

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**ANÁLISIS DEL CONTENIDO ARMÓNICO QUE PRODUCEN LOS
VARIADORES DE 6 PULSOS EN LA INDUSTRIA Y
DETERMINACIÓN DE METODOS DE MITIGACIÓN**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

LUIS ALBERTO AUQUI CAMAS

luis.auqui@epn.edu.ec

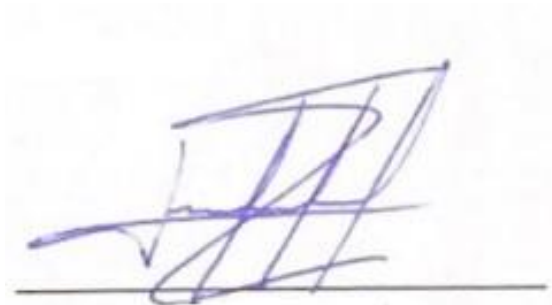
DIRECTOR: DR. HUGO NEPTALÍ ARCOS MARTÍNEZ

Hugo.arcos@epn.edu.ec

Quito, octubre 2022

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Luis Alberto Auqui Camas, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, overlapping letters, positioned above a horizontal line.

Dr. HUGO NEPTALÍ ARCOS MARTÍNEZ
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, LUIS ALBERTO AUQUI CAMAS, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he (hemos) consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.



LUIS ALBERTO AUQUI CAMAS

DEDICATORIA

A mis padres Luis Alberto Auqui Ortega y María Regina Camas Sislema, que me enseñaron el valor del trabajo honesto y que el estudio es el mejor camino hacia la libertad.

A mi hermano Darwin Orlando que es como mi segundo papá, mentor y gran amigo, que siempre supo darme las mejores lecciones de vida y guiarme en el camino de la excelencia personal y profesional.

A mi hermana Wilma Alexandra que es como mi segunda mamá, que a pesar de los encontrones y discusiones nunca dejó de apoyarme y creer en mí, y supo darme la mano de la mejor manera.

A mi hermanita Lourdes Pilar que es una amiga más en la que puedo confiar y de la cual aprendo día a día a mejorar.

A mi sobrino Darwin André que fue una de las personas más importantes en uno de los momentos más difíciles e importantes de mi vida.

A mis amigos: Danny, Javier, Erick, Katalina, Israel, Jonathan, Danilo, Erica, Leslie, Daniel, Fernando, Edwin, Ángel, que fueron parte importante de mi formación académica, profesional y como ser humano en el transcurso universitario.

A todas las personas que tuve la dicha de conocer y dejaron recuerdos valiosos en mi vida.

Y por último a Ángel Alí que es uno de los más lindos recuerdos que la vida me obsequio.

AGRADECIMIENTO

A mis padres por el gran esfuerzo que hicieron durante todo este tiempo para poder ayudar a sus hijos a ser mejores personas.

A mis hermanos por el apoyo incondicional que siempre me han brindado y los principios que me han inculcado desde niño.

A Darwin André que me permite vivir un episodio muy hermoso de la vida.

A Ángel Alí que es quien me cuida y nunca me abandona en mi camino.

A la vida que puso en mi camino a las personas correctas para formarme como un ser humano y profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
CAPITULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 PROBLEMÁTICA.....	1
1.3 OBJETIVOS.....	2
1.4 ALCANCE.....	2
1.5 MARCO TEÓRICO.....	3
1.5.1 PERTURBACIONES ARMONICAS.....	3
1.5.2 FUENTES DE ARMÓNICOS.....	5
1.5.3 FILTROS PASIVOS [5].....	8
1.5.4 FILTROS ACTIVOS [5].....	12
1.6 NORMAS NACIONALES E INTERNACIONALES PARA LA EVALUACIÓN Y MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS.....	15
1.6.1 IEE 519-1992 “RECOMENDACIONES Y REQUISITOS PARA EL CONTROL DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA” [6].....	16
1.6.2 IEC 61000-3-12 “LÍMITES PARA LAS EMISIONES DE CORRIENTE ARMÓNICA PARA EQUIPOS CON CORRIENTE DE ENTRADA >16 A POR FASE” [8] 18	
1.6.3 REGULACIÓN No. ARCERNNR-002/20 “CALIDAD DEL SERVICIO DE DISTRIBUCIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA” [9].....	21
CAPITULO II.....	23
2. GUÍA PRÁCTICA PARA LA MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS EN LA INDUSTRIA.....	23
2.1. RECOPIACION DE DATOS TÉCNICOS.....	23
2.1.1 DESCRIPCIÓN Y UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA INDUSTRIA.....	23

2.1.2	DATOS EN MEDIO VOLTAJE	23
2.1.3	DATOS EN BAJO VOLTAJE	25
2.2.	MODELACIÓN Y SIMULACIÓN	27
2.2.1	DISEÑO DE LA INDUSTRIA	28
2.2.2	INGRESO DE DATOS EN EL SOFTWARE ETAP 19.0.1 [14].....	28
2.3.	DISEÑO DEL FILTRO ARMÓNICO PARA LA MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS DE CORRIENTE [15] [16]	35
2.3.1	PASO 1: DETERMINACIÓN DE POTENCIA REACTIVA PARA EL FILTRO ARMÓNICO.....	35
2.3.2	PASO 2: SELECCIÓN DEL FILTRO ARMÓNICO A SINTONIZAR	36
2.3.3	PASO 3: OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DEL FILTRO.....	39
2.3.4	PASO 4: CLASIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES.....	40
CAPITULO III.....		47
3.	APLICACIÓN DE LA GUÍA DE DISEÑO PARA LA MITIGACIÓN DEL CONTENIDO ARMÓNICO EN LA INDUSTRIA DE CARBONATO DE CALCIO ..	47
3.1.	DATOS PRINCIPALES DE LA INDUSTRIA DE CARBONATO DE CALCIO.....	47
3.1.1	UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	47
3.1.2	UNIFILAR DE LA INDUSTRIA DE CARBONATO DE CALCIO	47
3.2.	RECOPIACIÓN E INGRESO DE DATOS DE LA INDUSTRIA DE CARBONATO DE CALCIO.....	48
3.2.1	EQUIVALENTE DE THEVENIN.....	48
3.2.2	ACOMETIDA PRINCIPAL	49
3.2.3	ALIMENTADORES SECUNDARIOS (SWITCHGEAR-MCC´S)	50
3.2.4	CENTRO DE CONTROL DE MOTORES (MCC).....	51
3.2.5	VARIADORES DE VELOCIDAD	52
3.2.6	CARGAS DE GRAN POTENCIA ASOCIADAS A LOS VARIADORES DE VELOCIDAD Y SUS ALIMENTADORES	54
3.3.	RESULTADOS	54
3.3.1	FLUJOS DE POTENCIA.....	54
3.3.2	FLUJO ARMÓNICO.....	55
3.4.	DISEÑO DE FILTROS DE ARMÓNICOS	63
3.4.1	CÁLCULO DEL FILTRO ARMÓNICO PARA MITIGAR EL ARMÓNICO DE ORDEN 5.....	63
3.4.2	IMPLEMENTACIÓN DEL FILTRO Y SIMULACIÓN DE COMPROBACIÓN 70	
3.4.3	COMPARACIÓN DEL THD Y EL TDD CALCULADOS CON LOS VALORES REFERENCIALES DE LA NORMA ARCERNNR [9].....	73

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	77
4.1. CONCLUSIONES.....	77
4.2. RECOMENDACIONES	78
ANEXOS.....	81

RESUMEN

En este trabajo se realiza un análisis técnico del uso de variadores de 6 pulsos en la industria, el contenido armónico que generan desde la carga hacia el punto de acoplamiento común (PCC) y los problemas que generan en la calidad de la energía suministrada por la empresa distribuidora hacia el resto de cargas industriales, comerciales y residenciales.

Los variadores electrónicos son cargas no lineales que realizan el control de velocidad de grandes maquinas en la industria, posibilitando procesos industriales como la trituración de piedras y granito, mezcla de químicos contaminantes, etc. Estos equipos generan problemas en la calidad de energía ya que introducen contenido armónico de voltaje y de corriente (THDi y THDv).

THDi: Total Harmonic Distortion of current (Distorsión Armónica Total de corriente).

THDv: Total Harmonic Distortion of voltage (Distorsión Armónica Total de voltaje).

La industria cuenta con una cantidad significativa de variadores de 6 pulsos para sus diferentes procesos de producción, con lo cual la calidad de la energía ha ido reduciéndose y ante la existencia de normas de calidad, las empresas tienen la obligación de realizar estudios de calidad de energía para determinar el contenido armónico que están generando y encontrar soluciones para mitigar el contenido armónico generado tanto de voltaje como de corriente.

En el caso del Ecuador, la mitigación del contenido armónico generado en la industria se rige por la regulación ARCERNNR 002/20 "Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica".

PALABRAS CLAVE: variadores de 6 pulsos, contenido armónico, carga, calidad de energía, mitigación de contenido armónico.

ABSTRACT

In this work, a technical analysis of the use of 6-pulse variators in the industry is carried out, the harmonic content that they generate from the load to the point of common coupling (PCC) and the problems that they generate in the quality of the energy supplied by the distribution company did the rest of the industrial, commercial and residential loads.

Electronic variators are non-linear loads that control the speed of large machinery in the industry, enabling industrial processes such as stone and granite crushing, mixing of polluting chemicals, etc. These equipments generate power quality problems since they introduce harmonic content of voltage and current (THDi and THDv).

THDi: Total Harmonic Distortion of current (Distorsión Armónica Total de corriente).

THDv: Total Harmonic Distortion of voltage (Distorsión Armónica total de voltaje).

The industry has a significant number of 6-pulse variators for its different productions processes, with which the quality of energy has been declining and, given the existence of quality standards, companies have the obligations to carry out energy quality studies, energy to determine the harmonic content they are generating and find solutions to mitigate the generated harmonic content of both voltage and current.

In the case of Ecuador, the mitigation of the harmonic content generated in the industry is governed by the regulation ARCERNNR 002/20 "Quality of the service of distribution and commercialization of electrical energy".

KEYWORDS: 6-pulse drives, harmonic content, load, power quality, harmonic content mitigation.

CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Una de las principales preocupaciones en los procesos industriales es la calidad de energía que está relacionada directamente con el pago en la planilla eléctrica ya sea por penalizaciones por bajo factor de potencia, distorsión armónica de corriente o por un consumo eléctrico no esperado producto de la operación de cargas no lineales. Estas cargas no lineales incluyen entre otros: arrancadores suaves, variadores de velocidad, computadores, UPS y otros dispositivos electrónicos como iluminación, material de soldadura y sistemas de alimentación ininterrumpida [1]. La mayoría de cargas no lineales utilizadas en diferentes tipos de sistemas electrónicos pueden incrementar las perturbaciones armónicas con la inyección de armónicos de corriente directamente a la red de distribución. Estas cargas generan armónicos que producen pérdidas en la red de distribución eléctrica.

Las industrias utilizan variadores de velocidad de 6, 12 y 24 pulsos para poder controlar la velocidad de sus máquinas eléctricas giratorias. El variador de 6 pulso es el más económico para aplicaciones de control de velocidad y por ende son los equipos más utilizados para los procesos de producción ya sea para el arranque de motores o para la regulación de velocidad en los procesos. La electrónica de potencia presente en estos variadores de velocidad, los convierten en importantes cargas no lineales presentes en los sistemas de potencia. En la actualidad existen severas normas internacionales referidas a compatibilidad electromagnética, como así también reglamentos de carácter local a cumplir tanto por las empresas prestatarias de servicio eléctrico como por los propios usuarios. [2].

1.2 PROBLEMÁTICA

En el afán de reducir costos en sus procesos de adquisición de equipos las industrias seleccionan el variador de 6 pulsos por ser el más económico, sin tomar en cuenta su bajo rendimiento y su significativo aporte de contenido armónico a la red eléctrica, esto afecta a los usuarios cercanos al punto de acoplamiento común de la industria.

Debido a que la industria incluye en su carga una cantidad significativa de variadores de 6 pulsos, es necesario realizar un estudio de calidad de energía en el punto de acoplamiento común para verificar si cumple con los límites establecidos por la regulación

ARCERNNR 002/20, que establece el porcentaje de armónicos de corriente que pueden inyectar las cargas a la red eléctrica. La distorsión armónica es uno de los puntos evaluados por la regulación ARCERNNR 002/20 como incumplimiento de los índices de calidad de servicio técnico.

1.3 OBJETIVOS

El objetivo general de este Proyecto Técnico es realizar un análisis del contenido armónico que producen los variadores de 6 pulsos en la industria y determinar un método adecuado de mitigación.

Los objetivos específicos del Proyecto Técnico son:

- Realizar el levantamiento bibliográfico de normas internacionales aplicadas a la evaluación y mitigación de armónicos en red eléctricas de distribución.
- Estructurar una guía de diseño para la selección y aplicación de técnicas de mitigación de armónicos en instalaciones industriales con alto nivel de penetración de variadores de velocidad de 6 pulsos.
- Aplicar la guía de diseño a un caso específico de la industria ecuatoriana.

1.4 ALCANCE

El proyecto propuesto abarca una descripción técnica y matemática de los variadores de 6 pulsos usados en la industria y la verificación del porcentaje de armónicos de corriente que producen cada uno de ellos.

Se realizará un análisis del contenido armónico total que producen los variadores de 6 pulsos utilizados comúnmente en la industria nacional, para el efecto serán simulados en un software comercial los espectros armónicos que indica el fabricante del variador para posteriormente ejecutar un flujo de armónicos y evaluar el cumplimiento de los índices de calidad de servicio técnico establecido por el ARCERNNR 002/20. En caso de incumplimientos, se plantearán y comprobarán técnicas de mitigación de armónicos.

El trabajo de Titulación incluirá análisis y simulaciones realizadas en base a datos reales de la industria y una guía técnica para mitigar las corrientes armónicas producidas por los variadores de 6 pulsos.

1.5 MARCO TEÓRICO

1.5.1 PERTURBACIONES ARMONICAS

1.5.1.1 Distorsión Armónica

La distorsión armónica en un sistema eléctrico es causada principalmente por la conexión de dispositivos y cargas no lineales en las que, la corriente no es proporcional al voltaje aplicado. En la Figura 1.1 se ilustra este concepto, se puede aplicar un voltaje sinusoidal a un resistor no lineal, el voltaje y la corriente variaran según la curva mostrada, es decir que una pequeña variación en el voltaje puede provocar grandes aumentos de corriente, además, se observa que mientras el voltaje aplicado es perfectamente sinusoidal la corriente resultante es distorsionada debido al elemento no lineal.

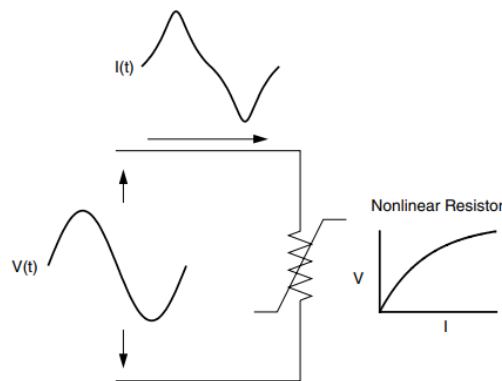


Figura 1.1 Distorsión de corriente causada por elementos no lineales [4].

En la Figura 1.2 se muestra que cualquier forma de onda distorsionada y periódica puede representarse como la suma de ondas sinusoidales puras, llamadas Series de Fourier, donde la frecuencia de cada senoide es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la onda distorsionada. Estas sinusoides de frecuencia múltiplos enteros de la fundamental, se denominan armónicos.

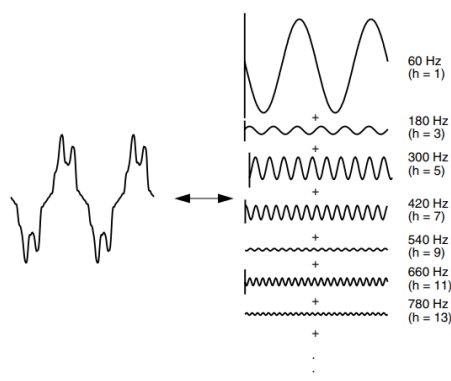


Figura 1.2 Representación de las series de Fourier de una onda distorsionada [4].

Las series de Fourier se aplica en el análisis de problemas de armónicos, ya que permiten encontrar la solución del sistema debido a que su análisis se lo realiza por separado para cada armónico individual y no a la onda original distorsionada. Cabe señalar que a menudo solo las magnitudes de ciertos armónicos son de interés.

Si la forma de onda tanto en el semiciclo positivo como en el semiciclo negativo son idénticas, es decir son simétricas, la serie de Fourier tendrán solo armónicos impares. Esto permite simplificar los estudios en sistemas de potencia ya que los elementos que producen armónicos comúnmente presentan la característica de simetría. De hecho, la aparición de armónicos pares suele indicar un mal funcionamiento de la carga, teniendo excepciones notables como rectificadores de media onda y hornos de arco.

Si un sistema de potencia es representado con elementos en serie y paralelo, se determina que las principales fuentes de distorsión armónica serán los elementos en derivación, es decir las cargas.

No todos los usuarios finales que experimenten distorsiones armónicas serán los que producen dichas distorsiones, su origen se atribuye a usuarios con cargas no lineales importantes conectadas en el punto común [4].

1.5.1.2 Distorsión de voltaje y distorsión de corriente

Tener un problema en el funcionamiento de los dispositivos debido a la presencia de armónicos en un sistema, puede significar alguna de las siguientes premisas:

- Los voltajes armónicos son demasiados grandes, es decir se tiene un voltaje muy distorsionado, provocando que el control de los ángulos de disparo en los dispositivos no sea el correcto.
- La presencia de corrientes armónicas demasiado grandes en transformador, ocasionan que estos operen a una menor capacidad de su potencia nominal.
- La presencia de grandes corrientes armónicas, tendrá como efecto la aparición de grandes voltajes armónicos en el sistema.

De acuerdo a las premisas mencionadas, se determina que pueden existir diferentes causas y efectos en la aparición de voltajes y corrientes armónicas, así como una relación entre ellos.

La presencia de cargas no lineales conectadas en derivación provocará la inyección de corriente armónica en el sistema eléctrico, esto conlleva a pensar que para la mayoría de análisis será suficiente tratar estas cargas simplemente como fuentes de corriente.

En la Figura 1.3 se esquematiza la presencia de distorsión armónica en el voltaje del punto de conexión de la carga, esto puede producirse debido a la circulación de corriente distorsionada a través de la impedancia serie del sistema, además las corrientes armónicas al pasar por la impedancia del sistema causarán una caída de voltaje para cada armónico y así la cantidad de distorsión del voltaje dependerá de la corriente e impedancia.

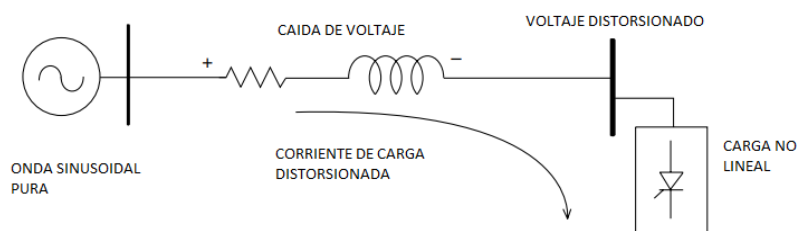


Figura 1.3 Distorsión de voltaje provocado por la circulación de corrientes armónicas generadas por una carga no lineal [4].

Mientras que los armónicos de corriente producidos por la carga causan la distorsión de voltaje, debe tenerse en cuenta que la carga no tiene control sobre la distorsión de voltaje, esto indica que, si la misma carga es conectada en dos lugares diferentes del sistema, se tendrán dos valores diferentes de distorsión de voltaje [4]. El reconocimiento de este hecho es la base para la división de responsabilidades para el control de armónicos que se encuentran en normas como la IEEE 519 [3], que menciona:

1. El control sobre la cantidad de corriente armónica inyectada en el sistema ocurre en el usuario final.
2. Suponiendo que la inyección de corriente armónica este dentro de límites permitidos, el control sobre la distorsión del voltaje es realizado por la entidad que tenga autoridad sobre la impedancia del sistema.

1.5.2 FUENTES DE ARMÓNICOS

1.5.2.1 Fuentes de Alimentación monofásica

En la actualidad los equipos electrónicos como computadoras personales, impresoras y fotocopiadoras, usan fuentes conmutadas como fuentes de alimentación monofásica debido a que presenta ventajas como bajo peso, tamaño compacto, operación eficiente y tolerancia a grandes variaciones en el voltaje de entrada. En la Figura 1.4 se muestra el diagrama de una fuente conmutada compuesta por elementos de electrónica de potencia que permiten realizar la conversión de corriente alterna a corriente continua.

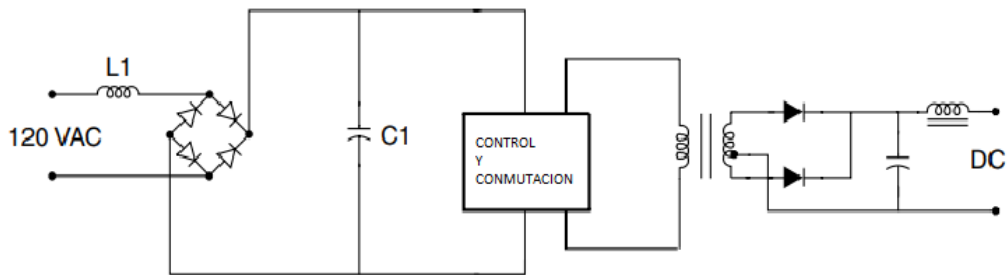


Figura 1.4 Fuente de alimentación conmutada [3]

En la Figura 1.5 se ilustra la forma de onda y el espectro de la corriente que requiere una fuente de alimentación conmutada.

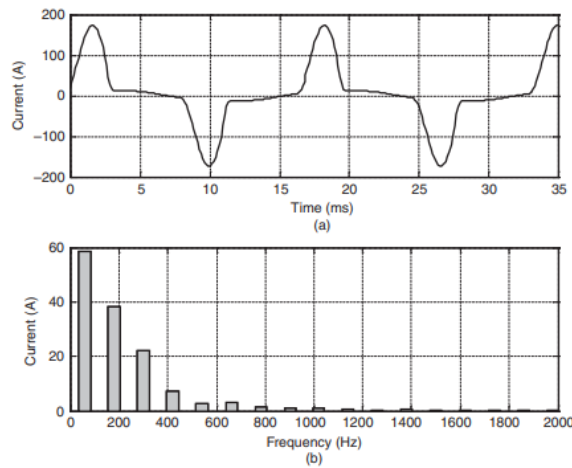


Figura 1.5 Forma de onda y espectro de corriente-Fuente conmutada [3]

Cabe señalar que las fuentes de alimentación conmutadas presentan un alto contenido de tercer armónico en su corriente. Dado que estos armónicos se adicionan, pueden ocasionar sobrecarga en el conductor del neutro en sistemas trifásicos [3].

1.5.2.2 Convertidores estáticos de potencia

Los convertidores estáticos de potencia son usados en la industria para efectuar el proceso de conversión de corriente alterna a corriente continua a través de rectificadores, que comúnmente son de 6 y 12 pulsos.

El orden de las corrientes armónicas características que produce un rectificador viene dado por la expresión [4]:

$$h = k \times p \pm 1 \quad (1.1)$$

Donde:

h = orden de armónico

p = número de pulsos del rectificador (6 o 12)

k = número entero (1,2,3...)

Y la magnitud de las corrientes armónicas se obtiene mediante [4]:

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (1.2)$$

Donde:

I_h = corriente armónica de orden h .

I_1 = magnitud de la corriente fundamental.

En la Figura 1.6 se ilustra el espectro de armónicos característicos para el rectificador de 6 pulsos, donde se observa que las corrientes armónicas de orden quinto y séptimo son las de mayor magnitud.

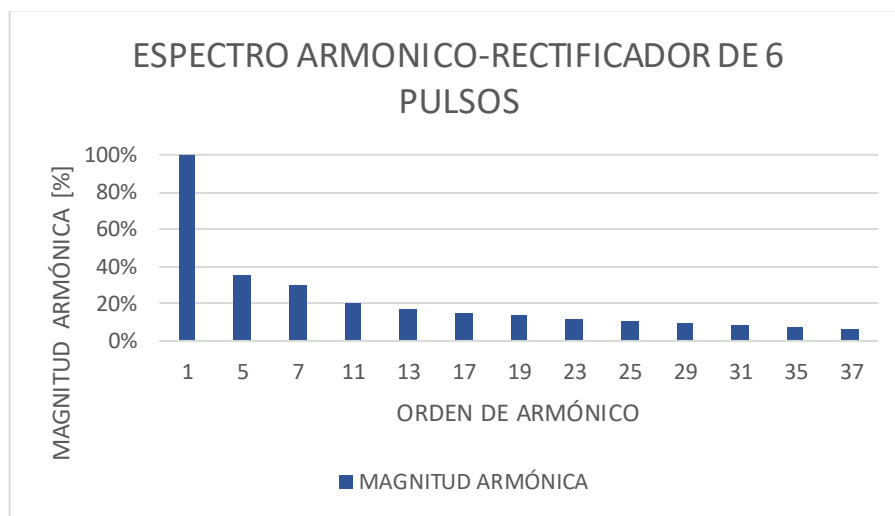


Figura 1.6 Espectro de armónicos característicos- rectificador de 6 pulsos.

En la Figura 1.7 se ilustra el espectro de armónicos característico para el rectificador de 12 pulsos, donde se observa que las corrientes armónicas de orden once y trece son las de mayor magnitud, recalcando que una ventaja que presenta el rectificador de 12 pulsos con respecto al de 6 pulsos es la reducción de armónicos de orden $6(2k-1) \pm 1$

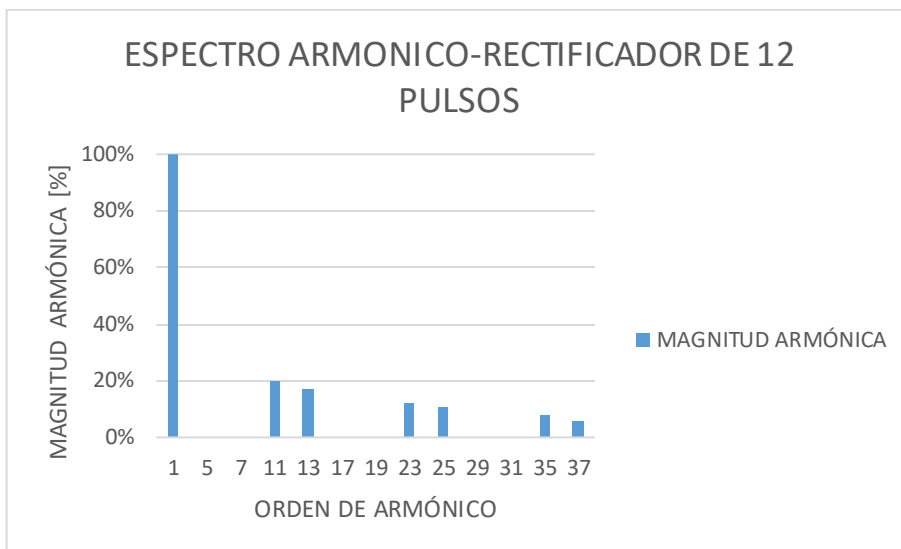


Figura 1.7 Espectro de armónicos característicos- rectificador de 12 pulsos.

1.5.3 FILTROS PASIVOS [5]

Estos filtros se componen de elementos pasivos como inductores, capacitores y resistencias cuya conexión puede permitir la atenuación del flujo de armónicos a través de ellos (serie) o desviación del flujo de armónicos a través de ellos (paralelo).

1.5.3.1 Filtro Pasivo Serie

Conectados en serie con la carga no lineal, un filtro pasivo serie representa una alta impedancia a los armónicos cercanos a la frecuencia de sintonía y bajas impedancias a medida que los armónicos se aparten por debajo o por encima de dicha frecuencia (ver Figura 1.8).

Son usados comúnmente en instalaciones monofásicas con cargas no lineales, también se conectan al neutro de instalaciones de capacitores para bloquear el flujo de armónicos “triplens”.

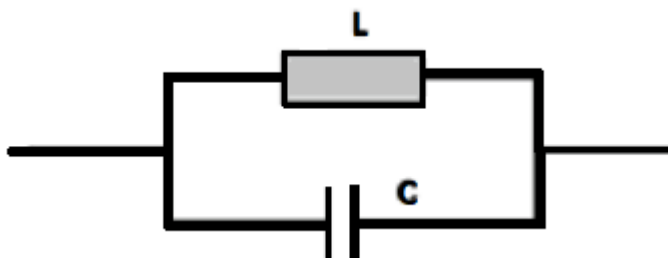


Figura 1.8 Topología filtro pasivo serie [5].

Usualmente los filtros pasivos serie se diseñan para tener una impedancia baja a corriente fundamental, siendo esto una desventaja porque sus componentes tienen que ser

dimensionados para la corriente nominal de carga. Los filtros pasivos serie dedicados no introducen resonancias extrañas dentro del sistema de potencia.

1.5.3.2 Filtro Pasivo Paralelo Antiresonante

Son comúnmente utilizados en casos en los que se encuentra instalado o se va a instalar un banco de capacitores para la corrección del factor de potencia (ver Figura 1.9).

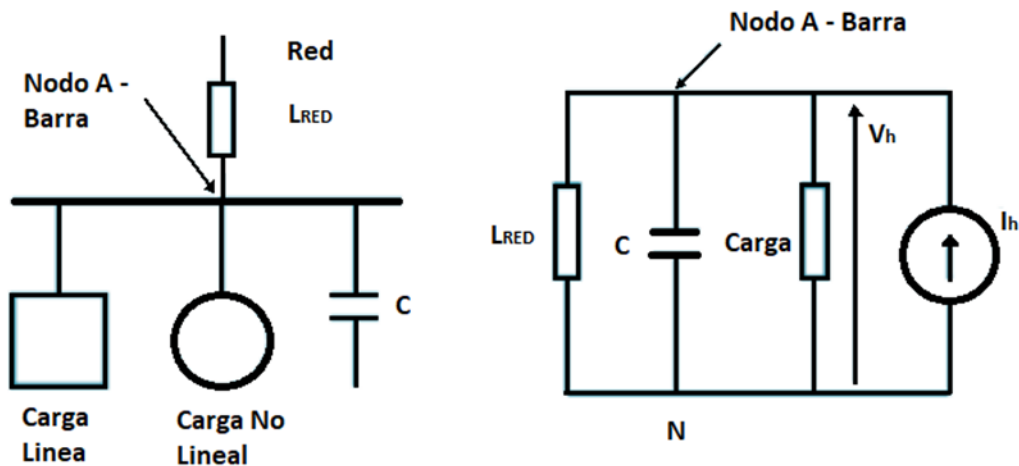


Figura 1.9 Conexión Filtro Pasivo Paralelo [5].

Este filtro absorbe las componentes armónicas para las cuales está sintonizado y dejar pasar la componente fundamental de corriente desde la alimentación hacia la carga.

Cuando un circuito no cuenta con este tipo de filtro, la impedancia aumenta linealmente con la frecuencia, funcionando como circuito inductivo. Este tipo de filtros permiten que la impedancia aumente hasta alcanzar un valor aproximado de R , parte resistiva de la carga lineal, justo a frecuencia de resonancia (f_{ar}) (ver Figura 1.10) del circuito paralelo formado por la inductancia de red y el banco de capacitores vistos desde los terminales de compensación.

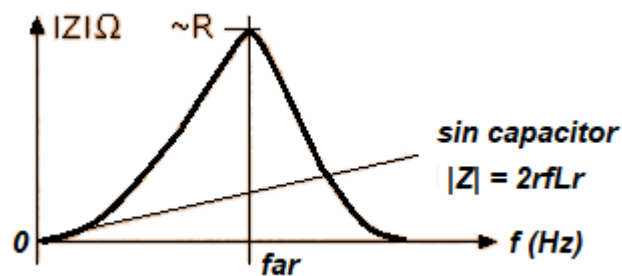


Figura 1.10 Variación del Módulo de la Impedancia con la Frecuencia [5].

Si alguna de las frecuencias de las corrientes armónicas, causadas por cargas no lineales (I_h), llegará a coincidir con la frecuencia de resonancia, aumentaría el voltaje y las corrientes armónicas en los terminales del capacitor, con efectos dañinos para la instalación. Para evitar que esto suceda se desintoniza la compensación, es decir, se agrega una inductancia o reactor antiresonante, en serie con el banco de capacitores formado por una resonancia serie que en junto con el capacitor son parte al “filtro antiresonante.”

1.5.3.3 Filtro Pasivo Paralelo Resonante

Un filtro con una inductancia L y una capacitancia C en serie forman un circuito con frecuencia resonante, sintonizado para eliminar el armónico de corriente deseado (ver Figura 1.11).

Este filtro presenta una mínima impedancia (resistencia propia del inductor), con lo cual absorbe corriente armónica con baja distorsión de voltaje.

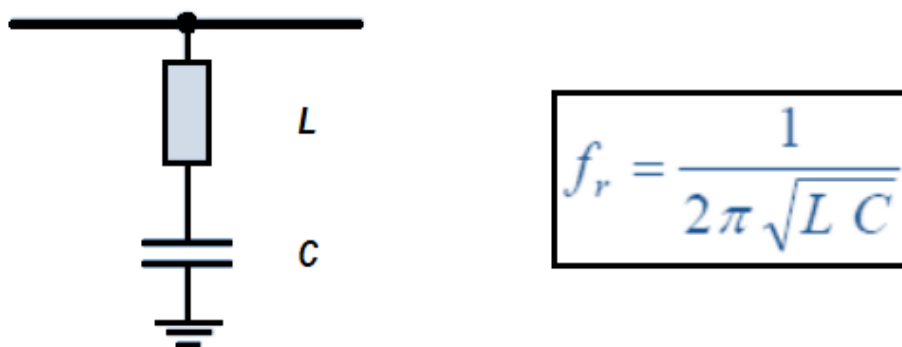


Figura 1.11 Conexión filtro pasivo paralelo resonante y frecuencia resonante [5].

Cuando este filtro está por un valor menor al de la frecuencia a la que fue sintonizado, tiene un comportamiento de capacitor y contribuye en la compensación de potencia reactiva, cuando el sistema se encuentra trabajando a frecuencia nominal.

Puesto que este filtro solo sirve para un tipo de frecuencia de resonancia, si se desea filtrar otras componentes armónicas, se deben emplear varias secciones de filtros, Figura 1.12.

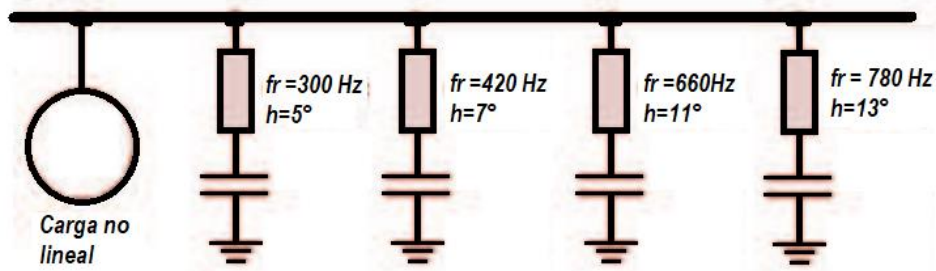


Figura 1.12 etapas sintonizadas en armónicos 5°, 7°, 11° y 13° [5].

Una de las desventajas del filtro paralelo resonante es su pérdida de sintonía, por lo cual se debe tener presente posibles ajustes (tap's) por correcciones en las tolerancias de fábrica. El desempeño del filtro es de gran importancia ya que junto al factor de calidad reducen problemas de pérdida de sintonía ante fluctuaciones de frecuencia de la red o frecuencia de resonancia del mismo filtro por variaciones de envejecimiento y temperatura.

1.5.3.4 Filtro Pasivo Paralelo con Amortiguamiento

Debido al espectro continuo de frecuencia, un filtro pasivo paralelo con amortiguamiento se utiliza con mucha frecuencia en instalaciones con hornos de arco, porque la probabilidad de inyectar corriente de igual frecuencia que la antiresonancia del filtro se ve incrementada.

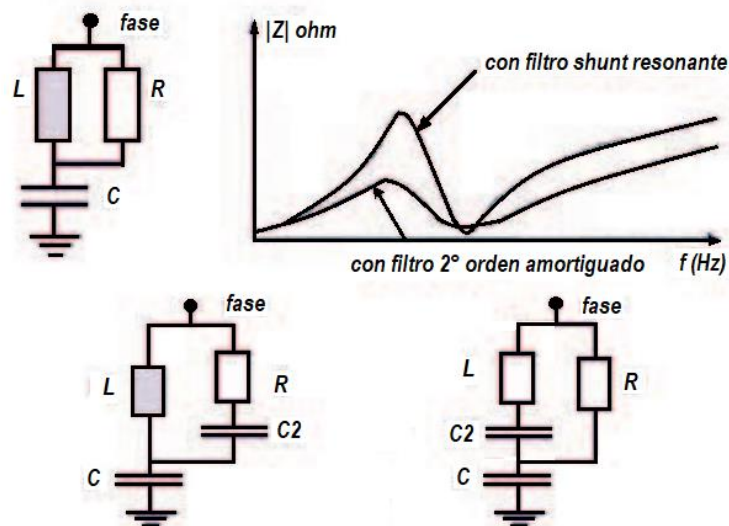


Figura 1.13 Configuraciones de filtros pasivos paralelo con amortiguamiento y variación de impedancia con respecto a la frecuencia [5].

El amortiguamiento se da por medio de una resistencia R ubicada en paralelo a L o LC (ver Figura 1.12) que reduce la impedancia de resonancia, pero incrementa las pérdidas a frecuencia fundamental.

1.5.4 FILTROS ACTIVOS [5]

El avance tecnológico de la electrónica de potencia para el control del flujo de la energía eléctrica, permite el desarrollo de los filtros activos de potencia, cuyo objetivo es mejorar la calidad de suministro.

Estos filtros se encuentran conformados por elementos pasivos y de electrónica de potencia como por ejemplo tiristores o transistores IGBT.

Un filtro activo consta de un módulo de potencia manejado por un módulo de control y encargado de suministrar a la red una forma de onda de corriente o de voltaje lo más sinusoidal posible.

Las diferencias con los filtros pasivos son: mayor costo, menor potencia y no tienen problema en producir resonancia con el sistema.

1.5.4.1 Filtro Activo Serie

No son muy utilizados ya que la inserción de una componente en serie resulta conflictiva por el difícil dimensionamiento que requieren en situaciones severas de fallas. Los filtros activos serie solo compensan los armónicos de voltaje mas no los de corriente que son generados por la carga, por esto no tienen una aplicación práctica.

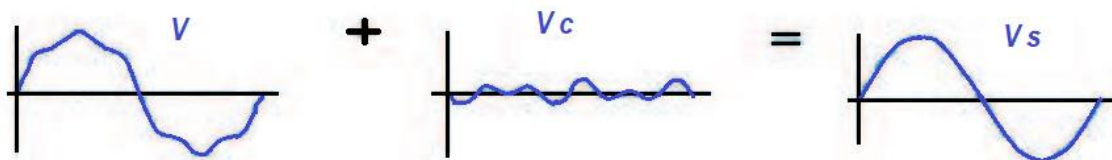


Figura 1.14 Compensación de forma de onda de un filtro activo serie [5].

Su funcionamiento se basa en compensar por medio de la generación de un voltaje de compensación V_c que se suma al suministro que se encuentra distorsionado V , resultando un voltaje sinusoidal V_s como muestra la Figura 1.14.

La unidad de control censa el voltaje v y la corriente i en la entrada generando una señal de voltaje referencial V_c para el convertidor. En general el filtro funciona como una fuente controlada de voltaje, (ver Figura 1.15).

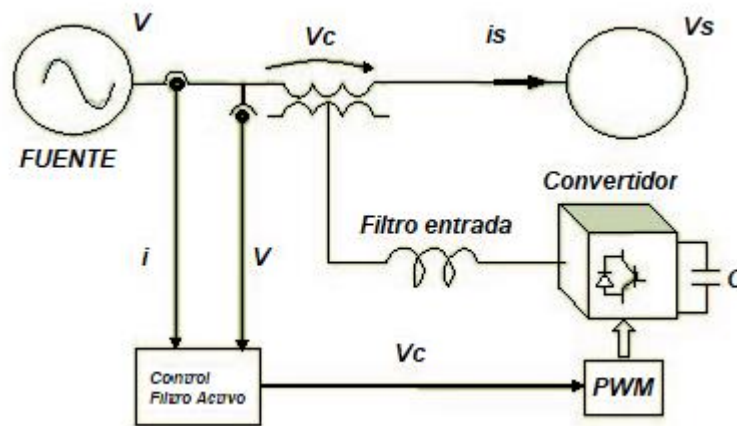


Figura 1.15 Funcionamiento de un filtro activo serie [5].

1.5.4.2 Filtro Activo Paralelo

Al contrario de los filtros activos serie, los filtros activos paralelos operan como generadores de corriente, compensando la forma de onda distorsionada por la carga.

La unidad de control de estos filtros mide constantemente la corriente i en el punto de conexión de la carga, y mediante un algoritmo calcula la corriente de compensación instantánea ic , por último, el convertidor inyecta una corriente ic en el punto de acoplamiento, tal como muestra la Figura 1.16.

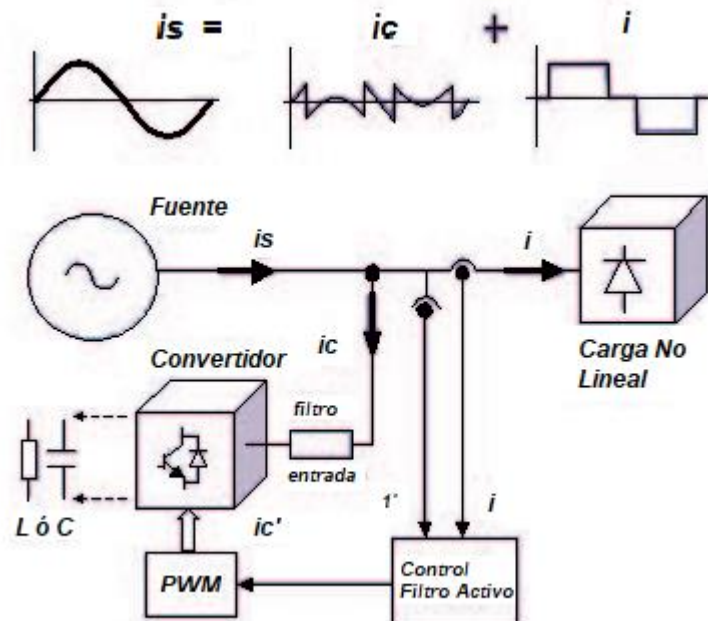


Figura 1.16 Funcionamiento de un filtro activo paralelo [5].

El convertidor trifásico o inversor se conecta con elementos capacitivos (operación como fuente de voltaje); e inductivos (operación como fuente de corriente) para almacenar la corriente que se inyecta al sistema.

Actualmente la fabricación comercial permite compensar hasta armónicos del orden 25°, pero esta compensación puede aumentar conectando varios equipos en paralelo.

1.5.4.3 Filtro Activos Combinados

Estos son una combinación de los filtros activos serie y paralelo, con lo cual se puede compensar el voltaje v de suministro y la corriente i_s de carga no lineal, simultáneamente. Esta combinación se la conocen como Acondicionador de Calidad de Potencia Unificado (Unified Power Quality Conditioner-UPQC) (ver Figura 1.17).

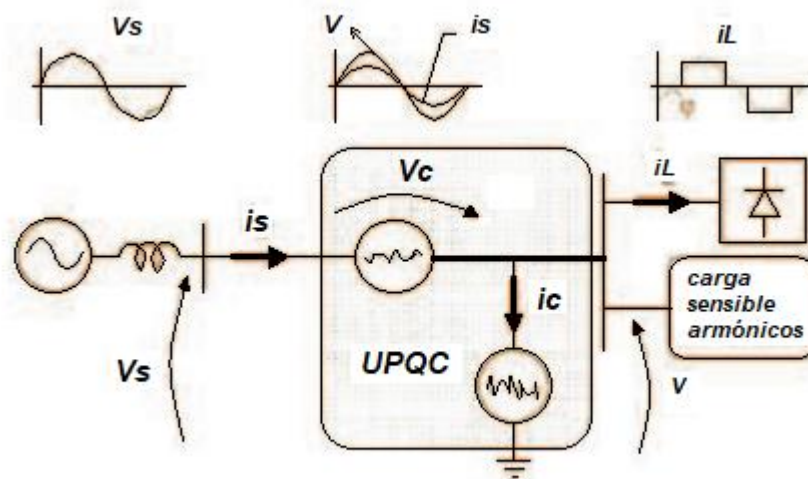


Figura 1.17 Aplicación de UPQC para compensación de voltajes y corrientes distorsionadas [5].

1.5.4.4 Filtro Híbridos

Se combinan tantos filtros pasivos como activos en sistemas donde el suministro tiene un voltaje distorsionado y alimenta a cargas no lineales.

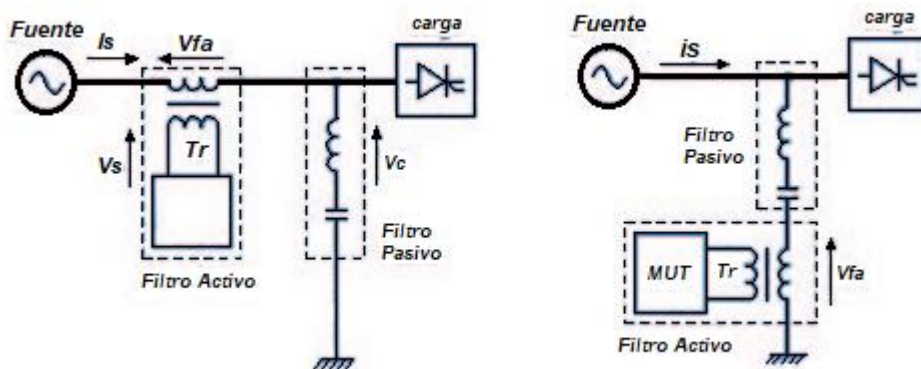


Figura 1.18 Conexión de filtros híbridos (paralelo-serie) [5].

1.5.4.5 Filtro Híbridos Serie-Paralelo

Un filtro híbrido serie-paralelo actúa como impedancia variable en serie, con alta impedancia frente a los armónicos y en cortocircuito para la frecuencia fundamental. Una desventaja de este filtro es el diseño del transformador Tr ya que toda sobrecarga en situaciones de cortocircuito y la corriente de carga circulan por el transformador.

1.5.4.6 Filtro Híbridos Paralelo-Serie

A los filtros Híbridos paralelo-serie se los puede utilizar en sistemas con mayor potencia y voltaje, además de ya no tener problemas de diseño del transformador Tr . La parte activa del filtro solamente actúa sobre el espectro armónico de corriente, logrando así aumentar la efectividad de la parte pasiva del filtro y por lo tanto proviene el incremento de voltajes armónicos hacia la fuente de suministro en las frecuencias antiresonantes del mismo bloque pasivo. Ambas partes, la pasiva y activa del filtro, se ven disminuidas en impedancia debido a la atenuación de armónicos de corriente entre fuente y carga.

1.6 NORMAS NACIONALES E INTERNACIONALES PARA LA EVALUACIÓN Y MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS

Se aplican para mejorar la calidad de la energía en el sector eléctrico en general y para que los equipos que contengan electrónica de potencia puedan emitir un valor límite de contenido armónico a la red eléctrica, además que la onda de voltaje y corriente no sea distorsionada bruscamente.

1.6.1 IEE 519-1992 “RECOMENDACIONES Y REQUISITOS PARA EL CONTROL DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA” [6]

Esta guía se utilizará en el diseño de sistemas de potencia con cargas no lineales. Los límites que se establecen en este documento son para operación en estado estable y es recomendable asumir “las peores condiciones”. Se pueden encontrar condiciones transitorias que sobrepasan estos límites. En cualquier caso, los valores límite indicados en este documento son recomendaciones, existe cierta ideología que no se la debe tomar en cuenta en ciertos casos.

Esta norma debe aplicarse en los puntos de conexión entre el sistema de distribución y los usuarios. Los límites de esta norma están destinados a la aplicación en el punto de acoplamiento común (PCC) entre el sistema de distribución y el usuario, donde el PCC generalmente es el punto más cercano al sistema de distribución donde ofrece su servicio a más usuarios.

Con frecuencia para los usuarios industriales (industrias, fabricas) que cuentan con un transformador de servicio dedicado, el PCC está en el lado de alto voltaje del transformador. Para usuarios comerciales (oficinas, centros comerciales, etc.) alimentados a través de un transformador de servicio común, el PCC suele estar en el lado de bajo voltaje del transformador de servicio común.

Los límites en esta norma representan una responsabilidad compartida para el control de armónicos entre el sistema de distribución y los usuarios. Los usuarios producen corrientes armónicas que fluyen a través del sistema de distribución, lo que genera armónicos de voltaje en la forma de onda entregada a otros usuarios. La cantidad de distorsión armónica de voltaje suministrada a otros usuarios es una función de los efectos agregados de las cargas productoras de corrientes armónicas de todos los usuarios y las características de impedancia del sistema de suministro.

Se establecen límites de distorsión de voltaje armónico para reducir los posibles efectos negativos en el usuario y el equipo del sistema. El mantenimiento de voltajes armónicos por debajo de estos niveles requiere que:

- Todos los usuarios limiten sus emisiones de corriente armónica a valores razonables determinados de manera equitativa en función de la participación de propiedad inherente que cada usuario tiene en el sistema de suministro.

- Cada operador del sistema toma medidas para disminuir los niveles de distorsión de voltaje modificando las características de impedancia del sistema de suministro según sea necesario.

Para permitir que el sistema de distribución controle las características de impedancia del sistema para reducir la distorsión de voltaje cuando sea necesario, los usuarios no deben agregar equipos pasivos que afecten la característica de impedancia de tal manera que aumenten las distorsiones de voltaje. En efecto, tales acciones por parte de un usuario podrían equivaler a producir una distorsión armónica de voltaje excesiva.

1.6.1.1 Límites de voltaje armónico recomendado

En el PCC el sistema de distribución o los usuarios deben limitar los armónicos de voltaje de línea a neutro de tal manera que cumplan con la Tabla 1.1:

Tabla 1.1 Límites máximos de armónicos de voltaje.

Voltaje individual en el PCC	Armónica Individual (%)	THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V < 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V < 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5*

*Los sistemas de alto voltaje pueden tener hasta un 2% de THD donde la causa puede ser un HVDC cuyos efectos se atenuarán en los puntos de la red donde se conectarán los futuros usuarios.

1.6.1.2 Límites de distorsión de corriente recomendados para sistemas con capacidad nominal de 120 V a 69 kV

Los límites en esta norma se aplican para usuarios conectados a sistemas donde el voltaje nominal en el PCC es de 120 V a 69 kV. En el PCC, los usuarios deben limitar sus corrientes armónicas de acuerdo con la Tabla 1.2.

Todos los valores deben estar en porcentaje de la máxima corriente de demanda IL. Este valor de corriente se establece en el PCC y debe tomarse como la suma de las corrientes correspondientes a la demanda máxima durante cada uno de los doce meses anteriores dividida para 12. La Tabla 1.2 aplica para corrientes armónicas cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia de la red.

Tabla 1.2 Límites de distorsión de corriente para sistemas clasificados de 120 V a 69 kV .

Distorsión de corriente armónica máxima en porcentaje de IL *						
Orden armónico individual (armónicos impares)**						
Isc/IL	3<=h <11	11<=h<17	17<=h<23	23<=h<35	35<=h<50	TDD [%]
<20***	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

*Los armónicos pares están limitados al 25% de los límites [7] de armónicos impares anteriores.

** No se permiten distorsiones de corriente que resulten en una compensación de CC, por ejemplo, convertidores de media onda

*** Todos los equipos de generación de energía están limitados a estos valores de distorsión de corriente, independientemente de la Isc/IL real.

Donde:

Isc= corriente máxima de cortocircuito en el PCC.

IL= corriente de carga a demanda máxima (frecuencia fundamental) en el PCC en condiciones normales de operación.

Para los componentes de corriente interarmónicos con frecuencias que no son múltiplos enteros de la frecuencia de la red, los usuarios deben limitar los componentes a niveles suficientemente bajos para no producir efectos no deseados en el sistema de potencia y en el equipo conectado.

1.6.2 IEC 61000-3-12 “LÍMITES PARA LAS EMISIONES DE CORRIENTE ARMÓNICA PARA EQUIPOS CON CORRIENTE DE ENTRADA >16 A POR FASE” [8]

Esta parte de la norma trata de la limitación de las corrientes armónicas inyectadas en la red de suministro público. Los límites definidos en esta norma se aplican a los equipos eléctricos y electrónicos con una corriente asignada de entrada superior a 16 A e inferior o igual a 75 A por fase, destinados a ser conectados a las redes de distribución pública de bajo voltaje en corriente alterna de las siguientes condiciones:

- Voltaje nominal hasta 240 V, monofásica, dos o tres conductores;
- Voltaje nominal hasta 690 V, trifásica, tres o cuatro conductores;
- Frecuencia nominal de 50 Hz o 60 Hz.

Los límites definidos se aplican a los equipos conectados a las redes de 230 V/ 400 V, 50 Hz o 60 Hz.

Esta norma se aplica a los aparatos conectados a las redes de bajo voltaje interconectados con la red de servicio público, también se aplica a los equipos conectados a las redes de medio y alto voltaje interconectados con la red pública.

Notas:

- El campo de aplicación de esta norma se limita a los equipos conectados a las redes públicas de bajo voltaje, porque se pueden controlar globalmente en el punto de conexión común de medio voltaje las emisiones producidas por los equipos instalados en las redes de bajo voltaje privadas. Por medio de procedimientos definidos en la norma IEC 61000-3-6 y/o por medio de acuerdos contractuales entre el operador de la red de distribución y el cliente, es de esperar que los operadores de las redes privadas manejen el entorno de CEM (Compatibilidad Electromagnética) de modo que se garantice el cumplimiento de las disposiciones definidas en la norma IEC 61000-3-6 y/o en los acuerdos contractuales.
- Si el equipo se destina para conectarlo únicamente a las redes privadas, el fabricante debería precisar este particular en la documentación de los productos en cuestión.
- Para equipos con una corriente de entrada ≤ 16 A por fase, que no cumplan con los requisitos y los límites de la norma IEC 61000-3-2, se puede autorizarse su conexión a un determinado tipo de red de suministro de bajo voltaje.
- Los límites de esta norma no se aplican a los filtros de armónicos autónomos.

En esta norma se definen:

- a) Los requisitos y límites de emisión para los equipos;
- b) Los métodos de ensayo de tipo y simulación.

Los ensayos realizados conforme a esta norma son ensayos de tipo equipos completos.

La conformidad con esta norma puede también determinarse por medio de simulaciones validadas.

1.6.2.1 Límites de emisión

Los límites de corriente armónica especificados en las tablas se aplican para cada una de las corrientes de fase, y no para la corriente del conductor de neutro.

Para los equipos que disponen de varias corrientes asignadas, se realizará una evaluación para cada corriente.

Para los equipos que no cumplen con los límites de emisión de corriente armónica correspondientes a $R_{cc}=33$, se autorizan valores de emisión superiores a la medida donde R_{cc} sea 66. Se espera que esta disposición se aplique a la mayoría de los equipos cuya corriente de entrada es superior a 16 A por fase.

El fabricante tiene que seleccionar un valor presumible de R_{cc} .

Tabla 1.3 Límites de emisión en corriente para equipos que no sean trifásicos equilibrados.

Rcc mínimo	Corriente armónica individual admisible I_n/I_1^* [%]						Factores de distorsión de corriente armónica admisible [%]	
	I3	I5	I7	I9	I11	I13	THD	PWHD
33	21.6	10.7	7.2	3.8	3.1	2	23	23
66	24	13	8	5	4	3	26	26
120	27	15	10	6	5	4	30	30
250	35	20	13	9	8	6	40	40
≥ 350	41	24	15	12	10	8	47	47

Tabla 1.4 Límites de emisión en corriente para equipos trifásicos equilibrados.

Rcc mínimo	Corriente armónica individual admisible I_n/I_1^* [%]				Factor de distorsión armónica de corriente admisible [%]	
	I5	I7	I11	I13	THD	PWHD
33	10.7	7.2	3.1	2	13	22
66	14	9	5	3	16	25
120	19	12	7	4	22	28
250	31	20	12	7	37	38
≥ 350	40	25	15	10	48	46

Tabla 1.5 Límites de emisión en corriente para equipos trifásicos equilibrados bajo condiciones especificadas.

Rcc mínimo	Corriente armónica individual admisible I_n/I_1^* [%]				Factor de distorsión armónica de corriente admisible [%]	
	I5	I7	I11	I13	THD	PWHD
33	10.7	7.2	3.1	2	13	22
≥ 120	40	25	15	10	48	46

* I_1 = corriente fundamental de referencia, I_n = componente armónica de la corriente.

Los valores relativos de los armónicos pares de orden inferior o igual a 12 no deben sobrepasar $16/n$ %. Los armónicos pares de orden estrictamente superior a 12 se tienen en cuenta en el THD y en el PWHD (Partial Weighted Harmonic Distortion) de la misma manera que los armónicos de orden impar.

1.6.3 REGULACIÓN No. ARCERNNR-002/20 “CALIDAD DEL SERVICIO DE DISTRIBUCIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA”

[9]

Esta regulación es de cumplimiento obligatorio para las empresas eléctricas de distribución, CENACE cuando corresponda, y para los consumidores regulados conectados a las redes de distribución.

El objetivo de la regulación es establecer los indicadores, índices y límites de calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica; y definir los procedimientos de medición, registro y evaluación a ser cumplidos por las empresas eléctricas de distribución y consumidores, según corresponda.

1.6.3.1 Corriente y voltaje armónico relativo

Es la relación porcentual entre el valor eficaz del armónico de orden h y el valor eficaz de la componente fundamental. Este se define mediante las siguientes ecuaciones:

$$I_h = \frac{I_{hrms}}{I_{1rms}} \times 100\% \quad (1.3)$$

$$V_h = \frac{V_{hrms}}{V_{1rms}} \times 100\% \quad (1.4)$$

1.6.3.2 Distorsión Armónica Total

La distorsión armónica total (THD) es una medida del valor eficaz de las componentes armónicas con respecto a la fundamental de una onda distorsionada de voltaje o corriente; proporciona una medida porcentual del contenido armónico presente en la onda distorsionada.

Este índice se calcula mediante las expresiones:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^n I_h^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \times 100\% \quad (1.5)$$

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^n V_h^2}}{V_1} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \times 100\% \quad (1.6)$$

1.6.3.3 Distorsión de Demanda Total

La Distorsión de Demanda Total (TDD) es el valor eficaz de las componentes armónicas de corriente de una onda distorsionada con respecto a la corriente máxima de carga (I_L) en el punto de conexión.

Este índice se lo calcula de la siguiente manera:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^n I_h^2}}{I_L} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}}{I_L} \times 100\% \quad (1.7)$$

1.6.3.4 Límites de Distorsión Armónica Parcial y Total de Voltaje

Los límites máximos de factor de distorsión armónica individual de voltaje y del factor de distorsión armónica total de voltaje son los siguientes [9]:

Tabla 1.6 Límites máximos de armónicos de voltaje (% del voltaje nominal).

Nivel de Voltaje	Factor de Distorsión Armónica Individual (%)	THD (%)
Bajo Voltaje	5.0	8.0
Medio Voltaje	3.0	5.0
Alto Voltaje (Grupo 1)	1.5	2.5
Alto Voltaje (Grupo 2)	1.0	1.5

1.6.3.5 Límites de Distorsión Armónica Parcial, Total y de Demanda Total de Corriente

Los límites de distorsión armónica individual de corriente y distorsión de demanda total son los siguientes [9]:

Tabla 1.7 Niveles máximos de distorsión armónica de corriente

Nivel máximo de armónicos impares* (% de la corriente máxima de demanda)						
Icc/IL	3<=h<11	11<=h<17	17<=h<23	23<=h<35	35<=h<50	TDD [%]
<20**	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

* Los límites para armónicos pares corresponden al 25% de los límites indicados en la tabla.

** Todos los equipos están limitados a estos valores de distorsión de corriente, donde Icc= corriente máxima de cortocircuito en el PCC; e, IL= corriente máxima de carga a frecuencia fundamental (60Hz).

CAPITULO II

2. GUÍA PRÁCTICA PARA LA MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS EN LA INDUSTRIA

2.1. RECOPIACION DE DATOS TÉCNICOS

2.1.1 DESCRIPCIÓN Y UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA INDUSTRIA

La descripción de los procesos que realiza una industria es necesaria para tener una idea de los elementos eléctricos que interactúan dentro de cada uno de los procesos y los efectos eléctricos que ocurren el momento de ejecutarlos.

La ubicación geográfica de la industria es de utilidad para la modelación y simulación de la industria, en base a la ubicación se solicita el equivalente de thevenin en el punto de conexión a la empresa distribuidora de energía que suministra energía al sector donde funcionan las instalaciones.

2.1.2 DATOS EN MEDIO VOLTAJE

2.1.2.1 Equivalente Thevenin [11]

El teorema de Thevenin establece que un circuito lineal de dos terminales puede reemplazarse por un circuito equivalente que consta de una fuente de voltaje V_{th} en serie con una impedancia Z_{th} , donde V_{th} es el voltaje de circuito de circuito abierto en las terminales y Z_{th} es la resistencia equivalente en las terminales cuando las fuentes independientes se apagan.

En la práctica suele ocurrir que un elemento en particular de un circuito sea variable (usualmente llamado carga) mientras que los demás elementos permanecen fijos. Como ejemplo habitual, en un tomacorriente doméstico se pueden conectar diferentes aparatos, los que constituyen una carga variable. Cada vez que el elemento variable cambia, el circuito entero tiene que volver a analizarse de nuevo. Para evitar este problema, el teorema de Thevenin proporciona una técnica mediante la cual la parte fija del circuito se reemplaza por un circuito equivalente.

De acuerdo con el teorema de Thevenin, el circuito lineal de la Figura 2.1 puede reemplazarse por el de la Figura 2.2 (la carga de la Figura 2.1 puede ser una resistencia o un circuito). El circuito a la izquierda de las terminales a-b en la Figura 2.2 se conoce como circuito equivalente de Thevenin y fue desarrollado en 1853 por el ingeniero de telégrafos francés M. Leon Thevenin (1817-1883).

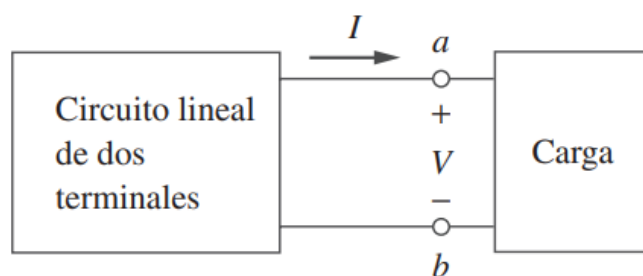


Figura 2.1 Reemplazo de un circuito lineal de dos terminales por su equivalente de Thevenin (circuito original) [11].

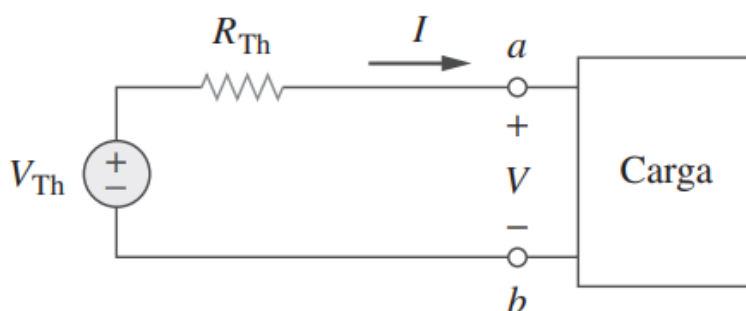


Figura 2.2 Reemplazo de un circuito lineal de dos terminales por su equivalente de Thevenin (circuito equivalente de Thevenin) [11].

En base a la definición anterior, el equivalente Thevenin es necesario para reducir todo el sistema eléctrico de la empresa distribuidora a una fuente con una impedancia y la industria en análisis será la carga conectada en los terminales a-b como se indica en la Figura 2.2.

2.1.2.2 Acometida Principal

Este dato es entregado por la empresa distribuidora que proporciona energía a la región donde funciona la industria, en el caso de las ciudades principales estos datos son de fácil acceso ya que el sistema GIS de algunas empresas distribuidoras de energía tiene una base de datos de los equipos eléctricos instalados en su red eléctrica como: transformadores, seccionadores, alimentadores principales, alimentadores secundarios, etc. Debido a la posibilidad de acceder a la base de datos de las empresas distribuidoras de energía, se pueden obtener datos reales de los conductores usados en las redes eléctricas de toda la región, del tipo de red instalada, el calibre y tipo de conductor que es usado en las redes de distribución y la distancia real que recorre cada tramo de distribución.

Los datos necesarios de la acometida principal son:

- Tipo de red (Aéreo o Subterránea)
- Longitud de la red.

- Calibre y tipo de conductor.

La acometida principal empieza desde el transformador de distribución más cercano a la industria y termina en los bornes de alto voltaje del transformador que abastecerá la demanda de la industria.

2.1.3 DATOS EN BAJO VOLTAJE

2.1.3.1 Acometida Secundaria

La acometida secundaria comienza desde los bornes de bajo voltaje del transformador que abastecerá la demanda de la industria en cuestión, y termina en la entrada de los equipos utilizados para la energización o desenergización de los equipos eléctricos de la industria (Switchgear), equipos utilizados para el control de motores (MCC).

2.1.3.2 Centro de Control de Motores (MCC) [11] [13]

Un MCC es un tablero que contiene como funciones principales las de alimentar, controlar y proteger circuitos cuyas cargas, generalmente, son motores.

La necesidad de estos equipos data de tiempo después de la revolución industrial donde anteriormente se contaba un solo motor de vapor muy potente para alimentar toda la planta. Conforme fue avanzando la tecnología se inventaron los motores eléctricos, los cuales no eran tan potentes en sus inicios como los de vapor, pero si más compactos.

Al tener tantos motores distribuidos por toda la planta nació la necesidad de tenerlos centralizados en un solo punto para evitar recorridos innecesarios. Fue entonces cuando se configuró en 1956, el primer Centro de Control de Motores.

La Figura 2.3 detalla la estructura interna y externa de un MCC.

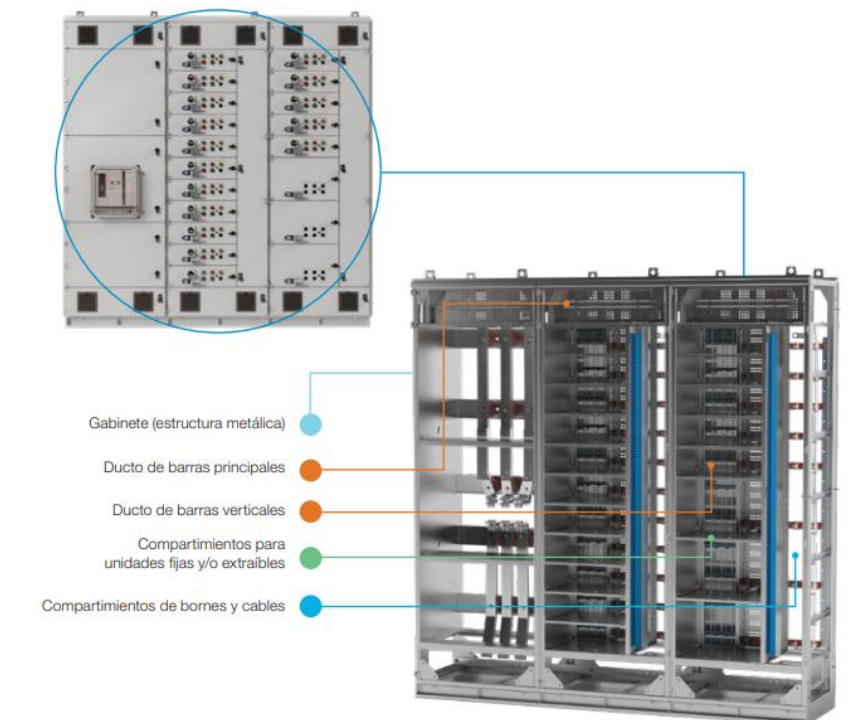


Figura 2.3 Estructura interna y externa de un MCC [13].

- **Gabinete:** estructura metálica de todo el MCC.
- **Ducto de barras principales:** barras de cobre que atraviesan horizontalmente por la parte de en medio a todo el CCM, alimentando así a las barras verticales que a su vez alimentarían a cada una de las cargas alojadas en la misma [13].
- **Ducto de barras verticales:** barras verticales que van a lo largo de la altura de cada columna del MCC. Son alimentadas por el bus horizontal.
- **Compartimiento para unidades fijas y/o extraíbles:** Unidades que alimentan las cargas y donde se alojan los equipos de control de las mismas.
- **Compartimiento de bornes y cables:** Espacio físico utilizado para la ubicación del cableado y puntos de conexión.

Los datos de placa necesarios para la simulación de un MCC son:

- Voltaje nominal [V]
- Corriente nominal [A]
- Potencia [KW]

2.1.3.3 Variadores de Velocidad [14]

Los variadores de velocidad son sistemas que se encuentran entre la fuente de alimentación eléctrica y los motores eléctricos. Sirven para regular la velocidad de giro de los motores de corriente alterna (AC).

Regulando la frecuencia de la electricidad que recibe el motor, el variador de frecuencia consigue ofrecer a este motor la electricidad demandada, evitando así la pérdida de energía, o lo que es lo mismo, optimizando el consumo.

Los datos de placa necesarios para la simulación de una industria que cuente con variadores de velocidad son:

- Voltaje nominal [V]
- Corriente nominal [A]
- Espectro armónico de corriente [%]

2.1.3.4 Alimentadores para abastecer la demanda de la carga [15]

Los conductores THHN o THWN-2 pueden ser sólidos o cableados y están contruidos con cobre de temple suave, están además aislados con una capa uniforme de material termoplástico policloruro de vinilo [PVC] resistente a la humedad y al calor elevado, sobre la cual se aplica una cubierta protectora de nylon o poliamida.

Son utilizados para circuitos de fuerza y alumbrado público en edificaciones industriales, comerciales y residenciales, son especialmente aptos para instalaciones especiales por ductos difíciles y para usarse en zonas abrasivas o contaminadas con aceites, grasas, gasolina y otras sustancias químicas corrosivas, Tal como se especifica en el National Electrical Code, este tipo de conductor, cuando es utilizado como THHN puede ser usado en lugares secos con temperatura máxima de operación de 90°C, pero si es utilizado como THWN-2 puede ser usado en lugares secos y húmedos con temperatura máxima de operación de 90°C, así mismo cuando están expuestos a aceites, grasas, pinturas, solventes químicos, etc. En cuanto a su tensión de servicio, para todas las aplicaciones, es de 600 V.

2.2. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN

Para realizar la simulación de una industria es necesario el uso de un software comercial el cual debe ser amigable al momento de ingresar datos, realizar flujos de potencia, cálculo de cortocircuitos, flujos armónicos y simulaciones dinámicas en cada uno de los escenarios requeridos por el usuario.

El software de simulación ETAP 19.0.1 es un software comercial amigable, cuenta con los módulos necesarios para realizar: flujos armónicos, análisis de cortocircuitos, flujos de potencia, análisis de arco eléctrico, etc.

2.2.1 DISEÑO DE LA INDUSTRIA

Para realizar un esquema ideal y representativo de una industria en ETAP 19.0.1 es necesario tener como referencia un diagrama unifilar de la industria en detalle, en el cual se tenga especificado los datos de placa recopilados anteriormente: equivalente de thevenin, acometida principal, transformador, acometida secundaria, switchgears, MCC's, variadores de velocidad y cargas de gran potencia.

2.2.2 INGRESO DE DATOS EN EL SOFTWARE ETAP 19.0.1 [14]

2.2.2.1 Equivalente Thevenin

Con el diagrama unifilar de la industria modelado en ETAP 19.0.1 se procede a ingresar los datos recopilados, uno de los datos más importantes es el valor del equivalente Thevenin.

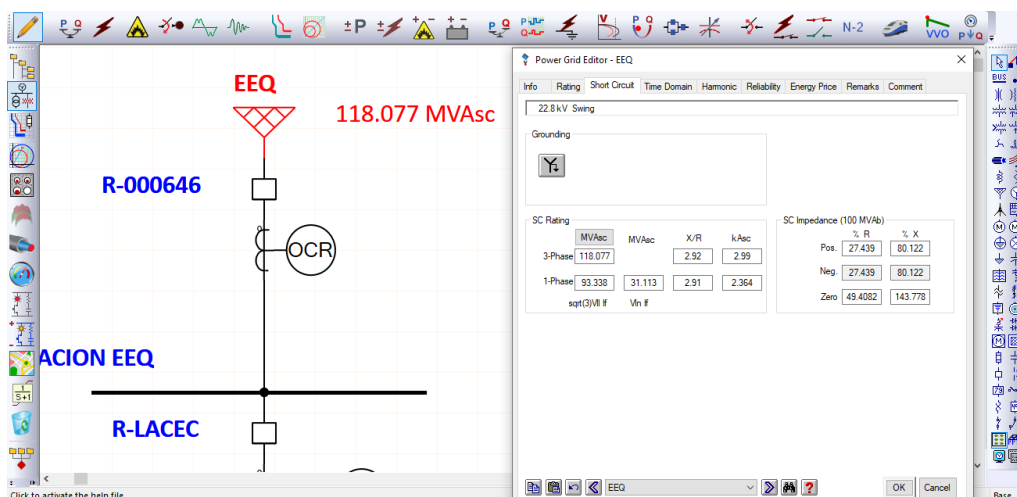


Figura 2.4 Ingreso de datos del equivalente de Thevenin.

La Figura 2.4 detalla los datos que solicita el módulo equivalente de thevenin (power grid editor) en ETAP 19.0.1, estos son:

- Información (info): esta pestaña sirve para incluir todos los datos informativos acerca de la red a la que se conecta, identificación, tipo de red, etc.
- Clasificación (rating): esta pestaña sirve para incluir el valor nominal del voltaje que va a entregar el equivalente de thevenin al usuario industrial.
- Cortocircuito (short circuit): esta pestaña sirve para incluir la información proporcionada por la empresa distribuidora de energía para en este punto modelar a la red eléctrica como una fuente para estudios de cortocircuitos, flujos de armónicos, flujos de potencia, arranque de motores, estabilidad transitoria, coordinación de protecciones, etc.

Las pestañas detalladas anteriormente son las más importantes para el modelado de la red a ser estudiada.

2.2.2.2 Acometida Principal y secundaria

Las acometidas por lo general son cables aéreos o subterráneo que transportan la energía eléctrica de una subestación a otra, o hacia un transformador de distribución, para una industria la acometida principal puede ser aérea o subterránea y por lo general con conductores trifásicos. Las acometidas secundarias son cable transportado por bandeja y son representadas como una resistencia en serie con una inductancia, ETAP 19.0.1 cuenta con una amplia librería de conductores tanto aéreos como subterráneos disponibles para el modelado de cualquier industria.

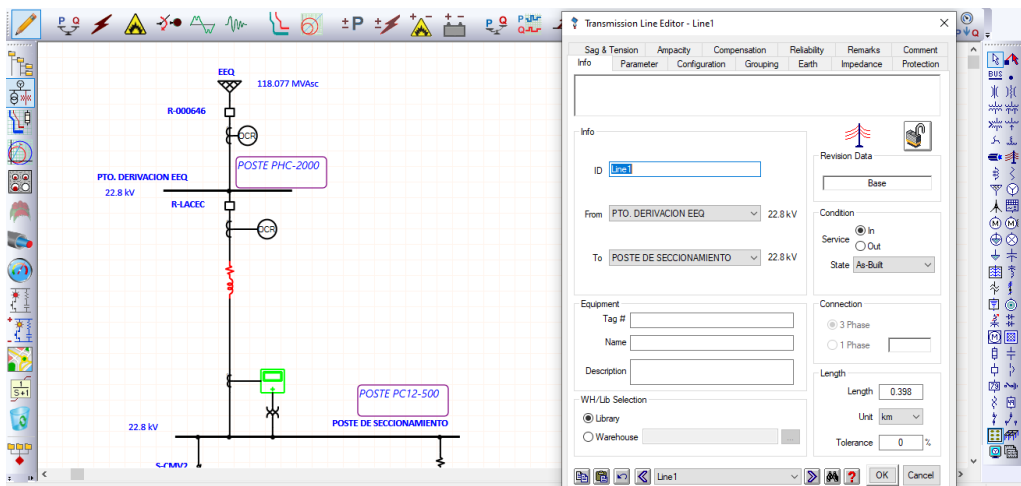


Figura 2.5 Acometida principal (aéreo).

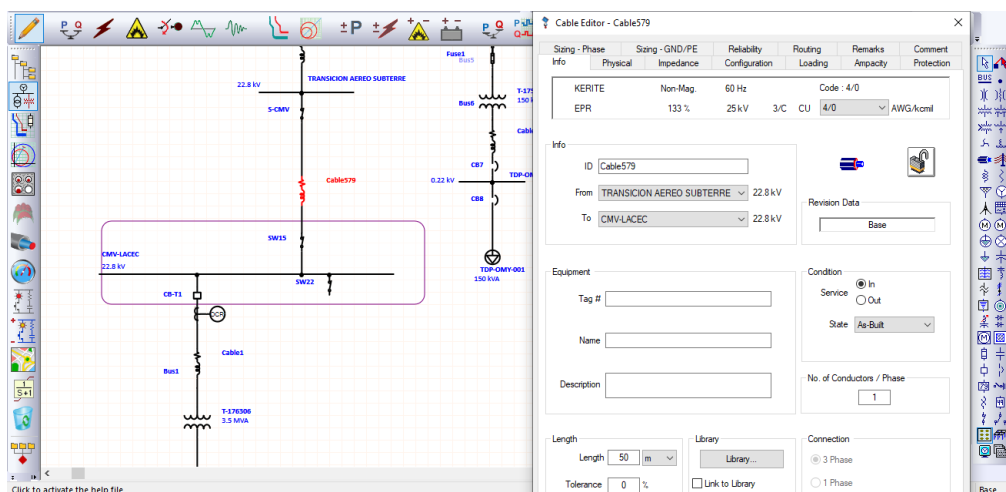


Figura 2.6 Acometida principal (subterráneo).

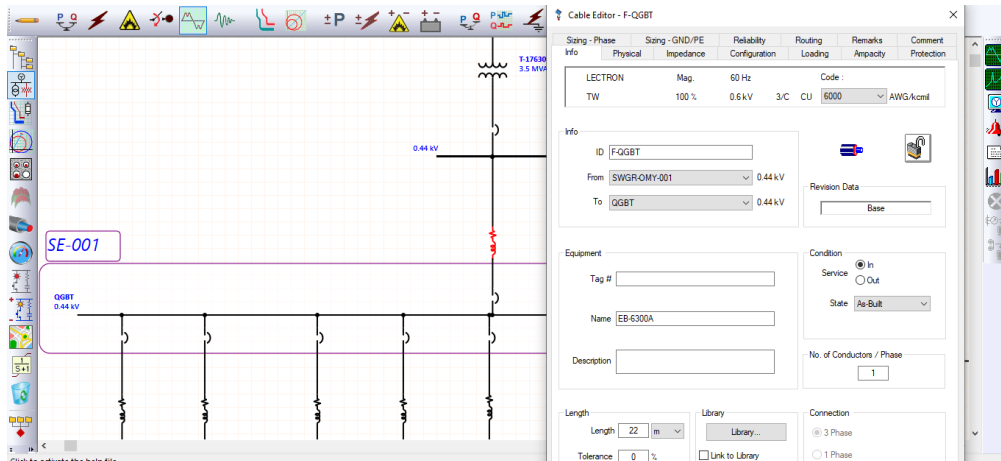


Figura 2.7 Acometida secundaria.

2.2.2.3 Centro de Control de Motores (MCC)

El centro de control de motores es representado como una barra común en ETAP 19.0.1, la Figura 2.8 muestra las pestañas que contiene la barra común para el ingreso de datos adicionales para que la barra pueda ser simulada como MCC, Switchgear, nodo, barra común, etc.

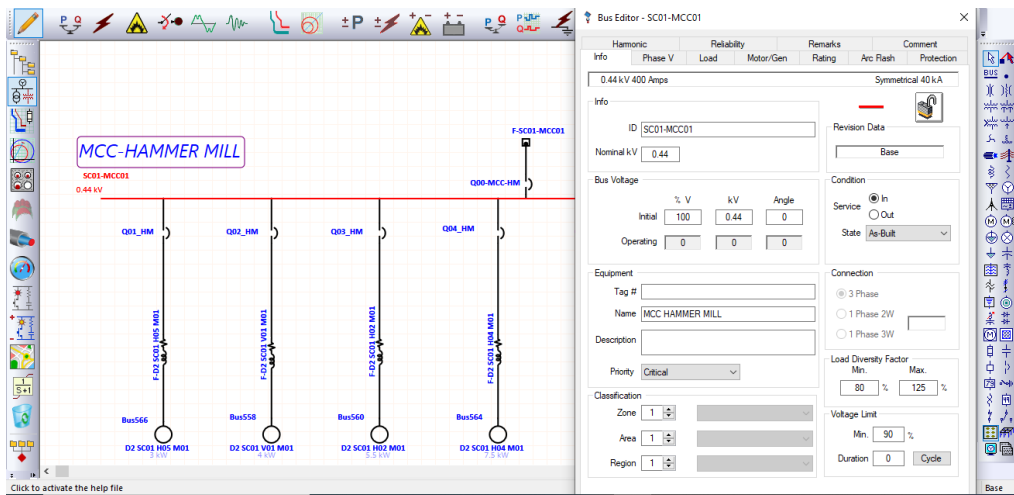


Figura 2.8 Ingreso de datos de placa para un MCC.

Las pestañas más importantes para la simulación son:

- Información (Info): Para especificar los datos de la barra, el estado, el voltaje nominal, voltaje inicial/operativo (magnitud y ángulo), factores de diversidad (máximo y mínimo) y la descripción del equipo.
- Clasificación (Rating): Para información sobre el tipo de equipo a simular: MCC, Switchgear, Switchboard, Panelboard, Others, etc. Para establecer los límites de

voltaje, aproximación y separación de equipos entre conductores en base al tipo de norma seleccionada.

2.2.2.4 Variador de velocidad

Los datos más relevantes para simular un variador de velocidad de 6 pulsos en ETAP 19.0.1 se los puede ver en la Figura 2.9.

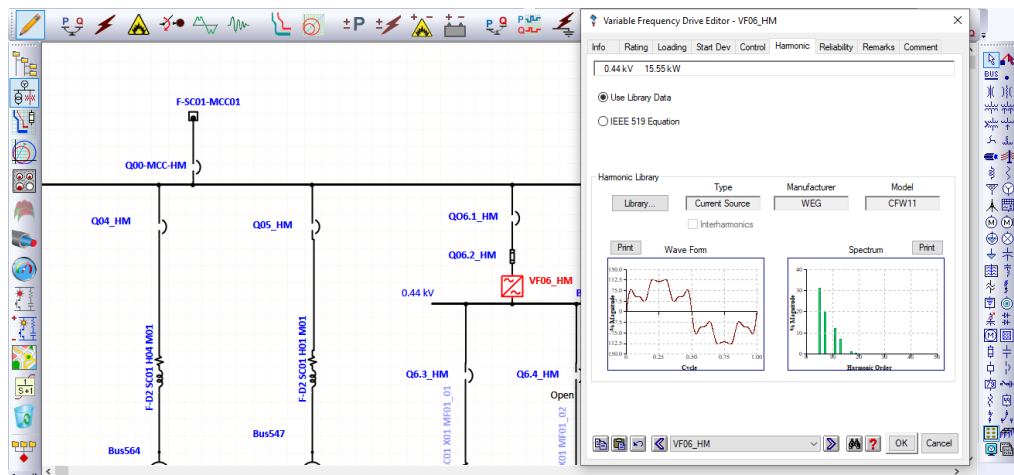


Figura 2.9 Ingreso de datos de placa para un variador de velocidad.

A continuación, se detalla las pestañas más importantes a modificar para el modelamiento y simulación de un variador de velocidad.

- Información (Info): Para especificar los datos del equipo: marca, barra de conexión, elementos de entrada y salida, identificación de la carga conectada.
- Clasificación (Rating): Para especificar los valores eléctricos de entrada y salida (Potencia activa, factor de potencia, voltaje, eficiencia y frecuencia) y la contribución a la corriente de cortocircuito.
- Armónico (Harmonic): para especificar el contenido armónico generado por este dispositivo. Etap 19.0.1 cuenta con una librería extensa de las marcas más renombradas de variadores y sus espectros armónicos, pero también cuenta con la posibilidad de crear el espectro armónico de marcas genéricas que no consten en la librería de armónicos.

2.2.2.4.1 Elaboración del espectro armónico

ETAP 19.0.1 cuenta con una extensa librería de espectros armónicos, para poder acceder a este debemos dar clic en Library en la barra de menú, se despliega un menú, se debe seleccionar Harmonic y se abrirá la librería de espectros armónicos de las marcas

comerciales más usadas a nivel mundial que tiene por default el software como se indica en la Figura 2.10.

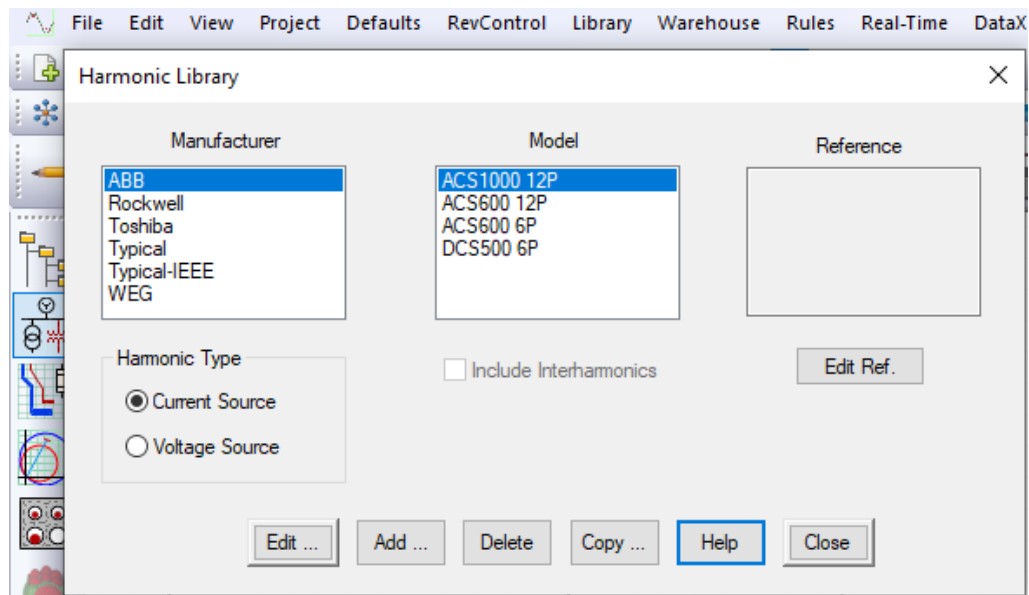


Figura 2.10 Librería principal de espectros armónicos.

De la Figura 2.11 a la Figura 2.14 se detalla el procedimiento para crear un variador y su respectivo espectro armónico de corriente siempre y cuando se tenga el porcentaje del contenido armónico que produce.

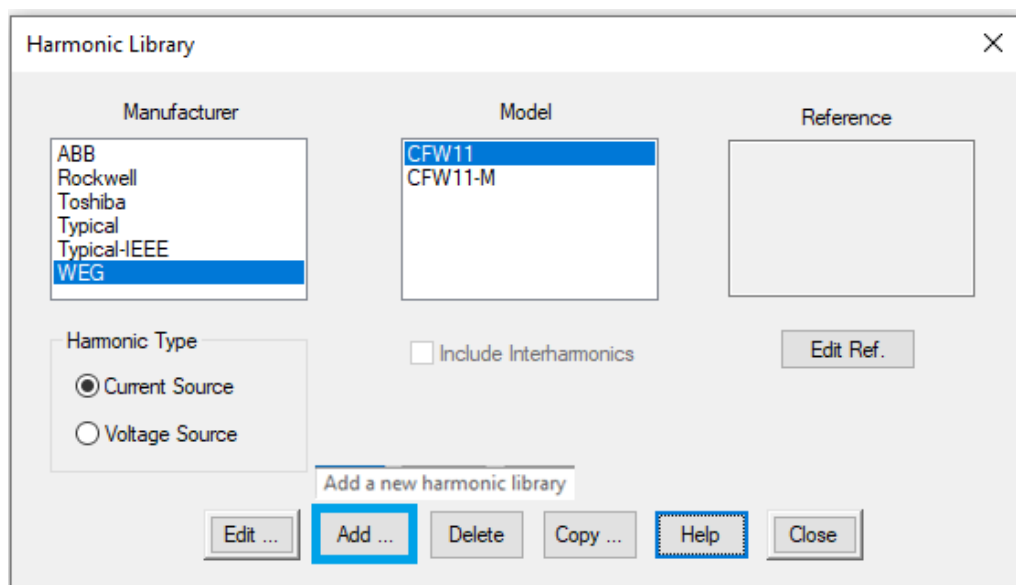


Figura 2.11 Creación de un nuevo modelo de variador.

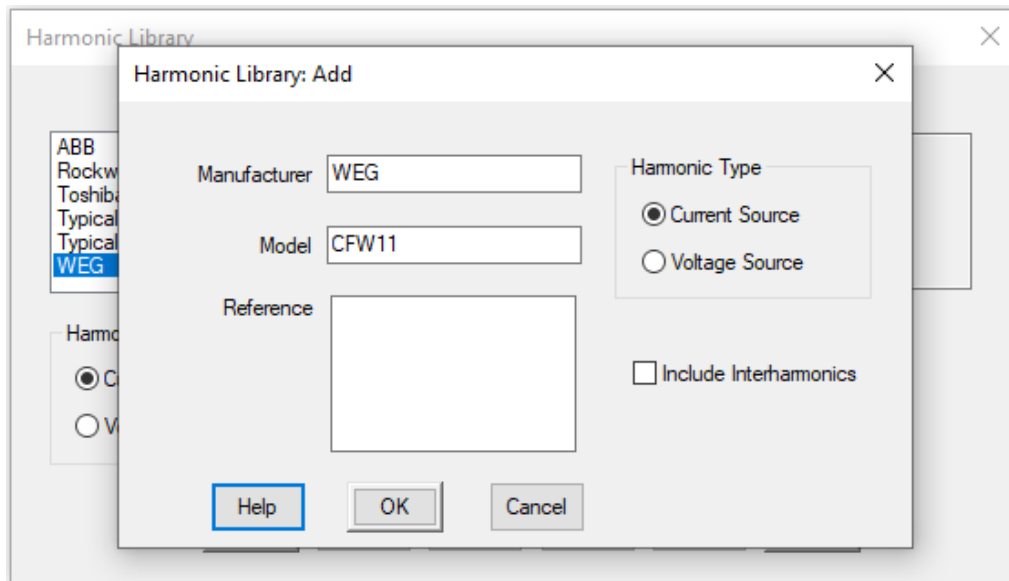


Figura 2.12 Datos de marca y modelo del variador.

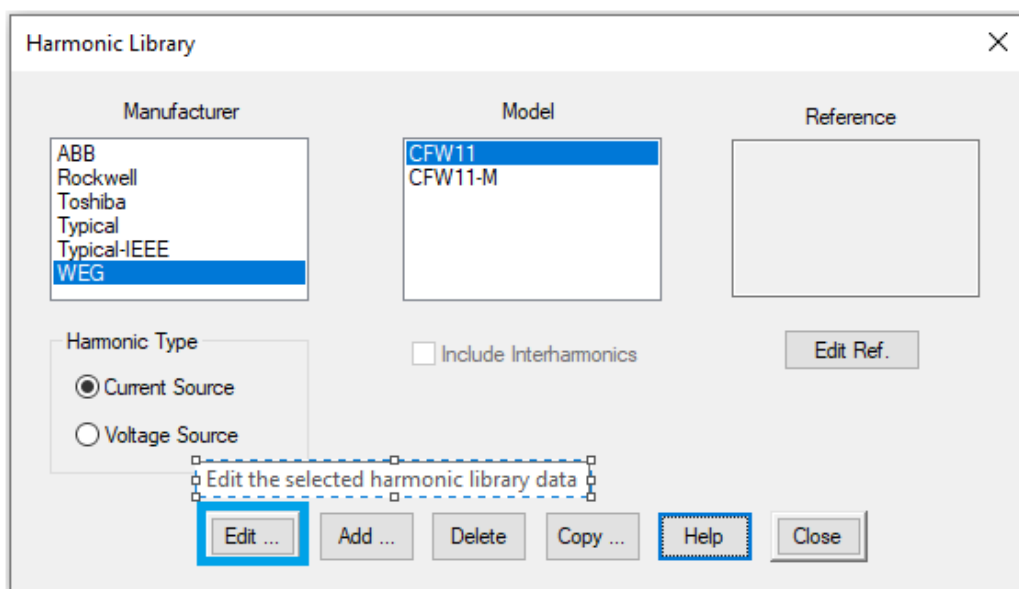


Figura 2.13 Creación del espectro armónico de corriente del variador.

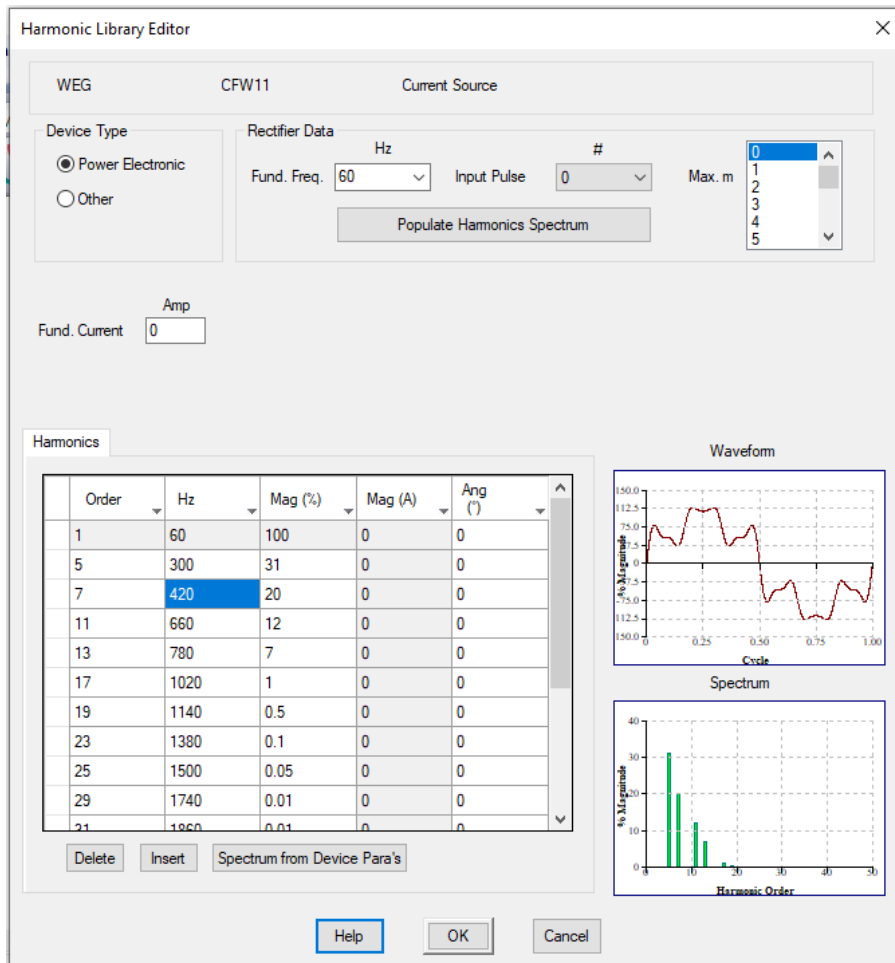


Figura 2.14 Ingreso del porcentaje armónico del espectro de corriente del variador.

2.2.2.5 Cargas de gran potencia

Para el detalle de las cargas a simular en ETAP 19.0.1 es necesario definir el tipo de carga a simular: estática, agrupada, motor de inducción o motor síncrono.

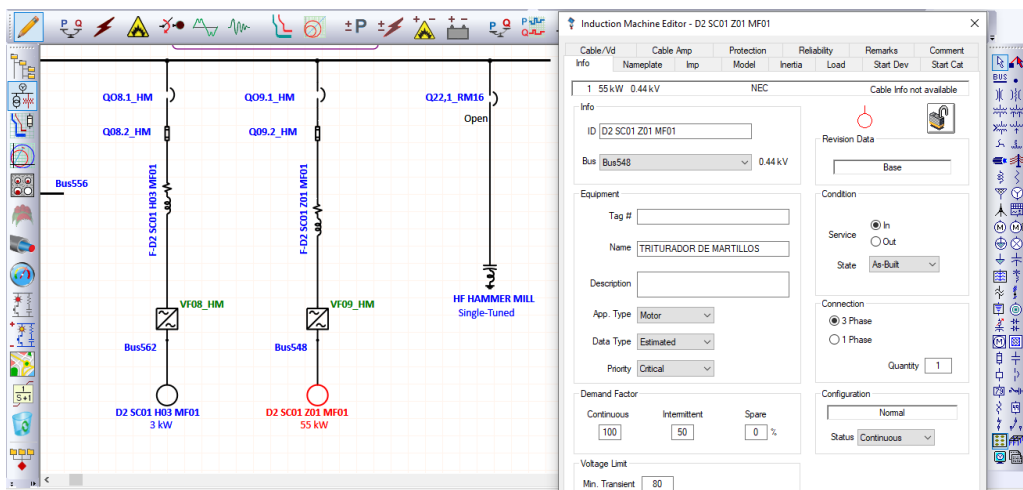


Figura 2.15 Carga de gran potencia (Motor de inducción).

La Figura 2.15 muestra los datos solicitados para simular un motor de inducción, las pestañas principales para modificar son:

- Información (Info): Para especificar la marca del equipo, descripción, barra de conexión, nivel de voltaje, estado de configuración, conexión de fase y factor de demanda.
- Datos de placa (Nameplate): Para especificar las características del motor (valores nominales). Selección de los datos del motor en la biblioteca, especificar el porcentaje de carga y las pérdidas del alimentador en la carga.

2.3. DISEÑO DEL FILTRO ARMÓNICO PARA LA MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS DE CORRIENTE [15][16]

El diseño de un filtro armónico requiere información sobre el sistema de potencia y el entorno en el que se instalará el filtro de armónicos. Esta información incluye características del sistema, como el voltaje nominal de línea a línea del sistema, el BIL típico del equipo para el nivel de voltaje del sistema y la frecuencia fundamental. Los datos ambientales, como la temperatura ambiente, la carga del viento, etc, deben estar disponibles. El propietario debe tomar decisiones, como la ubicación del equipo (interior o exterior) y las restricciones operativas, antes de que comience el diseño, ya que estas decisiones afectaran a ciertos aspectos del diseño, ya que estas decisiones afectan ciertos aspectos del diseño. Una comprensión clara del ciclo de trabajo actual del equipo y las tasas de repetición de conmutación también es importante para el diseño.

El diseño del filtro armónico requiere información básica sobre el sistema de potencia y la generación local de armónicos. Esta información incluye configuraciones del sistema, impedancia de los componentes del sistema (transformadores, líneas, fuentes, capacitores, filtros de armónicos, reactores de derivación), voltaje nominal y máximo, clasificaciones de potencia de carga y factores de potencia, y generación de armónicos. Las mediciones de armónicos en el sitio son los medios más precisos para obtener información de armónicos si las cargas ya están instaladas. De lo contrario, el fabricante del equipo debe proporcionar las características armónicas.

2.3.1 PASO 1: DETERMINACIÓN DE POTENCIA REACTIVA PARA EL FILTRO ARMÓNICO

Además del filtrado de armónicos, el equipo de filtrado proporcionará al sistema potencia reactiva capacitiva que mejorará el factor de potencia y ayudará a mantener el voltaje en condiciones de alta demanda. Los requisitos de potencia reactiva capacitiva para el factor

de potencia y el control de voltaje generalmente determinan el tamaño de “kvar efectivos” del filtro de armónicos. Los kvar efectivos del filtro de armónicos siempre son menores que los kvar de la placa de identificación del capacitor del filtro de armónicos debido al efecto sustractivo del reactor del filtro. Los kvar nominales se calculan en el Paso 4 del proceso de diseño.

Los programas de flujo de potencia se utilizan a menudo para determinar los requisitos de potencia reactiva capacitiva. Los factores que se deben considerar al realizar estos estudios son:

- ❖ Número de pasos del condensador del filtro de armónicos a conmutar.
- ❖ Rango de variación de voltaje del sistema.
- ❖ Rango de variación de carga.
- ❖ Configuraciones del sistema de potencia: normal y de contingencia, existente y planificada.

2.3.2 PASO 2: SELECCIÓN DEL FILTRO ARMÓNICO A SINTONIZAR

Con base en la generación de armónicos, se realizará una estimación inicial de la sintonización del filtro de armónicos. La sintonización se realiza para reducir el voltaje armónico y la distorsión de corriente para cumplir con este objetivo, el filtro de armónicos normalmente se sintonizará a la frecuencia más baja de los armónicos más significativos. Por ejemplo, si los niveles de corriente armónica más altos fueran para los armónicos 5° y 7°, un solo filtro sintonizado cerca del armónico 5 puede ser suficiente para controlar la distorsión. Las evaluaciones posteriores con un programa de análisis de armónicos pueden determinar el requerimiento de otros filtros de armónicos.

Los filtros armónicos no suelen estar sintonizados con frecuencias armónicas exactas. Sintonizar directamente la frecuencia armónica puede tener dos consecuencias indeseables:

- a) La baja impedancia en resonancia puede resultar en que casi toda la corriente armónica a esa frecuencia sea absorbida por el filtro armónico. Se requiere que el filtro armónico sea más grande y más costoso de lo que se necesita para lograr el rendimiento armónico requerido.
- b) La interacción del filtro de armónicos con las impedancias del sistema da como resultado una resonancia paralela a una frecuencia justo por debajo de la frecuencia sintonizada. Si un filtro armónico se diseña exactamente en la frecuencia armónica, una variación en los valores de impedancia del equipo real con respecto a los valores de diseño podría volver a sintonizar el filtro armónico y

colocar la frecuencia resonante paralela muy cerca de la armónica. Los niveles de distorsión se vuelven inaceptables y la amplificación de voltaje dañina puede resultar en casos severos. Los cambios en el suministro del sistema también pueden cambiar la resonancia paralela.

Los mecanismos más comunes que provocan un cambio en la resonancia son los siguientes:

- 1) Fallo del elemento/unidad del condensador del filtro de armónicos. Los bancos cuentan con fusibles que funcionan cuando una unidad o elemento se cortocircuita. La operación del fusible reduce la capacitancia total y aumenta la frecuencia de resonancia del filtro de armónicos. Por otro lado, los elementos en cortocircuito en un banco de condensadores de filtro de armónicos sin fusibles no se aíslan del circuito y la capacitancia aumenta en tanto que la frecuencia de resonancia disminuye.
- 2) Tolerancia: Tolerancias de fabricación tanto en los reactores del filtro de armónicos como en los capacitores del filtro de armónicos, y el cambio de capacitancia debido a las variaciones de temperatura en los capacitores.
- 3) Variaciones del sistema: las configuraciones del sistema de alimentación no son estáticas.
 - ❖ La pérdida de uno de los dos transformadores en paralelo o de uno de los alimentadores de suministro puede debilitar la fuente y cambiar la resonancia en paralelo a una frecuencia más baja.
 - ❖ El mantenimiento de rutina a menudo puede resultar en un “debilitamiento” de la fuente que alimenta la carga productora de armónicos.
 - ❖ Partes de los circuitos aéreos pueden reemplazarse con líneas subterráneas y las líneas pueden reubicarse. Estos cambios afectaran la impedancia entre la fuente y la carga.

Suele ser ventajoso ajustar el filtro de armónicos aproximadamente entre un 3% y un 15% por debajo de la frecuencia deseada. Esta sintonización proporcionará un filtrado de armónicos suficiente, pero también permitirá la desafinación del filtro de armónicos.

Para algunas instalaciones con múltiples filtros armónicos sintonizados a diferentes frecuencias, puede que no resulte ventajoso sintonizar filtros armónicos individuales por debajo de la frecuencia armónica. Debe considerarse el rendimiento del filtro de armónicos, tanto en condiciones normales como de contingencia.

La reactancia del capacitor del filtro de armónicos está determinada por el tamaño de kvar del filtro de armónicos. La reactancia inductiva se selecciona para crear una resonancia en serie con el capacitor del filtro armónico en la frecuencia sintonizada. La resonancia en serie proporciona una ruta de baja impedancia neutral para los armónicos del sistema.

Una ecuación simple para calcular la reactancia capacitiva (para un filtro sintonizado con el armónico h) a frecuencia industrial se indica en la Ecuación (2.1)

$$X_C = \left(\frac{h^2}{h^2 - 1} \right) \times X_{eff} \quad (2.1)$$

Donde:

$$X_{eff} = \frac{kV_{LLsys}^2}{Q_{eff}(Mvar)} \quad (2.2)$$

Una ecuación simple para calcular la reactancia inductiva a frecuencia industrial es la Ecuación (2.3)

$$X_L = \frac{X_C}{h^2} \quad (2.3)$$

Donde

X_{eff} es la reactancia efectiva del filtro armónico,

Q_{eff} es la potencia reactiva efectiva (Mvar) del filtro armónico,

V_{LLsys} es el voltaje nominal de línea a línea del sistema,

X_C es la reactancia capacitiva del capacitor del filtro armónico a la frecuencia fundamental,

X_L es la reactancia inductiva del reactor de filtro de armónico a la frecuencia fundamental,

h es el número de armónico.

Si la afinación del filtro armónico se elige ligeramente menor que la frecuencia armónica sugerida, la h de la Ecuación (2.3) no será un número entero. Por ejemplo, h será igual a 4,7 para un filtro de armónico 5 sintonizado a 282 Hz en un sistema de 60 Hz.

Un objetivo alternativo en la sintonización del filtro de armónicos puede ser evitar los armónicos en lugar de reducirlos. Esta alternativa se usa a veces cuando los niveles de distorsión armónica no son críticos, pero el usuario quiere evitar sobrecarga del capacitor del filtro armónico con corrientes armónicas y evitar una resonancia armónica en el sistema de potencia. En este caso, el filtro armónico no está conectado a tierra (para evitar la resonancia del tercer armónico con el sistema) y se ajusta por debajo del quinto armónico (es decir, 4.3 o 4.7) para evitar resonancia en un armónico característico (por ejemplo 5°, 7°).

2.3.3 PASO 3: OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DEL FILTRO

IEEE Std 519-1992 proporciona pautas para los límites de distorsión armónica. El filtro de armónicos debe limitar tanto la distorsión de voltaje como la de corriente en un rango de configuraciones normales del sistema, así como también en condiciones anormales. El análisis se puede hacer con cálculos manuales para sistemas simples. Sin embargo, por lo general, se requiere un programa de simulación de armónicos para evaluar adecuadamente cada una de las posibles condiciones de operación sobre el espectro de frecuencia de las cargas armónicas. IEEE Std 519-1992 e IEEE Std 399-1997 brindan orientación sobre cómo realizar los estudios requeridos.

Los estudios de armónicos permitirán determinar la cantidad, la sintonización y la ubicación de los filtros de armónicos en función del cumplimiento de los límites de contenido armónico establecidos o normados. Los factores que se deben considerar al realizar estos estudios se resumen a continuación:

- a) Número de pasos del filtro de armónicos a conmutar
- b) Interrupción de un filtro de armónicos, si se utiliza más de un filtro de armónicos
- c) Rango de variación de voltaje del sistema
- d) Rango de variación de la carga
- e) Configuraciones del sistema de potencia normal y de contingencia
- f) Desintonización del filtro de armónicos por cambios en la frecuencia del sistema, rango de tolerancia de fabricación de los componentes, variación de capacitancia con temperaturas severas y cortes de la unidad de condensadores del filtro de armónicos
- g) Armónicos característicos y no característicos
- h) Armónicos de fondo del sistema

Si los niveles de distorsión siguen siendo demasiado altos, puede deberse a que la adición de un filtro armónico ha provocado una nueva resonancia paralela con el sistema

cerca de uno de los armónicos de frecuencia más baja. En este caso, a veces puede ser adecuado volver a sintonizar el filtro armónico a la frecuencia armónica más baja. Si no es así, es posible que se necesiten filtros de armónicos sintonizados múltiples.

La amplitud de la sintonización se puede aumentar para tener en cuenta las desviaciones de capacitancia e inductancia al aumentar el tamaño de kvar del filtro.

El análisis armónico puede determinar la frecuencia o frecuencias sintonizadas y los valores de las(s) capacitancia(s), inductancia(s) y resistencia(s) (si es necesario). Pueden establecerse tolerancias permitidas para capacitancia, inductancia y resistencia. El análisis puede determinar la Q (relación R/X) del reactor del filtro de armónico a la frecuencia sintonizada y los requisitos de disipación de energía en estado estable para las resistencias del filtro de armónicos.

Un resultado del análisis serán los espectros armónicos para el voltaje y la corriente a través de cada componente del filtro (por ejemplo, capacitor, inductor). Un espectro armónico típico incluye las frecuencias armónicas fundamentales y todas las significativas. Los espectros para condiciones normales y de contingencia generalmente se incluyen en los resultados.

2.3.4 PASO 4: CLASIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES

Una vez que se optimiza el rendimiento del filtro de armónicos, se determinan las clasificaciones de los componentes. A veces, el proceso es iterativo y requiere ajustes en el diseño del filtro de armónicos si no se pueden cumplir los estándares de los componentes.

Los valores nominales del condensador del filtro de armónicos suelen ser los primeros en determinarse, seguidos del reactor del filtro de armónicos, la resistencia del filtro de armónicos y los valores nominales del interruptor. Los valores armónicos utilizados en el proceso de calificación deben ser los valores más altos determinados en el Paso 3 (2.3.3).

Las simulaciones de transitorios también pueden ser deseables para determinar las clasificaciones de los componentes para algunos diseños de filtros de armónicos, particularmente cuando los filtros de armónicos sintonizados a diferentes frecuencias se conectarán a la misma barra.

El efecto de la activación del transformador también se evalúa en simulaciones transitorias.

2.3.4.1 Condensadores de filtro armónico

Los condensadores se clasifican por voltaje y kvar. Estas clasificaciones generalmente las determina el fabricante del capacitor en función de los espectros armónicos, las sobretensiones transitorias, los requisitos de var y los datos del sistema especificados por el usuario.

En la mayoría de las aplicaciones de filtro de sintonización única, la clasificación de voltaje del capacitor del filtro de armónicos se basa en tareas de estado estable. La clasificación de voltaje de fase a neutro para el capacitor del filtro de armónicos se calcula utilizando la Ecuación (2.4)

$$V_t = \sum_{h=1}^{\infty} I(h) \times X_c(h) \quad (2.4)$$

Los valores nominales de tensión de los condensadores deben especificarse de modo que la tensión pico más alta aplicada a los condensadores del filtro de armónicos (es decir, la fundamental más los armónicos) no supere el 100% del pico de la tensión nominal de los condensadores. Se puede hacer una excepción para contingencias poco frecuentes (el voltaje nominal de los capacitores del filtro de armónicos de este cálculo nunca será menor que el valor calculado a través de los capacitores a un voltaje de barra máximo, incluido el aumento de voltaje a través del reactor del filtro de armónicos). Los voltajes a través del capacitor del filtro de armónicos (es decir, fundamental y armónicos combinados) deben calcularse a partir del peor de los casos determinado en el Paso 3 (2.3.3), el peor de los casos es generalmente un caso de contingencia en lugar de una condición de funcionamiento normal. En ausencia de un programa de computadora digital, se puede obtener una estimación razonable del voltaje nominal de línea a neutro sumando solo el voltaje de frecuencia fundamental y el voltaje de frecuencia sintonizado. (ver Ecuación (2.5) a Ecuación (2.7)).

$$V_c(1) = I_f(1) \times X_c \quad (2.5)$$

$$V_c(h) = I_f(h) \times \frac{X_c}{h} \quad (2.6)$$

$$V_c = V_c(1) + V_c(h) \quad (2.7)$$

Donde

$V_C(h)$ es el voltaje a través del capacitor del filtro armónico causado por la corriente armónica,

$I_f(h)$ es la corriente armónica,

$V_C(1)$ es el voltaje de frecuencia fundamental a través del capacitor del filtro armónico

$I_f(1)$ es la corriente de frecuencia fundamental a través del capacitor del filtro armónico,

X_C es la reactancia capacitiva a la frecuencia fundamental.

Las aproximaciones en estas ecuaciones se basan en el hecho de que, en la mayoría de las aplicaciones, el voltaje del capacitor del filtro de armónicos está dominado por la fundamental y el armónico más cercano a la frecuencia resonante del filtro de armónicos.

La corriente de frecuencia fundamental, $I_f(1)$, se puede calcular mediante la Ecuación (2.8)

$$I_f(1) = \frac{V_S}{(X_C - X_L)} \quad (2.8)$$

Donde

V_S es el voltaje a través del capacitor del filtro de armónicos, circuito del reactor del filtro de armónicos,

X_C es la reactancia capacitiva a la frecuencia fundamental,

X_L es la reactancia inductiva a la frecuencia fundamental.

La corriente de frecuencia sintonizada asume $I_f(h)$ = corriente armónica máxima disponible del sistema a la frecuencia resonante del filtro de armónicos (ej. 5to armónico).

La corriente de frecuencia fundamental que fluye en el capacitor del filtro de armónicos se puede calcular fácilmente a partir de la Ecuación (2.8). Las corrientes armónicas forman parte de los criterios de diseño del filtro de armónicos.

La corriente rms total en el filtro de armónicos se calcula mediante:

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_1^{\infty} I(h)^2} \quad (2.9)$$

La corriente rms total a través de las unidades del condensador del filtro de armónicos debe ser inferior al 135% de la corriente nominal de la unidad del condensador en función de los kvar nominales y la tensión nominal. Además, la corriente debe mantenerse dentro de la capacidad de los fusibles del condensador del filtro de armónicos. En realidad, la corriente rara vez es un factor limitante cuando se trata de armónicos de orden inferior.

Es difícil exceder la limitación de corriente sin exceder las otras limitaciones a menos que el orden sea alto.

La verificación final en el diseño del filtro de armónicos es ver que el calentamiento dieléctrico del capacitor del filtro de armónicos sea aceptable. El calentamiento dieléctrico se evalúa por la Ecuación (2.10)

$$\left| \sum V(h) \times I(h) \right| \leq |1.35 \times Q_{rated}| \quad (2.10)$$

Donde

$V(h)$ es la caída de voltaje (kV) a través del capacitor del filtro de armónico en el número armónico h ,

$I(h)$ es la corriente (A) que fluye a través del capacitor del filtro armónico en el número armónico h ,

h es todos los armónicos [incluido el fundamental ($h=1$)],

Q_{rated} son los kvar nominales del banco de condensadores, según los datos de la placa de identificación.

Es importante notar que los kvar nominales del banco de capacitores del filtro de armónicos no es lo mismo que la potencia reactiva del filtro de armónicos debido al efecto del reactor.

Para servicio continuo, es deseable construir el filtro armónico con más capacidad que la requerida para las cargas armónicas identificadas. Otros armónicos del sistema se extraerán del sistema y pueden provocar una sobrecarga. Cierta sobrevaloración debería permitir esta sobrecarga. El costo incremental por kvar de capacidad para la absorción de

armónicos es mucho más bajo que el costo promedio por kvar del filtro de armónicos. Por lo tanto, generalmente es deseable un margen generoso al especificar.

La información básica proporcionada al fabricante del condensador del filtro de armónicos debe incluir los elementos de especificación.

2.3.4.2 Reactor de filtro armónico

Los elementos para incluir en las especificaciones del reactor de filtro de armónicos son los mismos que se especifican para los condensadores de filtro de armónicos. En el Paso 3 (2.3.3) del proceso de diseño, el análisis de armónicos determinó la frecuencia sintonizada, la inductancia, Q (relación X/R) y el grado aceptable de tolerancia en la inductancia y los valores de Q para el reactor de filtro de armónicos. También se determinaron los espectros de corriente fundamental y armónica para casos normales y de contingencia. El Paso 4 (2.3.4) del proceso de diseño implica lo siguiente:

- a) Determine la ubicación física y técnica del reactor del filtro de armónicos con respecto al capacitor del filtro de armónicos. La ubicación del reactor del filtro de armónicos en el circuito influye en los problemas térmicos, el calentamiento por flujo magnético, la clasificación de cortocircuito del reactor y el BIL del reactor.

El calentamiento debido a las corrientes fundamentales y armónicas en un reactor de filtro de armónicos con núcleo de hierro debe tenerse en cuenta al diseñar filtros encapsulados en metal. El calentamiento excesivo puede provocar la degradación de los componentes. Debe considerarse el efecto de las pérdidas por corrientes de Foucault inducidas en las estructuras metálicas circundantes por el flujo magnético de un reactor de filtro de armónicos con núcleo de aire. Los efectos de calentamiento en el acero estructural de la construcción, el acero embebido en hormigón (barras de refuerzo), los sistemas eléctricos de puesta a tierra y la estructura del equipo pueden ser considerables.

El reactor del filtro de armónicos puede estar en el lado de la fuente del capacitor del filtro de armónicos o en el lado neutral. Si el reactor del filtro de armónicos está ubicado entre la barra colectora y el capacitor del filtro de armónicos, debe estar clasificado para resistir un cortocircuito a tierra en la unión entre el reactor del filtro de armónicos y el capacitor del filtro de armónicos.

La clasificación BIL del aislamiento de fase a tierra del reactor de filtro de armónicos debe ser similar a la clasificación de los transformadores de potencia conectados al mismo nivel de voltaje. Sin embargo, una reducción del BIL puede ser apropiada para un terminal de reactor de filtro de armónicos que está conectado a tierra (filtros de armónicos que está conectado a tierra). El

aislamiento a través de la bobina puede ser diferente del aislamiento de fase a tierra. Está diseñado para la caída de voltaje (es decir, frecuencia fundamental y armónicos) y transitorios a través de la bobina. El BIL de la bobina se puede reducir si la bobina está protegida por un pararrayos conectado de terminal a terminal.

- b) Evaluar las sobretensiones transitorias y dinámicas, si es necesario. Como se discutió con los condensadores de filtro de armónicos, la conmutación de filtros de armónicos sintonizados múltiples y la conmutación frecuente del transformador puede crear tensiones excesivas en el condensador del filtro de armónicos y el reactor del filtro de armónicos, a menos que estas tensiones se tengan en cuenta en el diseño. Pueden ser necesarios estudios transitorios para determinar la magnitud y duración de las sobretensiones. Los estudios transitorios determinan la protección adecuada del pararrayos para diseños del BIL reducidos.
- c) Calcule la corriente nominal de cortocircuito para el reactor de filtro de armónicos. La corriente de cortocircuito debe calcularse en función de la tensión máxima de funcionamiento del sistema. Se necesitan corrientes de falla simétricas rms y asimétricas de cresta. También se necesita la duración de la falla debido al retardo de disparo y al tiempo de interrupción del interruptor automático.

2.3.4.3 Resistencias de filtros armónicos

Si se incluyen resistencias en el diseño del filtro de armónicos en el Paso 3 (2.3.3) del proceso de diseño habría de ser definida la resistencia, la tolerancia de resistencia aceptable, la inductancia en serie máxima permitida en la resistencia. También se debe determinar los espectros de corriente fundamental y armónica para casos normales y de contingencia.

El paso 4 (2.3.4) del proceso de diseño implica lo siguiente:

- a) Determinar la ubicación física y técnica de la resistencia del filtro de armónicos con respecto al capacitor del filtro de armónicos. La ubicación de la resistencia del filtro de armónicos en el circuito influye en los problemas térmicos, la clasificación de cortocircuito de la resistencia y el BIL de la resistencia.

El calentamiento debido a las corrientes fundamentales y armónicas en una resistencia de filtro de armónicos se debe considerar al diseñar filtros de armónicos encerrados en metal. El calentamiento excesivo puede provocar la degradación de los componentes.

La ubicación de una resistencia de filtro de armónicos en un filtro de armónicos amortiguado es muy variable según el diseño. El resistor del filtro de armónicos

debe estar clasificado para soportar la corriente de cortocircuito máxima que puede fluir a través del durante una falla del filtro de armónicos.

Los requisitos de clasificación BIL también pueden verse afectados por la posición de la resistencia del filtro de armónicos dentro del filtro de armónicos al igual que con el reactor.

- b) Evaluar las sobretensiones transitorias y dinámicas, si es necesario. Al igual que con los reactores de filtro de armónicos, pueden ser necesarios estudios de transitorios para determinar la magnitud y duración de las sobretensiones y para diseñar una protección de pararrayos adecuada, especialmente si se van a utilizar BIL reducidos. Los estudios transitorios también determinan la energía de la resistencia asociada con las sobretensiones transitorias y dinámicas.
- c) Calcular la corriente nominal de cortocircuito de la resistencia del filtro de armónicos. El cortocircuito debe calcularse en función de la tensión máxima de funcionamiento del sistema. Se necesitan tanto la corriente de falla rms simétrica como la asimétrica. También se necesita la duración de la falla debido al retardo de disparo y al tiempo de interrupción del interruptor automático.

CAPITULO III

3. APLICACIÓN DE LA GUÍA DE DISEÑO PARA LA MITIGACIÓN DEL CONTENIDO ARMÓNICO EN LA INDUSTRIA DE CARBONATO DE CALCIO

3.1. DATOS PRINCIPALES DE LA INDUSTRIA DE CARBONATO DE CALCIO

3.1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El carbonato de calcio (CaCO_3) abunda en la naturaleza, presentándose con distintos aspectos y grados de pureza, uno de ellos es la piedra caliza que se dispone en yacimientos. La planta industrial de carbonato de calcio, objeto de análisis, está ubicada en la parroquia Ascázubi, sector Juan de Ascázubi, perteneciente al Cantón Cayambe. En la Figura 3.1 se presenta una fotografía de la planta en cuestión.



Figura 3.1 Fotografía de las áreas operativas planta Industrial de carbonato de calcio.

En las dos últimas décadas, esta planta se ha ido ampliando y modernizando, debido a que el procesamiento de carbonato de calcio pulverizado necesita satisfacer la demanda del mercado nacional.

3.1.2 UNIFILAR DE LA INDUSTRIA DE CARBONATO DE CALCIO

En la Figura 3.2 se representa un esquema en el cual se ubican todos los datos recopilados tanto para medio como para bajo voltaje. La realización de flujos de potencia tradicionales y de flujos de potencia armónicos permite determinar el incremento de

corriente (espectro armónico) que ocurre debido a la incorporación de variadores de velocidad en la planta industrial.

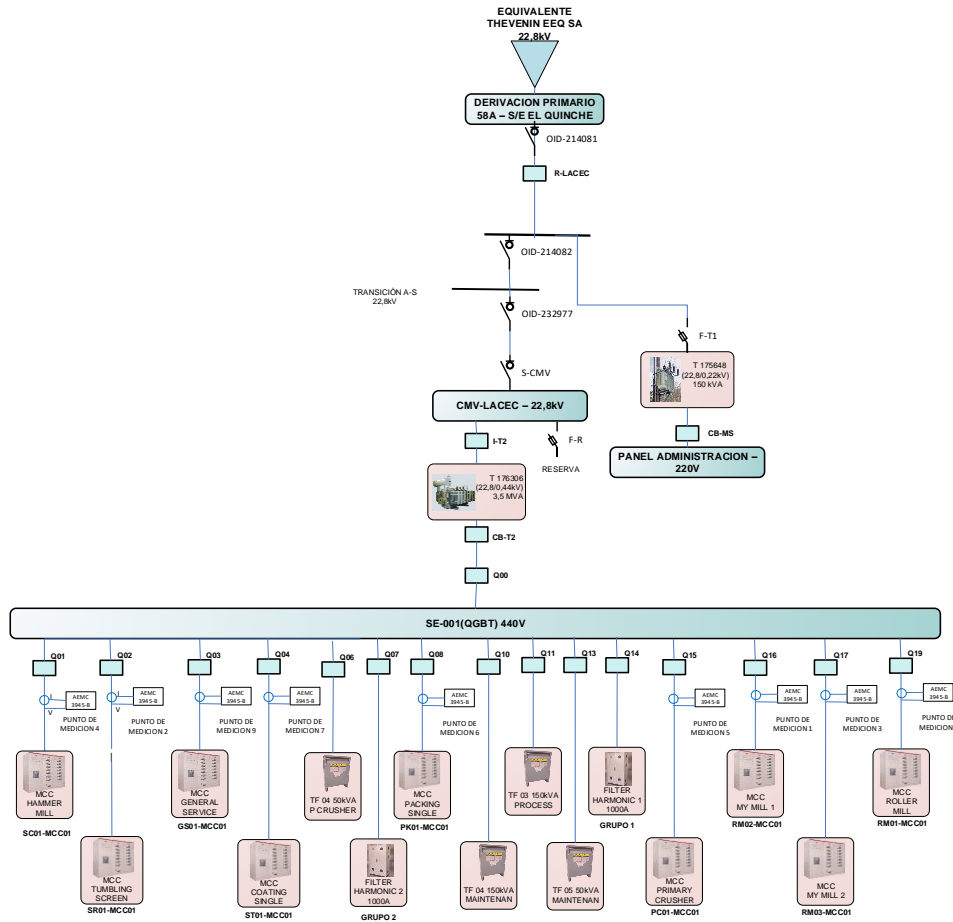


Figura 3.2 Diagrama esquemático planificado para realizarlo en ETAP 19.0.1.

3.2. RECOPIACIÓN E INGRESO DE DATOS DE LA INDUSTRIA DE CARBONATO DE CALCIO

3.2.1 EQUIVALENTE DE THEVENIN

La información para la determinación del equivalente Thévenin en el punto de conexión de la industria de carbonato de calcio es proporcionado por la EEQSA, en la Tabla 3.1 se detallan los valores del punto de conexión.

Tabla 3.1 Equivalente Thévenin en el punto de conexión Industria de Carbonato de Calcio.

Sub-Estación/ Primario	Nivel de Voltaje (kV)	Tipo de Falla	Ikss (kA)	Skss (MVA)	Ip (kA)	R1 (ohm)	X1 (Ohm)	R0 (ohm)	X0 (ohm)
El Quinche 58A	22.8	Trifásica	2.962	68.12	7.28	15.887	46.516	N/A	N/A
		Monofásica	2.343	31.15	5.747	15.887	46.516	28.784	83.332

Con el diagrama unifilar de la industria de carbonato de calcio simulado en ETAP 19.0.1 se procede a ingresar los datos recopilados de la Tabla 3.1:

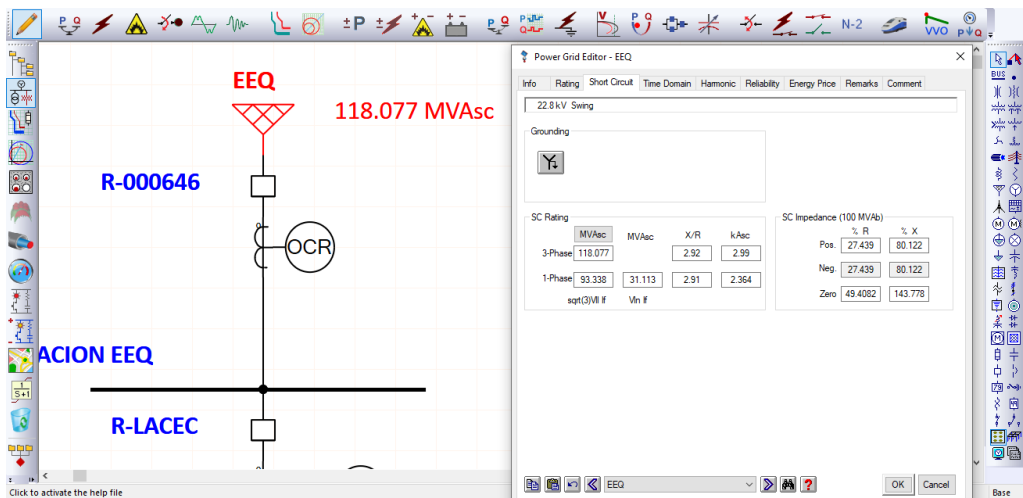


Figura 3.3 Ingreso de datos del equivalente Thévenin.

3.2.2 ACOMETIDA PRINCIPAL

La industria de carbonato de calcio se interconecta con el sistema eléctrico de la Empresa Eléctrica Quito a nivel de medio voltaje (22,8 kV) en el primario 58 A desde el poste PHC-2000 con seccionador tipo cuchilla OID-214081 en serie con un reconectador; desde este parte un alimentador trifásico de calibre ASCR-4/0AWG para la fase y ACSR-1/0 para el neutro, con una longitud aproximada de 398 m hasta el poste PC12-500. En este punto se ubica el seccionador OID-214082 y parte una derivación con distancia de 80 m hacia el transformador T-175648 de 150kVA-22.8 kV/220 V que abastece la demanda del área administrativa.

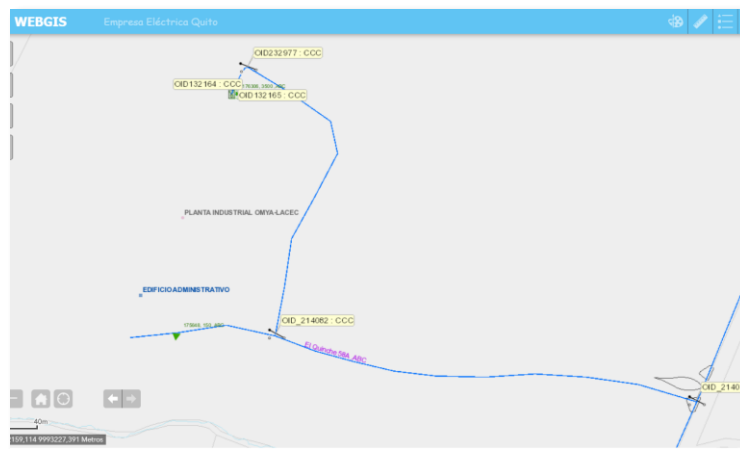


Figura 3.4 Red de medio voltaje de la industria de Carbonato de Calcio en el sistema GIS EEQSA [12].

Del seccionador OID-214082 parte un alimentador aéreo que pasa a ser subterráneo a 248 m aproximadamente, la transición subterránea tiene un seccionador OID-232977 y se configura con cable 4/0 25kV para la fase y 2/0 para neutro con una distancia aproximada de 50 m hacia la celda de medio voltaje CMW-CC que contiene la salida para el transformador T-176306 de 3.5 MVA/4MVA-22.8Kv/440V. En la Tabla 3.2 se detalla de mejor manera los datos de la acometida de medio voltaje y en el ANEXO A se incluye información de detalle de la ubicación y distancias de cada tramo de la acometida principal.

Tabla 3.2 Acometida principal de la Industria de Carbonato de Calcio

Red	Tramo		Conductor	Distancia [m]
	Inicio	Fin		
Aéreo	POSTE PHC-2000	POSTE PC12-500	3C (4/0 AWG) + 1C (1/0 ACSR)	398
	POSTE PC12-500	TRANSFORMADOR T-175648	3C (4/0 AWG) + 1C (1/0 ACSR)	80
	POSTE PC12-500	TRANSICION A-S	3C (4/0 AWG) + 1C (1/0 ACSR)	248
Subterráneo	TRANSICION A-S	TRANSFORMADOR T-176306	3C (4/0AWG) 1C (2/0AWG)	50

3.2.3 ALIMENTADORES SECUNDARIOS (SWITCHGEAR-MCC'S)

Desde los bornes de bajo voltaje del transformador T-176306 parte la acometida hacia el SWG-001, al que se conecta la barra SE-001 QGBT (detalles se indican en el ANEXO A) que distribuye energía a las siguientes áreas:

- MOLINO DE MARTILLO (MCC HAMMER MILL)
- TUMBLING SCREEN (MCC TUMBLING SCREEN)
- SERVICIOS GENERALES (MCC GENERAL SERVICES)
- ÁREA DE REVESTIMINETO (MCC COATING)
- EMBALAJE (MCC PACKING)
- LÍNEA DE TRITURACIÓN (MCC PRIMARY CRUSHER)
- ÁREA DE RODILLOS 1 (MCC MY MILL 1)
- ÁREA DE RODILLOS 2 (MCC MY MILL 2)
- MOLINO DE RODILLOS (MCC ROLLER MILL)

En la Tabla 3.3 se detalla el calibre y distancias de los conductores usados para cada una de las áreas de trabajo de la industria.

Tabla 3.3 Conductores de alimentación para cada área de trabajo

Tramo		Conductor	Distancia [m]
Inicio	Fin		
SE-001 (QGBT)	MCC HAMMER MILL	3C (500 KCMIL) + 1C (3/0 AWG)	20
SE-001 (QGBT)	MCC TUMBLING SCREEN	3C (350 KCMIL) + 1C (3/0 AWG)	20
SE-001 (QGBT)	MCC GENERAL SERVICE	3C (350 KCMIL) + 1C (3/0 AWG)	10
SE-001 (QGBT)	MCC COATING	3C (350 KCMIL) + 1C (3/0 AWG)	18
SE-001 (QGBT)	MCC PACKING	2X3C (300 KCMIL) + 1C (300KCMIL)	140
SE-001 (QGBT)	MCC PRIMARY CRUSHER	2X3C (300 KCMIL) + 1C (300KCMIL)	100
SE-001 (QGBT)	MCC MY MILL 1	2X3C (300 KCMIL) + 1C (300KCMIL)	16
SE-001 (QGBT)	MCC MY MILL 2	2X3C (350 KCMIL) + 1C (350KCMIL)	20
SE-001 (QGBT)	MCC ROLLER MILL	3X3C (400 KCMIL) + 1C (400KCMIL)	22

El ANEXO C contiene el procedimiento seguido para el ingreso de los datos de los alimentadores secundarios que dan energía a cada uno de los MCC´s instalados en las diferentes áreas de la industria de carbonato de calcio.

3.2.4 CENTRO DE CONTROL DE MOTORES (MCC)

La industria de carbonato de calcio cuenta con 9 MCC´s repartidos en diferentes áreas de trabajo, los cuales tienen características específicas de voltaje, corriente, potencia activa y nivel de protección del equipo.

A continuación, en la Tabla 3.4. se presenta información de cada uno de los MCC´s de la industria.

Tabla 3.4. Datos de placa de todos los MCC´s

MCC	Nivel de Voltaje [V]	Corriente Nominal [A]	Potencia [kW]	Nivel de protección del equipo (IP)
HAMMER MILL	440	400	82	54
TUMBLING SCREEN	440	400	83	54
GENERAL SERVICES	440	400	320	54
COATING	440	400	236	54
PACKING	440	400	175	54
PRIMARY CRUSHER	440	630	411	54
MY MILL 1	440	630	411	54
MY MILL 2	440	630	411	54
ROLLER MILL	440	1250	620	54

El ANEXO D detalla los datos de placa y características principales de cada uno, en la Tabla 3.4 se presentan los datos más importantes de los variadores de velocidad de la industria de carbonato de calcio

3.2.5 VARIADORES DE VELOCIDAD

Los variadores de velocidad instalados en la industria de carbonato de calcio son de diferentes potencias ya que están asociados a diferentes motores en cada una de las áreas de trabajo, el ANEXO B detalla los datos de placa y características principales de cada uno, en la Tabla 3.5 se presentan los datos más importantes de los variadores de velocidad de la industria de carbonato de calcio.

Tabla 3.5 Datos de placa de los variadores en la industrial de carbonato de calcio.

Variador WEG	Voltaje Nominal [V]	Corriente Nominal (ND) [A]	Corriente Nominal (HD) [A]	Grado de Protección (IP)
CFW110003T4OFAYZ	380-480	3.6	3.5	IP21
CFW110010T4OFAYZ	380-480	10	10	IP21
CFW110013T4OFAYZ	380-480	13.5	11	IP21
CFW110024T4OFAYZ	380-480	24	19	IP21
CFW110038T4OFAYZ	380-480	38	33	IP21
CFW110045T4OFAYZ	380-480	45	38	IP21
CFW110070T4OFAYZ	380-480	70.5	61	NEMA1/1P20
CFW110088T4OFAYZ	380-480	88	73	NEMA1/1P20
CFW110105T4ODBYZ	380-480	105	88	IP20
CFW110211T4ODBYZ	380-480	211	180	IP20
CFW110370T4OYZ	380-480	370	312	IP20
CFW110477T4OYZ	380-480	477	370	IP20

Los equipos utilizados en la industria de carbonato de calcio en las diferentes áreas de producción generan armónicos de corriente de orden 5, 7, 11, 13, 17, 19, etc; la Figura 3.5 indica el espectro armónico característico de estos equipos referenciados a la norma [8].

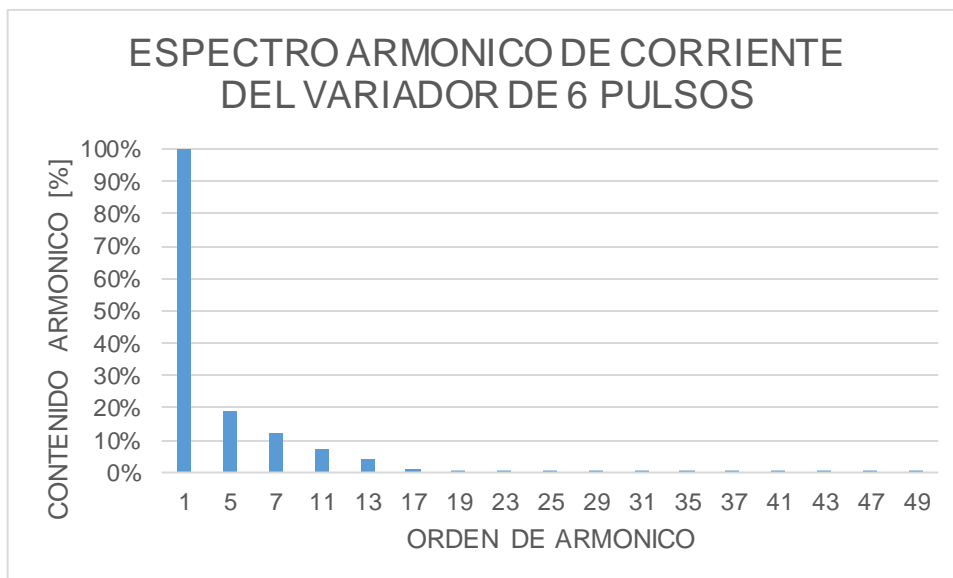


Figura 3.5 Espectro armónico para los variadores WEG de 6 pulsos

En base a medidas obtenidas de un analizador de red instalado en el MCC PRIMARY CRUSHER en el variador WEG CWF110307T4OYZ por un periodo de 6 minutos en intervalos de 20 segundos se obtuvo los datos del contenido armónico generado que se presentan en la Figura 3.6.

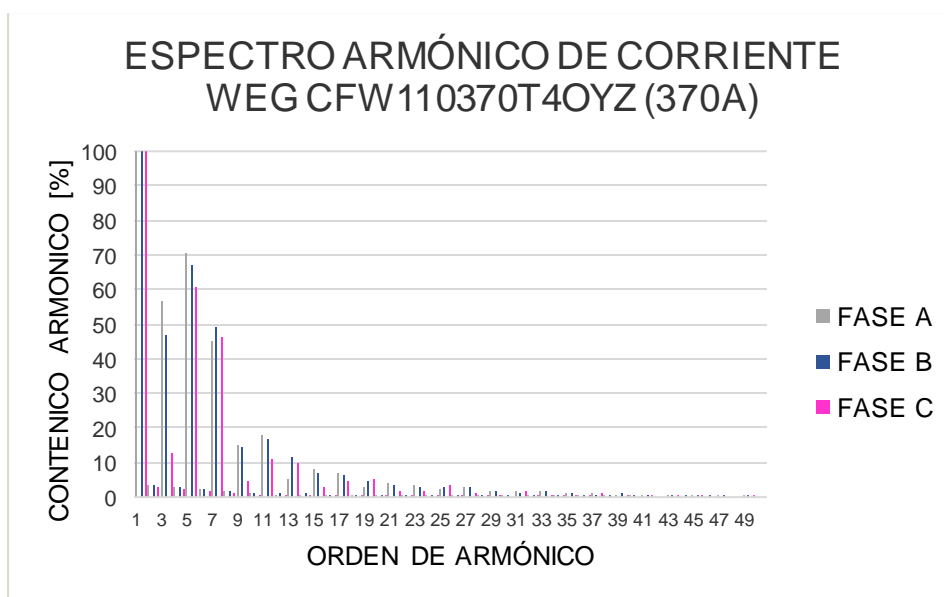


Figura 3.6. Espectro armónico de corriente WEG CFW110370T4OYZ.

Cabe recalcar que la carga asociada a este variador (tritadora de impacto de 160 kW) se encontraba funcionando al 25% de su capacidad nominal y por periodos cortos de tiempo como se detalla en la Figura 3.7.

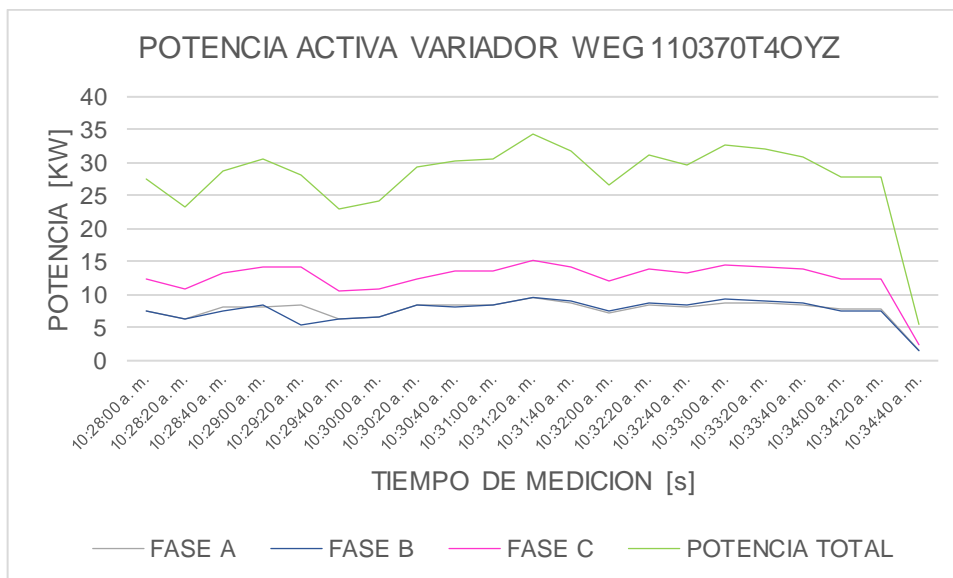


Figura 3.7 Medición de potencia activa en el variador WEG CFW110370T4OYZ.

3.2.6 CARGAS DE GRAN POTENCIA ASOCIADAS A LOS VARIADORES DE VELOCIDAD Y SUS ALIMENTADORES

La industria de carbonato de calcio cuenta con cargas de gran potencia en las diferentes áreas, es por esta razón que se ingresa el registro de las cargas más importantes de cada MCC.

El ANEXO E indica el procedimiento detallado del ingreso de los datos principales de la carga de gran potencia asociadas a los variadores de velocidad.

3.3. RESULTADOS

3.3.1 FLUJOS DE POTENCIA

El análisis de flujos de potencia en la industria de carbonato de calcio es fundamental porque con los resultados obtenidos se tiene el valor de la corriente RMS de cada uno de los MCC's en condiciones normales de operación sin tomar en cuenta el efecto que producen los espectros armónicos de los variadores de velocidad en cada una de las áreas de operación.

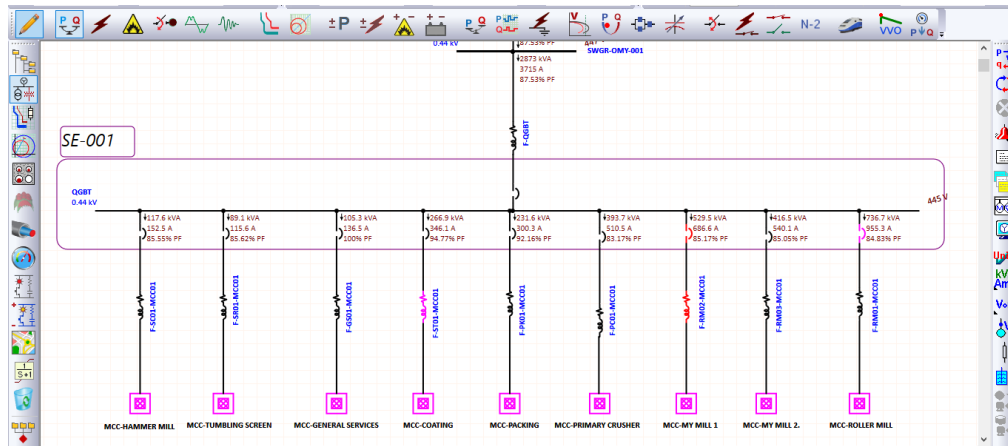


Figura 3.8. Flujo de Potencia en los MCC's de la industria.

La Tabla 3.6 detalla los valores de potencia aparente, factor de potencia y corriente que circula por el Switchgear QGBT y por cada uno de los MCC's principales de las áreas operativas de la industria de carbonato de calcio.

Tabla 3.6 Potencia aparente, corriente y factor de potencia de QGBT y los MCC's

MCC	Potencia Aparente [kVA]	Corriente [A]	Factor de Potencia [%]
QGBT	2873	3715	87.53
HAMMER MILL	117.6	152.5	85.55
TUMBLING SCREEN	89.1	115.6	85.62
GENERAL SERVICES	105.3	136.5	100
COATING	266.9	346.1	94.77
PACKING	231.6	300.3	92.16
PRIMARY CRUSHER	393.7	510.5	83.17
MY MILL 1	519.5	686.6	85.17
MY MILL 2	416.5	540.1	85.05
ROLLER MILL	736.7	955.3	84.83

3.3.2 FLUJO ARMÓNICO

Para el flujo de armónicos en la industria de carbonato de calcio se consideran dos escenarios de cálculo, el primer escenario en el cual se carga el espectro armónico de fábrica detallado en la Figura 3.9 de los variadores de velocidad de todas las áreas de trabajo; y un segundo escenario en el cual se utiliza el espectro armónico obtenido en mediciones, detallado en la Figura 3.12 para todos los variadores de la industria.

3.3.2.1 Primer escenario

La Figura 3.9 presenta los valores obtenidos de THD de corriente en el PCC y en el Switchgear QGBT de la industria. En la Figura 3.10 se muestran las formas de onda de las corrientes en cada uno de los puntos de medición señalados anteriormente.

La Figura 3.11 permite apreciar la deformación de la onda de voltaje en el PCC y en el MCC-QGBT, producida por los armónicos de corriente.

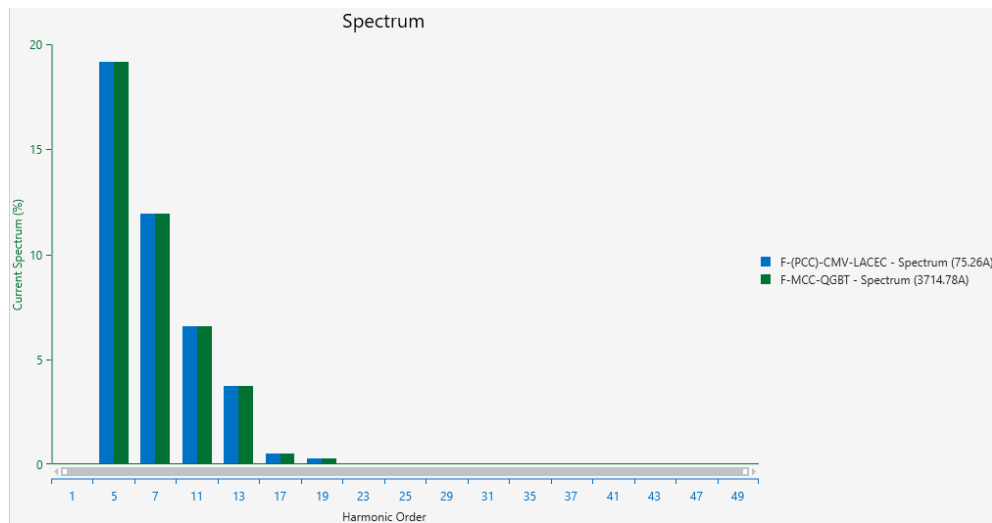


Figura 3.9. THD individual de corriente en el PCC y MCC-QGBT (Escenario 1).

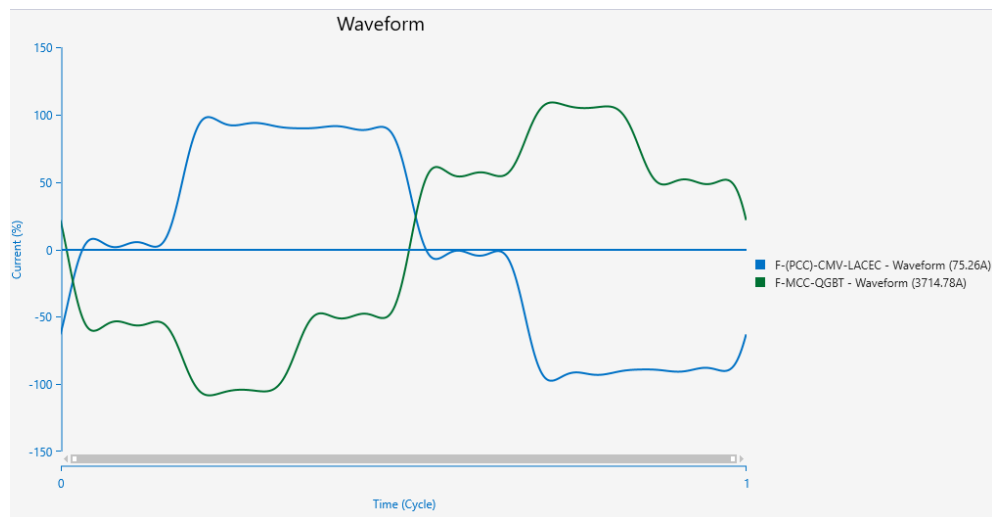


Figura 3.10. Forma de onda de corriente en el PCC y MCC-QGBT (Escenario 1).

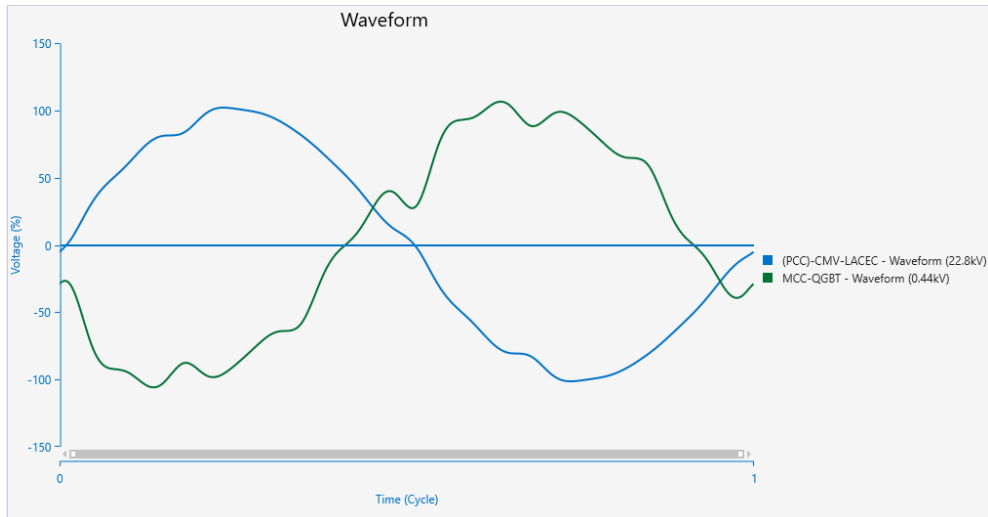


Figura 3.11. Forma de onda de voltaje en el PCC y MCC-QGBT (Escenario 1).

En el ANEXO F se presentan los datos de la corriente armónica y el THD de corriente de cada uno de los MCC´s de la industria de carbonato de calcio, cuyo resumen se presenta en la Tabla 3.7 y Tabla 3.8.

Tabla 3.7 Armónicos de corriente de los MCC´s

MCC	CORRIENTE FLUJO ARMÓNICO [A]	I1 [A]	I5 [A]	I7 [A]	I11 [A]	I13 [A]	I17 [A]	I19 [A]	I23 [A]	I25 [A]
QGBT	3819	3715	712.4	442.9	244.4	138.1	19.4	9.9	2.1	1.1
HAMMER MILL	156.3	152.5	26.8	17.4	10.7	6.3	0.913	0.458	0.092	0.046
TUMBLING SCREEN	117.5	115.6	16.3	10.6	6.6	3.9	0.57	0.287	0.058	0.029
GENERAL SERVICES	137.6	136.5	10.5	9.1	8	5.4	0.996	0.571	0.149	0.084
COATING	357.7	346.1	71	45.1	27.6	16.8	2.7	1.4	0.276	0.132
PACKING	300.7	300.3	11.1	7.8	5.5	3.4	0.596	0.336	0.086	0.049
PRIMARY CRUSHER	519.7	510.5	76.1	49.6	30.3	17.8	2.6	1.3	0.255	0.127
MY MILL 1	724.2	686.6	180.7	117	70.7	41.4	5.9	3	0.592	0.296
MY MILL 2	572.9	540.1	149.9	97	58.6	34.3	4.9	2.5	0.491	0.245
ROLLER MILL	1001.1	955.3	243.9	152.3	92.4	54.2	7.8	3.9	0.771	0.384

Tabla 3.8 THD de corriente individual y total de los MCC's.

MCC	THD TOTAL DE CORRIENTE [%]	THD I1 [%]	THD I5 [%]	THD I7 [%]	THD I11 [%]	THD I13 [%]	THD I17 [%]	THD I19 [%]	THD I23 [%]	THD I25 [%]
QGBT	23.82	100	19.177	11.922	6.58	3.717	0.523	0.266	0.056	0.029
HAMMER MILL	22.51	100	17.585	11.443	7.009	4.129	0.599	0.301	0.06	0.03
TUMBLING SCREEN	18.09	100	14.093	9.198	5.684	3.366	0.493	0.249	0.05	0.025
GENERAL SERVICES	12.42	100	7.69	6.699	5.845	3.919	0.73	0.418	0.109	0.061
COATING	26.05	100	20.524	13.025	7.967	4.847	0.768	0.398	0.08	0.038
PACKING	5.02	100	3.707	2.601	1.818	1.146	0.198	0.112	0.029	0.016
PRIMARY CRUSHER	19.09	100	14.907	9.708	5.943	3.496	0.504	0.252	0.05	0.025
MY MILL 1	33.56	100	26.315	17.035	10.3	6.028	0.865	0.432	0.086	0.043
MY MILL 2	35.38	100	27.748	17.958	10.852	6.35	0.911	0.456	0.091	0.045
ROLLER MILL	31.39	100	24.584	15.944	9.674	5.669	0.813	0.406	0.081	0.04

3.3.2.2 Segundo escenario

La Figura 3.12 presenta los valores obtenidos del THD de corriente en el PCC y en el Switchgear QGBT de la industria. En la Figura 3.13 se muestran las formas de onda de las corrientes en cada uno de los puntos de medición señalados anteriormente.

La Figura 3.14 permite apreciar la deformación de la onda de voltaje en el PCC y en el MCC-QGBT, producida por los armónicos de corriente.

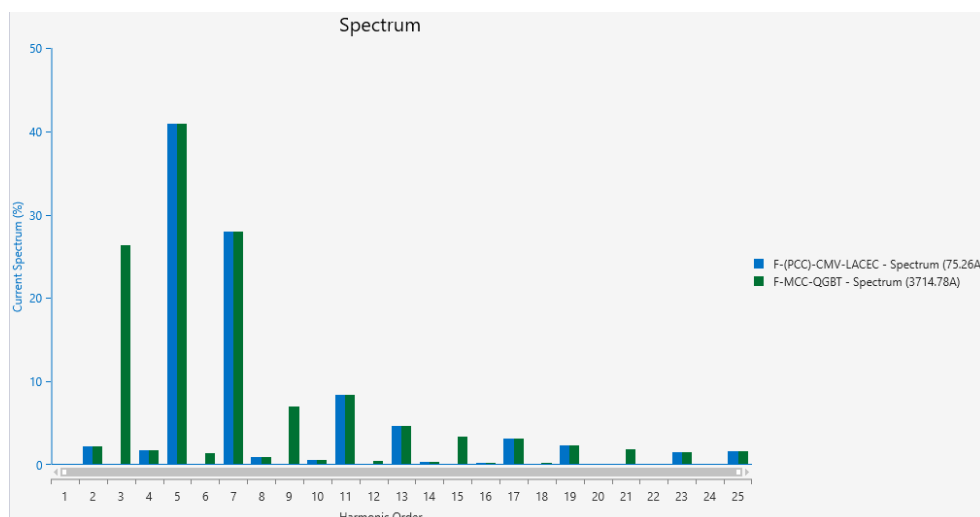


Figura 3.12 THD individual de corriente en el PCC y MCC-QGBT (Escenario 2).

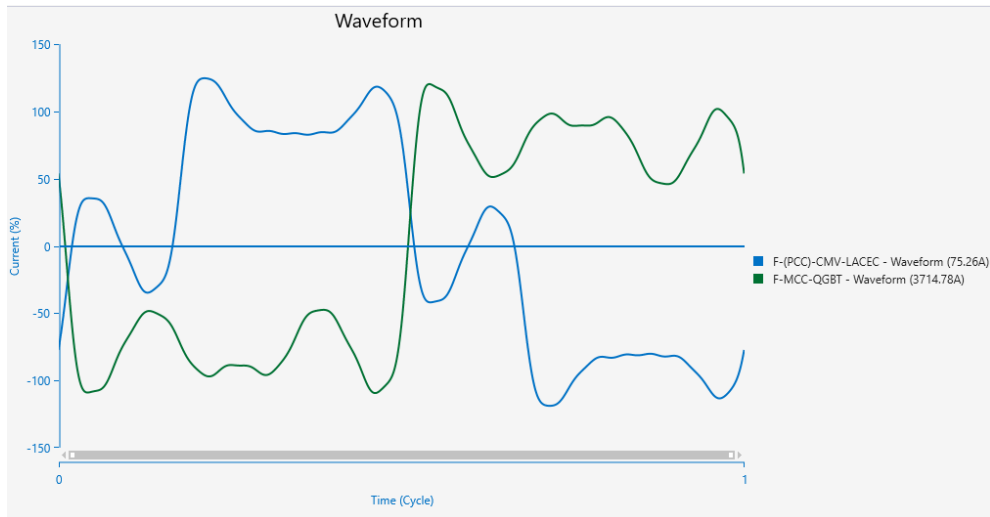


Figura 3.13 Forma de onda de corriente en el PCC y MCC-QGBT (Escenario 2).

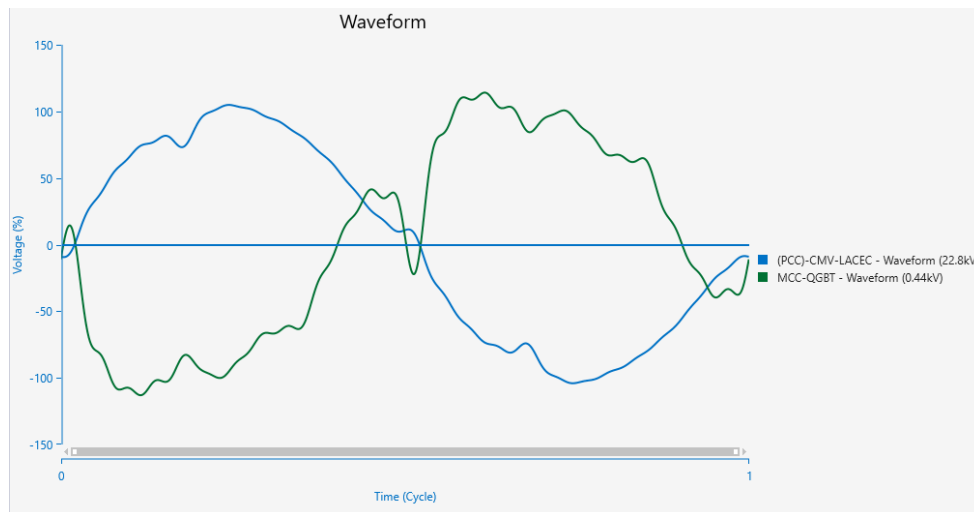


Figura 3.14 Forma de onda de voltaje en el PCC y MCC-QGBT (Escenario 2).

En el ANEXO G se puede observar datos de corriente armónica y el porcentaje de THD de corriente que se genera en la industria de carbonato de calcio, estos datos pueden ser visualizados de mejor manera en la Tabla 3.9 y en la Tabla 3.10.

Tabla 3.9 Armónicos de corriente de los MCC's.

MCC	CORRIENTE FLUJO ARMÓNICO [A]	I1 [A]	I2 [A]	I3 [A]	I4 [A]	I5 [A]	I6 [A]	I7 [A]	I8 [A]	I9 [A]
QGBT	4291	3715	80.4	977.9	64.9	1521	53.7	1041	34.9	260.1
HAMMER MILL	173.5	152.5	2.9	37.4	2.4	57.3	2.2	41	1.4	11.1
TUMBLING SCREEN	126.4	115.6	1.8	24.4	1.5	34.8	1.4	25	0.862	7.3
GENERAL SERVICES	141.2	136.5	0.477	5.5	0.765	22.4	0.603	21.5	0.825	4.4
COATING	407.4	346.1	7.9	93.2	6.4	151.7	5.1	105.9	3.6	25.1
PACKING	302.1	300.3	1.1	6	0.956	23.8	0.475	18.4	0.654	3.1
PRIMARY CRUSHER	562.6	510.5	8.2	109	6.8	162.5	6.3	116.5	4	32.4
MY MILL 1	877.9	686.6	19.6	232.8	16.2	385.8	13.4	274.9	9.4	68.8
MY MILL 2	704.7	540.1	16.2	191.1	13.4	320	11	227.9	7.8	56.5
ROLLER MILL	1191	955.3	25.4	301.8	21	501.5	17.4	357.9	12.3	89.7

Tabla 3.9 Armónicos de corriente de los MCC's

MCC	CORRIENTE FLUJO ARMÓNICO [A]	I10 [A]	I11 [A]	I12 [A]	I13 [A]	I14 [A]	I15 [A]	I16 [A]	I17 [A]	I18 [A]
QGBT	4291	21.4	312.1	18.4	172.6	12.5	124	8.7	115.2	7.5
HAMMER MILL	173.5	0.912	13.6	0.833	7.9	0.587	5.8	0.41	5.4	0.344
TUMBLING SCREEN	126.4	0.56	8.4	0.544	4.9	0.358	3.8	0.255	3.4	0.225
GENERAL SERVICES	141.2	0.634	10.2	0.406	6.7	0.523	3.4	0.419	5.9	0.244
COATING	407.4	2.3	35.2	1.9	21	1.6	13.7	1.2	15.8	0.874
PACKING	302.1	0.452	7	0.273	4.3	0.328	2.2	0.254	3.5	0.151
PRIMARY CRUSHER	562.6	2.6	38.7	2.4	22.3	1.6	16.9	1.2	15.3	1
MY MILL 1	877.9	6.1	90.3	5.1	51.7	3.8	35.7	2.7	35.2	2.1
MY MILL 2	704.7	5	74.8	4.2	42.9	3.1	29.3	2.2	29.2	1.7
ROLLER MILL	1191	7.9	118	6.7	67.7	5	46.6	3.5	46.1	2.8

Tabla 3.9 Armónicos de corriente de los MCC's

MCC	CORRIENTE FLUJO ARMÓNICO [A]	I19 [A]	I20 [A]	I21 [A]	I22 [A]	I23 [A]	I24 [A]	I25 [A]
QGBT	4291	86.9	5	69.9	3.7	56.8	2.6	61.3
HAMMER MILL	173.5	4	0.229	3.1	0.165	2.5	0.108	2.6
TUMBLING SCREEN	126.4	2.5	0.144	2	0.104	1.6	0.07	1.7
GENERAL SERVICES	141.2	5	0.306	2.6	0.251	4	0.11	4.8
COATING	407.4	12.1	0.697	8.3	0.502	7.5	0.295	7.5
PACKING	302.1	2.9	0.179	1.6	0.146	2.3	0.067	2.8
PRIMARY CRUSHER	562.6	11.3	0.624	8.9	0.46	6.9	0.311	7.2
MY MILL 1	877.9	26.1	1.5	18.9	1.1	16.1	0.664	16.8
MY MILL 2	704.7	21.6	1.2	15.6	0.885	13.3	0.545	14
ROLLER MILL	1191	34.1	1.9	24.7	1.4	20.9	0.863	21.9

Tabla 3.10 THD de corriente individual y total de todos los MCC's.

MCC	THD TOTAL DE CORRIENTE [%]	THD I1 [%]	THD I2 [%]	THD I3 [%]	THD I4 [%]	THD I5 [%]	THD I6 [%]	THD I7 [%]	THD I8 [%]	THD I9 [%]
QGBT	57.82	100	2.164	26.324	1.746	40.953	1.445	28.017	0.94	7.003
HAMMER MILL	54.3	100	1.901	24.526	1.572	37.552	1.411	26.891	0.926	7.29
TUMBLING SCREEN	44.34	100	1.526	21.109	1.529	30.095	1.215	21.616	0.746	6.279
GENERAL SERVICES	26.24	100	0.349	4.059	0.56	16.422	0.442	15.744	0.604	3.186
COATING	62.07	100	2.294	26.92	1.859	43.828	1.475	30.61	1.045	7.261
PACKING	10.84	100	0.35	2.002	0.318	7.917	0.158	6.113	0.218	1.031
PRIMARY CRUSHER	46.32	100	1.607	21.357	1.332	31.833	1.23	22.813	0.785	6.35
MY MILL 1	79.68	100	2.852	33.912	2.357	56.196	1.946	40.033	1.374	10.027
MY MILL 2	83.84	100	3.008	35.389	2.485	59.256	2.031	42.201	1.448	10.466
ROLLER MILL	74.46	100	2.659	31.591	2.2	52.498	1.817	37.467	1.287	9.387

Tabla 3.10 THD de corriente individual y total de los MCC's

MCC	THD TOTAL DE CORRIENTE [%]	THD I10 [%]	THD I11 [%]	THD I12 [%]	THD I13 [%]	THD I14 [%]	THD I15 [%]	THD I16 [%]	THD I17 [%]	THD I18 [%]
QGBT	57.82	0.576	8.401	0.495	4.646	0.336	3.339	0.235	3.102	0.201
HAMMER MILL	54.3	0.598	8.948	0.546	5.161	0.379	3.797	0.269	3.551	0.226
TUMBLING SCREEN	44.34	0.484	7.257	0.471	4.207	0.31	3.273	0.221	2.922	0.195
GENERAL SERVICES	26.24	0.464	7.462	0.298	4.899	0.383	2.49	0.307	4.327	0.178
COATING	62.07	0.675	10.172	0.541	6.059	0.455	3.944	0.337	4.555	0.253
PACKING	10.84	0.15	2.321	0.091	1.432	0.109	0.726	0.085	1.177	0.05
PRIMARY CRUSHER	46.32	0.508	7.587	0.476	4.37	0.321	3.301	0.226	2.988	0.196
MY MILL 1	79.68	0.882	13.149	0.75	7.535	0.552	5.203	0.389	5.127	0.309
MY MILL 2	83.84	0.93	13.854	0.783	7.938	0.581	5.433	0.41	5.4	0.323
ROLLER MILL	74.46	0.828	12.35	0.703	7.086	0.519	4.882	0.366	4.822	0.29

Tabla 3.10 THD de corriente individual y total de los MCC's

MCC	THD TOTAL DE CORRIENTE [%]	THD I19 [%]	THD I20 [%]	THD I21 [%]	THD I22 [%]	THD I23 [%]	THD I24 [%]	THD I25 [%]
QGBT	57.82	2.339	0.135	1.883	0.1	1.53	0.07	1.651
HAMMER MILL	54.3	2.64	0.151	2.015	0.109	1.633	0.071	1.716
TUMBLING SCREEN	44.34	2.182	0.125	1.737	0.09	1.359	0.061	1.431
GENERAL SERVICES	26.24	3.67	0.224	1.925	0.184	2.954	0.08	3.495
COATING	62.07	3.498	0.201	2.392	0.145	2.16	0.085	2.167
PACKING	10.84	0.981	0.059	0.536	0.049	0.779	0.022	0.921
PRIMARY CRUSHER	46.32	2.211	0.126	1.744	0.09	1.353	0.061	1.413
MY MILL 1	79.68	3.797	0.216	2.758	0.155	2.338	0.097	2.454
MY MILL 2	83.84	3.999	0.228	2.881	0.164	2.464	0.101	2.587
ROLLER MILL	74.46	3.567	0.203	2.582	0.146	2.188	0.09	2.291

De los resultados de flujos armónicos presentados en la Tabla 3.7 y Tabla 3.8 para el Escenario 1 y en la Tabla 3.9 y Tabla 3.10 para el Escenario 2, es necesario identificar el mayor contenido armónico de corriente que se produce por el uso de variadores en la industria.

En el siguiente apartado se detalla el diseño del filtro armónico realizado para mitigar los espectros armónicos de corriente más representativos en la industria y comparar si cumple con los límites establecidos en [9].

3.4. DISEÑO DE FILTROS DE ARMÓNICOS

El contenido armónico generado por los variadores de 6 pulsos instalados en la industria de carbonato de calcio es muy alto y esto genera un gran consumo de energía eléctrica innecesaria y distorsión en las ondas de voltaje y corriente en toda la industria. Una alternativa para reducir el consumo innecesario y mejorar la calidad de las ondas es la instalación de filtros pasivos.

Para el caso de la industria de carbonato de calcio se tienen datos del flujo armónico en el Switchgear QGBT y en cada uno de los MCC´s obtenidos de la simulación, sobre esta base se realiza el diseño del filtro armónico que mitigue el contenido armónico de la industria.

El contenido armónico se lo debe medir en el PCC (Punto de Acoplamiento Común), ya que es aquí donde la empresa distribuidora evalúa los límites del contenido armónico y sanciona.

3.4.1 CÁLCULO DEL FILTRO ARMÓNICO PARA MITIGAR EL ARMÓNICO DE ORDEN 5

Para realizar el cálculo de los filtros armónicos se necesita datos de potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente y factor de potencia. Estos datos se presentan en la Tabla 3.6 y son utilizados en el cálculo de los componentes principales del filtro como son la capacitancia y la inductancia. También es necesario tener en cuenta los flujos armónicos detallados de la Tabla 3.7 a la Tabla 3.10.

3.4.1.1 Cálculo del filtro para el MCC QGBT de la industria (Primer Escenario)

Siguiendo el proceso detallado en 2.3 se procede a calcular los parámetros del filtro armónico, como se indica a continuación.

❖ MCC QGBT

Datos:

$$S = 2873 \text{ [kVA]}$$

$$fp = 0.8753$$

Cálculo:

Potencia de Diseño

$$fp = \frac{P}{S}$$

$$P = fp \times S$$

$$P = 0.8753 \times 2873 \text{ [kVA]}$$

$$P = 2514.74 \text{ [kW]}.$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

$$Q = \sqrt{(2873 \text{ [kVA]})^2 - (2514.74 \text{ [kW]})^2}$$

$$Q = 13898.33 \text{ [kvar]}$$

Para el cálculo de la potencia reactiva de compensación que va a ser usada en el filtro se requiere que el factor de potencia se incremente a un valor de 0.98.

$$Q_c = P \times \tan(\cos^{-1}(0.98))$$

$$Q_c = 2514.74 \text{ [kW]} \times \tan(\cos^{-1}(0.98))$$

$$Q_c = 510.64 \text{ [Kvar]}$$

$$Q_{eff} = Q - Q_c$$

$$Q_{eff} = 13898.33 \text{ [kvar]} - 510.64 \text{ [kvar]}$$

$$Q_{eff} = 878.69 \text{ [kvar]}$$

$$X_{eff} = \frac{V_{LL-sist} \text{ [kV]}^2}{Q_{eff} \text{ [Mvar]}}$$

$$X_{eff} = \frac{0.44^2}{0.87869}$$

$$X_{eff} = 0.2203 \text{ [\Omega]}$$

$$X_c = \frac{(h \times 0.97)^2}{(h \times 0.97)^2 - 1} \times X_{eff}$$

$$X_c = \frac{(5 \times 0.97)^2}{(5 \times 0.97)^2 - 1} \times 0.2203 \text{ [\Omega]}$$

$$X_c = 0.2301 \text{ [\Omega]}$$

$$C = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times X_c}$$

$$C = \frac{1}{2 \times \pi \times 60 \text{ [Hz]} \times 0.2301 \text{ [\Omega]}}$$

$$C = 11527.36 \text{ [uF]}$$

$$X_L = \frac{X_c}{(h \times 0.97)^2}$$

$$X_L = \frac{0.2203 \text{ [\Omega]}}{(5 \times 0.97)^2}$$

$$X_L = 0.0098 [\Omega]$$

$$L = \frac{X_L}{2 \times \pi \times f}$$

$$L = \frac{0.0098 [\Omega]}{2 \times \pi \times 60 [Hz]}$$

$$L = 0.0259 [mH]$$

Para verificar el cálculo de los parámetros del filtro se utilizan las ecuaciones

(2.4) a (2.10).

$$I_{fund} = \frac{V_{LL-sist}}{\sqrt{3} (X_C - X_L)}$$

$$I_{fund} = \frac{\frac{440}{\sqrt{3}}}{(0.2301 - 0.0098) [\Omega]}$$

$$I_{fund} = 1152.98 [A]$$

$$I_5\% = 19.177 \text{ (Dato flujo armónico)}$$

$$I_5 = \frac{I_5\% \times I_{fund}}{100\%} = 221.11 [A]$$

En base a estos resultados y con los datos de la Tabla 3.8 se calcula los valores de corriente armónica en el Switchgear QGBT, mismos que se incluyen en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11 Corriente armónica para el filtro armónico del MCC QGBT

MCC QGBT	I [%]	I [A]
I1 [A]	100	1152.98
I5 [A]	19.177	221.11
I7 [A]	11.922	137.46
I11 [A]	6.58	75.87
I13 [A]	3.717	42.86
I17 [A]	0.523	6.03
I19 [A]	0.266	3.07
I23 [A]	0.056	0.65
I25 [A]	0.029	0.33

A continuación, se calcula la corriente rms:

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}$$

$$I_{rms} = \sqrt{1152.98^2 + 221.11^2 + 137.46^2 + 75.87^2 + 42.86^2 + 6.03^2 + 3.07^2 + 0.65^2 + 0.33^2}$$

$$I_{rms} = 1185.234 [A]$$

Verificando el valor de la norma:

$$\frac{I_{rms}}{I_{fund}} \times 100 \leq 135\%$$

$$\frac{1185.234}{1152.98} \times 100 \leq 135\%$$

102.73% \leq 135% \therefore Cumple.

Se verifica que el voltaje pico del filtro no sobrepase el 120% del voltaje pico del sistema:

$$V_C = I_{fund} \times X_C$$

$$V_C = 1152.98 [A] \times 0.2301 [\Omega]$$

$$V_C = 265.31 [V]$$

$$V_C(h) = \sum_h^n (V(h)) = \sum_h^n \left(I(h) \times \frac{X_C}{h} \right)$$

$$V_C(h) = V(5) + V(7) + V(11) + V(13) + V(17) + V(19) + V(23) + V(25)$$

$$V_C(h) = X_C \times \left(\frac{I(5)}{5} + \frac{I(7)}{7} + \frac{I(11)}{11} + \frac{I(13)}{13} + \frac{I(17)}{17} + \frac{I(19)}{19} + \frac{I(23)}{23} + \frac{I(25)}{25} \right)$$

$$V_C(h) = 0,2301 [\Omega] \times \left(\frac{221.11}{5} + \frac{137.46}{7} + \frac{75.87}{11} + \frac{42.86}{13} + \frac{6.03}{17} + \frac{3.07}{19} + \frac{0.65}{23} + \frac{0.33}{25} \right) [A]$$

$$V_C(h) = 17.168 [V]$$

$$V_{C L-N total pico} = \sqrt{2} \times (V_C + V_C(h))$$

$$V_{C L-N total pico} = \sqrt{2} \times (265.31 + 17.168)$$

$$V_{C L-N total pico} = 399.48 [V]$$

$$V_{L-N pico sist} = \sqrt{2} * \frac{440}{\sqrt{3}} = 359.258 [V]$$

Y el valor de la norma es también verificado:

$$\frac{V_{C L-N total pico}}{V_{L-N pico sist}} \times 100 \leq 120\%$$

$$\frac{399.48 [V]}{359.258 [V]} \times 100 \leq 120\%$$

111.19% \leq 120% \therefore Cumple.

El valor eficaz del voltaje del filtro no debe ser mayor al 110% del voltaje eficaz del sistema:

$$V_{C L-N total rms} = \sqrt{V_C^2 + V_C(5)^2 + V_C(7)^2 + V_C(11)^2 + \dots + V_C(25)^2}$$

$$V_{C L-N total rms} = \sqrt{265.313^2 + 50.879^2 + 31.631^2 + 17.458^2 + 9.862^2 + 1.388^2 + 0.706^2 + 0.149^2 + 0.077^2}$$

$$V_{C L-N total rms} = 272.736 [V]$$

$$V_{L-N rms sist} = \frac{V_{L-L sist}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{L-N rms sist} = \frac{440}{\sqrt{3}}$$

$$V_{L-N rms sist} = 254.034 [V]$$

Verificando el valor de la norma:

$$\frac{V_{C L-N total rms}}{V_{L-N rms sist}} \times 100 \leq 110\%$$

$$\frac{272.735 [V]}{254.034 [V]} \times 100 \leq 110\%$$

$$107.361\% \leq 110\% \therefore \text{Cumple.}$$

Se verifica que el valor de la potencia reactiva recalculada no supere el 135% del valor de la potencia reactiva efectiva:

$$Q_{3\phi recalculada} = 3 \times \frac{V_{C L-N total rms}^2}{X_C}$$

$$Q_{3\phi recalculada} = 3 \times \frac{272.735^2}{0.2301}$$

$$Q_{3\phi recalculada} = 969.809 [Kvar]$$

Verificando el valor de la norma:

$$\frac{Q_{3\phi recalculada}}{Q_{eff}} \times 100 \leq 135\%$$

$$\frac{969.809 [Kvar]}{878.69 [Kvar]} \times 100 \leq 135\%$$

$$110.36\% \leq 135\% \therefore \text{Cumple.}$$

Finalmente se evalúa el calentamiento del dieléctrico del capacitor del filtro:

$$\left| 3 \times \sum_{h=1} (V(h) \times I(h)) \right| \leq 1.35 \times Q_{3\phi recalculada}$$

$$\left| 3 \times \sum_{h=1} (V(h) \times I(h)) \right| = |3 \times (V(1) \times I(1) + V(5) \times I(5) + V(7) \times I(7) + \dots + V(25) \times I(25))|$$

$$\left| 3 \times \sum_{h=1} (V(h) \times I(h)) \right| = |3 \times (265.31 \times 1152.98 + 50.87 \times 211.11 + 31.63 \times 137.46 + \dots + 0.077 \times 0.33)|$$

$$\left| 3 \times \sum_{h=1} (V(h) \times I(h)) \right| = |3 \times (323.255)| = 969.766 [Kvar]$$

$$969.766 [Kvar] \leq 1.35 \times 969.809 [Kvar]$$

$$969.766 [Kvar] \leq 1309.242 [Kvar] \therefore \text{Cumple.}$$

Los valores obtenidos para el diseño del filtro activo cumplen con las 4 condiciones de [15], por lo que se procede a modelar el filtro activo en el software Etap 19.1 y a verificar si mitiga las perturbaciones que están presentes en la industria de carbonato de calcio.

3.4.1.2 Cálculo del filtro para el MCC QGBT de la industria (Segundo Escenario)

Siguiendo el proceso detallado en 2.3 y como el procedimiento es el similar al numeral anterior solo detallaremos los resultados principales obtenidos:

❖ MCC QGBT

Datos:

$$S = 2873 [kVA]$$

$$fp = 0.8753$$

Cálculo:

Potencia de Diseño

$$Q = 13898.33 [kvar]$$

Para el cálculo de la potencia reactiva de compensación que va a ser usada en el filtro vamos a requerir que el factor de potencia se incremente a un valor de 0.98.

$$Q_c = 510.64 [kvar]$$

$$Q_{eff} = 878.69 [kvar]$$

$$X_{eff} = 0.2203 [\Omega]$$

$$X_c = 0.2301 [\Omega]$$

$$C = 11527.36 [\mu F]$$

$$X_L = 0.0098 [\Omega]$$

$$L = 0.0259 [mH]$$

Para verificar el correcto cálculo de los parámetros del filtro se comprobará mediante las ecuaciones (2.4) a la (2.10) que se detallan en 2.3.

$$I_{fund} = 1152.98 \text{ [A]}$$

$$I_5\% = 40.953 \text{ (Dato flujo armónico)}$$

$$I_5 = \frac{I_5\% \times I_{fund}}{100\%} = 472.18 \text{ [A]}$$

Corriente rms:

$$I_{rms} = 1292.900 \text{ [A]}$$

Verificando el valor de la norma:

$$112.135\% \leq 135\% \therefore \text{Cumple.}$$

Ahora se debe verificar que el voltaje pico del filtro no sobrepase el 120% del voltaje pico del sistema:

$$V_C = 265.31 \text{ [V]}$$

$$V_C(h) = 36.486 \text{ [V]}$$

$$V_{C\text{-}L\text{-}N\text{ total pico}} = 426.803 \text{ [V]}$$

$$V_{L\text{-}N\text{ pico sist}} = \sqrt{2} \times \frac{440}{\sqrt{3}} = 359.258 \text{ [V]}$$

Verificando el valor de la norma:

$$118.801\% \leq 120\% \therefore \text{Cumple.}$$

Ahora el valor eficaz del voltaje del filtro no debe ser mayor al 110% del voltaje eficaz del sistema:

$$V_{C\text{-}L\text{-}N\text{ total rms}} = 277.51 \text{ [V]}$$

$$V_{L\text{-}N\text{ rms sist}} = 254.034 \text{ [V]}$$

Verificando el valor de la norma:

$$109.24\% \leq 110\% \therefore \text{Cumple.}$$

Ahora se verificará que el valor de la potencia reactiva recalculada no supere el 135% del valor de la potencia reactiva efectiva:

$$Q_{3\phi\text{ recalculada}} = 969.809 \text{ [Kvar]}$$

Verificando el valor de la norma:

$$110.36\% \leq 135\% \therefore \text{Cumple.}$$

por último, se va a evaluar el calentamiento del dieléctrico del capacitor del filtro:

$$969.766 [Kvar] \leq 1309.242[Kvar] \therefore \text{Cumple.}$$

Los valores obtenidos para el diseño del filtro activo cumplen con las 4 condiciones de [15], por lo que se procede a modelar el filtro activo en el software Etap 19.1 y verificar si mitiga las perturbaciones que están presentes en la industria de carbonato de calcio para el segundo escenario donde se obtuvo medidas reales.

3.4.2 IMPLEMENTACIÓN DEL FILTRO Y SIMULACIÓN DE COMPROBACIÓN

Una vez diseñados los filtros armónicos para la industria de carbonato de calcio se procede a implementarlos en Etap 19.0.1 con el propósito de comprobar si el filtro instalado reduce el contenido armónico.

El objetivo principal del filtro calculado no es eliminar el contenido armónico total generado, si no reducirlo para que cumpla con los valores establecidos en normas y estándares internacionales.

3.4.2.1 Simulación y resultados del flujo armónico en el Primer Escenario

En la Figura 3.15, Figura 3.16 y Figura 3.17, se puede notar la mejoría que se produce al implementar el filtro armónico en la industria, tanto en la reducción de contenido armónico generado por los variadores, así como la disminución de la deformación de la onda sinusoidal de voltaje y de corriente en el PCC y en el punto donde se instalará el filtro armónico (MCC-QGBT).

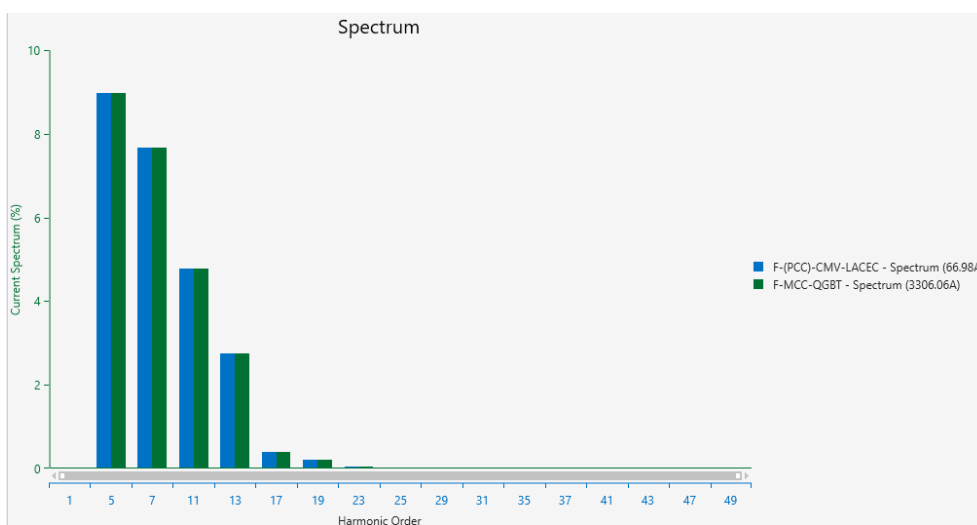


Figura 3.15 THD individual de corriente al implementar el filtro armónico (Escenario 1).

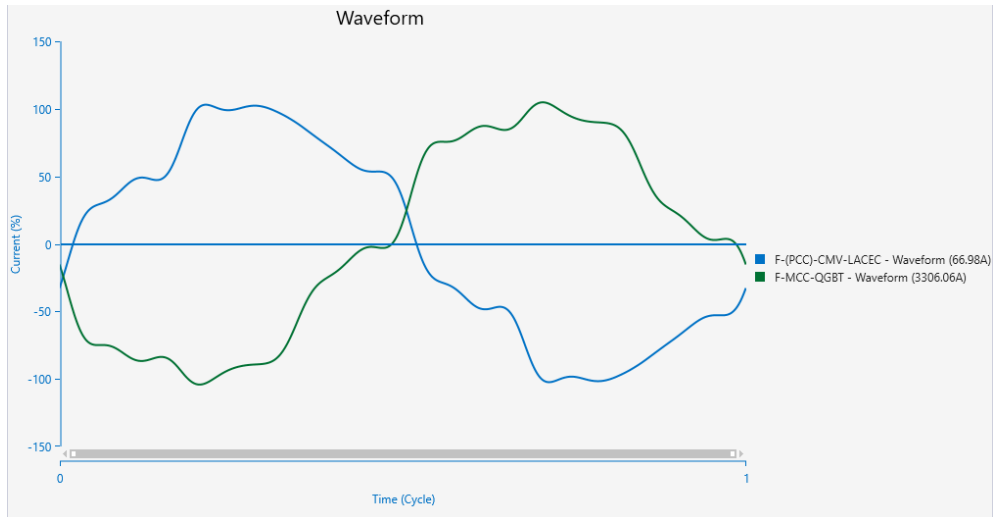


Figura 3.16 Forma de onda de corriente al implementar el filtro activo (Escenario 1).

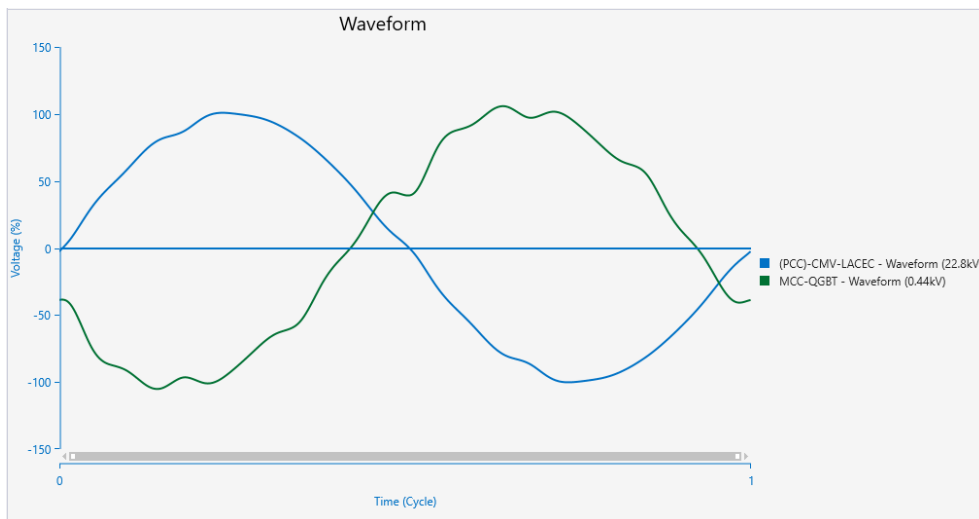


Figura 3.17 Forma de onda de voltaje al implementar el filtro activo (Escenario 1).

3.4.2.2 Simulación y resultados del flujo armónico en el Segundo Escenario

En la Figura 3.18, Figura 3.19 y Figura 3.20, se puede notar la mejoría que se produce al implementar el filtro armónico en la industria, tanto en la reducción de contenido armónico generado por los variadores, así como la disminución de la deformación de la onda sinusoidal de voltaje y de corriente en el PCC y en el punto donde se instalará el filtro armónico (MCC-QGBT).

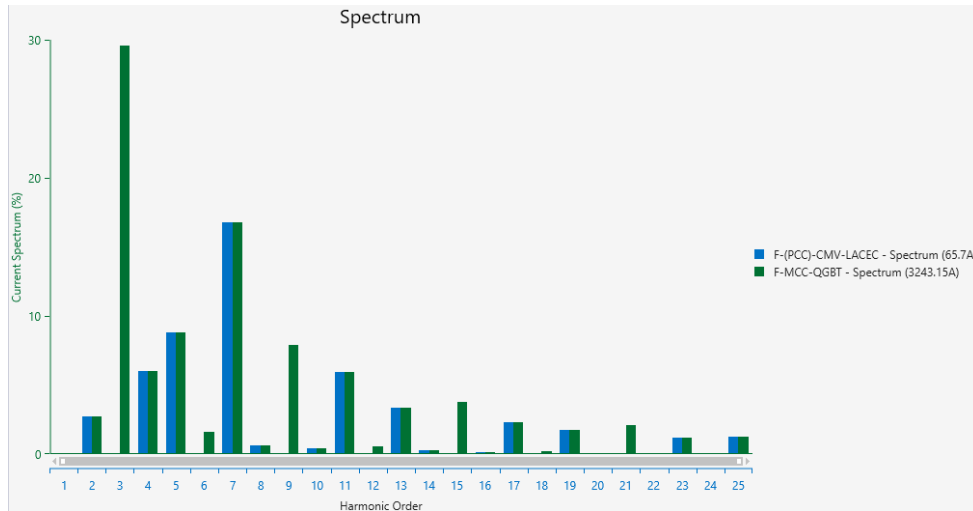


Figura 3.18 THD individual de corriente al implementar el filtro armónico (Escenario 2).

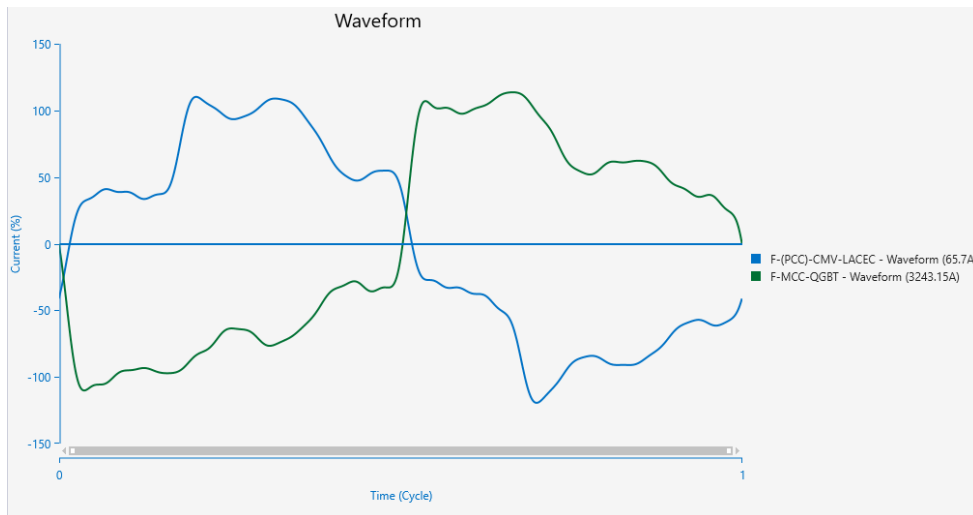


Figura 3.19 Forma de onda de corriente al implementar el filtro activo (Escenario 2).

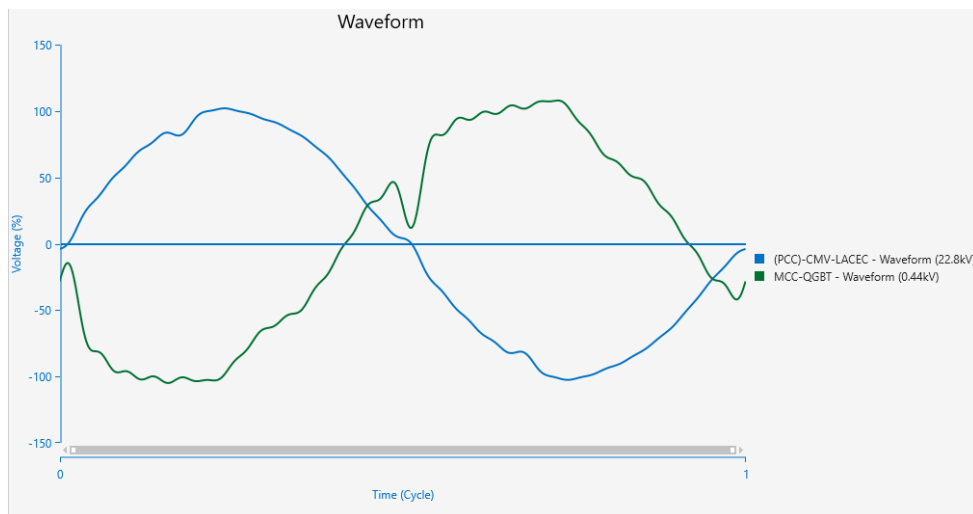


Figura 3.20 Forma de onda de voltaje al implementar el filtro activo (Escenario 2).

3.4.3 COMPARACIÓN DEL THD Y EL TDD CALCULADOS CON LOS VALORES REFERENCIALES DE LA NORMA ARCERNNR [9]

Para realizar la comparación de datos y saber si se cumple con los límites de contenido armónico permitidos, es necesario obtener la relación ICC/IL como se indica en [9]. Esta relación se la calcula en el PCC, para el caso de estudio la corriente de cortocircuito es ICC= 2.82 [kA], y la corriente de línea IL varía de acuerdo con el escenario de simulación.

3.4.3.1 Cálculo del TDD en el PCC

Para comparar los valores de THD y TDD de corriente indicados en la norma ARCERNNR-002-20, se procede a calcular la relación ICC/IL y el TDD con los resultados obtenidos en la simulación y tabulados en la Tabla 3.12, Tabla 3.13 y Tabla 3.14.

Tabla 3.12. Corriente de cortocircuito (ICC) y corriente de línea (IL) en el PCC de la Industria.

Datos		Sin Filtro	Con Filtro
Primer Escenario	ICC [kA]	2.82	2.82
	IL [A]	75.3	67
Segundo Escenario	ICC [kA]	2.82	2.82
	IL [A]	75.30	65.70

Tabla 3.13. THD individual de corriente y THD de voltaje en el PCC de la industria (Primer Escenario).

CMV-(PCC)	Sin Filtro		Con Filtro	
	I [%]	I [A]	I [%]	I [A]
I1 [A]	100	75.3	100	67
I5 [A]	19.177	14.4	8.981	6
I7 [A]	11.922	9	7.659	5.1
I11 [A]	6.58	5	4.774	3.2
I13 [A]	3.717	2.8	2.748	1.8
I17 [A]	0.523	0.394	0.395	0.264
I19 [A]	0.266	0.2	0.202	0.135
I23 [A]	0.056	0.042	0.043	0.029
I25 [A]	0.029	0.029	0.022	0.015
I RMS [A]	77.4		67.5	
THDV [%]	3.92		2.14	

Tabla 3.14. THD individual de corriente y THD de voltaje en el PCC de la industria (Segundo Escenario).

CMV-(PCC)	Sin Filtro		Con Filtro	
	I [%]	I [A]	I [%]	I [A]
I1 [A]	100	75.3	100	65.7
I5 [A]	40.953	30.8	8.826	5.8
I7 [A]	28.017	21.1	16.802	11
I11 [A]	8.401	6.3	5.971	3.9
I13 [A]	4.646	3.5	3.382	2.2
I17 [A]	3.102	2.3	2.313	1.5
I19 [A]	2.339	1.8	1.756	1.2
I23 [A]	1.53	1.2	1.162	0.763
I25 [A]	1.651	1.2	1.259	0.827
I RMS [A]	84.4		67.2	
THDV [%]	8.05		3.64	

$$\frac{I_{CC}}{I_L} = \frac{2.82 [KA]}{75.3 [A]}$$

$$\frac{I_{CC}}{I_L} = 37.45$$

$$TDD\% = \left[\frac{1}{I_{h,1}} \sqrt{\sum_2^{50} (I_{h,1})^2} \right] \times 100$$

$$TDD\% = \left[\frac{1}{75.3} \times \sqrt{14.4^2 + 9^2 + 5^2 + 2.8^2 + 0.394^2 + 0.2^2 + 0.042^2 + 0.029^2} \right] \times 100\%$$

$$TDD = 23.808\%$$

Al momento de incorporar el filtro en la simulación los valores de la relación ICC/IL y TDD cambian, la Tabla 3.15 cuenta con los valores obtenidos en la simulación sin la incorporación y con la incorporación del filtro armónico.

Tabla 3.15. THD individual de corriente y THD de voltaje en el PCC de la industria.

COMPARATIVOS		SIN FILTRO	CON FILTRO
PRIMER ESCENARIO	ICC/IL	37.450	42.090
	TDD [%]	23.808	12.976
SEGUNDO ESCENARIO	ICC/IL	37.450	42.922
	TDD [%]	50.695	20.401

3.4.3.2 Comparación y cumplimiento de la norma ARCERNNR-002/20 Primer Escenario

Con los valores de la Tabla 3.15 se comprueba si los valores del contenido armónico individual de corriente y de TDD están dentro de los valores recomendados en la Tabla 1.7 de la norma ARCERNNR-002-20.

En la Tabla 3.16 y la Tabla 3.17 se detalla la comparación entre los armónicos individuales de corriente, el THD de voltaje y el TDD en el PCC y los límites que establece la norma ARCERNNR-002-20.

Tabla 3.16. Comparación entre los indicadores THDi, THDv y TDD en el PCC de la industria (Primer Escenario.)

Primer Escenario			
CMV-(PCC)	Con Filtro	Regulación	Cumplimiento
	I [%]	I [%]	
I5 [A]	8.981	7	NO CUMPLE
I7 [A]	7.659	7	NO CUMPLE
I11 [A]	4.774	3.5	NO CUMPLE
I13 [A]	2.748	3.5	CUMPLE
I17 [A]	0.395	2.5	CUMPLE
I19 [A]	0.202	2.5	CUMPLE
I23 [A]	0.043	1	CUMPLE
I25 [A]	0.022	1	CUMPLE
TDD [%]	12.976	8	NO CUMPLE
THDV [%]	2.14	5	CUMPLE

Tabla 3.17. Comparación entre los indicadores THDi, THDv y TDD en el PCC de la industria (Segundo Escenario.)

Segundo Escenario			
CMV-(PCC)	Con Filtro	Regulación	Cumplimiento
	I [%]	I [%]	
I5 [A]	8.826	7	NO CUMPLE
I7 [A]	16.802	7	NO CUMPLE
I11 [A]	5.971	3.5	NO CUMPLE
I13 [A]	3.382	3.5	CUMPLE
I17 [A]	2.313	2.5	CUMPLE
I19 [A]	1.756	2.5	CUMPLE
I23 [A]	1.162	1	NO CUMPLE
I25 [A]	1.259	1	NO CUMPLE
TDD [%]	20.401	8	NO CUMPLE
THDV [%]	3.64	5	CUMPLE

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- Las simulaciones realizadas en el presente documento consideran una modelación detallada que permite crear escenarios de operación que se aproximan adecuadamente a las condiciones operativas reales de la industria bajo análisis, de esta manera es posible obtener valores más reales de flujos de potencia y flujos de armónico en los diferentes escenarios de operación.
- Para realizar un análisis de calidad de energía en una industria que cuenta con cargas no lineales, es necesario tener un conocimiento amplio acerca de los equipos electrónicos y eléctricos que generan perturbaciones y cuáles son las posibles soluciones que se pueden aplicar para disminuir el contenido armónico generado.
- En Ecuador la mayoría de las industrias cuentan con cargas no lineales que aportan contenido armónico que no es mitigado; en este contexto entro en vigencia la regulación 002/20 ARCERNR “Calidad del servicio de distribución y comercialización de la energía eléctrica” en la cual se regula el nivel de contenido armónico que un usuario industrial puede generar, limitando la emisión de armónicos del usuario hacia la red de distribución.
- Para la evaluación del contenido armónico de corriente que produce la industria se utilizó el indicador TDD, con el cual se realizó una evaluación general de todo el contenido armónico, permitiendo de este modo evitar la realización de una comparación individual del contenido armónico.
- Los filtros calculados para reducir el contenido armónico, son de características simples y tienen una impedancia resonante a baja frecuencia, considerando que el armónico más representativo es el de orden 5°.
- El espectro armónico de los variadores de velocidad típicamente usados en la industria, obtenido mediante mediciones, no se asemeja al entregado por el fabricante, por ello se analizó dos escenarios de estudio, obteniéndose un filtro armónico de diferente capacidad para cada escenario.

4.2. RECOMENDACIONES

- Es importante tener claro el concepto de PCC (punto de acoplamiento común) ya que existe mucha confusión entre el lugar de instalación del filtro y el lugar de medición del contenido armónico, en el primer caso se busca la carga donde se está generando el mayor contenido armónico, para instalar el filtro cerca de ese lugar, y en el segundo caso, es el lugar o sitio donde la empresa distribuidora realiza la medición del contenido armónico, en general en medio o alto voltaje.
- Para realizar un estudio de calidad de energía más exacto es recomendable instalar un analizador de red, como se indica en la Regulación ARCERNNR 002/20, en los MCC's o si es posible en cada una de las cargas de mayor potencia, de esta forma se tendrá una idea más clara del origen del contenido armónico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABB, «Reduciendo armónicos generados por variadores de velocidad.», *Newsletter de ABB Colombia*, p. 3, 2015.
- [2] P. Issouribehere, G. Barbera y F. Issouribehere, «"Medición de la emisión armónica en variadores de velocidad y desarrollo de modelos de simulación",» de *Decimo tercer Encuentro regional iberoamericano de cigré*, Argentina, 2009.
- [3] R. C. DOUGAN, M. F. MCGRANAGHAN, S. SANTOSO y H. W. BEATY, *Electrical Power Systems Quality*, Mc-graw Hill Education 2012, 2012.
- [4] M.D. Donsion, *Calida de la Energia Eléctrica*, Madrid: GarcetaGrupo Editorial, 2016.
- [5] G. B. Salazar, *Mitigacion de Perturbaciones*, Quito, 2010.
- [6] IEEE STD 519-1992, «IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems,» 1993.
- [7] IEC 61000-4-7, GUÍA GENERAL RELATIVA A LAS MEDIDAS DE ARMÓNICOS E INTERARMÓNICOS, ASI COMO A LOS PARATOS DE MEDIDA, APLICABLE A LAS REDES DE SUMINISTRO Y A LOS APARATOS CONECTADOS A ESTAS, SWITZERLAND: ALL RIGHTS RESERVED, 2002.
- [8] IEC-61000-3-12, «Limite para las corrientes armónicas producidas por los equipos conectados a las redes publicas de baja tensión con corriente de entrada >16A por fase,» 2006, pp. 18-19.
- [9] ARCERNNR-Regulación 002/20, «Calidad del servicio de distribucion y comercializacion de la energia eléctrica,» Quito, 2020.
- [10] S. Matthew y A. Charles, *Fundamentos de circuitos eléctricos*, Mexico D.F.: Mc Graw Hill, 2003.
- [11] G. WEG, «static.weg.net,» 21 10 2020. [En línea]. Available: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h43/h8f/WEG-ccm-centros-de-control-de-motores-de-baja-tension-50070397-es.pdf>. [Último acceso: 02 07 2022].
- [12] Risoul, «Blog de Risoul,» 27 12 2021. [En línea]. Available: <https://www.risoul.com.mx/blog/que-es-un-ccm-y-por-que-deberias-de-adquirir-uno#a1>. [Último acceso: 27 12 2021].
- [13] solerpalau, «solerpaula,» 07 Enero 2020. [En línea]. Available: <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/variador-de-frecuencia/#>. [Último acceso: 17 02 2022].
- [14] Electrocable, «Electrocablec,» 25 06 2018. [En línea]. Available: <https://www.electrocable.com/uploads/catficha/cata-logo-electrocables-2018.pdf>. [Último acceso: 27 02 2022].
- [15] etap, «etap Powering Success,» 05 01 2022. [En línea]. Available: <https://etap.com/es/product/intelligent-electrical-one-line-diagram>. [Último acceso: 05 01 2022].
- [16] IEEE-1531, "GUIDE FOR APPLICATION AND SPECIFICATION OF HARMONIC FILTERS", 2013.
- [17] Ehab El-Saadany, *DISTRIBUTION SYSTEM POWER QUALITY*, Waterloo: Canada Research Chair in Energy Systems, 2017.
- [18] EEQSA, «EMPRESA ELECTRICA QUITO,» 12 12 2022. [En línea]. Available: <https://gis-sigde.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=37be603e683c420f94b32d75035fea96>. [Último acceso: 12 12 2021].

- [19] L. Carvajal, Metodología de la Investigación Científica. Curso general y aplicado, 28 ed., Santiago de Cali: U.S.C., 2006, p. 139.
- [20] J. R. Gallego Vásquez, Teoremas Fundamentales de Circuitos Eléctricos, Pereira, 2008.
- [21] WEG, «WEG.NET,» 27 12 2021. [En línea]. Available: <https://www.weg.net/catalog/weg/BO/es/Drives/Convertidores-de-Frecuencia/Drives-para-Sistemas-Industriales/Convertidor-de-Frecuencia-CFW11/CONVERTIDOR-CFW110010T4OFAYZ/p/11951159>. [Último acceso: 27 12 2021].
- [22] «URUWIRE.COM,» 29 12 2021. [En línea]. Available: <https://uruwire.com/wp-content/uploads/2015/07/Tabla-de-equivalencias-AWG-a-MM2.pdf>. [Último acceso: 29 12 2021].
- [23] UNE-EN 61000-3-2, Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada <16A por fase)., MADRID-España: AENOR, 2014.

ANEXOS

ANEXO A Diagrama unifilar Industria de Carbonato de calcio.

ANEXO B Datos de placa y características de variadores de velocidad.

ANEXO C Ingreso de datos en los alimentadores secundarios (Switchgear)

ANEXO D Ingreso de datos Centro de Control de Motores (MCC).

ANEXO E Ingreso de datos cargas de gran potencia asociadas a los variadores de velocidad.

ANEXO F Flujo de potencia Escenario 1

ANEXO G Flujo de potencia Escenario 2

ORDEN DE EMPASTADO