serie con los capacitores, pero sintonizados justo al valor exacto de la frecuencia armónica más significativa existente en el sistema. El diseño tanto de capacitores, como de reactores, debe permitir el paso hacia ellos mismos de toda la energía que fluye por el sistema para cada armónico, ya que, al presentar una impedancia casi nula a la frecuencia sintonizada, cada sección del filtro se comporta como un sumidero de energía que puede fallar si no se dimensiona correctamente. Los filtros de absorción son una opción mucho más costosa que los filtros de rechazo; no obstante, si están bien diseñados, permitirán mitigar los armónicos de la red a un nivel despreciable o manejable, además de proteger a los capacitores, evitar resonancias, mitigar armónicas en el sistema y corregir el FP a frecuencia fundamental (60 Hz). Ver Figura 30.

- C. **Los filtros de bloqueo de tercera armónica H3.** Este tipo de filtros, tiene el riesgo potencial de los armónicos de secuencia cero, para las personas es mayor cuanto más alto sea el contenido de armónicos a los 180 Hz, que es la velocidad a la que corre el armónico H3. Al ser este armónico el de mayor presencia en los inmuebles de oficinas, es en donde tiene su aplicación típica. Estos filtros de bloqueo se conectan en paralelo entre el hilo del neutro y la fase, y para redes trifásicas en serie en el hilo del neutro. Están diseñados para la reducción de dicho armónico en instalaciones monofásicas y trifásicas, tales como cuartos de cómputo, CCTV, dispositivos de seguridad electrónica, computadoras, luminarios con balastos electrónicos, reguladores de intensidad luminosa y otros tipos de cargas monofásicas conectadas entre fase y neutro. En la figura 31 muestra la conexión de este en el sistema.

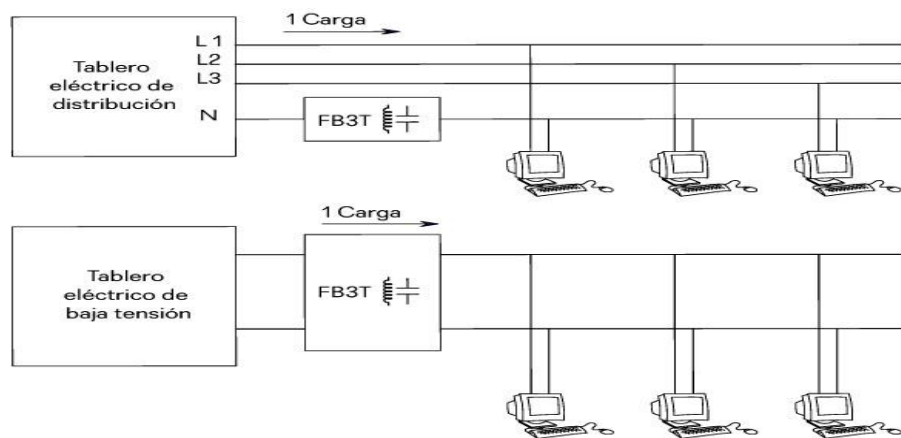


Figura 31. Arreglo típico de filtros de tercera armónica

Fuente Constructor Eléctrico

- D. **Los filtros LCL**, están conformados por una combinación serie-paralelo de inductancias y capacitores, adaptados para eliminar o reducir de manera importante los armónicos producidos por rectificadores o convertidores de potencia de 6 pulsos que emplean los variadores de frecuencia para motores, los drivers de frecuencia variable, algunos UPS y los sistemas de soldado automatizado.

Algunos de estos equipos están regulados a base de tiristores, diseñados para la compensación de armónicos en dispositivos de control que trabajan de manera fluctuante y requieren de compensación instantánea.

Un ejemplo de aplicación se encuentra en elevadores, ya que son cargas controladas por convertidores de 6 pulsos que trabajan en cortos intervalos de tiempo. Mediante la compensación regulada, se filtra la corriente armónica generada por dichas cargas y evita cualquier efecto de sobrecompensación, al actuar sólo cuando la carga está en funcionamiento.

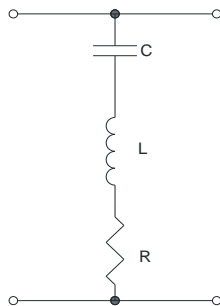
La función principal de los LCL es filtrar los armónicos de corriente H5, H7 y, de manera minoritaria, H11 y H13, generados por los convertidores de 6 pulsos. Así, reducen el THDI a valores inferiores al 10 por ciento.

- E. **Los filtros armónicos en paralelo (Shunt)**, por lo general no se usan en aplicaciones de calidad de la energía, pues permiten corregir el factor de potencia a frecuencia fundamental, evitan resonancias protegen a los capacitores y eliminan armónicas en el sistema.
- F. **Los Filtros activos** sirven para mitigar el espectro armónico en general, esta técnica puede ser aplicada tanto para drivers, rectificadores, UPS y, en general, equipos electrónicos de potencia. Para ello se requieren mediciones precisas del contenido en valor eficaz en amperes (amperes rms) del contenido de cada uno de los armónicos presentes en la red estudiada, ya que se deberá determinar la magnitud de cada uno de ellos para removerlos y contener la capacidad de cancelación adecuada.

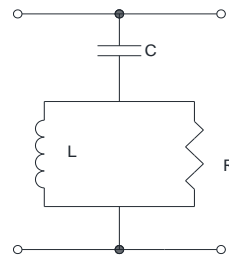
Es importante decir que, para cancelarlas, estos dispositivos son generadores de corrientes armónicas con ciclos inversos, de tal forma que se contraponen y cancelan su contenido de valor eficaz (rms). Para su operación pueden introducir ruido en la potencia de switcheo y requerir de un filtrado adicional para prevenir interferencias con otros equipos.

- G. **Diseños especiales son usados para atenuar armónicas.** Por ejemplo, los filtros serie pueden ser usados para desviar armónicas a tierra. Un filtro sintonizado conectado en paralelo, el cual consiste de un inductor, un capacitor y una resistencia, es sintonizado para eliminar una armónica de orden específico al presentar una baja impedancia a la frecuencia armónica y desviando la energía armónica a tierra. Varios de estos filtros pueden ser ordenados por etapas, filtrando selectivamente con cada etapa una frecuencia armónica dada. Alternativamente, un diseño de paso alto puede emplearse y, por lo tanto, armónicas de un cierto orden mayor serán desviadas a tierra. Arreglos de filtros sintonizados para la quinta armónica, reduciendo el valor de la impedancia como en la figura 32.

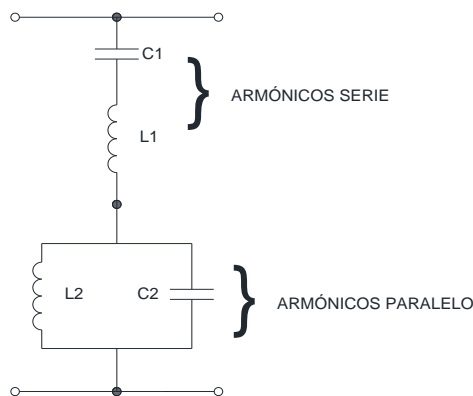
FILTRO SIMPLE SINTONIZADO EN PARALELO



FILTRO PASO ALTO REDUCTOR DE ONDA



FILTRO EN PARALELO SINTONIZADO DOBLE



FILTRO PASO ALTO MODIFICADO

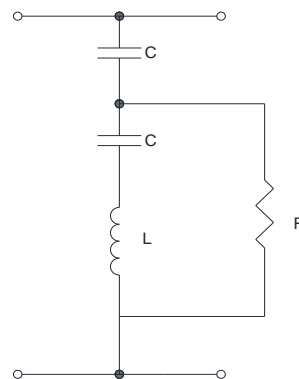


Figura 32. Arreglos de filtros sintonizados para la quinta armónica

6.1.3 Desventajas

Comúnmente, el ruido no necesariamente es eliminado debido a que, como ya vimos estos filtros son capaces de controlar las armónicas y como comentamos al principio estos minimizan tanto como la red lo permita y en algunos casos los elimina.

Cuando varios equipos que contienen filtros lineales son conectados, se debe tener cuidado de que el sistema sea compatible. De otra forma, es posible que las unidades no tengan la misma cantidad de filtración requerida para evitar problemas de corriente en el circuito. Pueden ser requeridos filtros suplementarios en el circuito.

El filtro serie de bajo orden, son ocasionalmente usados para la atenuación de armónicas, puesto que deben diseñarse para la corriente extrema o máxima, haciéndolos relativamente caros.

Los filtros paralelos aplicados a cargas individuales, pueden muchas veces ser sobrecargados por armónicas producidas por cargas cercanas y otros consumidores ubicados en la misma línea.

6.2 Reactores de choque

También llamados reactores de rechazo o reactores de línea, aparecen en los diagramas, necesarios en los bancos de capacitores para limitar las corrientes de magnetización que se presentan en los transformadores a los pocos ciclos desde el momento en que es energizado (corrientes de Inrush), sus características generales es que son compactos, tienen bajas pérdidas, el núcleo de alta calidad permite amortiguar efectos transitorios.

Es bastante frecuente encontrar en las redes eléctricas motores gobernados por variadores de frecuencia o variadores de velocidad angular, con rectificadores de seis pulsos (rectifican dos veces cada una de las tres fases, de ahí su nombre). Estos dispositivos generan niveles de distorsión armónica (THDI) de alrededor de 45 por ciento en la onda de corriente.

6.2.1 Diseño y operación de los reactores de choque

Una manera de atenuarla consiste en incorporar reactores de choque, estos se colocan en serie entre el tablero eléctrico de alimentación y el variador de velocidad, como en la figura 33.

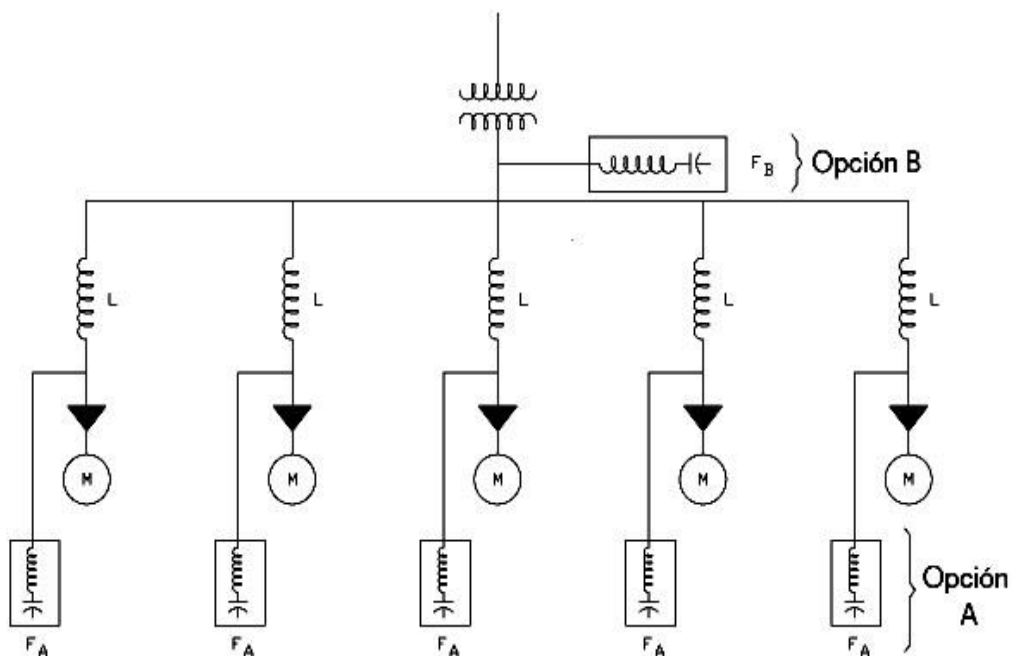


Figura 33. Arreglo típico de los reactores de choque "L"

Fuente Constructor Eléctrico

Debido a que es común encontrar grupos de motores y variadores operando en paralelo, se recomienda que cada uno de ellos contenga su propio reactor de choque para impedir el flujo de los armónicos provenientes de los demás variadores. Dichos reactores pueden amortiguar mesuradamente las corrientes armónicas desde 4 hasta 10 por ciento. Como el reactor se conectará en serie con el variador de frecuencia y con el motor, será necesario dimensionarlo tomando como referencia la intensidad de corriente del circuito.

6.2.2 Usos y ventajas

Los reactores comerciales se ofrecen con caídas de tensión (según la corriente nominal del variador) de 3 y 5 por ciento, a elegir por el usuario.

Los reactores de 5 por ciento pueden ser más eficaces para los fines propuestos, pero es preciso revisar el efecto de la caída de tensión sobre el motor.

Estos reactores pueden amortiguar un poco las corrientes armónicas generadas por el variador de 4 a 6 por ciento en el caso de reactores de 3 por ciento de caída de tensión y de 8 a 10 por ciento para reactores de 5 por ciento. El filtro de armónicas es conveniente instalarlo entre el reactor y el variador como se ve en la figura 33 opciones A.

Permiten instalar mayor cantidad de capacitores de forma fija en secundarios de transformadores sin peligro de provocar resonancias.

Permiten la instalación segura de capacitores en redes con cargas no lineales (inversores, rectificadores, variadores de velocidad, sistemas ups, hornos de inducción, etc.)

Permiten la operación confiable de variadores de frecuencia en paralelo.

Evitan fallas de capacitores por corrientes armónicas

Protegen al motor y al variador de frecuencia de:

- Sobrecalentamiento por espectro armónico
- Fallas de control y de motor por exceso de armónicos.

6.2.3 Desventajas

La instalación de variadores en paralelo hace necesario la protección individual para cada motor con reactores de choque que impidan presentarse problemas de operación en el motor debido al flujo de corrientes armónicas provenientes de los demás variadores que como ya se ha mencionado, es un diseño único y lo hace muy complicado en ampliaciones o modificaciones de la red.

6.3 Transformadores estrella-delta

Es la forma natural de bloquear la tercera armónica (H3) y de los armónicos de secuencia cero (H9, H15, H21, etcétera). En este tipo de arreglo se incorpora un transformador configurado en estrella-delta. Su lado primario (de la fuente) está configurado en estrella y el secundario (de la carga) en delta. Los armónicos de secuencia cero que provienen de la fuente se descargan hacia el neutro o bien recirculan por el bobinado del secundario en delta.

Los armónicos de secuencia cero que provienen de la carga quedan bloqueadas, recirculando por el devanado en delta, ya que esta configuración carece de neutro; sin embargo, habrá que tomar en cuenta

que si la red contiene capacitores pueden presentarse resonancias, por lo que será conveniente tomar en cuenta la inductancia del transformador.

6.3.1 Diseño y operación

Se debe calcular el tamaño de carga, el espectro de armónicos emitido por la carga, la impedancia de la fuente y otros parámetros con blindajes y efectos capacitivos en el núcleo para impedir el paso de altas frecuencias hacia el lado de la fuente. Sin embargo, son de diseño delicado y su costo suele ser bastante más alto que el del filtro de rechazo (capacitor-reactor) equivalente.

6.3.2 Usos y ventajas

Transformadores de aislamiento. Aplicación: protección contra disturbios eléctricos generales y reducción del nivel de distorsión armónica (THD). Son dispositivos de protección eléctrica general que evitan la transferencia de disturbios entre dos secciones de una red eléctrica. Normalmente son transformadores con relación 1:1 entre sus devanados primario y secundario; esto quiere decir que ambos bobinados tienen la misma cantidad de espiras (o vueltas de alambre conductor). Por lo tanto, el bobinado secundario entregará el mismo voltaje que se aplique al primario, sin existir una conexión eléctrica entre el bobinado primario y el secundario. Por ello, estos dispositivos aíslan la energía de entrada de la energía de salida, lo cual permite que las perturbaciones eléctricas (como interferencias, pequeñas distorsiones en la frecuencia, armónicas, entre otros) entre el secundario y el primario no se transfieran al otro devanado.

6.3.3 Desventajas

Sobre calentamiento excesivo

En ocasiones son más caros que un filtro de rechazo o absorción

Elimina las corrientes armónicas de secuencia cero, la secuencia positiva, negativa armónicas H5 o H7 hacen que se caliente demasiado.

6.4 Transformadores en Zig-Zag

Representan una muy buena medida de protección para la cancelación de armónicos de secuencia cero (H3, H9, H15, H21, etcétera). En esta configuración, en el lado secundario se conecta la carga no lineal y provee un hilo de neutro para cargas de cómputo monofásicas entre fase y neutro, o bien trifásicas conectadas entre fases.

6.4.1 Diseño y operación

Los transformadores tipo Zig-Zag figura 34. Tienen una arquitectura en el lado secundario parecida a una estrella, pero con la peculiaridad de contener seis bobinados idénticos en lugar de los tres usuales.

El devanado en Zig-Zag produce el mismo desplazamiento angular que un devanado en delta, proporcionando, además, un hilo de neutro para cargas monofásicas.

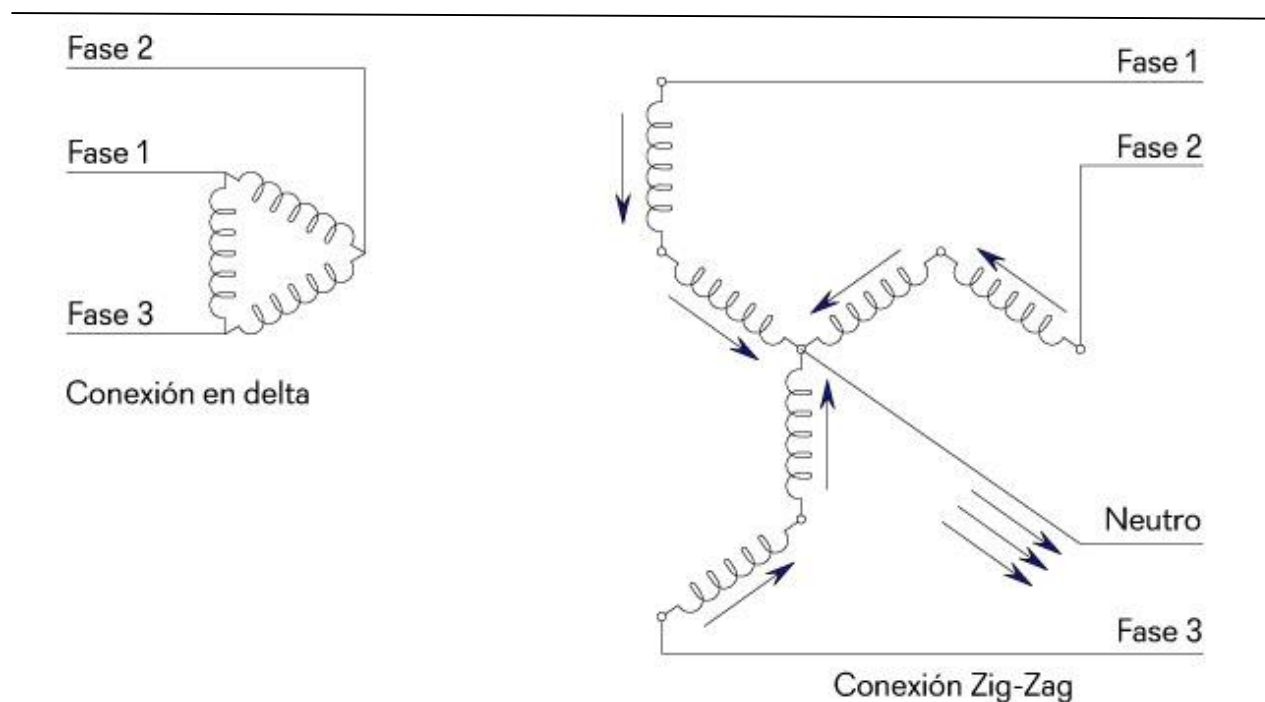


Figura 34. Arreglo típico de transformadores en Zig-Zag

Fuente Constructor Eléctrico.

6.4.2 Usos y ventajas

Si el espectro de armónicos lo amerita, es decir, si también tienen peso el armónico H5 y el armónico H7, a esta solución se le pueden agregar filtros de rechazo para dichos armónicos, lo cual proveerá a la red de un sistema de filtrado de muy buen desempeño, ya que permitirá reducir o mitigar los armónicos H3, H5, H7, H9, H15, H21.

Constituye una buena alternativa para sustituir a un transformador estándar cuando éste se está sobrecalentando por el flujo de armónicas, especialmente las de secuencia cero, tal como es el caso en instalaciones de alumbrado fluorescente y computadoras personales.

Protección de equipos UPS que alimentan computadoras.

6.4.3 Desventajas

Necesita un 15 por ciento más de material conductor

6.5 Transformadores tipo k

Estos son aprobados para operar con cargas no lineales, el factor k indica la severidad de la distorsión armónica que el transformador puede soportar.

6.5.1 Diseño y operación

Esta clase de transformadores está diseñada para trabajar con cargas no lineales. No corrige el contenido armónico, pero permite contrarrestar los efectos de elevación de temperatura que producen. El factor k es un indicador numérico que está asociado con el número de veces que un transformador puede soportar el calor armónico en sus devanados, en relación con un transformador construido sin factor k.

En la Tabla 6.5.1 se observa el nivel de distorsión armónica característico que puede tolerar un transformador, de acuerdo con el factor k con que está construido, de conformidad con lo establecido por Underwriters Laboratories (UL).

Tabla 6.5.1. Niveles de distorsión armónica para un transformador tipo k

Alumbrado con lámparas incandescentes	K-1
Calefacción por resistencia eléctrica	K-1
Motores sin estado sólido	K-1
Control de los transformadores/dispositivos electromagnéticos de control	K-1
Motores generadores (Sin estado sólido)	K-1
Descarga eléctrica de iluminación	K-4
UPS con filtro en la entrada	K-4
Soldadoras eléctricas	K-4
Equipos de calentamiento por inducción	K-4
PLC's y controles de estado sólido	K-4
Equipos de telecomunicaciones	K-13
UPS sin filtro en la entrada	K-13
Circuitos de receptáculos múltiples en áreas de cuidados generales de salud, salones de escuelas, etc.	K-13
Circuitos de receptáculos múltiples en pruebas u otras áreas de producción.	K-13
Cargas de computadoras	K-20
Circuitos de receptáculos múltiples dentro de salas de operación y recuperación de hospitales	K-20

Fuente transformadores ORION

La CFE pide transformadores norma k 07 o 08 que como lo mencionamos en el tema anterior, el número del factor es la capacidad de soportar armónicas.

6.5.2 Usos y ventajas

Protección del transformador de alimentación al evitar su sobrecarga por el efecto de la distorsión armónica (THD) presente en la red.

6.5.3 Desventajas

Un transformador k puede ocupar 130 a 140 por ciento de espacio y pesar 115 por ciento más que un transformador estándar, el costo es de aproximadamente del doble.

6.6 Sobredimensionamiento del hilo de neutro

La característica es evitar la sobrecarga del hilo del neutro por efecto de los armónicos de secuencia cero y de H3, principalmente. En el caso de instalaciones con una gran proporción de carga proveniente de equipos electrónicos, como computadoras, debe dimensionarse el calibre del hilo de neutro al doble de ampacidad de los conductores de fase.

6.6.1 Diseño y operación

El sobredimensionamiento está orientado a evitar daños en los conductores o en los dispositivos de alimentación eléctrica de la red, pero no reduce los niveles del contenido armónico de la red eléctrica del usuario.

Estos armónicos, al sumarse en el hilo del neutro, pueden alcanzar valores eficaces del doble que la corriente en las fases. Por ello, el NEC 210-4a indica que el conductor de neutro debe ser de un calibre igual o mayor al de los conductores de fase.

6.6.2 Usos y ventajas

Los balastos electrónicos de alumbrado fluorescente y las fuentes de poder de computadoras, equipos de monitoreo, copadoras y otros equipos electrónicos alimentados con fuentes de corriente rectificadas y alimentados en forma monofásica provocan una fuerte distorsión armónica en la onda de corriente con alto contenido en los armónicos tercero (H3), noveno (H9) y décimo quinto (H15) (armónicos de secuencia cero).

6.6.3 Desventajas

No elimina los armónicos solo los soporta

7 Metodología para realizar un estudio de calidad de energía eléctrica en presencia de armónicas.

Los estudios de calidad de energía han tenido mayor aceptación entre los consumidores debido a los costos por consumo de energía eléctrica, la sensibilidad de los equipos y la entrada de la electrónica de potencia que estos últimos responden fácilmente a una señal defectuosa y fallan, en este apartado se presenta una metodología donde intervienen los temas anteriores identificado los tipos de cargas sensibles, los síntomas típicos que causan las perturbaciones eléctricas dentro de una instalación eléctrica, el recibo de la compañía suministradora, además, nos puede ayudar también a comprender como se presentan estas perturbaciones para poder definir si el sistema está contaminado por corrientes armónicas o simplemente se tiene bajo factor de potencia o alguna otra, para comenzar debemos hacernos una serie de cuestionamientos los cuales nos darán información importante a recopilar y poder hacer el análisis de la posible falla de las instalaciones, a continuación detallare estos puntos empezando con el plan de trabajo para poder atacar distintos puntos estratégicos de la red además que nos ayuda a planificar las áreas a visitar, la administración de recursos y los tiempos asignados que se necesiten para estos para finalmente tener un reporte detallado donde tenga la medida correctiva adecuada, en los siguientes temas a este reporte le llamare también propuesta técnica-económica.

7.1 Plan de trabajo

El plan de trabajo nos ayuda a sistematizar la información e interrelacionar los recursos ya sea financieros, tecnológicos, humanos, etc. con el fin de enfocarnos en la problemática que el usuario llegue a tener, además, nos permite plantearnos objetivos específicos para contar con un suministro eléctrico adecuado que se encuentre dentro de las normativas vigentes además de garantizar la correcta operación del sistema y prevenir futuras y/o posibles fallas dentro del mismo.

- Explorar la red eléctrica del usuario
 - Inspección de tableros a analizar
- Mediciones efectuadas
 - Medición y graficas de los principales parámetros eléctricos en operación normal. -
 - Medición del contenido armónico en corriente y en voltaje hasta la armónica que el equipo de medición pueda registrar. -
- Graficación del contenido armónico, forma de onda de tensión y corriente, así como el factor k
- Equipo utilizado
- Análisis, ingeniería, reporte y recomendaciones a todos los problemas detectados.

7.2 Como explorar la red eléctrica del usuario

Para poder empezar a dar una solución a un problema eléctrico producido en las instalaciones del usuario, debemos conocer sus instalaciones, en esta parte daré una directriz de lo que en campo usualmente el Ingeniero eléctrico debe considerar para poder llevar un buen levantamiento eléctrico para el estudio de calidad de la energía, este levantamiento se complementa con las versiones finales de los planos de las instalaciones o diagramas unifilares generales, también me ha tocado ver que muchas de las empresas industriales o comerciales no cuentan con un diagrama unifilar general y mucho menos con alguna modificación a las instalaciones por lo que entre mejor sea el levantamiento eléctrico más herramientas tendremos para la solución de algún problema provocado por calidad de la energía.

El estudio de corrientes armónicas y factor de potencia tiene como objetivos, evitar y solucionar los fallos de tarjetas electrónicas, así como disparos innecesarios de equipo crítico y en consecuencia el paro de máquinas, para una operación segura y confiable.

El estudio y análisis en conjunto de la compensación del factor de potencia y corrientes armónicas nos darán el soporte en el diseño, fabricación y costo de los equipos necesarios para cumplir el objetivo.

7.2.1 Visita a campo

La visita en campo tiene la finalidad de

- Levantamiento eléctrico y recolección de datos en campo para la obtención de características de sus equipos e instalaciones, últimamente las fotos son una ayuda para tener algún detalle.
- Levantamiento del estado general de cada uno de sus capacitores instalados si fuera el caso.
- Medición de todos los parámetros eléctricos (V, A, KW, KVARL, KVARC, F.P., Hz), así como el THD en corriente y voltaje, y las armónicas individuales en voltaje y corriente hasta la 50ª armónica, en el secundario de los transformadores principales y en cada una de las máquinas más importantes de sus instalaciones eléctricas.

7.2.2 Levantamiento eléctrico y recolección de datos

Consiste básicamente en la recopilación de datos de la placa y capacidades de cada una de las cargas, así como verificar que se encuentre bien instaladas en base a la NOM-001-SEDE-2012(UTILIZACIÓN) o las normas internacionales de instalaciones eléctricas según sea el caso, para posteriormente actualizar o realizar planos eléctricos As-Built (prácticamente de como quedo después de los ajustes en obra) de toda la planta o nave industrial. La actualización de los planos eléctricos de las instalaciones de cada cliente, serán supervisadas, firmadas y autorizadas por una unidad verificadora y para tener una idea clara de lo

que se tiene. Con esta actualización podremos verificar en un futuro las distintas áreas de oportunidad que sirvan para generar una base de datos necesarios para realizar los estudios posteriores a su sistema.

Para el levantamiento, la verificación de los datos debe hacerse en forma cuidadosa y tomando en cuenta las medidas de seguridad para recabar la siguiente información:

- Contar con un recibo de la compañía suministradora (CFE), verificación de la carga instalada y demanda contratada. Solicitar al cliente
- Si existiera la última actualización en físico o en digital del proyecto aprobado con valores finales para referencia. Solicitar al cliente
- Si existiera plano que se entregó a la compañía suministradora con valores de potencia máximos y mínimos de corto circuito monofásico y trifásico, así como la relación X/R del sistema de suministro en el punto de acometida a la planta. Esto por lo regular lo da la compañía suministradora en el resolutivo cuando se hace contrato y en algunos DU aparecen. Solicitar al cliente
- Datos de placa completos del transformador o transformadores, así como de su ubicación, en ocasiones no todos se encuentran en la SE.
- Datos de placa completos de tableros generales de distribución, así como de los de emergencia
- Para MT (acometida) y BT (Alimentadores) Datos completos de longitud, calibre, tipo de material, caída de tensión, canalización y número de conductores por fase de alimentadores, así como de electro ductos.
- Datos completos de las puestas a tierra de la SE (transformadores, tableros, plantas de emergencia, etc.).
- Datos de placa completos de los interruptores en MT y BT, con sus ajustes actuales.
- Datos de placa completos de fusibles en MT y BT.
- Datos de placa completos de los tableros de distribución en MT y BT.
- Datos de placa completos de los CCM.
- Superficie en [m²] de la SE y ubicación de equipos, así como la altura y equipo de seguridad y alumbrado.
- Datos completos de Subestación Receptora, Seccionador o Murete de Derivadores

Los tres puntos principales que se deben destacar de acuerdo a lo anterior en una instalación eléctrica para un estudio de calidad de la energía en presencia de armónicos son:

- a) El transformador de distribución del cual se alimenta la instalación eléctrica:
 - Foto de placa de datos
 - Inspección visual de las conexiones
 - Posición del "TAP"
 - Tipo de conexión (Delta-Estrella)
 - Capacidad
 - Tipo
 - Impedancia
 - Relación de transformación
 - Tipo de norma J o K
 - Medición de temperatura

- Existencia de vibraciones
- Fugas de aceite
- Conexión del sistema de puesta a tierra
- Rastros de corrosión
- Detección de zumbidos (posible arqueo, mala conexión).

b) Tableros eléctricos

- Inspección visual de las conexiones
- Medición de la impedancia del conductor de puesta a tierra y neutro
- Verificación de la rotación de fases
- Calibres de los conductores cumplen con la NOM-001-SEDE-2012
- Detección de zumbidos (posible arqueo, mala conexión)
- Determinar la presencia de olor a quemado. (Posiblemente de una mala conexión o sobrecarga del conductor.

c) El Sistema de Puesta a Tierra (SPT)

- Diseño de la puesta a tierra de la instalación como lo establece la NOM-001-SEDE-2012
- Inspección visual de las conexiones y electrodos en busca de indicios de corrosión o posible desconexión.
- Medición de corriente en el conductor del electrodo de puesta a tierra
- Medición de la resistencia en el SPT

Otra inspección que se debe de realizar consiste en revisar los elementos físicos y ambientales que pueden influir en la red de distribución primaria de la empresa eléctrica suministradora. Los elementos que puedan causar perturbaciones de tensión desde la red de distribución.

d) Inspección al circuito de acometida

- Bancos de capacitores conmutables
- Cargas vecinas con motores de gran potencia
- Mal estado del conductor (roturas, degradación o mala instalación)
- Alta presencia de tormentas eléctricas
- Altas impedancias en la red primaria (calibre del conductor no adecuado)

Por ultimo las mediciones con el analizador de redes que al principio lo mencionamos es el que nos dará los parámetros eléctricos.

e) Medición en cargas sensibles

- En el secundario del transformador
- En convertidores de frecuencia o drive
- Motores de gran capacidad
- UPS
- PLC
- Sistemas de computo
- Y cualquier equipo eléctrico que posea un control o un sistema de conversión CA-CD o CA-CA

Todas estas observaciones nos ayudaran a conocer el sistema, diagnosticar y tener más herramientas para el análisis donde además podremos fortalecer el reporte y dar una medida correctiva adecuada.

7.3 Interpretación de explorar la red eléctrica del usuario

Conocer los problemas y tipos de cargas que posee una instalación eléctrica nos ayuda a realizar una entrevista con el usuario donde se aclaran incógnitas que el investigador de calidad de energía debe realizar:

¿Qué tipo de equipos experimentan problemas?

¿Qué tipo de daño han presentado?

¿Es una carga sensible?

¿Qué sensibilidad presentan estos equipos?

¿El equipo presenta problemas desde que fue instalado?

¿Cuándo comenzaron los problemas?

¿Cuándo ocurren estas perturbaciones (hora, día)?

¿Son recurrentes o no?

¿Recientemente han realizado cambios al sistema de puesta a tierra de la instalación?

¿Posee la instalación motores de gran potencia?

¿Observa caídas en la luminosidad de los focos incandescentes?

7.3.1 Mediciones efectuadas

Para la elaboración del reporte se deben tomar las mediciones de los siguientes parámetros eléctricos

Voltaje de fase a fase, fase a neutro y trifásico

Corrientes de fase a fase, fase a neutro y trifásico

Potencia real por fase y trifásica

Potencia aparente por fase y trifásica

Potencia reactiva por fase y trifásica

THD total, en voltaje y corriente

Factor de potencia por fase y trifásica

Especificar los puntos donde se tomaron o tomarán las mediciones como acometidas, alimentadores, salida del Tr, cargas sensibles como variadores de frecuencia o drives, UPS entre otros equipos de interés.

7.3.2 Equipo utilizado

Como ya hemos mencionado en el tema 2.2, el uso de un equipo de medición adecuado para ayudar a corregir problemas de armónicos es el que debemos utilizar para la captura de los distintos parámetros eléctricos como las formas de onda y armónicas, los cuales deben de realizar la transformada rápida de Fourier.

7.4 Análisis, Ingeniería, reporte y recomendaciones a todos los problemas

En este apartado se empieza a dar una solución que mejore las condiciones del sistema, pues a estas alturas ya se tiene el panorama real de lo que ocurre en las instalaciones por lo cual es necesario empezar a diagnosticar para poder ofrecer una solución fundamentada con las mediciones y las inspecciones realizadas, a continuación, el análisis es el que nos permite decidir la medida correctiva y el reporte una conclusión de lo que la investigación nos dio.

7.4.1 Análisis

Aquí es donde se hace el vaciado de consideraciones todas las medidas correctivas que se pueden ocupar, para posteriormente elegir una, hacer los cálculos y dimensionamiento y poder recomendar.

7.4.2 Reporte técnico y recomendaciones

En el reporte transmitimos al cliente las conclusiones de las investigaciones que se hicieron a las instalaciones, el cual contiene:

- a) Evaluación del estado de sus capacitores.

- b) Determinación de la potencia activa necesaria para alcanzar los niveles del factor de potencia indicados por la planta., así como la localización de los equipos que resulten recomendar.
- c) Medidas correctivas, recomendación y análisis de la reducción de pérdidas al instalar capacitores, filtros de absorción o reactores.
- d) Gráfica de la onda de tensión y de corriente, así como los porcentajes individuales en corriente y tensión (Gráfico de barras), de cada una de las mediciones realizadas.
- e) Diagrama unifilar simplificado con la instalación actual y con los equipos recomendados.
- f) Tabla numérica de cada uno de los parámetros eléctricos, de cada una de las mediciones.
- g) Especificación técnica de los equipos a recomendar.

El reporte, de esta forma, confiere una mayor utilidad a los datos, pues permite encontrar las áreas de oportunidad y crear una base donde se exhibe la información de una manera gráfica y entendible para el lector.

8 Aplicación practica

En este apartado daremos lugar a dos problemáticas que se atendieron en el año 2017, de donde, con la información que se obtuvo se realiza una propuesta técnica y económica viablemente posible, además, se presenta el comportamiento de los equipos principales que generan bajo factor de potencia para estos casos, para seleccionar de manera óptima la medida correctiva que sea capaz de mejorar la calidad de la energía eléctrica vista desde el usuario.

La propuesta de la aplicación práctica 1, se presenta el diseño de un banco de capacitores donde se presenta un factor de potencia bajo para una nave industrial de la empresa que se dedica al almacenamiento y refrigeración de alimentos perecederos, finalmente comprobar los objetivos logrados. Además, basándonos en el histórico del recibo de luz de la compañía suministradora CFE poder calcular y dimensionar la potencia reactiva que necesite dicho sistema para el mejoramiento de la calidad de la energía eléctrica; este procedimiento se analiza dentro de un ambiente eléctrico contaminado por potencia reactiva, a fin de mejorar el factor de potencia en el sistema.

Para determinar si hay una buena calidad en el servicio de energía, debe conocerse con certeza la magnitud y tipo de armónicos presentes en la red y la fuente que los produce, con el fin de determinar la medida correctiva más apropiada. Para tal efecto debe seguirse un método de solución que garantice que las magnitudes de operación satisfagan las características de equipos estandarizados y que las sobretensiones por efecto de armónicos no filtrados sean tolerables. Además, se verifica que los valores satisfagan los límites indicados en la norma IEEE-519. Un aspecto que finalmente se menciona es, el relacionado con la especificación apropiada de los elementos de acuerdo con equipos de fabricación normalizada.

La propuesta de la aplicación práctica 2 se presenta la selección de un filtro de corrientes armónicas para una nave industrial de comercialización de bandas para uso automotriz que, también ayudándonos de las mediciones, se hace el dimensionamiento inicial del capacitor. Con un primer valor de éste se seleccionan los distintos escenarios. Utilizando el flujo de armónicos se calculan los niveles de corriente por los elementos y se verifica que no excedan los nominales. En caso de ser ellos excedidos se modifican los parámetros y se hacen nuevas corridas hasta que se obtengan valores satisfactorios. El procedimiento es ilustrado en una planta industrial, aunque puede ser usado igualmente en sistemas de distribución asociados a empresas de energía.

Para ambos casos se presentan las propuestas técnicas y económicas que permitan la solución del problema presentado a cada caso.

8.1 Propuesta técnica económica de aplicación práctica 1

8.1.1 Tipo de propuesta

PROPUESTA TÉCNICA-ECONÓMICA

IDENTIFICACIÓN PROPUESTA

Tipo de solicitud:

a. Propuesta: Número 2017-001.

b. Pre propuesta

8.1.2 Datos generales

Título: Suministro e instalación de equipo para corrección del factor de potencia a nave industrial mediante banco de capacitores.

Demanda atendida: se cuenta con una subestación particular de 750 [kVA] que atiende una carga instalada y una carga demandada 300 [kW] el factor de potencia es de 88.78 por ciento de acuerdo al último mes de facturación de marzo del 2017, el cual se considera bajo de acuerdo a los estándares de CFE del 90 por ciento.

8.1.3 Alcance

La presente tiene como objetivos

Generales

Establecer los aspectos técnicos, económicos, políticas y lineamientos que deben cumplir los usuarios, desarrolladores, proyectistas eléctricos en evaluar y analizar los niveles permitidos para el factor de potencia y las corrientes armónicas en sistemas de baja tensión.

Individuales

Revaloración de la infraestructura actual para la colocación de un equipo que corrija el factor de potencia.

Apegarnos a la normativa existente por parte de la compañía suministradora, así como de las normas nacionales o internacionales según sea el caso para la determinación de los trabajos técnicos más económicos.

Contribuir con las mejoras y lineamientos a la red de una manera segura como lo describe el reglamento de la ley de del servicio público de la energía eléctrica en el artículo 64. Reformado en el DOF el 24/08/2014.

8.2 Reporte

Se trata de una de las plantas de la empresa dedicada a la refrigeración ubicada en Cuautitlán Izcalli, la cual actualmente opera con una subestación particular de 750 kVA que abastece a tres compresores de 150

C.P.45 con una tensión de 460 V, 3F, 60 Hz., un enfriador con dos motores de 10 C.P. y un TR de 75 kVA tipo seco para servicios generales, todo esto opera con un banco de capacitores fijo de 50 [kVAR], sin embargo presenta bajo factor de potencia, a continuación se presenta el diagrama unifilar que se obtuvo en la visita, como lo mencione antes, esta planta no lo tenía por lo que se tuvo que realizar.

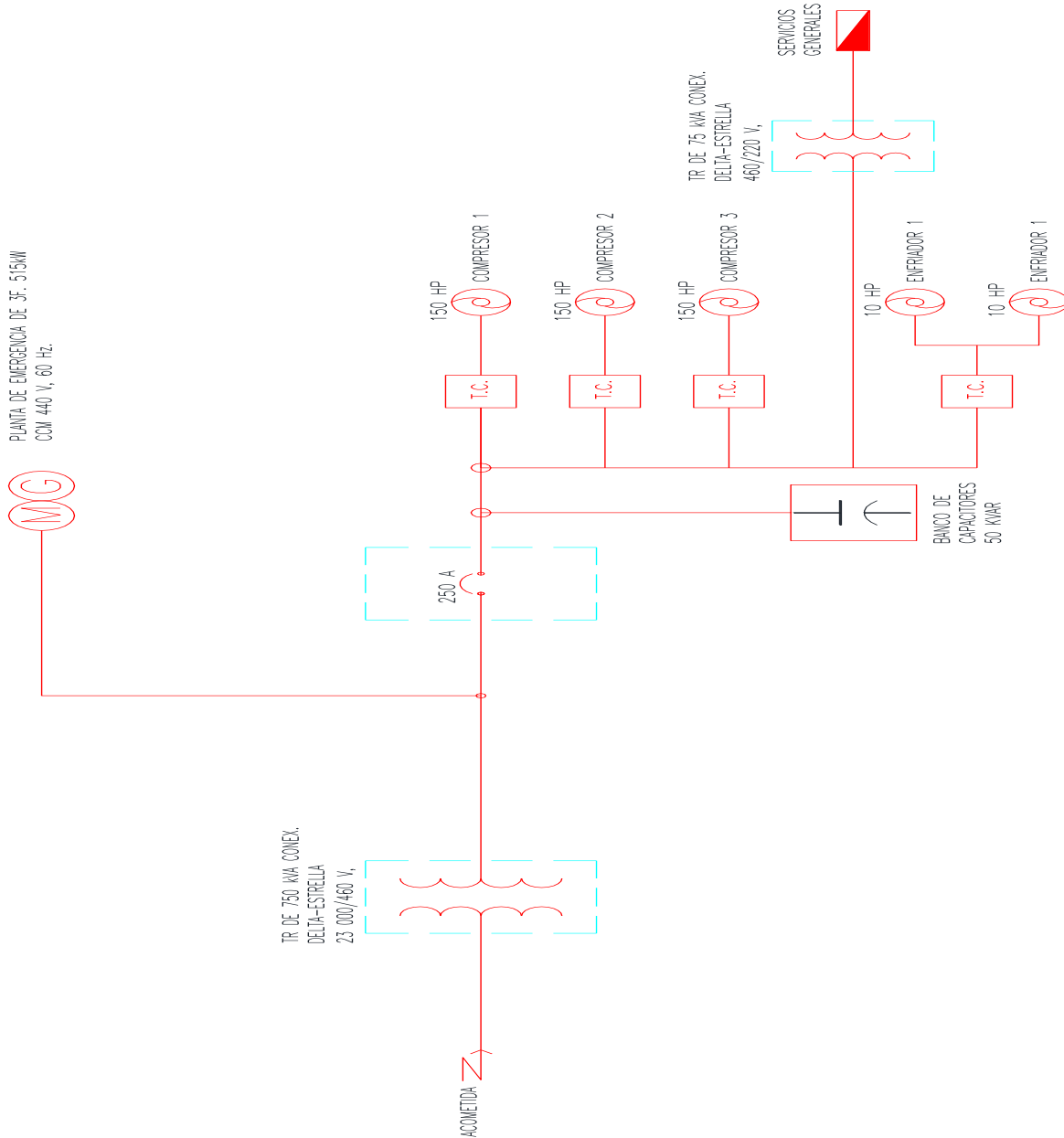


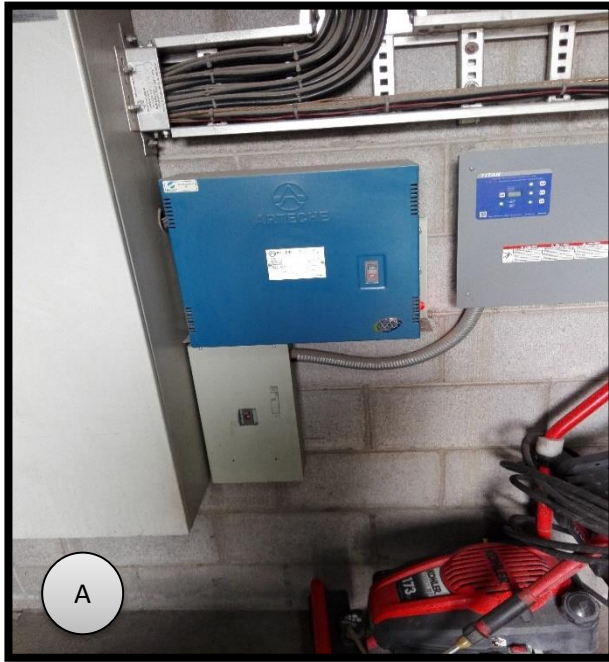
Figura 34. Diagrama unifilar de planta 1

Fuente Visita a campo

⁴⁵ Caballo de Potencia (H.P siglas en ingles)

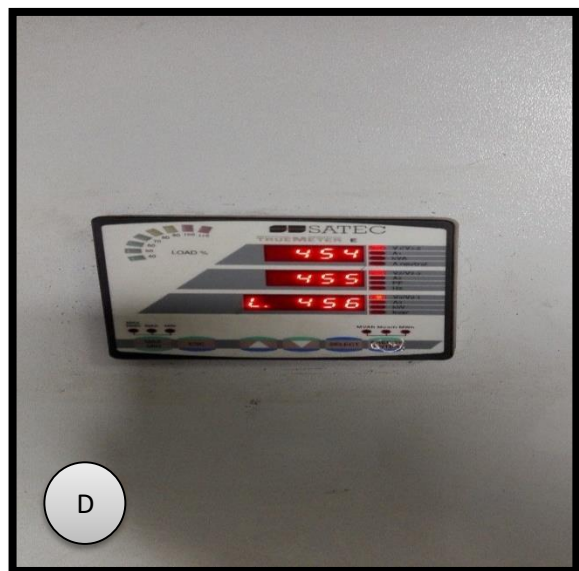
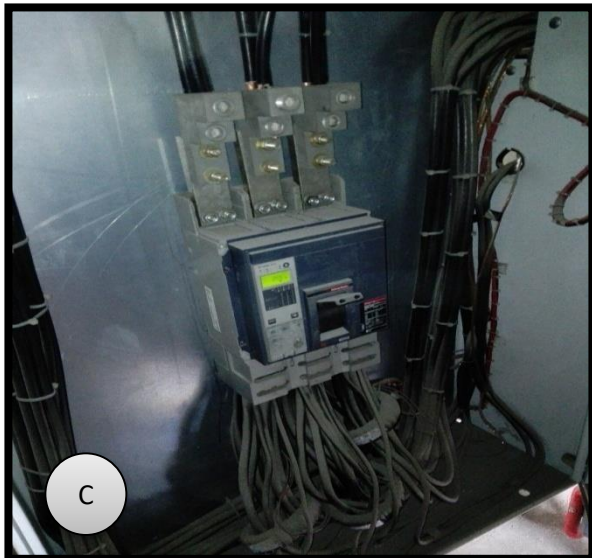
8.2.1 Levantamiento y recolección de datos para la valoración de instalaciones y optimización de los consumos de energía.

- Problemas de factor de potencia, A. Se tiene instalado un banco de 50 [kVAr], B. Placa de datos
- C. Mala distribución de equipos, todos los alimentadores principales llegan a un interruptor




principal en la planta.

- D. La planta cuenta con un equipo de medición independiente. –



8.2.2 Recibo de la compañía suministradora CFE

AVISO RECIBO



Comisión Federal de Electricidad

Av. Paseo de la Reforma Num. 164
Col. Juárez, Ciudad de México C.P. 06600.
RFC: CSS160330CP7
CFE SUMINISTRADOR DE SERVICIOS BÁSICOS

Rata
82DL20B818250120

Periodo
28 FEB 17 A 31 MAR 17

Función y periodo	Lectura actual	Lectura anterior	Diferencia	Totales
kWh intermedia				64,909
kWh punta				16,090
kWh base				175
kWh armonía				194
kWh punta				186
kVAh				62,742
Factor de potencia %				88.78

Total a pagar:
\$273,843.00

DOCIENTOS SETENTA Y TRES MIL OCHOCIENTOS CUARENTA Y TRES PESOS 00/100 (MXN)

Fecha límite de pago:
12 ABR 2017

Tarifa	Carga contratada	Demanda contratada	Multiplicado
HM	300	300	240

Conceptos	Totales	Precios unitarios
Energía en intermedia kWh	64,909	1,47110
Energía en punta kWh	16,090	2,60750
Demanda facturable kW	189	225,41000

Avisos importantes

- Corfe a partir de 13 ABR 2017.
- Nos transformamos para servirte mejor.
- Servicio a Clientes Teléfono 071.

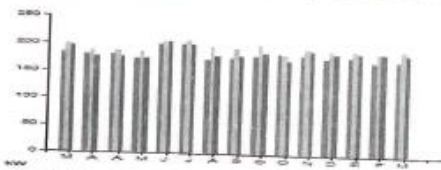
Datos Fiscales del Receptor

IREDO304J17
PIRULES MZ11 LOTE 9
CUAUTITLAN IZCALLI, MEK.

Serie: LA Folio: 000101376189
Foto Fiscal: EC44B89B-BF4B-4236-803A-06C0B028A321
N. Certificado del SAT: 0000100000300404988
No. certificado del CSD: 0000100000040103045
Fecha y Hora de certificación: 2017-04-01T15:34:13

Unidad de medida: No Aplica
Método de pago: NA
Régimen Fiscal: RÉGIMEN GENERAL DE LEY DE PERSONAS MORALES

Datos Históricos



Mes	Demanda máxima kW	Consumo total kWh	FP %	F.C. %	Precio kWh
ABR 16	181	7,432	91.24	82	1,2558
ABR 16	181	100,211	92.39	79	1,1953
MAY 16	179	112,537	81.39	81	1,1401
JUN 16	205	106,337	80.78	72	1,2673
JUL 16	204	127,474	81.54	82	1,2862
AGO 16	195	114,576	82.50	79	1,3328
SEP 16	185	113,710	88.75	81	1,3641
OCT 16	191	117,358	88.80	84	1,3379
NOV 16	193	120,191	87.90	90	1,3104
DIC 16	190	122,729	88.59	86	1,5112
ENE 17	190	122,228	88.49	85	1,5443
FEB 17	189	104,673	89.36	80	1,5878
MAR 17	189	121,016	88.78	84	1,3096

Conceptos	Estado de cuenta	Importe
Energía		186,655.21
Demanda Facturable		42,602.49
Cargo Factor de Potencia		1,834.06
Subtotal		231,091.76
IVA 16%		36,974.68
Facturación del Periodo		268,066.44
Derecho de Alumbrado Público		5,777.29
Adeudo Anterior		215,766.02
Su Pago		215,766.00
Total		\$273,843.75

Cadena original Este documento es una representación impresa de un CPDI


Pago en una sola exhibición

03 APR 2017 18:13:45 hrs. Asociación contra Subestación Victoria s/n Col. Ejido de San Isidro Cuauhtlan local Cuauhtlan local Edo Mex. Mexico CP 54799

568110810489

01 568110810489 170412 000273843 0

PORTE PAGADO
CANTAS
CA98-1507
AUTORIZADO POR SEPOMEX



Cuenta: 82DL20B818250120

Total a pagar:
\$273,843.00

DOCIENTOS SETENTA Y TRES MIL OCHOCIENTOS CUARENTA Y TRES PESOS 00/100 (MXN)

Clave de envío: Buro De Credito

TALÓN DE CAJA

Figura 35. Recibo de consumo de energía eléctrica de la planta

Fuente proporcionada por el usuario

8.3 Selección de medida correctiva

Únicamente nos enfocaremos en la corrección del factor de potencia debido a que las instalaciones no presentan gran cantidad de electrónica de potencia que es la que nos hiciera pensar en problemas de armónicos, por lo que se va a proponer un banco de capacitores con las características que nos den los cálculos.

Para comenzar con la selección empezaremos con los datos del recibo:

DEL RECIBO DE CFE	ENERGIA EN Kw	162.66
	ENERGIA EN kVAR	84.33
	FACTOR DE POTENCIA	88.78
	ENERGIA EN kVA	180.00

Se propone mejorar el factor de potencia lo mejor posible, el cual se contempla 99 por ciento.

8.3.1 Cálculos

Como tenemos un centro de carga en kW y el factor de potencia es $\cos \theta$, la potencia del banco de capacitores que es necesario instalar para pasar a un nuevo factor de potencia $\cos \theta_1$, viene dada por la expresión:

$$kVAR = kW(\tan \theta - \tan \theta_1) \dots\dots\dots (42)$$

Sustituyendo valores

$$kVAR = 162.66(\tan (\cos^{-1} 0.8878) - \tan (\cos^{-1} 0.99))$$

$$kVAR = 61.14 [kVAR]$$

Como ya se tiene un banco instalado fijo de 50 [kVAR] se suma al obtenido quedando un banco de 111.14 [kVAR].

Los fabricantes no tienen esa medida comercial así que el inmediato superior es 120 kVAR en 480 V.

El voltaje de la red es 460 V, los fabricantes los manejan a 480 V, sin embargo, cuando los capacitores operan a un voltaje inferior a su voltaje nominal, disminuye la potencia reactiva proporcionalmente al cuadrado de la relación de los voltajes como en la siguiente expresión:

$$kVAR_{suministrados} = \left(\frac{\text{voltaje aplicado}}{\text{voltaje nominal}} \right)^2 \times kVAR_{nominales} \dots\dots\dots (43)$$

Sustituyendo valores

$$kVAR_{suministrados} = \left(\frac{460}{480} \right)^2 \times 120 \text{ kVAR}$$

$$kVAR_{suministrados} = 110.20 \text{ [kVAR]}; \text{ Con un voltaje de 460 V}$$

En el reporte hay una foto de 454 [V] por lo que los $kVAR_{suministrados} = 107.35 \text{ kVAR}$

Ahora debemos tener en cuenta la resonancia debido a la instalación de un banco de este tipo por la expresión:

$$h = \sqrt{\frac{kVA_{CC}}{kVAR_{efectivos}}} \approx h = \sqrt{\frac{\frac{kVA}{\%Z} \times 100}{kVAR_{efectivos}}} \dots\dots\dots (44)$$

Sustituyendo valores

$$h = \sqrt{\frac{\frac{750}{6.5} \times 100}{110.20}} = 10.23$$

- La red entraría en resonancia en la 10° armónica que sería la fase de secuencia positiva, los armónicos en tensión generan en los motores un campo giratorio en el mismo sentido de la componente fundamental.
- Si el valor de la resonancia fuera 11° se produciría un campo giratorio en sentido inverso de la componente fundamental lo que nos indicaría un problema de armónicos.
- Si el valor de la resonancia fuera 9° los armónicos de orden 3n de corriente se propagarían por el retorno por neutro.

8.3.2 Análisis y escenarios

Una vez realizado el cálculo se presentan tres escenarios donde se empleará un análisis técnico-económico para su aprobación, a continuación, describiremos brevemente estos:

Escenario uno

Instalación de un banco de capacitores de 120 [kVAr] tipo automático

Escenario dos

Instalación de un banco de capacitores de 30 [kVAr] con interruptor termo magnético

Escenario tres

Instalación de un banco de capacitores de 30 [kVAr] con interruptor termo magnético

- Propuesta del escenario uno

Banco de capacitores de operación automática, tipo compacto de 120 [KVAR], 480 V, 60 Hz, trifásico, uso interior, marca SALGAR. Fabricado según normas ANSI 18, IEC 831 y NMX-J-203. Cat. AC-4120-06. Para reemplazar el banco de capacitores de 50 [kVAr] fijo operando actualmente.

La conexión de este banco en la instalación eléctrica, corregirá el factor de potencia hasta valores de 99 por ciento, sin embargo, puede acarrear problemas de resonancia por la amplificación de la quinta y séptima armónica de estar operando de manera fija, si por la instalación eléctrica fluyen corrientes armónicas por lo que la operación de este será automática para abatir esos problemas como en la figura 36.

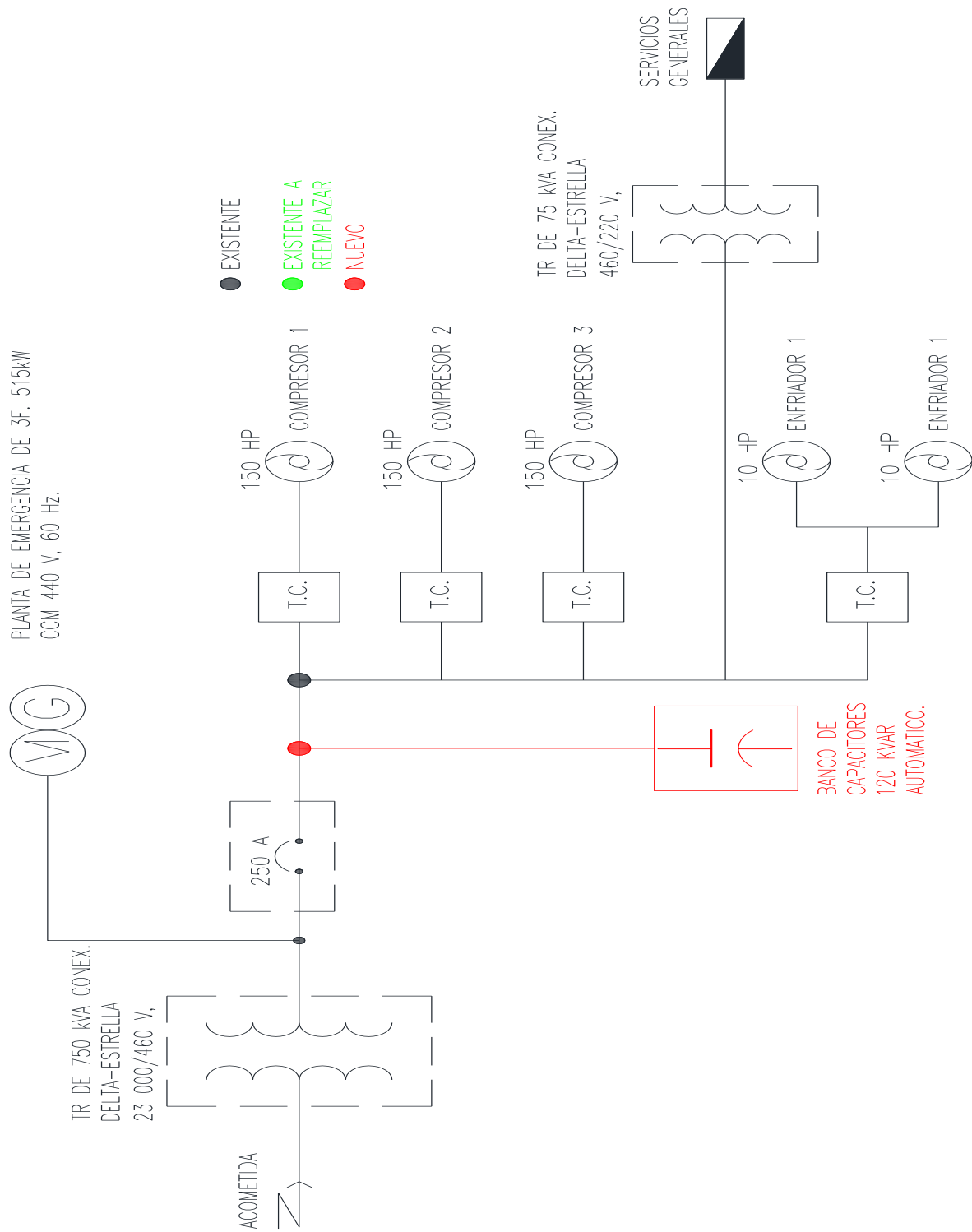


Figura 36. Diagrama unifilar de planta 1 con equipo propuesto uno

Fuente generada propuesta

- Propuesta del escenario dos

Capacitor de potencia trifásico, de 30 KVAR, 480 V. 3F. 60 Hz, marca SALGAR, servicio interior, gabinete NEMA 1, con resistencia de descarga y protegido por medio de un interruptor termo magnético. Cat. KT-4030. Para operar en conjunto con el banco de 50 kVAR quedando de la siguiente manera. La conexión de este banco en la instalación eléctrica, corregirá el factor de potencia hasta valores de 93 por ciento, puede presentar resonancia por la amplificación de la quinta y séptima armónica de estar operando de manera fija, se cumple con la norma IEEE-519 de no colocar más del 10 por ciento de la capacidad del transformador en potencia reactiva fija, ver figura 37.

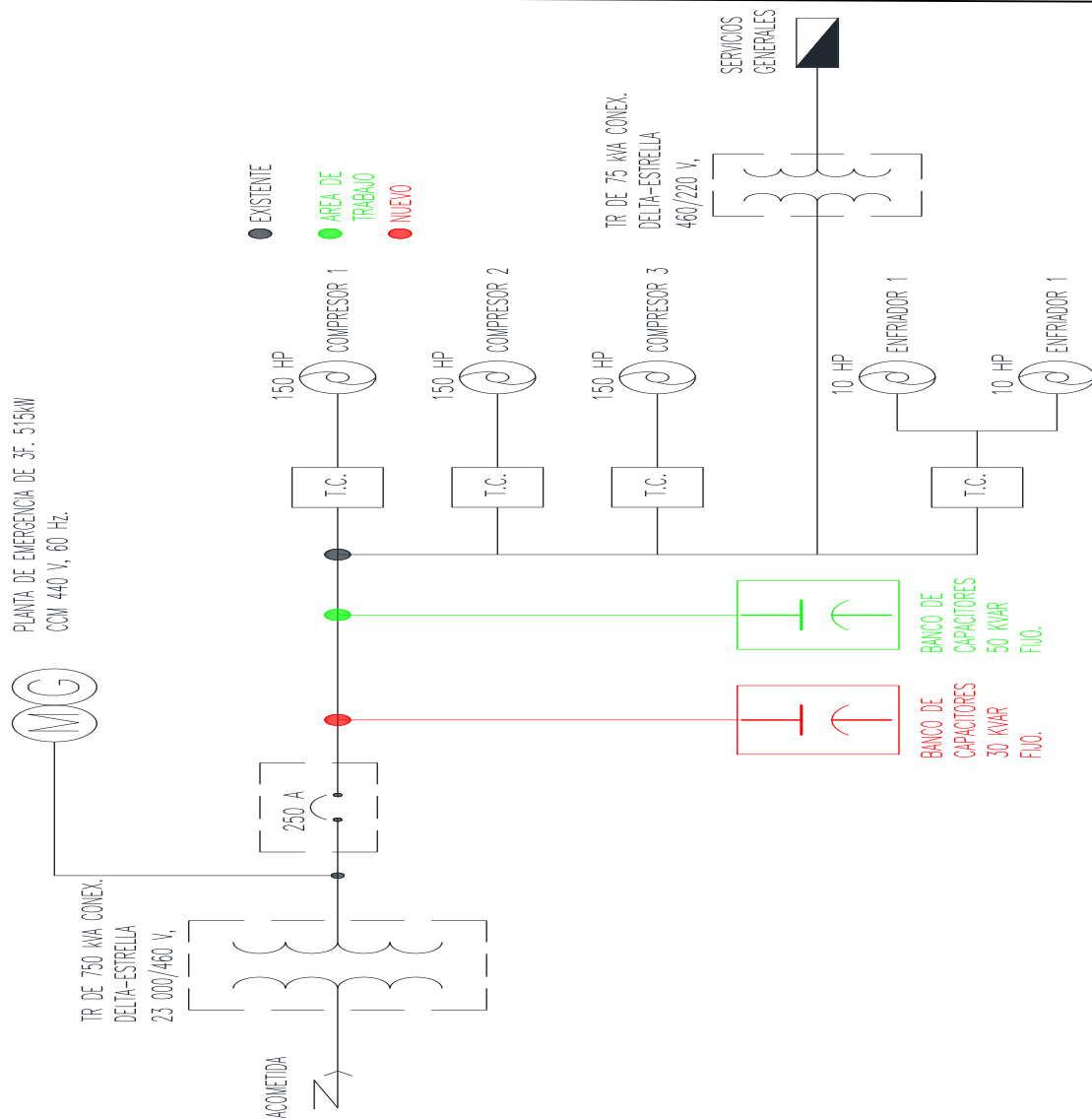


Figura 37. Diagrama unifilar de planta 1 con equipo propuesto dos

- Propuesta del escenario tres

Conjunto de capacitor – reactor, de operación fija, de 30 KVAR, 480 V, 60 Hz, trifásico, uso interior, marca SALGAR. El equipo está alojado en un gabinete tipo NEMA 1 y protegido por medio de un interruptor termo magnético. Fabricado según normas ANSI 18, IEC 831 y MNX-J-203. Cat. CCRT-4030. Para operar en conjunto con el banco de 50 kVAR quedando de la siguiente manera. La conexión de un conjunto de capacitor-reactor en la instalación eléctrica, corregirá el factor de potencia hasta valores de 93 por ciento, Los capacitores con reactor de rechazo son equipos diseñados para la corrección del factor de potencia, además, en sistemas con contaminación de corrientes armónicas y el riesgo de resonancia exista. La finalidad de instalar un reactor de rechazo en serie con el capacitor es evitar la elevación de los niveles de contaminación armónica presente en el sistema y evitar la sobrecarga en los capacitores, ver figura 38.

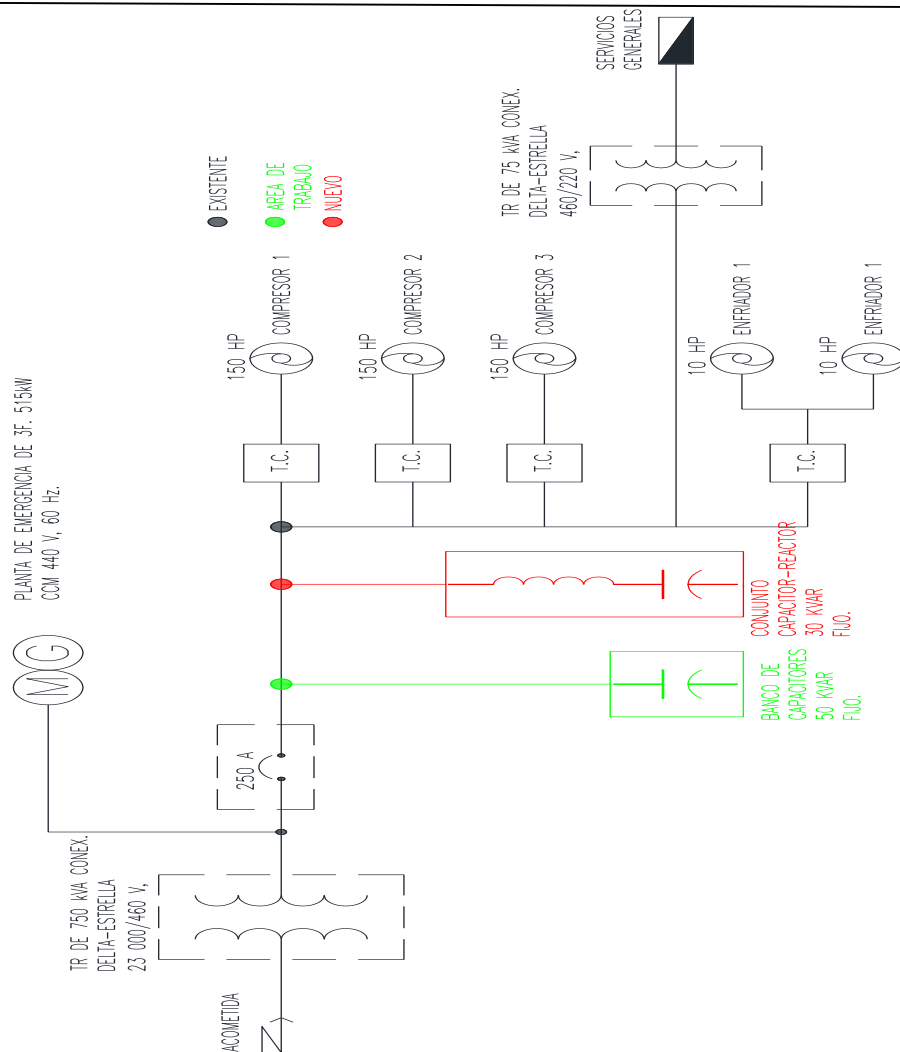


Figura 38. Diagrama unifilar de planta 1 con equipo propuesto tres

8.4 Estimación de costos y retorno de inversión

Las empresas tienen que saber además de la inversión que efectuara, los costos y el tipo de ahorro así como el retorno de la inversión donde se pueda tomar una decisión y comprender la productividad de sus inversiones, la tabla de a continuación refleja los ahorros estimados.

AHORROS ESTIMADOS							
	FACTOR DE POTENCIA ACTUAL	PENALIZACIÓN POR F.P. ACTUAL *	F.P CORREGIDO	BONIFICACION DEL F.P**	AHORRO MENSUAL TOTAL ***	COSTO DEL EQUIPO PROPUESTO	*TIR
ESCENARIO UNO	88.78	\$ 1,834.06	99	\$ 5,273.00	\$ 7,107.06	\$ 84,596.00	11.90
ESCENARIO DOS	88.78	\$ 1,834.06	93	\$ 1,834.00	\$ 3,668.06	\$ 13,058.00	3.56
ESCENARIO TRES	88.78	\$ 1,834.06	93	\$ 1,834.00	\$ 3,668.06	\$ 37,628.00	10.26

* ESTE CARGO SE SUMA A LOS CONCEPTOS DE ENERGIA Y DEMANDA FACTURABLE

** ESTE CARGO SE RESTA A LOS CONCEPTOS DE ENERGIA Y DEMANDA FACTURABLE

*** ESTE ES LA SUMA DEL CARGO ACTUAL MAS EL CORREGIDO

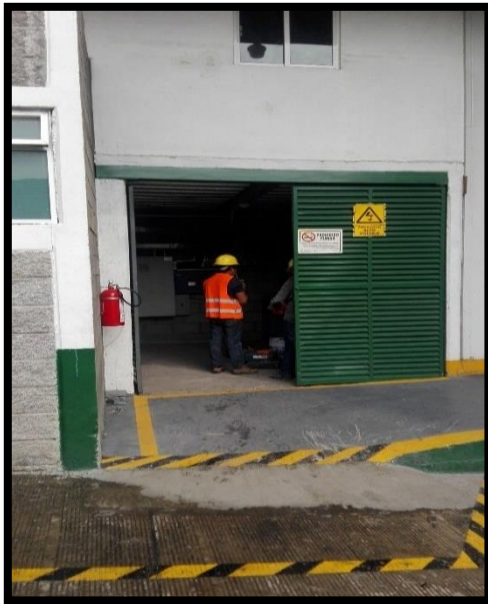
*TIR: TASA INTERNA DE RETORNO EN MESES

De lo anterior obtenemos lo siguiente

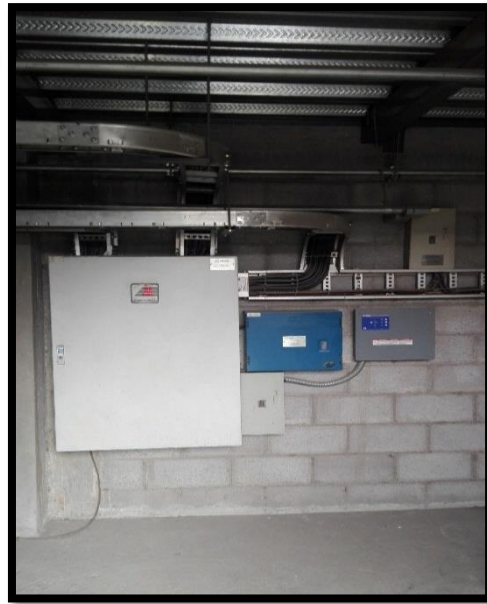
- La propuesta del escenario dos es la más barata, así como también las maniobras para su puesta en marcha.
- La propuesta del escenario uno y tres, se tiene que considerar un periodo de tres semanas más para colocar el equipo en su sitio.
- Cualquier escenario se consigue mejorar el factor de potencia y mejorar la calidad de vida de los equipos como envejecimiento de aislamiento de cables o devanados.
- Los retornos de inversión de las propuestas tienen un tiempo de 12 meses en el peor de los casos, es decir durante un año obtendremos los beneficios de la bonificación por factor de potencia, los equipos tienen una vida útil de 30 años por lo que de mantenerse así el sistema se va a estar recibiendo estos beneficios durante toda su operación.

8.5 Instalación de propuesta aceptada y resultados

Reporte fotográfico de instalación banco de capacitores en la planta, se aprobó la propuesta uno que fue el banco de capacitores de 120 kVAR.



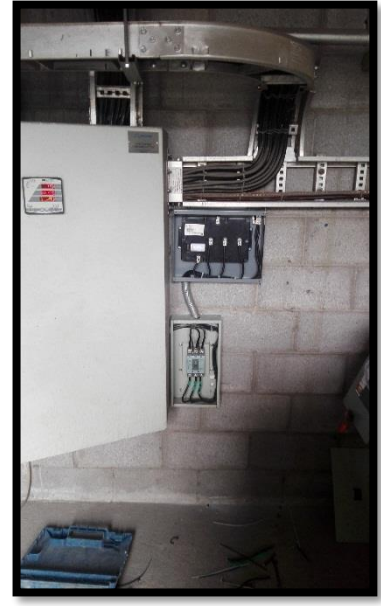
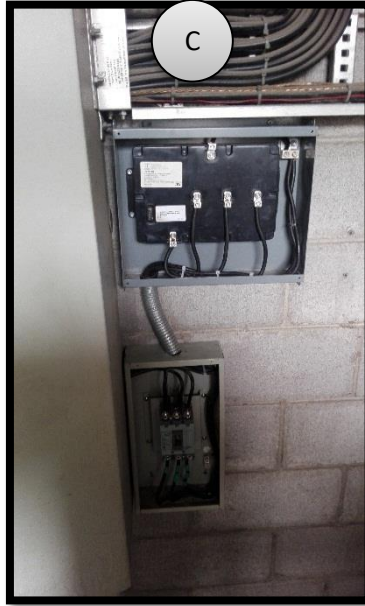
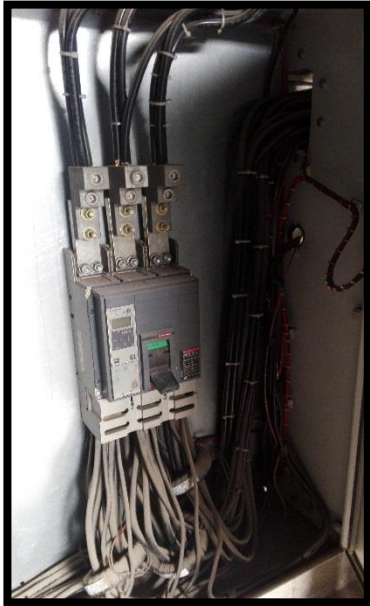
A



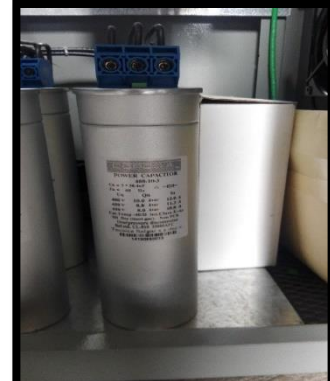
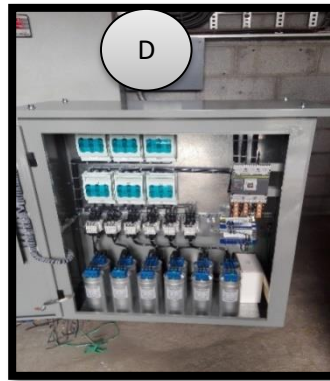
A. Sitio a colocar el banco de capacitores



B. Banco de capacitores Arteche que se retiró por el banco de capacitores nuevo



C. Equipos que se reubicaron por el banco de capacitores. -



D. Banco de capacitores. D1. Placa de datos que se aprobó "propuesta de escenario uno" a instalar. -

E. Conexión a interruptor principal de la planta lado banco. E1 Lado interruptor.-



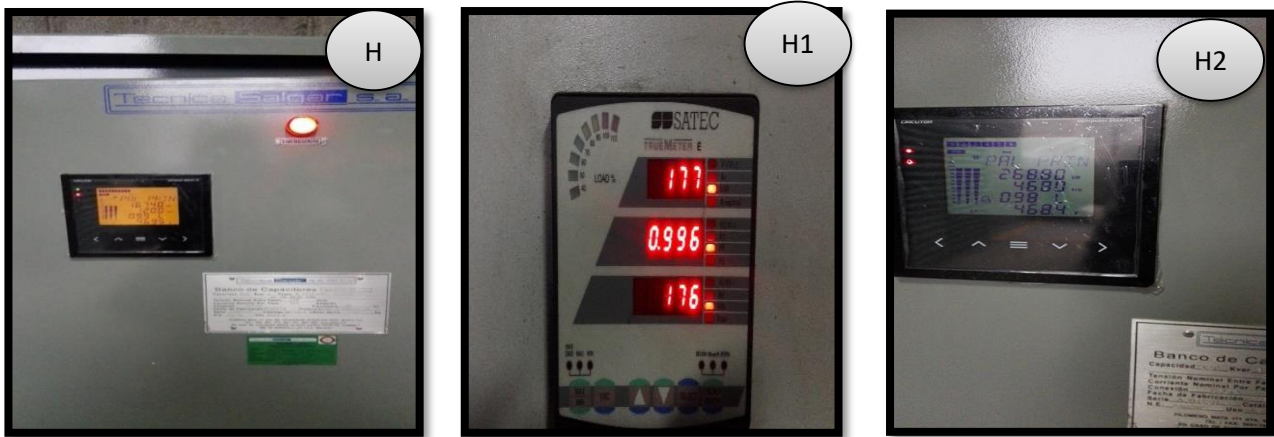
F. Conexión de TC y cable de control para registro de FP, voltaje, corriente y potencia real y reactiva. -



G. Energización de banco, imágenes siguientes




En las imágenes siguientes. H. Se lee un fp de 0.99 para una carga de 167 kW, que es idéntico al reportado por el equipo de la planta H1. –
En H2 se lee un fp de 0.98 cuando la carga sube a 268 kW. -



I. Manual en versión impresa y digital entregados en planta



8.5.1 Resultados obtenidos en recibo



Comisión Federal de Electricidad

Av. Paseo de la Reforma Núm. 164
Col. Juárez, Ciudad de México C.P. 06600.
RFC: CSS160330CP7
CFE SUMINISTRADOR DE SERVICIOS BÁSICOS

Número de Servicio:
568 110 810 489

Total a pagar:
\$258,275.00
(DOSCIENTOS CINCUENTA Y OCHO MIL DOSCIENTOS SETENTA Y CINCO PESOS 00/100 M.N.)

Fecha límite de pago:
12 AGO 2017

Nombre y Domicilio:
[Redacted]

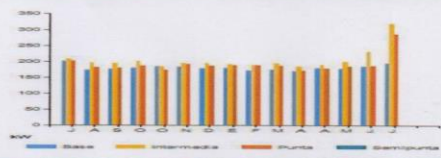
Ruta: 82DL20B818250120 Período: 30 JUN 17 A 31 JUL 17 No. Medidor: A032202

Tarifa: HM **Carga conectada:** 300 **Demanda contratada:** 300 **Multiplificado:** 240

Función y período	Lectura actual	Lectura anterior	Diferencia	Totales
kWh intermedia				77,642
kWh punta				7,243
kW base				194
kW intermedia				319
kW punta				266
kVAh				43,707
Factor de potencia %				94.49

Concepto	Totales	Precio unitarios
Energía en base kWh	1290	0.0000
Energía en intermedia kWh	77,642	1.22440
Energía en punta kWh	7,243	2.38780
Demanda facturable kW	296	222.94000

Datos Históricos



Mes	Demanda máxima kW	Consumo total kWh	FP %	F.C. %	Precio unitario
AGO 16	186	114,576	82.50	79	1.3328
SEP 16	185	113,710	88.75	81	1.3641
OCT 16	191	117,358	88.80	84	1.3379
NOV 16	177	8,162	87.90	90	1.3194
DIC 16	193	120,191	88.59	86	1.5112
ENE 17	190	122,729	88.49	85	1.5443
FEB 17	190	122,228	89.24	86	1.5878
MAR 17	189	104,673	89.36	82	1.7305
ABR 17	189	121,016	88.78	84	1.6096
MAY 17	176	3,988	87.81	90	1.7743
JUN 17	182	112,172	88.44	85	1.7544
JUL 17	189	122,602	88.02	83	1.5936
AUG 17	201	122,695	87.83	73	1.6310
SEP 17	296	126,165	94.49	53	1.7275

Avisos Importantes

- Corte a partir de 13 AGO 2017.
- Nos transformamos para servirte mejor.
- Servicio a Clientes Teléfono 071.

Datos Fiscales del Receptor

IRE080304117
PIRULRES MZIII LOTE 9
CUAUTITLAN IZCALLI, MEX.

Serie: LA Folio: 000107080669
Folio Fiscal: BBF5D464-0B98-42B0-80C6-5BC87724F000
N. Certificado del SAT: 00001000000406725461
No. certificado del CSD: 00001000000404010245
Fecha y Hora de certificación: 2017-08-01T22:23:15

Unidad de medida: No Aplica
Método de pago: NA
Régimen Fiscal: RÉGIMEN GENERAL DE LEY DE PERSONAS MORALES

Estado de cuenta

Energía	154,609.78
Demanda Facturable	65,990.24
Bonificación Factor de Potencia	2,647.20
Subtotal	217,952.82
IVA 16%	34,872.45
Facturación del Período	252,825.27
Derecho de Alumbrado Público	5,448.82
Adcuado Anterior	237,135.96
Su Pago	237,135.00
Total	\$258,275.05

Cadena original Este documento es una representación impresa de un CFDI **Pago en una sola exhibición**

568110810489 01 568110810489 470812 000258275 8

PORTO PAGADO
CARTAS
CAG-1199
AUTORIZADO POR SEPOMEX

Total a pagar:
\$258,275.00
(DOSCIENTOS CINCUENTA Y OCHO MIL DOSCIENTOS SETENTA Y CINCO PESOS 00/100 M.N.)

Cuenta: 82DL20B818250120 **Clave de envío:** Buro De Credito

Figura 39. Recibo de consumo de electricidad después de la instalación del equipo propuesto

Fuente Recibo de consumo eléctrico de planta

Se corrigió la penalización que se tenía, además, se obtuvo una bonificación de \$ 2,647.20, con esto el costo de recuperación fue de \$4,481.26, también pudieron incrementar su carga de 169 kW (dato con el que se hizo el cálculo para la selección) a 296 kW demanda máxima registrada. Actualmente la planta tiene más capacidad en cuanto a maquinaria operando por lo que la productividad también mejoró y es algo que no se consideró en la estimación de costos.

8.6 Propuesta técnica económica de aplicación práctica 2

El tipo de propuesta y el alcance es similar a la propuesta de la aplicación práctica 1 por lo que ya no lo repetiré en esta parte.

8.6.1 Datos generales

Título: Suministro e instalación de equipo para corrección del factor de potencia a nave industrial mediante filtro de corrientes armónicas.

Demanda atendida: se cuenta con una subestación particular de 750 [kVA] que atiende una carga instalada y una carga demandada 612 [kW] el factor de potencia es de 78.00 por ciento de acuerdo al resumen de mediciones de abril de 2017, el cual se considera bajo de acuerdo a los estándares de CFE del 90 por ciento.

8.6.2 Reporte

Se trata de una de las plantas de la empresa dedicada a la comercialización de bandas para uso automotriz ubicada en Cuautitlán Izcalli, la cual actualmente opera con un transformador de 750 kVA que abastece al tablero general normal del área Banbury 1 con una tensión de 440 V, 3F, 60 Hz., todo esto opera con un banco de capacitores fijo de 100 [kVAr], sin embargo presenta bajo factor de potencia, a continuación se presenta el diagrama unifilar que se obtuvo en la visita, como lo mencione antes, esta planta no lo tenía por lo que se tuvo que realizar. A continuación, en la figura 40 se muestra el diagrama unifilar de la planta.

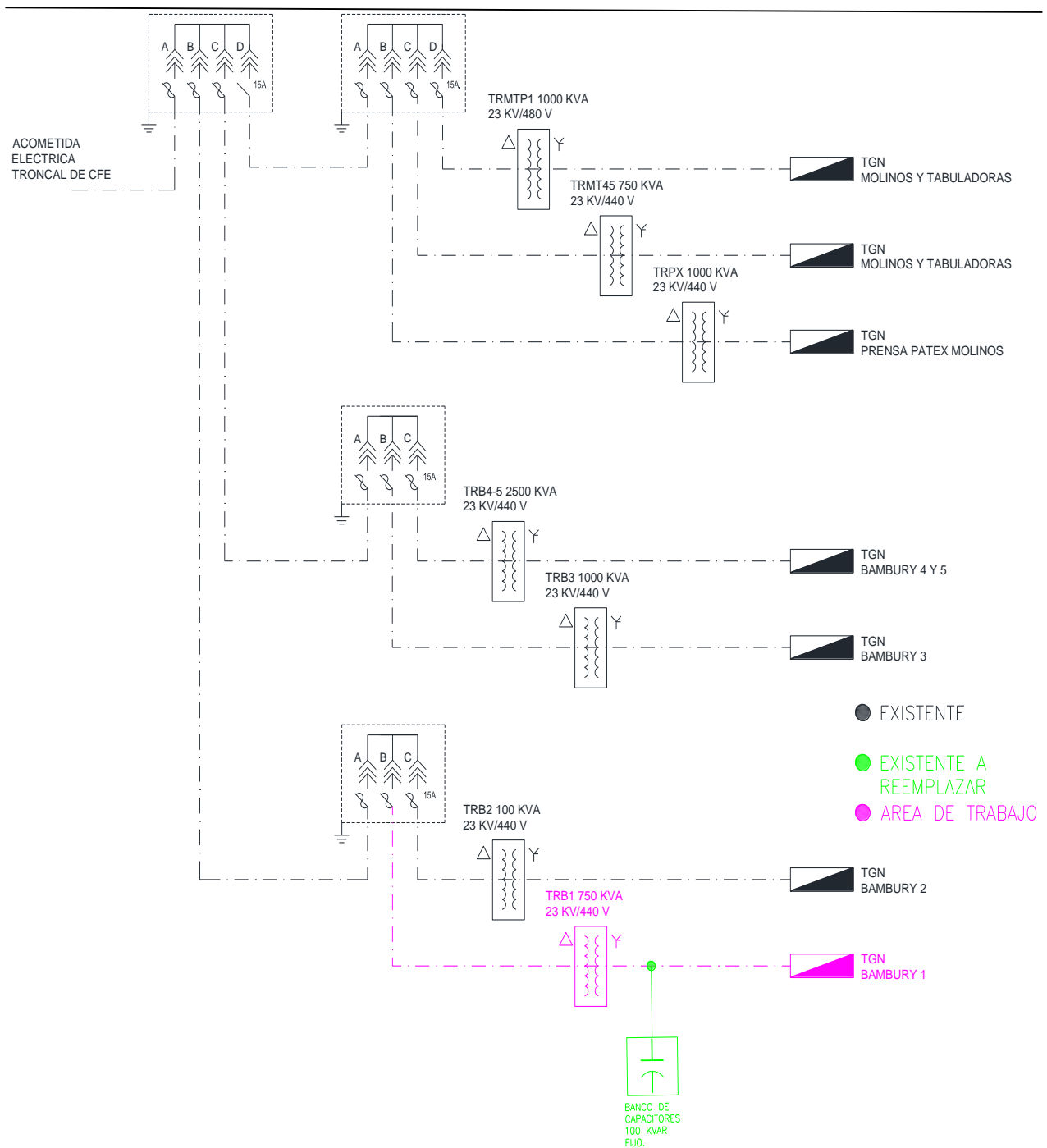


Figura 40. Diagrama unifilar de planta 2

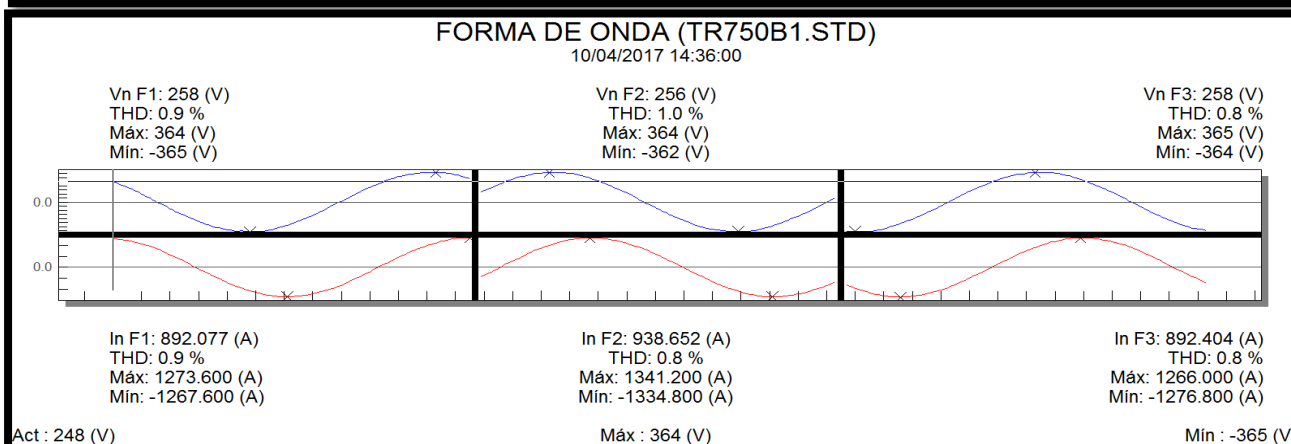
Fuente generada en visita de campo

8.6.3 Levantamiento y recolección de datos para la valoración de instalaciones y optimización de los consumos de energía.

Medición de armónicos en el transformador TR750 BANBURY 1 operación normal.

MEDICIONES CON 100 KVAR EN CAPACITORES FIJOS

Fecha 10/04/2017 14:36:00		Período: 00:00:15			
	L1	L2	L3	III	
Tensión Comp. [V]	441	438	442	440	~
Corriente [A]	1008	1060	995	1021	~
P. Aparente [kVA]					782
P. Activa [kW]	207	216	189		612
P. Inductiva [kvar]	155	162	170		487
P. Capacitiva [kvar]	0	0	0		0
Factor pot.	0.80	0.79	0.74		0.78
Frecuencia [Hz]					60.0



Fecha 10/04/2017 14:36:00					
Tensión fase 1			Corriente fase 1		
Vrms [V]:258	THD (%):0.9		Irms [A]:892.116	THD (%):0.9	
Fundamental [V]:258	Desfase (°):0.0		Fundamental [A]:892.077	Desfase (°):321.9	
Armónico	Amplitud [%]	Desfase (°)	Armónico	Amplitud [%]	Desfase (°)
2 (+)	0.076	52.0	2 (+)	0.245	244.1
3 (+)	0.053	81.9	3 (+)	0.227	192.1
4 (+)	0.103	98.7	4 (+)	0.102	16.0
5 (+)	0.279	125.7	5 (+)	0.369	292.0
6 (+)	0.047	102.3	6 (+)	0.077	167.8
7 (-)	0.613	263.7	7 (-)	0.389	68.0
8 (+)	0.067	8.4	8 (+)	0.073	14.3
9 (+)	0.109	62.6	9 (+)	0.066	243.1
10 (+)	0.085	94.0	10 (+)	0.067	134.2
11 (-)	0.224	81.3	11 (-)	0.304	246.3
12 (+)	0.023	239.2	12 (+)	0.038	143.9
13 (+)	0.355	30.2	13 (+)	0.512	267.6
14 (-)	0.017	211.1	14 (-)	0.064	145.5
15 (+)	0.064	6.0	15 (+)	0.116	357.5
16 (-)	0.065	272.5	16 (-)	0.043	301.1

8.6.4 Selección de medida correctiva

En la medición se observa una demanda de potencia reactiva máxima de 487 KVAR, con niveles de distorsión armónica de 0.9 % en tensión y 0.9 % en corriente, relativamente bajos.

El voltaje de operación es de 440 V, se propone mejorar el factor de potencia lo mejor posible, el cual se contempla 100 por ciento.

8.6.4.1 Cálculos

Como tenemos un centro de carga en kW y el factor de potencia es $\cos \theta$, la potencia del banco de capacitores que es necesario instalar para pasar a un nuevo factor de potencia $\cos \theta_1$, viene dada por la expresión:

$$kVAR = kW(\tan \theta - \tan \theta_1)$$

Sustituyendo valores

$$kVAR = 612(\tan(\cos^{-1} 0.78) - \tan(\cos^{-1} 1))$$

$$kVAR = 490.99 [kVAR]$$

Si seleccionamos el inmediato superior contemplando los 100 [kVAR] fijos que se tendría un filtro de la capacidad de 600 [kVAR]. Ahora el voltaje de la red es 440 V, los fabricantes los manejan a 480 V, sin embargo, cuando los capacitores operan a un voltaje inferior a su voltaje nominal, disminuye la potencia reactiva proporcionalmente al cuadrado de la relación de los voltajes como en la siguiente expresión:

$$kVAR_{suministrados} = \left(\frac{\text{voltaje aplicado}}{\text{voltaje nominal}}\right)^2 \times kVAR_{nominales}$$

Sustituyendo valores

$$kVAR_{suministrados} = \left(\frac{440}{480}\right)^2 \times 600 \text{ kVAR}$$

$$kVAR_{suministrados} = 504 [kVAR]; \text{ Con un voltaje de 440 V}$$

En el reporte hay una foto de 442 [V] por lo que los $kVAR_{suministrados} = 508 \text{ kVAR}$

De acuerdo con las mediciones tomadas se muestra que la potencia reactiva que se necesita en el sistema es de 487 [kVAR] por lo que este filtro nos puede abastecer sin problema.

Ahora debemos tener en cuenta la resonancia debido a la instalación de un banco de este tipo por la expresión:

$$h = \sqrt{\frac{kVA_{CC}}{kVAR_{efectivos}}} \approx h = \sqrt{\frac{\frac{kVA}{\%Z} \times 100}{kVAR_{efectivos}}}$$

Sustituyendo valores

$$h = \sqrt{\frac{\frac{750}{4.06} \times 100}{508}} = 6.00$$

- La red entraría en resonancia en la 6° armónica que sería la fase de secuencia cero, los armónicos de orden de 3n de corriente se propagarían por el retorno del neutro.
- El filtro dual puede absorber o rechazar las armónicas de quinta y séptima por lo que en este sistema están en niveles bajos y se drenan por el neutro.

8.6.4.2 Análisis y escenarios

Una vez realizado el cálculo se presenta un solo escenario que contempla varias opciones donde se empleará un análisis técnico-económico para su aprobación, a continuación, describiremos brevemente estos:

Escenario único

Instalación de filtro de corrientes armónicas de rechazo o absorción para 5ta y 7ma de 600 [kVAR] tipo automático

- Propuesta del escenario uno

Como ya se tiene un banco instalado fijo de 100 [kVAR] se suma al obtenido quedando un banco de 590.99 [kVAR]. Los fabricantes no tienen esa medida comercial así que el inmediato superior es:

Filtro de dual de corrientes armónicas de 600 KVAR, 480 V, trifásico, 60 Hz, 10 secciones de 60 KVAR c/u, fecha de fabricación 05/2017

La conexión de este filtro en la instalación eléctrica, corregirá el factor de potencia hasta valores de 100 por ciento, además, puede filtrar las armónicas de la quinta y séptima de estar operando de manera fija, por lo que la operación de este será automática para abatir esos problemas.

A continuación, se presenta el diagrama unifilar propuesto:

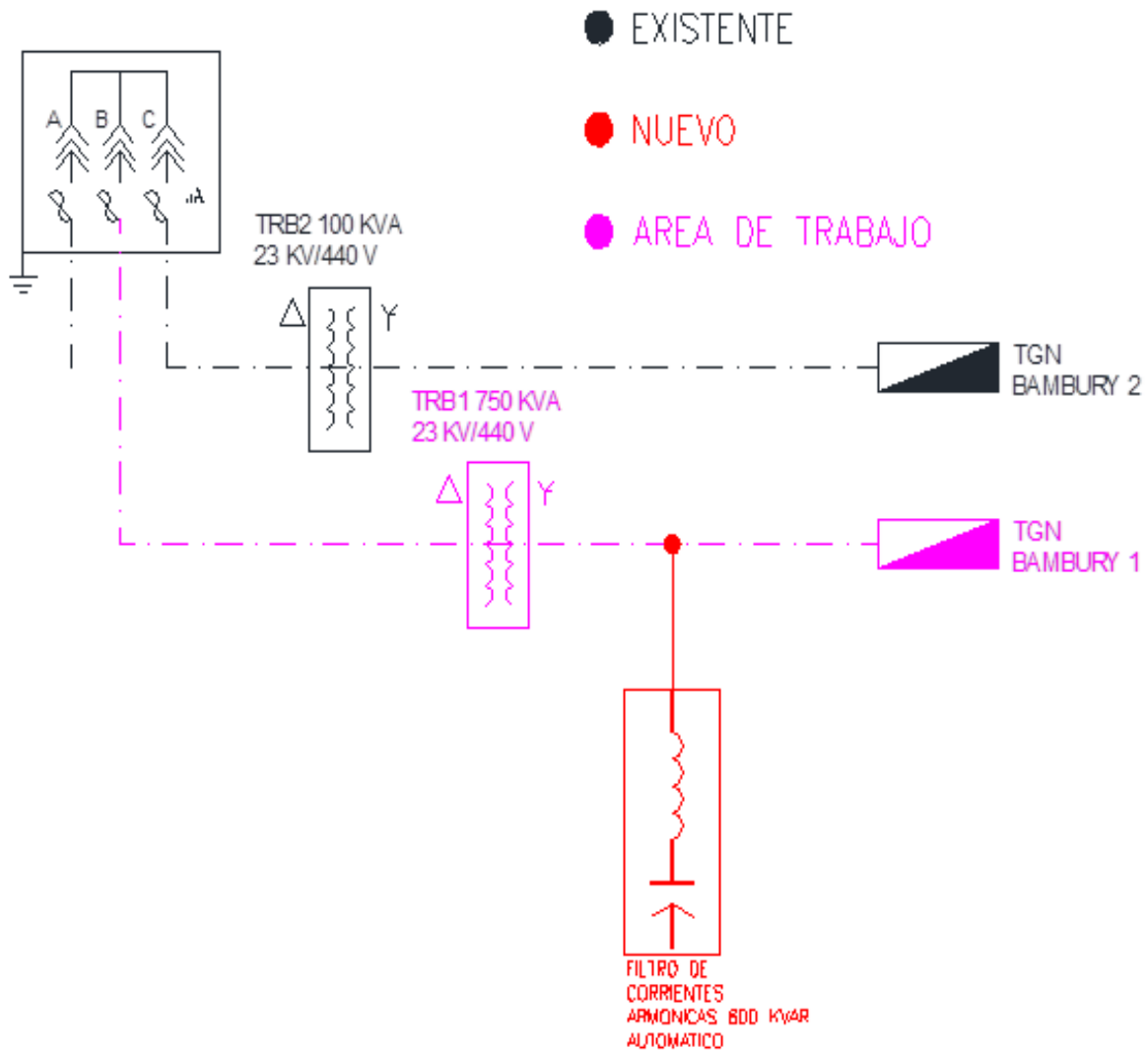


Figura 41. Diagrama unifilar de planta 2 con equipo propuesto uno

Fuente generada del análisis

8.6.5 Estimación de costos y retorno de inversión

Las empresas tienen que saber además de la inversión que efectuara, los costos y el tipo de ahorro así como el retorno de la inversión donde se pueda tomar una decisión y comprender la productividad de sus inversiones, en este caso no tenemos un recibo, sin embargo podemos ocupar los precios y valores del recibo del caso anterior como referencia para saber los ahorros estimados.

Entonces para el

- Concepto de demanda facturable

$$CD' = 612 \text{ kW a } \$222.94 = \$ 136,439.28$$

- Concepto de energía

Si para 296 kW se consumieron 126,165 kWh, para 612 kW se consumieron 260,854.66 kWh entonces:

$$CE = 260854.66 \text{ a } 1.7275 = \$ 450,626.42$$

Para el cargo de factor de potencia de la ecuación 2.3.4.A

Sustituyendo valores

$$\%R = \frac{3}{5} * \left(\left(\frac{90}{78} \right) - 1 \right) * 100$$

$\%R = 9.236$ 0.0923 pero CFE toma valores enteros y adimensionales, por lo tanto

$$\%R = 0.09$$

$$CARGO \text{ POR FACTOR DE POTENCIA} = (136,439.28 + 450,626.42) * 0.09$$

$$CFP = - \$ 52,835.91$$

La tabla quedaría de la siguiente manera:

AHORROS ESTIMADOS							
	FACTOR DE POTENCIA ACTUAL	PENALIZACIÓN POR F.P. ACTUAL*	F.P CORREGIDO	BONIFICACION DEL F.P**	AHORRO MENSUAL TOTAL ***	COSTO DEL EQUIPO PROPUESTO	*TIR
ESCENARIO UNICO	78	\$ 52,835.91	100	\$ 14,676.64	\$67,512.55	\$ 408,384.00	6.05

- * ESTE CARGO SE SUMA A LOS CONCEPTOS DE ENERGIA Y DEMANDA FACTURABLE
- ** ESTE CARGO SE RESTA A LOS CONCEPTOS DE ENERGIA Y DEMANDA FACTURABLE
- *** ESTE ES LA SUMA DEL CARGO ACTUAL MAS EL CORREGIDO
- *TIR: TASA INTERNA DE RETORNO EN MESES

- Los retornos de inversión de las propuestas tienen un tiempo de 6 meses, es decir durante un año obtendremos los beneficios de la bonificación por factor de potencia, los equipos tienen una vida útil de 30 años por lo que de mantenerse así el sistema se va a estar recibiendo estos beneficios durante toda su operación.

8.6.6 Instalación de propuesta aceptada y resultados

La instalación y energización del equipo se efectuó los días 01 y 08 de agosto del 2017 en la empresa ubicada en Cuautitlán Izcalli. El equipo es un **Filtro dual de corrientes armónicas de 600 KVAR, 480V, trifásico, 60 Hz, 10 secciones de 60 KVAR c/u. con fecha de fabricación 05/2017,**

Instalado en Banbury 1, en lado secundario del transformador de 750 KVA.



Transformador 750 kVA



Filtro de 600 KVAR

- Se inspecciona el equipo a conectar y la conexión en lado secundario de transformador de 750KVA



Lado secundario de TR



Interruptor de filtro

La acometida este equipo se realizó por medio de 2 conductores de 500 KCM por fase que se conectan al interruptor trifásico de 3 x 1250 A del filtro, para aterrizar se utilizó un cable desnudo 2/0 AWG, los cables fueron alojados en trinchera ya existente. Posteriormente se instalan dos transformadores de corriente con relación de 1000/5 A dejando en óptimas condiciones para su correcta operación del filtro.



Lado secundario de TR de 750 KVA. Llegada al interruptor del equipo A-03127



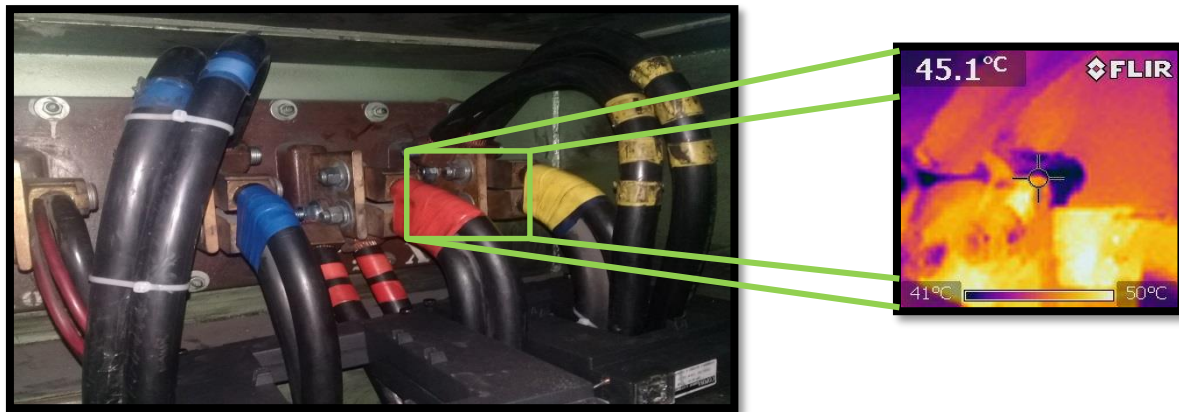
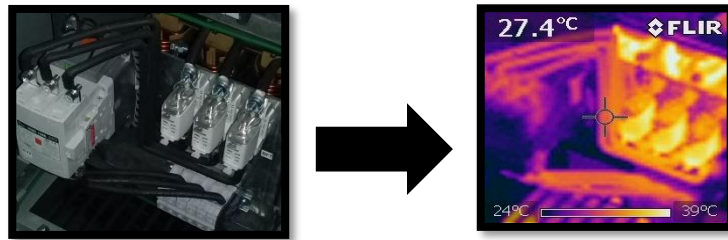
Conexión a tierra del equipo A-03127 Energización del equipo A-03127

El filtro de absorción descrito queda configurado de la siguiente forma:

- Se deja habilitado con 10 secciones en forma automática en modo rechazo.
- Se realizan pruebas en vacío operando adecuadamente las alarmas de sobre tensión y sobre corriente.

Ya realizada la instalación del filtro A-03127 y programación, se realiza el procedimiento de energización del equipo el día 08 de agosto del presente año, verificando su estado actual y realizando reapriete de tornillería quedando listo para entrar de forma automática.

Se realizan inspecciones con cámara termo gráfica, descartando cualquier punto caliente.



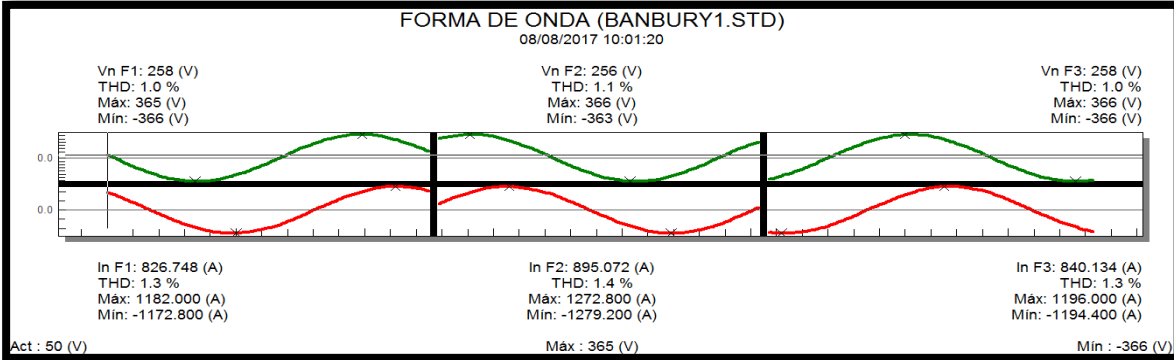
En la siguiente tabla se resumen los resultados obtenidos con respecto al factor de potencia.

Transformador (kVA)	Factor de Potencia	
	Sin Filtro	Con Filtro
750	0.73 Ind.	1.0 Ind.

El factor de potencia alcanzado con la operación del filtro es 1.0 inductivo y se hace de una forma correcta sin entrar en problemas de resonancia.

Mediciones efectuadas en el secundario del transformador de 750 kVA, sin la operación del filtro de 600kVAR.

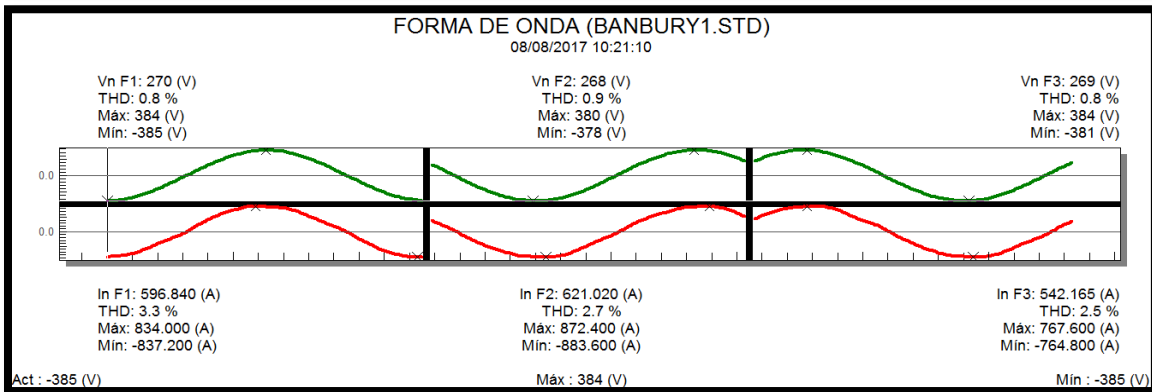
Fecha 08/08/2017 10:01:20		Período: 00:00:10			
	L1	L2	L3	III	
Tensión Comp. (V)	445	443	447	445 ~	
Corriente (A)	797	840	794	810 ~	
P. Aparente (kVA)				627	
P. Activa (kW)	156	162	144	462	
P. Inductiva (kvar)	135	142	146	423	
P. Capacitiva (kvar)	0	0	0	0	
Factor pot.	0.75	0.75	0.70	0.73	
Frecuencia (Hz)				60.0	



Fecha 08/08/2017 10:01:20					
Tensión fase 1			Corriente fase 1		
Vrms (V):258		THD (%):1.0	Irms (A):826.830		THD (%):1.3
Fundamental (V):258		Desfase (°):0.0	Fundamental (A):826.748		Desfase (°):320.8
Armónico	Amplitud (%)	Desfase (°)	Armónico	Amplitud (%)	Desfase (°)
2 (+)	0.150	302.4	2 (+)	0.181	110.0
3 (-)	0.211	50.2	3 (-)	0.115	130.1
4 (-)	0.047	242.2	4 (-)	0.015	188.1
5 (+)	0.335	159.9	5 (+)	0.850	261.1
6 (-)	0.058	271.4	6 (-)	0.105	329.2
7 (+)	0.549	222.0	7 (+)	0.314	44.1
8 (+)	0.027	110.7	8 (+)	0.059	63.8
9 (+)	0.054	75.8	9 (+)	0.007	10.7
10 (+)	0.050	214.9	10 (+)	0.057	235.5
11 (-)	0.280	70.2	11 (-)	0.562	241.0
12 (+)	0.051	86.7	12 (+)	0.072	307.7
13 (-)	0.324	327.1	13 (-)	0.504	235.6
14 (-)	0.043	271.0	14 (-)	0.031	343.8
15 (-)	0.104	350.5	15 (-)	0.138	342.6
16 (+)	0.052	46.4	16 (+)	0.073	9.3

Mediciones efectuadas en el secundario del transformador de 750 kVA, con la operación del filtro de 600kVAR.

Fecha 08/08/2017 10:21:10		Período: 00:00:10		
	L1	L2	L3	III
Tensión Comp. (V)	464	462	466	464 ~
Corriente (A)	575	608	532	572 ~
P. Aparente (kVA)				461
P. Activa (kW)	155	163	143	461
P. Inductiva (kvar)	0	4	9	13
P. Capacitiva (kvar)	9	0	0	9
Factor pot.	1.00	1.00	1.00	1.00
Frecuencia (Hz)				60.0



Fecha 08/08/2017 10:21:10					
Tensión fase 1			Corriente fase 1		
Vrms (V):270		THD (%):0.8	Irms (A):597.185		THD (%):3.3
Fundamental (V):270		Desfase (°):0.0	Fundamental (A):596.840		Desfase (°):2.9
Armónico	Amplitud (%)	Desfase (°)	Armónico	Amplitud (%)	Desfase (°)
2 (+)	0.061	256.2	2 (+)	0.378	44.0
3 (-)	0.314	289.7	3 (-)	2.300	6.3
4 (-)	0.074	263.1	4 (-)	0.196	110.3
5 (-)	0.139	59.0	5 (-)	1.763	317.0
6 (+)	0.012	226.7	6 (+)	0.133	90.9
7 (+)	0.350	135.9	7 (+)	1.383	23.1
8 (+)	0.050	335.5	8 (+)	0.077	283.7
9 (-)	0.110	256.9	9 (-)	0.100	56.7
10 (-)	0.089	44.3	10 (-)	0.057	75.4
11 (-)	0.201	331.7	11 (-)	0.487	31.8
12 (+)	0.034	348.4	12 (+)	0.021	214.5
13 (+)	0.181	231.0	13 (+)	0.371	331.3
14 (-)	0.036	36.5	14 (-)	0.052	13.3
15 (-)	0.053	298.7	15 (-)	0.095	4.5
16 (-)	0.050	191.9	16 (-)	0.057	228.5

8.6.6.1 Resultados obtenidos

En las siguientes tablas se resumen los resultados obtenidos al poner en operación el filtro

MEDICIONES SIN FILTRO

Transformador (kVA)	Potencia Activa (kW)	Potencia Reactiva (kVAR L)	Potencia Aparente (kVA)	Corriente Total (A)	Tensión (V L-L)	THD(V)% (Prom.)	THD (I)% (Prom.)	ANEXO
750	462	423	627	810	445	1.0	1.3	ANEXO HOJA 1-2

MEDICIONES CON FILTRO

Transformador (kVA)	Potencia Activa (kW)	Potencia Reactiva (kVAR L)	Potencia Aparente (kVA)	Corriente Total (A)	Tensión (V L-L)	THD(V)% (Prom.)	THD (I)% (Prom.)	ANEXO
750	461	13	461	572	464	0.8	3.3	ANEXO HOJA 2-2

Con la puesta en operación del filtro dual de corrientes armónicas de 600 kVAR se observan los siguientes cambios en los parámetros de energía eléctrica.

Se reduce la demanda de potencia reactiva inductiva de 423 a 13 kVAR.

Los valores de corriente rms total en el secundario del transformador disminuyen de 810 [A] a 572 [A]. Esto representa liberar de carga al transformador y reducir las pérdidas eléctricas en el mismo.

Este transformador se encontraba operando con niveles de distorsión armónica bajos los cuales se mantienen en niveles aceptables, en tensión y en corriente al entrar en operación el filtro.

Por otra parte, obtiene un beneficio técnico importante puesto que aumenta la capacidad de sus instalaciones, al circular solo la corriente activa que requiere, evitando pérdidas de energía, calentamiento de conductores, motores, etc. mejorando el voltaje en su red interna.

8.7 Otros aspectos técnicos y su impacto económico

La intensión que se puede acondicionar la propuesta técnica-económica que comúnmente se realiza para licitaciones ante dependencias de gobierno en una forma más común regularmente para el empresario, líder de negocio o encargado para que las decisiones de inversión tomen fuerza fundamentando los aspectos técnicos que les brinden las mejores opciones que satisfagan sus necesidades.

Para la identificación de las oportunidades en cualquier negocio que requiera de algún servicio donde nos ayudará también a dar la mejor solución a la problemática y nos dará también la mejor solución garantizando al cliente que todas las opciones o escenarios mostrados han sido evaluados por lo que la decisión será lo más saludablemente posible.

Otros conceptos importantes para la estimación de costos

La mayoría de empresas utilizan la automatización para incrementar la productividad. Por lo tanto, confiamos en una automatización que, a su vez, se basa en un suministro de energía estable. Los problemas de calidad de energía eléctrica pueden provocar el funcionamiento incorrecto de procesos y equipos o llegar a la interrupción de los mismos. Y las consecuencias de esto varían desde el costo excesivo de la energía como lo vimos en las dos problemáticas mostradas hasta el cese completo del funcionamiento, en esos casos la calidad de la energía eléctrica es crítica, sin embargo, la mayoría se origina dentro de las instalaciones.

Puede deberse a problemas con:

- Instalación: conexión incorrecta a tierra, cableado inadecuado o distribución sub-dimensionada.
- Funcionamiento: los equipos funcionan fuera de los parámetros de diseño.
- Métodos de mitigación: blindaje inadecuado o falta de corrección del factor de potencia.
- Mantenimiento: aislamiento del cable deteriorado o la conexión a tierra.

Los problemas de calidad de la energía eléctrica causan estragos en tres áreas generales:

- Tiempo de inactividad
- Problemas en los equipos y costos de consumo de energía
- Interrupciones imprevistas

Para cuantificar los costes derivados del tiempo de inactividad del sistema, necesita saber dos cosas:

- Los ingresos por hora que genera el sistema.
- Los costes de producción. Debe tener en cuenta también el proceso empresarial.

Todo proyecto es un medio para solucionar un problema o concretar una oportunidad percibida, se espera que a través de la implementación de los resultados de un proyecto -el uso del o los productos obtenidos se logre un cambio positivo sobre el sistema con el que interactúa, disminuyendo o eliminando el problema u ofreciendo mecanismos para aprovechar una oportunidad.

9. Conclusiones

Se ha demostrado con la aplicación de una metodología para el estudio de calidad de energía que se planteó en este trabajo, la confianza entre los usuarios para reducir los costos por consumo llevando a cabo el ahorro y uso racional del consumo de energía eléctrica siendo la clave para el desarrollo económico dando una cultura del ahorro de energía eléctrica en nuestro País.

Cuando se instaló el banco de capacitores y el filtro se tuvieron resultados esperados que permitieron reforzar la metodología propuesta, además los profesionistas que se dedican a esta actividad tienen la ventaja de obtener mayor oportunidad de empleo o la posibilidad de formar su propio negocio sobre el ahorro de energía eléctrica, además de difundir esta técnica y las nuevas que se apliquen para esto.

Al reducir el consumo de energía y mejorar las tecnologías, se van a reducir considerablemente los problemas ambientales, en los próximos años el impacto económico y tecnológico para reducir los costos por consumo de energía eléctrica no será una tarea que se pueda realizar de manera trivial o a corto plazo, como se vio, se debe realizar una medición de armónicos y las medidas correctivas para impedir que estos afecten severamente los diferentes componentes de un sistema eléctrico de potencia.

Además, esto viene acompañado de las medidas correctivas principales que podemos usar cuando se nos presente alguna problemática, también, se ha descrito una metodología para la selección de un banco de capacitores o filtros de armónicas, lo cual ha sido complementado con un ejemplo para una nave industrial típica.

De esta forma las empresas de electricidad a nivel nacional e internacional hacen reflexionar a las industrias sobre la conveniencia de generar o controlar su consumo de potencia reactiva a través de este cargo por penalización, al reducir este consumo se obtiene un beneficio y la compañía suministradora concede incentivo en el pago para motivar cobrándole por capacidad suministrada en KVA, factor donde se incluye el consumo de los KVAR que se entrega a la industria, las recomendaciones son encaminadas para obtener instalaciones más seguras y eficientes, que contribuyan a mejorar las condiciones laborales, disminuir riesgos e incrementar la productividad según sea el caso.

La actualización de las instalaciones existentes también genera inquietud entre los usuarios debido a que no cuentan con esta información lo que provoca otra área de oportunidad.

Es conveniente entre los usuarios que invierten en la mejora de sus instalaciones saber la estimación de costos, en este trabajo se presentaron distintos recibos del consumo de energía eléctrica en el sector industrial donde se detectan los costos y el impacto económico que esto representa, siendo esta, la importancia entre los usuarios que tienen para distribuir racionalmente la carga y abatir estos costos, finalmente con la estimación de costos se muestra el retorno de inversión de los equipos que ayudan a mejorar los costos en el consumo, al poder controlar racionalmente la energía, se le conoce como

administración de carga, que fundamentalmente tiene la finalidad de cambiar el uso de la energía que realizan los usuarios.

La administración de la carga, es una técnica que han tenido que seguir algunas empresas debido a los precios de las tarifas que debe pagar cada usuario, lo que también provoca otra área de oportunidad.

Con este trabajo, también, se pudo conjuntar los conocimientos teóricos y técnicos teniendo una fuente de consulta apropiado para las demás generaciones en contribuir con el aprendizaje que como sociedad necesitamos ante la llegada de nuevas tecnologías y poder entender mejor los efectos de los campos electromagnéticos en nuestro día para aprovechar mejor la energía eléctrica, además de la actualización continua que como ingenieros necesitamos en todo momento, existe mucho por aprender y construir así que dejo estas hojas a falta de algo por construir.

10. Bibliografía

- Chapman, S. J. (2016). Máquinas Eléctricas, 4ta Edición –. En S. J. Chapman, *Máquinas Eléctricas, 4ta Edición* – (págs. Capitulo 1, 3 y 6). México: Mc Graw Hill.
- Circutor. (2005). Guía rápida, Puesta en marcha de analizador AR5-L. Barcelona, villa de Cavals, España: Circutor.
- Comisión Federal de Electricidad. (2013). <http://www.cfe.gob.mx>. Obtenido de http://www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/1_AcercadeCFE/CFE_y_la_electricidad_en_Mexico/Paginas/CFEylaelectricidadMexico.aspx.
- COMISION REGULADORA DE ENERGIA. (2015). MANUAL DE CONEXIÓN DE CENTROS DE CARGA,. En COMISION REGULADORA DE ENERGIA, *MANUAL DE CONEXIÓN DE CENTROS DE CARGA*, (pág. CAPITULO 1). MEXICO D.f.: COMISION REGULADORA DE ENERGIA,.
- CONDUCTORES MONTERREY S.A. DE C.V. (2012). MANUAL ELECTRICO. En CONDUCTORES MONTERREY S.A. DE C.V., *MANUAL ELECTRICO* (págs. 36, 37 Y 38). MONTERREY NUEVO LEON: VIAKON.
- CRESPO., D. A. (2001). *BANCO DE CAPACITORES*. MÉXICO D.f.: TECNICA SALGAR S.A. DE C.V.
- Dr ALFREDO NAVARRO CRESPO. (2001). CALIDAD DE LA ENERGIA ELECTRICA,. En Dr ALFREDO NAVARRO CRESPO, *CALIDAD DE LA ENERGIA ELECTRICA*, (pág. 40). MÉXICO D.f.: TECNICA SALGAR S.A. DE C.V.
- Dr. ALFREDO NAVARRO CRESPO. (2001). CORRIENTES ARMONICAS. En T. S. Dr. ALFREDO NAVARRO CRESPO, *CORRIENTES ARMONICAS* (pág. 102). México D.f.: Tecnica Salgar S.A de C.V.
- Dugan, R. C. (2004). *Electrical Power Systems Quality, Second Edition*. EE.UU: The McGraw-Hill Companies.
- Eléctrica, E. H. (2004). EL ABC de la calidad de la Energía Eléctrica. En E. Harper, *EL ABC de la calidad de la Energía Eléctrica* (págs. Capítulo 1, 2 y 3). México D.f.: Limusa.
- ELECTRICIDAD, C. F. (2005). *DESVIACIONES PERMISIBLES EN LAS FORMAS DE ONDAS DE TENSIÓN Y CORRIENTE EN EL SUMINISTRO Y CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA*. MÉXICO D.f.: CFE.
- IEEE. (01 de 01 de 1992). *NORMA IEEE-519-1992,. Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia*. EEUU.
- JARAMILLO M., G. A. (2001). *Electricidad y Magnetismo*. México: Facultad de Ingeniería Trillas.
- JOSEPH A. EDMINISTER, M. (1998). ELECTROMAGNETISMO. En M. JOSEPH A. EDMINISTER, *ELECTROMAGNETISMO* (págs. Capitulo 6, 7 y 11). MÉXICO: Mc Graw Hill.
- Quality, E. P. (2004). *Electrical Power Systems Quality*. En R. C. Duran, *Capitulo 6 y 7* (pág. 167). EE.UU: Mc Graw Hill.

- <http://www.cfe.gob.mx/industria/informacioncliente/paginas/conoce-tu-recibo.aspx>
- Quality, E. P. (2004). Electrical Power Systems Quality. En R. C. Duran, *Capítulo 6 y 7* (pág. 167). EE.UU: Mc Graw Hill.
- Dr. ALFREDO NAVARRO CRESPO. (2001). CORRIENTES ARMONICAS. En T. S. Dr. ALFREDO NAVARRO CRESPO, *CORRIENTES ARMONICAS* (pág. 102). México D.f.: Tecnica Salgar S.A de C.V.
- IEEE. (01 de 01 de 1992). NORMA IEEE-519-1992,. *Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia*. EEUU.
- Eléctrica, E. H. (2004). EL ABC de la calidad de la Energía Eléctrica. En E. Harper, *EL ABC de la calidad de la Energía Eléctrica* (págs. Capítulo 1, 2 y 3). México D.f.: Limusa.
- oss.mx/data/documents/CFE-L0000-45-CALIDAD-ENERGIA_1.pdf
- <http://www.cre.gob.mx/documento/3841.pdf>
- <http://www.delrealenergy.com/documentacion/Instructivo Interpretacion de tarifas NOV04.pdf>

11. Glosario

Fem	fuentes externa o fuente de corriente alterna
I	Corriente eléctrica [A]
V	Voltaje o diferencia de potencial [V]
R	Resistencia eléctrica [Ω]
C	Capacitancia o capacitor [F]
F	Faradios
L	Inductor
Z	Impedancia
Xc	impedancia capacitiva
XL	impedancia inductiva
w	Frecuencia angular
μ	Prefijo micro
LCK	ley de corrientes de Kirchhoff
LVK	ley de voltajes de Kirchhoff
Vth	Voltaje de Thévenin
Rth	Resistencia de Thévenin
I _{No}	Corriente de Norton
R _{No}	Resistencia de Norton
P	Potencia real o activa [W]
Q	Potencia reactiva [VAR] o [kVAR]
S	Potencia Aparente [VA] o [kVA]
P(t)	Potencia Promedio
P(m)	Potencia instantánea
T	periodo

t	tiempo
cos (Θ)	factor de potencia F.P.
h	orden armónico
I_h	Corriente armonica
I_1	Corriente fundamental
THD	Distorsion armonica total
TDD	Distorsion de demanda total
THDv	Distorsion armonica de voltaje
THDi	Distorsion armonica de corriente
RMS	(Del inglés, root mean square) Valor eficaz
f	frecuencia
f1	frecuencia fundamental
fr	frecuencia de resonancia
fs	frecuencia en presencia de armónicas
PPDvi	Potencia promedio con distorsión en voltaje o corriente
Vs	Distorsión en voltaje
Is	Distorsión en corriente
PADvi	Potencia aparente con distorsión en voltaje o corriente
F.P.v-i	Factor de potencia en presencia de armónicas de voltaje y corriente
F.P.des	factor de potencia de desplazamiento
F.P.dist	Factor de potencia de distorsión
F.P.tt	Factor de potencia total
Factor k	coeficiente de los transformadores
Factor Q	coeficiente de calidad

Hz	Hertz
CA	Corriente alterna
CD	Corriente directa
PCC	Punto de conexión común (que en inglés es point of commoncoupling)
CFP	Cargo por factor de potencia
%R	por ciento de penalización
%B	por ciento de bonificación
TDD	Distorsión de demanda total
kWh	kilowatt hora
kVArh	kilo-volt-amper-reactivo-hora
OM	ordinaria en media tensión
HM	horaria en media tensión
CE	Concepto de energía
CFP	Cargo por factor de potencia
CD'	Cargo por demanda
DAP	derecho de alumbrado público
CFE	Comisión Federal de Electricidad
MT	Media Tensión
BT	Baja Tensión
SE	Subestación Eléctrica
CCM	Cuarto de control de motores
X/R	relación de impedancia reactancia entre resistencia
SPT	sistema de puesta a tierra
Tr	Transformador eléctrico trifásico
UPS	Sistema de alimentación ininterrumpida (en inglés UninterruptiblePowerSupply.)