

**UNIVERSIDAD DE TARAPACÁ**  
**Facultad de Ingeniería**



**ARMÓNICOS EN REDES INDUSTRIALES**

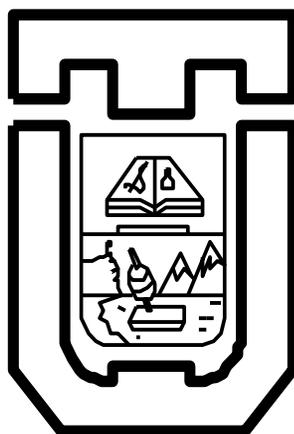
**Memoria para optar al título de:  
Ingeniero Civil Eléctrico**

**Alumno:  
Marco Cassane Arroyo**

**Profesor Guía:  
Juan Pablo Espinoza Gonzalez**

**Iquique – Chile  
2021**

**UNIVERSIDAD DE TARAPACÁ**  
**Facultad de Ingeniería**



**ARMÓNICOS EN REDES INDUSTRIALES**

**Memoria para optar al título de:  
Ingeniero Civil Eléctrico**

**Alumno:  
Marco Cassane Arroyo**

**Profesor Guía:  
Juan Pablo Espinoza Gonzalez**

**Profesor Informante:  
Pablo Guicharrousse Luza**

**Iquique – Chile  
2021**



## ÍNDICE GENERAL

### Contenido

ÍNDICE GENERAL.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS.....	vi
RESUMEN.....	viii
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 MOTIVACIÓN.....	2
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 Objetivo General.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos.....	3
1.3 METODOLOGÍA.....	3
1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	4
1.5 DESCRIPCIÓN DE CAPÍTULOS.....	4
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 ARMÓNICOS.....	5
2.1.1 Secuencia Armónica [8]......	7
2.1.2 Índices de distorsión armónica.....	8
2.1.3 Definiciones para la medición de parámetros armónicos en sistemas trifásicos desbalanceados [12].....	10
2.1.4 Cargas no lineales.....	12
2.1.5 Resonancia armónica.....	16
2.1.6 Filtros pasivos de armónicas.....	18
2.1.7 Estándares y normas sobre límites de contaminación armónica en redes eléctricas.....	25
2.1.8 Efectos de los armónicos.....	31
CAPÍTULO 3: Desarrollo.....	39
3.1 ANTECEDENTES GENERALES ANDESDRIP LTDA.....	39
3.2 RED ELÉCTRICA ANDESDRIP.....	44
3.3 MEDICIONES DE CAMPO.....	47
3.3.1 Instrumento de medición y conexión.....	47
3.3.2 Resultados y análisis de las mediciones.....	49

3.3.3 Prueba banco de condensadores para determinar resonancia .	57
3.4 CÁLCULO DE PÉRDIDA EN POTENCIA Y CAPACIDAD DE TRANSFORMADOR. ....	58
3.4.1 Pérdidas adicionales por armónicos .....	58
3.4.2 Pérdida de capacidad en el transformador .....	59
3.5 DISEÑO DE BANCO DE CONDENSADORES CON FILTROS ANTIRRESONANTES. ....	60
3.6 SIMULACIÓN DIGilent POWERFactory. ....	62
3.6.1 Escenario N°1 .....	63
3.6.2 Escenario N°2 .....	69
3.7 CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES.....	72
BIBLIOGRAFÍA.....	74
ANEXOS.....	80
A.1 ESPECTRO ARMÓNICO ESCENARIO N°1 Y N°2. ....	80
A.2 DATOS DE CORTO CIRCUITO PARA SIMULACIÓN DE RED EXTERNA. ....	82
A.3 MODELOS PARA REACTANCIAS Y CONDENSADORES. ....	82

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Consumo de energía eléctrica según sector. ....	2
Figura 1.2. Diagrama de Metodología de Trabajo. ....	3
Figura 2.1. Ondas armónicas y espectro armónico de una función. ....	6
Figura 2.2. Rectificador trifásico de seis pulsos. ....	13
Figura 2.3. Etapas variador de frecuencia. ....	15
Figura 2.4. En (a) diagrama unilineal de un sistema industrial simplificado, en (b) circuito equivalente Thevenin de la red industrial visto desde el capacitor. ....	17
Figura 2.5. (a) filtro sintonizado simple, (b) filtro serie. ....	18
Figura 2.6. (a) filtro sintonizado simple, (b) filtro doble sintonía. ....	19
Figura 2.7. Filtros de amortiguamiento; (a) primer orden, (b) segundo orden, ....	20
(c) tercer orden y (d) tipo C. ....	20
Figura 2.8. Comportamiento en frecuencia de filtro pasa altas de 2°orden. ....	20
Figura 2.9. Comportamiento en frecuencia de filtro tipo C. ....	21
Figura 2.10. Diagrama de flujo para filtro pasivo propuesto en [6]. ....	22
Figura 2.11. Curva de derrateo en función de HVF. ....	36
Figura 3.1. Ubicación y superficie AndesDrip. ....	39
Figura 3.2. Distribución y sectores. ....	39
Figura 3.3. Galpones principales AndesDrip. ....	41
Figura 3.4. Resumen proceso productivo para tuberías HDPE y PVC. ....	41
Figura 3.5. Potencia instalada AndesDrip. ....	45
Figura 3.6 Esquema <i>Cir-e+</i> para conexión de sensores de tensión y corriente. ....	48
Figura 3.7 (a) conexión pinzas de corriente, (b) conexión sensores de tensión. ....	49
Figura 3.8. Potencia aparente máxima, mínima y promedio. ....	50
Figura 3.9. Contraste FP y $\cos(\varphi)$ . ....	50
Figura 3.10. Potencia capacitiva y tensión por fases. ....	51
Figura 3.11. <i>THDi</i> promedio para cada fase. ....	52

Figura 3.12. Contraste entre $I_{rms}$ (en rojo) y $I_1$ (en verde) .....	53
Figura 3.13. Componentes Armónicas en Corriente.....	54
Figura 3.14. $THDv$ promedio por fase.....	54
Figura 3.15. $THDv$ componentes armónicas en tensión.....	55
Figura 3.16. Corriente en el Neutro .....	56
Figura 3.17. Componentes de secuencia cero.....	56
Figura 3.18. Diagrama general para simulación .....	63
Figura 3.19. Espectro armónico tensión escenario N°1 condensadores conectados...	64
Figura 3.20. Respuesta en frecuencia escenario N°1 con banco conectado. ....	64
Figura 3.21. Barrido de frecuencia escenario N°1 banco desconectado.....	65
Figura 3.22. Espectro armónico en tensión escenario N°1 con banco desconectado. 65	
Figura 3.23. barrido de frecuencia escenario N°1 banco de condensadores con filtro antirresonante conectado. ....	66
Figura 3.24. Espectro armónico en tensión escenario N°1 con filtro conectado. ....	67
Figura 3.25. Formas de onda de tensión, en (a) banco de condensadores sin filtros y en (b) banco de condensadores con filtros .....	68
Figura 3.26. Formas de onda de corriente, en (a) banco de condensadores sin filtros y en (b) banco de condensadores con filtros.....	68
Figura 3.27. Espectro armónico en tensión escenario N°2 sin filtro conectado. ....	69
Figura 3.28. Barrido de frecuencia escenario N°2 sin filtro. ....	70
Figura 3.29. Barrido de frecuencia escenario N°2 con filtros antirresonantes. ....	70
Figura 3.30. Espectro armónico en tensión escenario N°2 con filtros conectados. ....	71
Figura 3.31. Formas de onda de tensión para escenario N°2, en (a) banco de condensadores sin filtros y en (b) banco de condensadores con filtros. ....	72
Figura 3.32. Formas de onda de corriente para escenario N°2, en (a) banco de condensadores sin filtros y en (b) banco de condensadores con filtros. ....	72
Figura A.1.1. Espectro armónico en tensión N°1. ....	80
Figura A.1.2. Espectro armónico en tensión N°2. ....	80

Figura A.1.3. Espectro armónico en corriente N°1.....	81
Figura A.1.4. Espectro armónico en corriente N°2.....	81
Figura A.2.1. Niveles de corto circuito para red externa. ....	82

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Secuencias de armónicas.....	8
Tabla 2.2. Clasificación de parámetros para sistemas trifásicos no balanceados econdiciones no sinusoidales. ....	12
Tabla 2.3 Tipo de convertidor para variador de velocidad, según motor y potencia..	13
Tabla 2.4. Armónicos en corriente para convertidor trifásico de 6 pulsos. ....	15
Tabla 2.5. Quinta armónica de corriente para VDF de seis pulsos tipo VSI en función del factor de carga .....	16
Tabla 2.6. parámetros para cálculo de filtro antirresonante .....	23
Tabla 2.7. Límites en distorsión de tensión.....	26
Tabla 2.8. Límites de distorsión de corriente para sistemas entre 120V – 69kV.....	26
Tabla 2.9. Niveles de compatibilidad para armónicas individuales en BT y MT.....	27
Tabla 2.10. Límites distorsión en tensión por tipo y orden de armónica. ....	28
Tabla 2.11. Niveles de compatibilidad para THD.....	29
Tabla 2.12. Niveles de compatibilidad de armónicos de tensión; órdenes impares con exclusión de los múltiplos de 3 .....	30
Tabla 2.13. Niveles de compatibilidad de armónicas de tensión; órdenes impares múltiplos de 3.....	30
Tabla 2.14. Niveles de compatibilidad de armónicos de tensión de orden par.....	30
Tabla 3.1. Productos y características fabricados en AndesDrip .....	40
Tabla 3.2. Consumo energético y factor de potencia. ....	42
Tabla 3.3. Ahorro total y promedio durante el período de evaluación .....	43
Tabla 3.4. Parámetros transformador AndesDrip. ....	44
Tabla 3.5. Motores y controladores de velocidad .....	45
Tabla 3.6. Potencia del banco de condensadores por etapa .....	46
Tabla 3.7. Parámetros medidos y registrados por analizador de redes Cir-e+.....	47
Tabla 3.8. Precisión analizador de redes Cir-e+.....	48
Tabla 3.9. Comparación FP y $\cos(\varphi)$ .....	51

Tabla 3.10. Prueba N°1 para determinar resonancia.....	57
Tabla 3.11. Prueba para determinar resonancia .....	57
Tabla 3.12. parámetros para el cálculo de factor de pérdida armónica.....	58
Tabla 3.13. pérdidas corregidas para transformador AndesDrip de 750[kVA].....	59
Tabla 3.14. Potencias reactivas banco de condensadores con filtro .....	61
Tabla 3.15. Parámetros para etapas de compensación 1-6.....	61
Tabla 3.16. Parámetros para etapas de compensación 7-8.....	62
Tabla 3.17. Parámetros para etapas de compensación 9-11 .....	62
Tabla 3.18. Parámetros para etapa de compensación 12.....	62
Tabla 3.19. Comparación parámetros simulados y reales en escenario N°1 banco conectado.....	63
Tabla 3.20. Parámetros escenario N°1 con banco desconectado. ....	65
Tabla 3.21. Parámetros escenario N°1 banco de condensadores con filtros.....	66
Tabla 3.22. Comparación de casos para escenario N°1. ....	67
Tabla 3.23. Comparación parámetros simulados y reales en escenario N°2. ....	69
Tabla 3.24. Comparación de resultados para casos en escenario N°2. ....	71
Tabla A.3.1. Modelos de reactancias y condensadores para filtro antirresonante. ....	82

## RESUMEN

El trabajo presentado tiene como objetivo principal revisar los conceptos y estándares relacionados a armónicos con el fin de aplicarlos al estudio de una instalación industrial real. La bibliografía estudiada incluye estándares internacionales y nacionales, generación de armónicos, cargas no lineales, consecuencias de la distorsión armónica tales como pérdidas adicionales, resonancia armónica y sobredimensionamiento de equipos. Además, se analizan las variedades de filtros pasivos con énfasis en filtros antirresonantes utilizados en conjunto a banco de condensadores.

La red estudiada corresponde a la empresa AndesDrip LTDA perteneciente a la industria de fabricación de plásticos. La instalación cuenta con 1300[kW] de potencia instalada, se conecta en media tensión a través de un transformador de 750 [kVAR] 13.200/400/231 [V]. El desarrollo del proceso productivo se hace principalmente mediante doce líneas de producción, donde se conectan cargas no lineales para el control de velocidad en motores.

Las mediciones se realizaron a través de un equipo analizador de redes en el lado de baja tensión del transformador, del análisis de datos obtenidos y pruebas adicionales a través del regulador de compensación reactiva, se concluye que la distorsión es amplificada en las componentes de quinta y séptima armónica por el aumento de impedancia generado al conectar las etapas del banco de condensadores.

Como medida para mitigar los índices de distorsión armónica, se diseñó un banco de condensadores con reactancias antirresonantes. Con objeto de predecir el comportamiento de los índices armónicos y la respuesta en frecuencia del sistema, se modeló la red por medio del software *DIgSILENT*.

## **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

Los armónicos se definen como la componente sinusoidal de una onda periódica, cuya frecuencia es un múltiplo integral de la frecuencia fundamental [30]. Estas frecuencias son inherentes a los sistemas de corriente alterna y generan ondas de tensión y corriente distorsionadas en los sistemas de potencia, los cuales generalmente son estudiados y diseñados para ondas ideales o sinusoidales [1].

La generación de armónicos tiene origen en las no linealidades de componentes del sistema eléctrico, la saturación magnética y ondas pulsantes producidas en equipos de resistencia variable. La masiva incorporación de controladores de velocidad con tecnología IGBT de alta frecuencia de conmutación y la resonancia armónica, son las mayores causas de distorsión armónica. En redes industriales una causa común de resonancia armónica es el uso de condensadores para compensación de reactivos, los cuales sin los filtros respectivos pueden cambiar la impedancia del sistema y amplificar la distorsión.

Las formas en onda de tensión y corriente distorsionadas en los sistemas eléctricos aumentan las pérdidas por efecto joule y efecto pelicular, se debe considerar la pérdida de capacidad en transformadores, motores, cables y conductores funcionando bajo condiciones no sinusoidales. En presencia de componentes de secuencia cero se presenta un aumento en las corrientes de neutro lo que conlleva a un sobredimensionamiento del conductor. También pueden modificar los parámetros de operación de las protecciones causando operación en falso y pérdida en la coordinación.

Debido a las consecuencias generadas por los armónicos, se han desarrollado guías y estándares en los cuales se definen los límites de distorsión recomendados que un usuario puede inyectar a la red en el punto de conexión común (PCC) o en un punto interno específico de la instalación. Los estándares internacionales IEC 61000-3-6 y IEE 519 definen los índices de distorsión recomendados según la tensión y corriente de corto circuito del sistema en el PCC. Para un punto de conexión interno de la red (PCI) el estándar IEC 61000-2-4 define los límites de tensión según el criterio de nivel de compatibilidad electromagnética.

En el diseño de filtros pasivos para mitigar la distorsión en redes industriales se deben considerar los requerimientos específicos de cada instalación y poner especial atención en las características de frecuencia, ya que se puede generar resonancia en frecuencias presentes en el sistema. Es recomendable el uso de herramientas computacionales para estudiar el flujo de carga armónica y realizar un barrido de frecuencia [6].

## 1.1 Motivación

Se calcula que la energía eléctrica consumida actualmente por año en todo el mundo es de aproximadamente 20.000 [TWh], es el tipo de energía con la tasa de crecimiento de demanda más alta y se estima que para 2040 aumente su demanda en un 60% [2]. La Figura 1.1. muestra que respecto al consumo total de energía eléctrica, el sector industrial consume alrededor de un 40%.

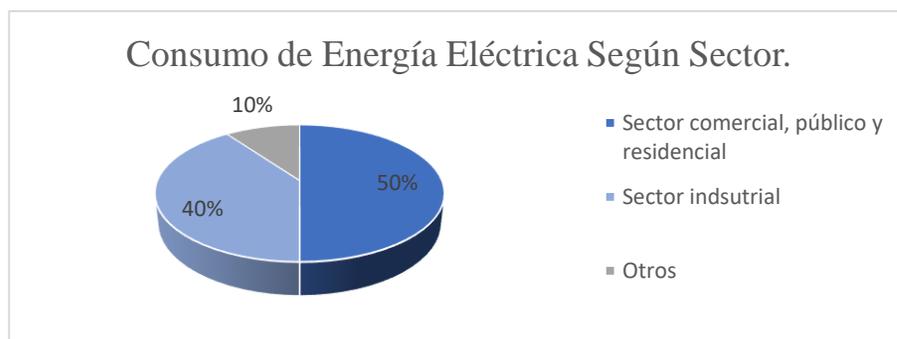


Figura 1.1. Consumo de energía eléctrica según sector.  
Fuente: Basado en [2]

Los motores de inducción son esenciales para casi todo proceso productivo industrial y se proyecta que el 30% del crecimiento total en la demanda para 2040 corresponda a estos dispositivos [3]. El funcionamiento de los motores de inducción puede verse afectados por malas condiciones en la calidad de la energía, como podrían ser niveles inadecuados de tensión armónica en la red, produciendo aumentos de temperatura, pérdidas adicionales, envejecimiento térmico, vibraciones, ruidos, pérdida de capacidad de potencia y menor eficiencia [4].

Se estima que para 2025 el 60% de la carga total en los sistemas de distribución sean cargas no lineales. La incorporación de dispositivos de electrónica de potencia como controladores de velocidad en motores aumenta la productividad y eficiencia, no obstante, son fuentes generadoras de armónicas y del mismo modo menos tolerantes a formas de ondas distorsionadas [6].

Debido a las pérdidas y consecuencias de los armónicos, estos son considerados en programas y estudios de eficiencia energética. A nivel país, en el marco del programa “energía 2050, política energética de Chile” del ministerio de energía, se ha propuesto como meta para el 2035 que todos los grandes consumidores industriales hagan uso eficiente de la energía, implementando sistemas activos de gestión de energía y activas mejoras en la eficiencia [5]. También se han creado fundaciones como la “Agencia Chilena de Eficiencia Energética”, con objeto de incentivar, difundir, educar e implementar políticas públicas en la materia.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo General

Realizar estudio de armónicos en una red industrial, diseñar y evaluar las opciones de mejora.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Describir los efectos y consecuencias de los armónicos en redes industriales.
- Estudio de los estándares nacionales e internacionales en relación a índices de distorsión armónica.
- Evaluar mediante el uso del analizador de redes *CIR-e+*, el funcionamiento con respecto a distorsión armónica en la red industrial AndesDrip LTDA.
- Describir la red industrial AndesDrip LTDA.
- Diseñar filtro pasivo para mitigar la distorsión armónica en el sistema y lograr parámetros recomendados según estándares.
- Mediante el software Digsilent simular el sistema industrial y verificar el efecto del filtro pasivo en la red.

## 1.3 Metodología

Tal como indica la Figura 1.3, en primera instancia se trabajó en la recopilación de datos correspondientes a las características generales de la instalación, dispositivos conectados y particularidades del proceso productivo, en esta etapa también se realizaron mediciones de campo, principalmente mediante el analizador de redes *CIR-e+*. Adicionalmente los datos para el análisis de la resonancia en el sistema se obtuvieron mediante el dispositivo regulador de energía reactiva *SMART III*.

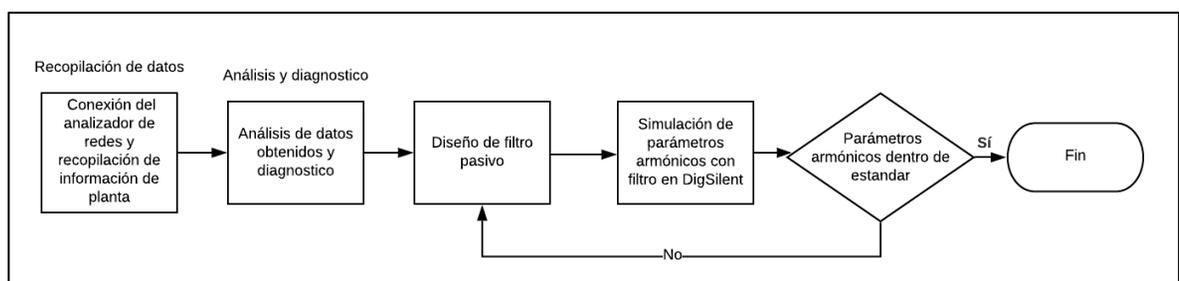


Figura 1.2. Diagrama de Metodología de Trabajo.

## Capítulo 1: Introducción

Una vez analizados los datos y realizado el diagnóstico se trabajó en las opciones de mejora, como muestra el diagrama para el caso del diseño del filtro pasivo de armónicos se realizó una simulación en *DigSilent*, con objeto de verificar los parámetros calculados.

### 1.4 Alcances y Limitaciones

- El estudio de las normas, estándares y conceptos teóricos se limita a lo que se considera de interés desde la perspectiva de la optimización de la red industrial objeto de estudio, es decir, se omite lo que en la fase de diagnóstico se consideró de funcionamiento óptimo.
- El trabajo hace énfasis en lo que respecta a la calidad de energía, específicamente en el mejoramiento de los índices de contaminación armónica en la red.
- A causa de las limitaciones del equipo analizador de redes disponible, solo se estudian armónicos de tipo característico.

### 1.5 Descripción de Capítulos

- Capítulo 1, Introducción: en este capítulo se contextualiza de forma breve el problema, se presenta la motivación para realizar el trabajo, se definen objetivos generales, específicos, limitaciones y metodología utilizada.
- Capítulo 2, Marco Teórico: se exponen conceptos teóricos con relación a armónicos; definición, resonancia, tipos de filtros, consecuencias, normativas y estándares vigentes.
- Capítulo 3, Desarrollo : comienza con la descripción general de la red industrial, luego se estudian los resultados obtenidos desde el analizador de redes. A partir de lo estudiado en el capítulo 2 se calculan las pérdidas en el transformador y se diseña un banco de capacitores con reactancias para mitigar la distorsión armónica. Finalmente se estudia el comportamiento de la red con respecto al filtro diseñado mediante simulación en *DIgSILENT*.

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

### 2.1 Armónicos

Idealmente la tensión de alimentación suministrada a una carga conectada a un sistema eléctrico debe ser perfectamente sinusoidal con periodicidad definida. Si bien, componentes del sistema eléctrico como transformadores o motores de inducción pueden generar armónicos, la reciente introducción de cargas no lineales en los sistemas de potencia, tales como variadores de frecuencia, rectificadores o inversores, trae consigo un aumento significativo en los niveles de contaminación de tensión y corrientes armónicas, generando pérdidas y mal funcionamiento en los dispositivos susceptibles. En redes industriales el uso de condensadores para compensación de potencia reactiva amplifica el problema debido al fenómeno de resonancia producido por el cambio en la frecuencia natural del sistema, la cual puede tener un valor cercano al orden de las armónicas generadas por elementos no lineales y de esta forma debido al aumento en impedancia por resonancia paralelo, amplificar los armónicos.

Se puede definir una carga no lineal como aquella que, al aplicarle una tensión sinusoidal, produce un flujo no sinusoidal de corriente, esta corriente puede ser discontinua o tener forma de pulsos [6].

Matemáticamente, linealidad implica dos condiciones: Homogeneidad y superposición:

considerando la ecuación de estado

$$\dot{x} = f[x(t), r(t), t] \quad (2.1)$$

Si  $x(t)$  es solución a la ecuación (2.1) con condiciones iniciales  $x(t_0)$  para  $t = t_0$  y con entrada  $r(t), t > t_0$ , entonces

$$x(t) = g[x(t_0), r(t)] \quad (2.2)$$

Homogeneidad implica que

$$g[x(t_0), \alpha r(t)] = \alpha g[x(t_0), r(t)] \quad (2.3)$$

Es decir,  $x(t)$  con entrada  $\alpha r(t)$  es igual a  $\alpha$  veces  $x(t)$ , para cualquier escalar  $\alpha$ .

Superposición implica que

$$g[x(t_0), r_1(t) + r_2(t)] = g[x(t_0), r_1(t)] + g[x(t_0), r_2(t)] \quad (2.4)$$

Esto conlleva que  $x(t)$  con entrada  $r_1(t) + r_2(t)$  es igual a la suma entre  $x(t)$  con entrada  $r_1(t)$  y  $x(t)$  con entrada  $r_2(t)$ .

Los elementos no lineales generan corrientes distorsionadas, estas ondas no sinusoidales pueden descomponerse en las componentes armónicas que oscilan a frecuencias definidas y distintas a la fundamental.

Por definición, una función periódica  $f(t)$  es aquella donde se cumple que  $f(t) = f(t + T)$ , donde  $T$  es el periodo [7]. Estas funciones se pueden representar mediante la serie geométrica de Fourier:

$$x(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \left( a_h \cos\left(\frac{2\pi ht}{T}\right) + b_h \sen\left(\frac{2\pi ht}{T}\right) \right) \quad (2.5)$$

Donde:

$a_0$  : Valor medio de la función. (componente C.C)

$h$  : Orden de la armónica

$T$  : Periodo de la función

$a_h, b_h$  : Amplitud o coeficientes de las series

La Figura 2.1 (a) muestra la onda fundamental  $f_1(t)$  con frecuencia 50 [hz] de una función  $f(t)$ , y sus armónicas  $h = 5, 7, 11$ . Donde  $f_n = b_n \sen(h\omega t)$ , con los coeficientes  $b_h = 100, 17, 12, 11$  para  $f_1, f_2, f_3, f_4$  respectivamente.

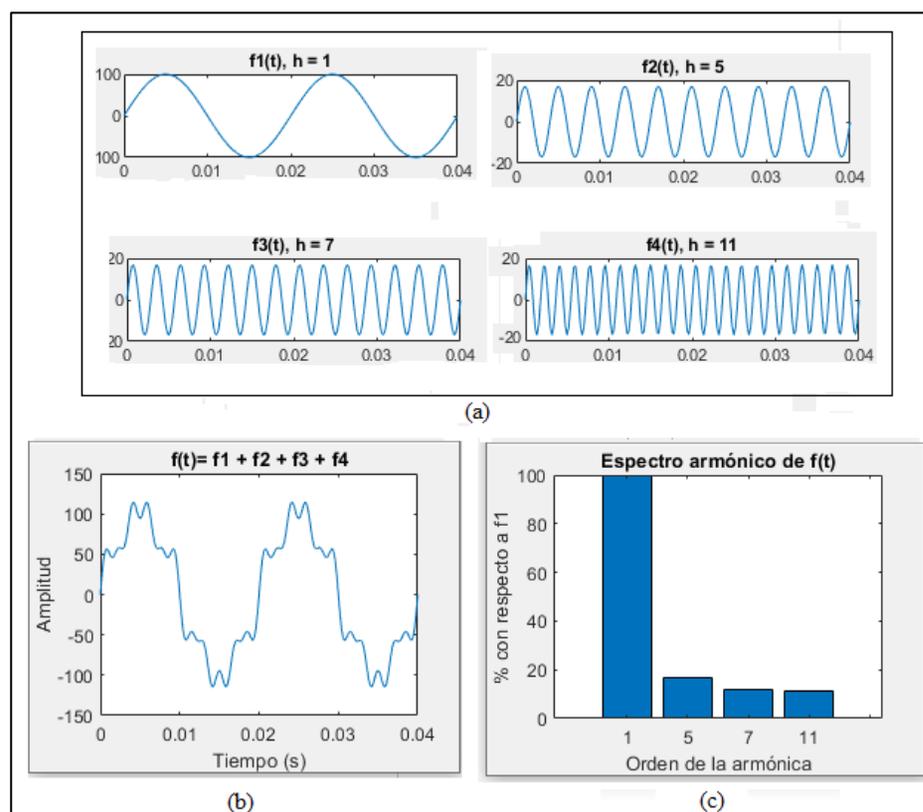


Figura 2.1. Ondas armónicas y espectro armónico de una función.

En (b) se aprecia el oscilograma resultante de sumar la fundamental con las frecuencias armónicas y en (c) se grafica el espectro armónico de  $f(t)$  en porcentajes de cada armónica con respecto a la fundamental.

### 2.1.1 Secuencia Armónica [8]

En un sistema trifásico balanceado con presencia de ondas no sinusoidales, la onda de tensión (o corriente) de orden “ $h$ ” se puede expresar como:

$$V_{ah} = \sum_{h=1}^{\infty} (V_h \text{sen}(h\omega_0 t + \theta_h)) \quad (2.6)$$

$$V_{bh} = \sum_{h=1}^{\infty} (V_h \text{sen}(h\omega_0 t - 2h\pi/(3 + \theta_h))) \quad (2.7)$$

$$V_{ch} = \sum_{h=1}^{\infty} (V_h \text{sen}(h\omega_0 t + 2h\pi/(3 + \theta_h))) \quad (2.8)$$

Donde  $\theta_h$  es el ángulo de desfase con respecto a la fundamental.

Desarrollando las ecuaciones (2.6) – (2.8) y considerando una rotación en sentido antihorario de los fasores fundamentales, obtenemos que:

$$V_a = V_1 \text{sen } \omega t + V_2 \text{sen } 2\omega t + V_3 \text{sen } 3\omega t + V_4 \text{sen } 4\omega t + V_5 \text{sen } \omega t + \dots$$

$$V_b = V_1 \text{sen}(\omega t - 120^\circ) + V_2 \text{sen}(2\omega t + 120^\circ) + V_3 \text{sen } 3\omega t + V_4 \text{sen}(4\omega t - 120^\circ) + V_5 \text{sen}(5\omega t + 120^\circ) \dots$$

$$V_c = V_1 \text{sen}(\omega t + 120^\circ) + V_2 \text{sen}(2\omega t - 120^\circ) + V_3 \text{sen } 3\omega t + V_4 \text{sen}(4\omega t + 120^\circ) + V_5 \text{sen}(5\omega t - 120^\circ) \dots$$

De lo anterior se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Los armónicos de fase  $b$  se atrasan  $h$  veces  $120^\circ$  con respecto al mismo orden de armónica en fase  $a$ .
- De igual forma, los armónicos de fase  $c$  se atrasan  $h$  veces  $240^\circ$  con respecto al mismo orden de armónica en fase  $a$ .
- todos los armónicos de orden  $3h$ , independiente de la fase, tienen ángulo de desfase cero.

Se concluye que:

- Los armónicos de orden  $3h + 1$  tienen secuencia positiva.
- Los armónicos de orden  $3h + 2$  tienen secuencia negativa.
- Armónicos de orden  $3h$  tienen secuencia cero.

La tabla 2.1 resume el patrón de secuencia armónica.

Tabla 2.1. Secuencias de armónicas

<b>h</b>	<b>Secuencia del armónico</b>
1	+
2	-
3	0
4	+
5	-
6	0
7	+
8	-
9	0
10, 11, 12	+, -, 0

Fuente: basado en [8]

### 2.1.2 Índices de distorsión armónica

La distorsión total armónica (*THD*), es uno de los índices más utilizados para describir la calidad de energía en los sistemas de potencia. Es la relación entre la suma de los componentes de cada armónica y su fundamental [9]. Se define según sea de corriente o tensión como

- i. Distorsión armónica total de corriente

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \cdot 100 \quad (2.9)$$

- ii. Distorsión armónica total de tensión

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (2.10)$$

Las expresiones de corriente y tensión total RMS están dadas por

iii. Corriente total RMS

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (2.11)$$

iv. Tensión total RMS

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \quad (2.12)$$

Otro índice fundamental en lo que respecta a calidad de energía es la distorsión de demanda total (TDD)

v. Distorsión de demanda total (TDD)

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \cdot 100 \quad (2.13)$$

A diferencia del  $THD_i$ , la distorsión de demanda total considera como referencia el parámetro  $I_L$ , el cual corresponde al promedio de los máximos valores de la componente fundamental de corriente de carga medidos en el punto común de conexión (PCC) correspondiente. Para el cálculo de este promedio se debe considerar idealmente los valores máximos mensuales de los últimos doce meses, o en su defecto los valores máximos diarios registrados durante el periodo de evaluación [10].

Según [11] el PCC de una red industrial se define como el punto o nodo donde se conectan las cargas no lineales y el resto de las cargas. En la “Norma Técnica de Calidad de Servicio Para Sistemas de Distribución” se considera el PCC de un usuario como *el punto de la red de distribución más cercano a él y donde otros usuarios se conectan a dicha red*. El punto exacto donde se realiza la medición está en función de la topología de la red de distribución y éste se puede ubicar en el lado de baja tensión, alta tensión o en el extremo de la carga.

Los límites asociados al TDD están definidos en IEEE *Standard 519-1992, Recommended Practices and requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems* [11].

### 2.1.3 Definiciones para la medición de parámetros armónicos en sistemas trifásicos desbalanceados [12]

Con el propósito de definir las expresiones adecuadas para el diseño de los instrumentos de medición en sistemas trifásicos desbalanceados en presencia de ondas no sinusoidales y lograr una descripción óptima de dichos sistemas, el estándar IEEE 1459-2010, propone las siguientes ecuaciones:

- i. Corriente efectiva equivalente total, fundamental y armónica.

$$I_e = \frac{\sqrt{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2}}{3} \quad (2.14)$$

$$I_{e1} = \frac{\sqrt{I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2 + I_{n1}^2}}{3} \quad (2.15)$$

$$I_{eH} = \sqrt{I_e^2 - I_{e1}^2} \quad (2.16)$$

Donde  $I_n$  es la corriente rms en el neutro.

- ii. Tensión efectiva equivalente total, fundamental y armónica.

$$V_e = \sqrt{\frac{1}{18} [3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2]} \quad (2.17)$$

$$V_{e1} = \sqrt{\frac{1}{18} [3(V_{a1}^2 + V_{b1}^2 + V_{c1}^2) + V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2]} \quad (2.18)$$

$$V_{eH} = \sqrt{V_e^2 - V_{e1}^2} \quad (2.19)$$

- iii. Potencia aparente equivalente total, fundamental y armónica.

$$S_e = 3V_e I_e \quad (2.20)$$

$$S_{e1} = 3V_{e1} I_{e1} \quad (2.21)$$

$$S_{eH} = 3V_{eH} I_{eH} \quad (2.22)$$

iv. Potencia no fundamental (VAR)

Se define la potencia fundamental como

$$N = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.23)$$

Donde  $P = P_1 + P_H$

v. Potencia de distorsión de corriente, de tensión y armónica (VAR)

$$D_{e1} = 3V_{e1}I_{eH} \quad (2.24)$$

$$D_{eV} = 3V_{eH}I_{e1} \quad (2.25)$$

$$D_{eH} = \sqrt{S_{eH}^2 - P_{eH}^2} \quad (2.26)$$

Se observa que la potencia de distorsión de corriente  $D_{e1}$  es producida por la corriente armónica equivalente total  $I_{eH}$  y la tensión efectiva equivalente fundamental  $V_{e1}$ , mientras que la potencia de distorsión de tensión  $D_{eV}$  es generada por la tensión armónica equivalente y la corriente efectiva fundamental.

vi. Factor de potencia

El factor de potencia en condiciones no sinusoidales se define como

$$PF = \frac{\left[1 + \left(\frac{P_H}{P_1}\right)\right] \cdot PF_1}{\sqrt{1 + THD_I^2 + THD_V^2 + (THD_I + THD_V)^2}} \quad (2.27)$$

Donde  $PF_1 = P_1/S_1 = \cos\theta_1$ .

En los casos que  $THD_V < 5\%$  y  $THD_I > 40\%$  se recomienda utilizar la expresión (2.29).

$$PF \approx \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}} \cdot PF_1 \quad (2.28)$$

En función de los parámetros equivalentes para sistemas trifásicos no balanceados en condiciones no sinusoidales se puede calcular como

$$PF = \frac{P}{S_e} \quad (2.29)$$

vii.  $THD_{eI}$  y  $THD_{eV}$

La distorsión total de corriente y tensión en función de los parámetros equivalentes están dadas por

$$THD_{eI} = \frac{I_{eH}}{I_{e1}} \quad (2.30)$$

$$THD_{eV} = \frac{V_{eH}}{V_{e1}} \quad (2.31)$$

En la tabla 2.3 se resumen y agrupan los parámetros para sistemas trifásicos no sinusoidales definidos en IEEE 1459-2010 “*Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions*” [12].

Tabla 2.2. Clasificación de parámetros para sistemas trifásicos no balanceados e condiciones no sinusoidales.

Parámetro o indicador	Potencia fundamental y no fundamental	Potencia fundamental			Potencia no fundamental	
		$S_{e1}$	$S_1^+$	$S_{U1}$	$S_{eN}$	$S_{eH}$
Aparente (VA)	$S_e$	$S_{e1}$	$S_1^+$	$S_{U1}$	$S_{eN}$	$S_{eH}$
Activa (W)	$P$		$P_1^+$		$P_H$	
No activa (VAR)	$N$		$Q_1^+$		$D_{eI}$	$D_{eV}$ $D_{eH}$
Utilización de línea	$PF = \frac{P}{S_e}$		$PF_1^+ = \frac{P_1^+}{S_1^+}$		-	
Contaminación armónica	-		-		$\frac{S_{eN}}{S_{e1}}$	
Desbalance de carga	-		$\frac{S_{U1}}{S_1^+}$		-	

Fuente: [12]

### 2.1.4 Cargas no lineales

Las cargas no lineales están en constante aumento y se estima que para el 2025 representen el 60% del total de cargas en los sistemas de distribución [6]. Los variadores de velocidad representan el porcentaje más alto de cargas no-lineales en sistemas industriales, como muestra la tabla 2.3, el convertidor utilizado está en función del tipo de motor, potencia y rango de velocidad necesitado [7].

Tabla 2.3 Tipo de convertidor para variador de velocidad, según motor y potencia.

Motor	HP	Rango de velocidad	Tipo de convertidor
Corriente continua	1-10.000	50:1	Control de fase, conmutación natural.
Jaula de ardilla	100-4.000	10:1	CSI, conmutación forzada
Jaula de ardilla	1-1.500	10:1	VSI, conmutación forzada
Rotor bobinado	50-20.000	3:1	CSI, conmutación natural
Síncrono sin escobillas	1.000-60.000	50:1	CSI, conmutación forzada
Síncrono o jaula de ardilla	1.000-60.000	50:1	Control de fase, conmutación natural

Fuente: Basado en [7]

Bajo condiciones normales e ideales de operación los armónicos generados por los convertidores de potencia son del tipo característico, es decir, su frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental. El espectro armónico y la distorsión armónica generada por estos dispositivos no solo está determinado por el tipo de convertidor, tecnología o topología implementada en este, sino que factores como la impedancia del sistema, fenómeno de resonancia y factor de carga del convertidor, pueden afectar significativamente los índices armónicos medidos en la entrada del convertidor [13] - [15].

#### 2.1.4.1 Rectificador trifásico

La figura 2.2 muestra el esquema de un puente rectificador trifásico de seis pulsos.

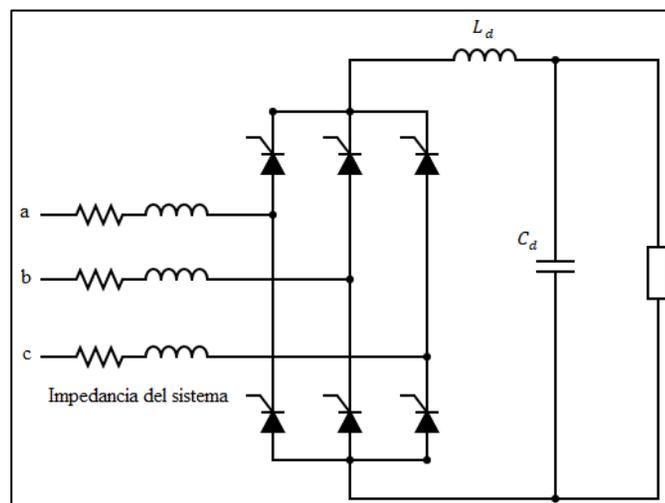


Figura 2.2. Rectificador trifásico de seis pulsos.

La forma de onda obtenida desde el análisis de Fourier de corriente en la entrada de un rectificador trifásico totalmente controlado de seis pulsos, con ángulo de disparo  $\alpha = 0$  y alimentado por un transformador en conexión delta-delta o estrella-estrella, está dada por

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left[ \cos\omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \frac{1}{17} \cos 17\omega t + \frac{1}{19} \cos 19\omega t \dots \right] \quad (2.32)$$

Para un transformador con conexión estrella-delta la forma de onda es

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left[ \cos\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t + \frac{1}{17} \cos 17\omega t - \frac{1}{19} \cos 19\omega t \dots \right] \quad (2.33)$$

El espectro y corrientes armónicas en el convertidor se pueden calcular a partir de

$$h = kq \pm 1 \quad (2.34)$$

$$q = 6m \quad (2.35)$$

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (2.36)$$

Donde:

- $h$  : Orden de la armónica.
- $q$  : Número de pulsos del circuito rectificador.
- $I_h$  : Amplitud de corriente de la armónica de orden  $h$ .
- $I_1$  : Amplitud de corriente de la fundamental.
- $k$  y  $m$  : Enteros positivos.

Estas expresiones definidas en el estándar IEEE 519-1992, considera condiciones ideales de operación, es decir, se desprecian los efectos de la inductancia en el circuito alimentador y se asumen las formas de onda de corriente perfectamente rectangulares descritas en (2.32) y (2.33).

Basado en las expresiones (2.34) - (2.36) y para  $q = 6$ , la tabla 2.4 muestra los armónicos en porcentajes con respecto a la fundamental en la entrada de un rectificador trifásico hasta la armónica  $h = 13$ .

Tabla 2.4. Armónicos en corriente para convertidor trifásico de 6 pulsos.

<b>h</b>	<b>%</b>
5	20
7	14,3
9	11,1
11	9,1
13...	7,7

### 2.1.4.2 Variador de frecuencia

Como se mencionó anteriormente, el contenido armónico generado por un VDF está en función de las características propias del diseño del dispositivo y del sistema de potencia donde este funcione, no obstante, la topología más utilizada en redes industriales corresponde al VDF de seis pulsos, tipo VSI y con control de etapa inversora mediante la técnica PWM [16]. Este tipo de VDF se puede definir genéricamente como muestra la figura 2.3.

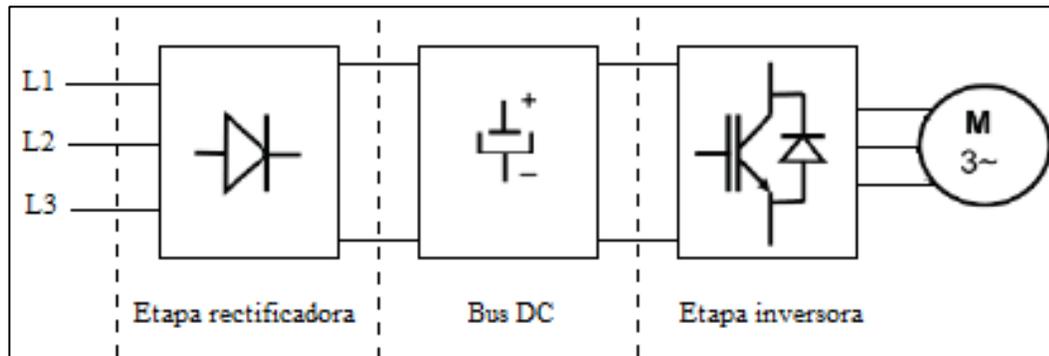


Figura 2.3. Etapas variador de frecuencia.

Los armónicos en la entrada del circuito mostrado en la figura 2.3, están dados por las expresiones (2.35) - (2.37). De estas expresiones también podemos concluir que, a mayor cantidad de pulsos, se eliminan las armónicas de menor orden.

El estudio realizado en [13] demuestra una variación considerable de la quinta armónica en función al factor de carga del VDF. Debido a que las expresiones definidas en IEEE std. 519-2014 no consideran esta variable, se propone reemplazar el porcentaje de corriente de la quinta armónica en función del factor de carga, a los valores que se indican en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Quinta armónica de corriente para VDF de seis pulsos tipo VSI en función del factor de carga

Factor de carga del VDF	% de corriente armónica para h=5
70%	25
60%	28
50%	30
40%	35
0%-25%	40

Fuente: [13]

Para un factor de carga de 100% se considera valido lo expuesto con respecto a la quinta armónica en la tabla 2.4.

En cuanto a la distorsión en la salida de la etapa inversora, los armónicos generados serán de alta frecuencia (en función a la velocidad de conmutación), cuya intensidad variará con respecto al tipo de control PWM utilizado, balance de carga y contenido armónico de la señal del bus de corriente continua. La distorsión puede ser mitigada mediante filtros o implementando inversores multinivel [17] – [19].

### 2.1.5 Resonancia armónica

El fenómeno de resonancia armónica ocurre en un sistema de potencia cuando la frecuencia de corriente de una fuente generadora de armónicos es igual a la frecuencia natural del sistema [20]. La resonancia tanto en circuitos LC serie como paralelos está en función de las reactancias capacitivas e inductivas y se produce para  $X_L = X_C$ . En un circuito paralelo a la frecuencia de resonancia la impedancia equivalente vista desde el elemento generador de armónicas será máxima, mientras que para un circuito en serie la impedancia equivalente resultante tendrá valores mínimos, como resultado las corrientes o tensiones a la frecuencia resonante (o cercanas a esta), se verán amplificadas.

El circuito mostrado en la figura 2.4 muestra en (a) el diagrama unilineal de un sistema industrial con cargas lineales, no lineales y banco de condensadores conectados en paralelo, en (b) se aprecia el sistema modelado mediante la impedancia y voltaje Thevenin vistos desde el capacitor y las cargas armónicas representadas por una fuente de corriente. La impedancia  $Z_{th}$  considera las resistencias y reactancias de las cargas lineales, transformador de distribución y red externa.

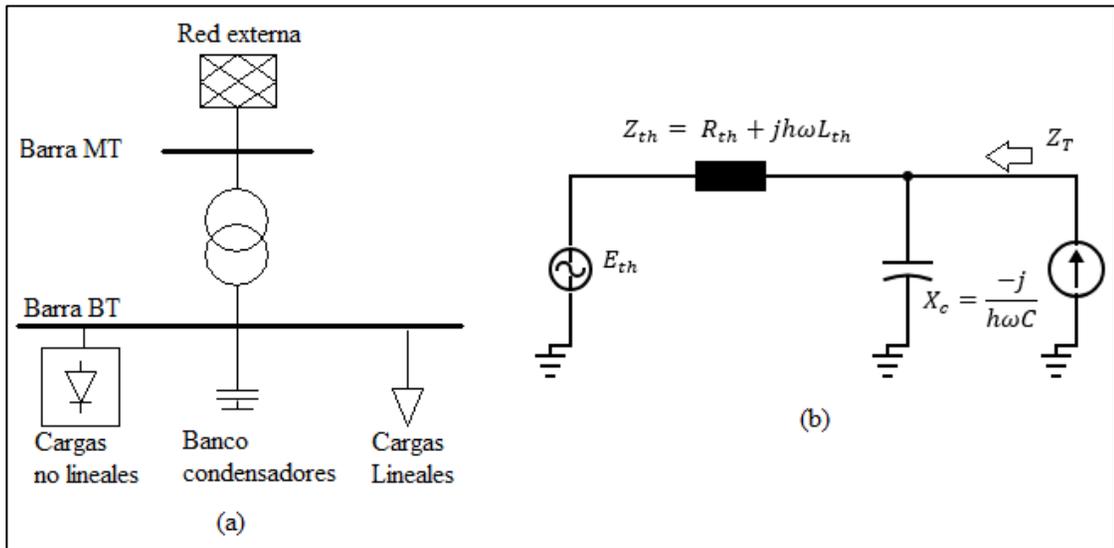


Figura 2.4. En (a) diagrama unilineal de un sistema industrial simplificado, en (b) circuito equivalente Thevenin de la red industrial visto desde el capacitor.

Del circuito mostrado en la Figura 2.3 (b), obtenemos que la impedancia equivalente total vista desde la fuente de corriente armónica es

$$Z_T = \frac{(R_{th} + jh\omega L_{th})(-j/h\omega C)}{R_{th} + jh\omega L_{th} - j/h\omega C} \quad (2.37)$$

De la expresión anterior se concluye que el circuito alcanza su impedancia máxima para  $X_L = X_C$ . Por tanto, y despreciando los efectos resistivos, la frecuencia de resonancia paralelo es

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{th}C}} \quad (2.38)$$

Y la orden de la armónica se puede calcular como

$$h_{res} = \frac{f_{res}}{f_{sistema}} \quad (2.39)$$

También podemos estimar  $h_{res}$  según se indica en [12], como función de la potencia de corto circuito del sistema y la potencia capacitiva.

$$h_{res} = \sqrt{\frac{S_{sc}}{S_{cap}}} \quad (2.40)$$

Debido a que la frecuencia de resonancia puede variar según las condiciones de operación del sistema o cambios en la potencia reactiva capacitiva de la red, consecuencia del uso de banco de condensadores automáticos y a que la amplificación de la distorsión armónica se presenta con rango variable también para frecuencias cercanas a la resonante, se recomienda realizar un estudio de la respuesta en frecuencia del sistema que permitan caracterizar la impedancia de la red en función del orden de los armónicos bajo distintas condiciones [21], [22].

### 2.1.6 Filtros pasivos de armónicas

Esencialmente los filtros pasivos consisten en combinaciones serie-paralelo de condensadores y reactancias sintonizadas a una frecuencia armónica específica [23]. En general los filtros armónicos se conectan en paralelo al nodo de conexión de una o varias cargas no lineales, ofreciendo un camino de baja impedancia a la frecuencia de sintonización y de esta forma evitando la propagación distorsiones armónicas en el sistema. También es posible conectar filtros en serie a los convertidores de potencia para impedir el flujo de armónicos desde los circuitos rectificadores hacia la red [6].

La Figura 2.5 muestra el principio de funcionamiento para filtros pasivos conectados en serie y en paralelo. En (a)  $Z_{fp}$  representa baja impedancia a la frecuencia de sintonización y en (b) la impedancia equivalente del filtro  $Z_{fs}$ , presenta magnitudes altas a la frecuencia sintonizada.

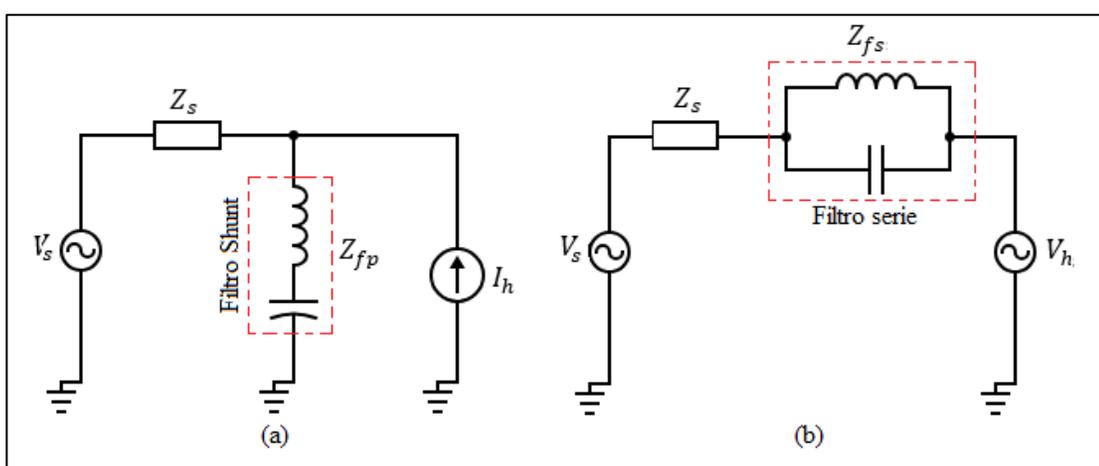


Figura 2.5. (a) filtro sintonizado simple, (b) filtro serie.

Los filtros pasivos mostrados en (a) y (b) se sintonizan para eliminar un armónico específico, en consecuencia para filtrar mas de un orden de armónica sera necesario conectar múltiples filtros en paralelo o serie según corresponda.

### 2.1.6.1 Filtros en derivación

También llamados filtros paralelos o shunt, presentan baja impedancia para una frecuencia o un rango de frecuencias determinado, se pueden clasificar en filtros sintonizados y de amortiguamiento.

En instalaciones industriales los más utilizados son el filtro sintonizado simple y el filtro pasa altas de segundo orden.

#### i. Filtros sintonizados.

La figura 2.6 muestra la configuración y comportamiento en frecuencia para los filtros sintonizados de una sintonía (a) y de doble sintonía (b).

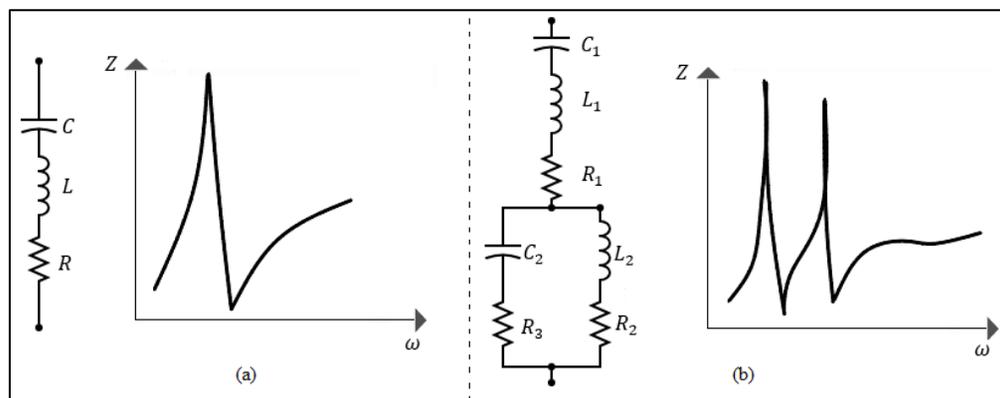


Figura 2.6. (a) filtro sintonizado simple, (b) filtro doble sintonía.

Fuente: basado en [6]

Los filtros de una sintonía se configuran para producir resonancia en serie a la frecuencia del armónico que requiere ser filtrado y así proveer un camino de baja impedancia. Este tipo de filtro además puede entregar parte de la potencia reactiva capacitiva requerida por el sistema. El circuito del filtro de doble sintonía (b) es el equivalente de conectar dos filtros sintonizados simples en paralelo, esta configuración presenta baja impedancia para dos frecuencias de sintonización.

Las desventajas de los filtros sintonizados es su vulnerabilidad a la desintonía debido a tolerancia de elementos con la temperatura o variaciones de la frecuencia fundamental y que de igual forma que los bancos de condensadores, pueden causar resonancia [24].

#### ii. Filtros de amortiguamiento

La figura 2.7 muestra los distintos tipos de filtros amortiguados; primer orden (a), segundo orden (b), tercer orden (c) y tipo C (d).

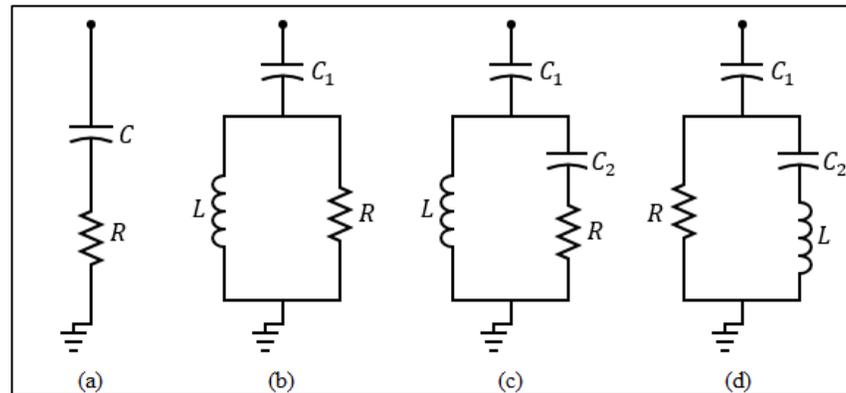


Figura 2.7. Filtros de amortiguamiento; (a) primer orden, (b) segundo orden, (c) tercer orden y (d) tipo C.

Filtros de primer orden generalmente no son utilizados debido a que presentan pérdidas excesivas a la frecuencia fundamental. [6]

Los de segundo orden (o pasa altas) son los más comunes en redes industriales, estos filtros presentan impedancia mínima para un rango de frecuencias superiores a la sintonía y alta impedancia bajo la sintonía. Son ampliamente utilizados cuando la fuente de armónicas no tiene una frecuencia fija, como podría ocurrir con cicloconvertidores y hornos de arco eléctrico [24]. La Figura 2.8 muestra la curva característica de impedancia contra frecuencia para filtros pasa altas de segundo orden y distintos valores de resistencia del filtro.

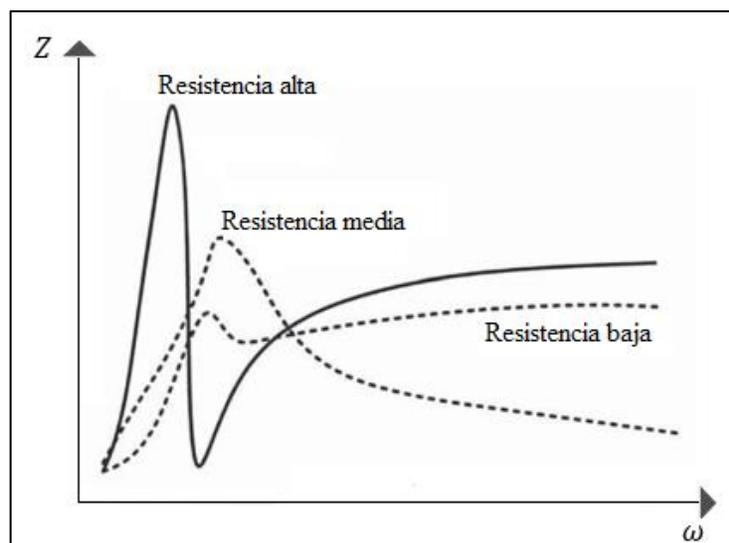


Figura 2.8. Comportamiento en frecuencia de filtro pasa altas de 2°orden.  
 Fuente: basado en [6]

El comportamiento del filtro de tercer orden es similar al de segundo orden con la ventaja de mejorar las pérdidas a la frecuencia fundamental. Esto debido al aumento de la impedancia producido por  $C_2$ .

Con relación al filtro de configuración tipo C, su principal característica es la resonancia generada por los componentes  $C_2$  y  $L$  a la frecuencia fundamental, lo que reduce al mínimo las pérdidas en la resistencia de amortiguamiento  $R$ . Estos filtros han ido paulatinamente reemplazando a los de segundo y tercer orden para el control de armónicos en sistemas HVDC [25]. La figura 2.9 muestra el comportamiento de la resistencia, impedancia y reactancia del filtro tipo C, sintonizado para  $h = 3$ .

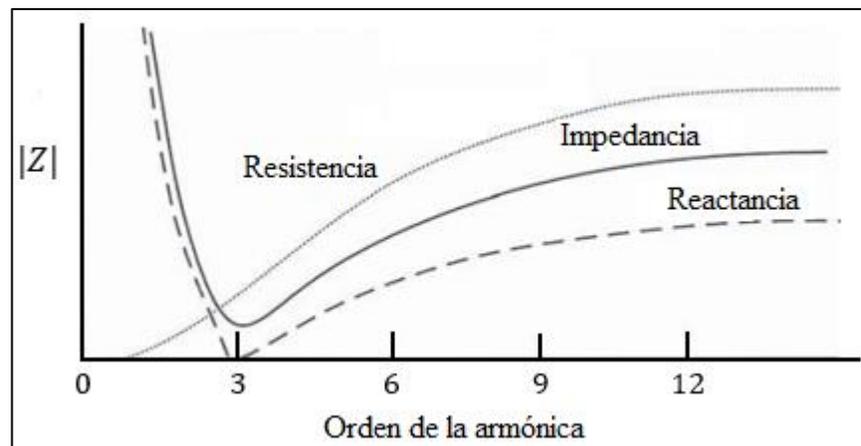


Figura 2.9. Comportamiento en frecuencia de filtro tipo C.

Fuente: basado en [6], [25].

#### 2.1.6.2 Filtros desintonizados o antirresonantes

Generalmente se utilizan para evitar la resonancia paralela producida por bancos de condensadores de compensación reactiva. Consiste en un reactor, llamado reactor desintonizado conectada en serie al capacitor. El filtro se sintoniza para una frecuencia menor a la del armónico de orden más bajo presente en el sistema [26]. El filtro está determinado por el factor de sobretensión ( $P$  %) y se calcula como

$$P = \left(\frac{f_N}{f_s}\right)^2 \times 100 \quad (2.41)$$

Donde  $f_N$  y  $f_s$  representan la frecuencia del sistema y la frecuencia de sintonía.

En función del espectro armónico de la red donde se instalen, se sintonizan a frecuencias de 134, 189, 210 o 224Hz (sistemas de 50Hz).

Cabe señalar que, si bien en general estos filtros son económicamente más asequibles en comparación a los filtros sintonizados simples, no eliminan los armónicos del sistema, sino que contribuyen a disminuir los índices de distorsión al evitar problemas de resonancia [27]. En caso de que el sistema lo requiera los filtros antirresonantes pueden ser utilizados en conjunto con otros tipos de filtros [28],[29].

### 2.1.6.3 Diseño de filtros pasivos

i. Diagrama de flujos

La figura 2.10 muestra el diagrama de flujo para el diseño de filtros pasivos.

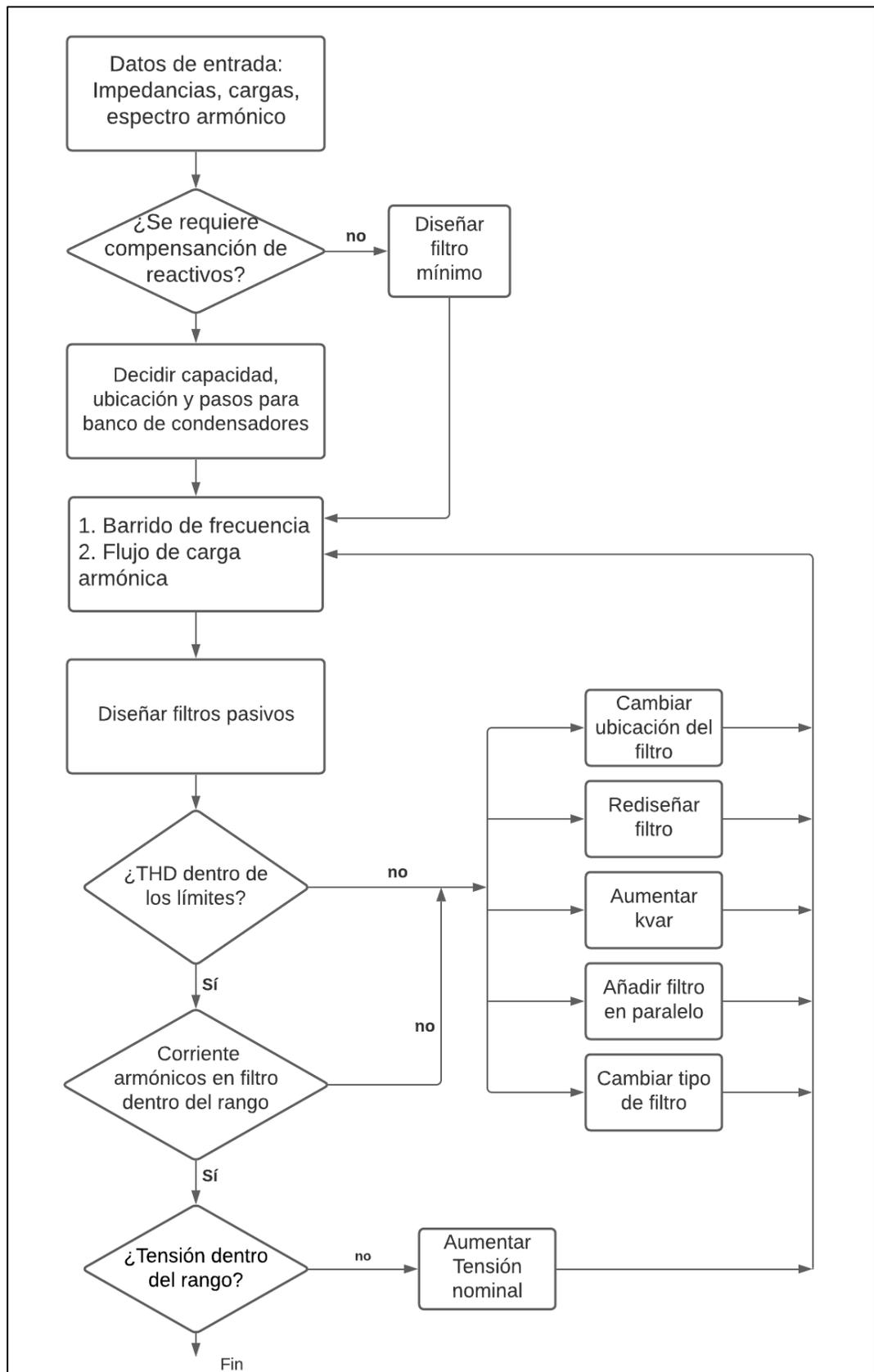


Figura 2.10. Diagrama de flujo para filtro pasivo propuesto en [6].

ii. Ecuaciones para el diseño de filtros antirresonantes.

Las expresiones (2.42) - (2.51) describen el proceso de diseño filtros antirresonantes y variables a considerar según [54]. La tabla 2.6 muestra los datos de entrada y variables a utilizar.

Tabla 2.6. parámetros para cálculo de filtro antirresonante

Datos de entrada		Variables	
Símbolo	Parámetro	Símbolo	Parámetro
$\rho\%$	Factor de sobretensión	$C$	Capacitancia
$Q_{CN}$	Potencia Reactiva nominal	$X_C$	Reactancia del condensador
$V_N$	Tensión nominal	$X_L$	Reactancia del reactor
$f_N$	Frecuencia nominal	$X_T$	Reactancia total de filtro
$V_{CN}$	Tensión nominal de capacitor	$L$	Inductancia de reactor
		$I$	Corriente en filtro
		$V_c$	Tensión capacitor corregida
		$Q_c$	Potencia reactiva C corregida
		$Q_L$	Potencia reactiva de reactor
		$Q_{RES}$	Potencia reactiva total
		$M$	Coefficiente sobrecompensación

En primera instancia se determina el factor de sobretensión  $\rho\%$  mediante la ecuación (2.41), se debe tener especial cuidado en que la frecuencia de sintonía no coincida con alguna frecuencia armónica presente en el sistema, y como se sugiere en el diagrama de la figura 2.10, realizar previamente un estudio de la respuesta en frecuencia de la red, de los equipos conectados y espectro armónico.

Luego de definir el factor de sobretensión, se calcula la tensión corregida en los condensadores como  $V_c = (V_s / (1 - \rho))$  y se decide la tensión nominal del condensador  $V_{CN}$  como el valor comercial superior más cercano a  $V_c$ . Esto debido a que el reactor en serie aumenta la tensión en el capacitor.

Se calcula la capacitancia como

$$C = \frac{Q_{cn}}{2\pi \cdot f_n \cdot V_{cn}^2} \quad (2.42)$$

Luego mediante las ecuaciones (2.43) a (2.45) se obtienen las reactancias del sistema

$$X_c = \frac{1}{2\pi \cdot f_n \cdot C} \quad (2.43)$$

$$X_l = X_c \cdot \rho \quad (2.44)$$

$$X_T = X_c - X_l \quad (2.45)$$

La inductancia en el reactor está dada por

$$L = \frac{X_l}{2\pi \cdot f_N} \quad (2.46)$$

La corriente en el filtro es

$$I = \frac{V_S}{\sqrt{3} \cdot X_T} \quad (2.47)$$

Luego se estima el efecto de la sobretensión en la potencia reactiva capacitiva mediante la ecuación

$$Q_c = 2\pi \cdot f_n \cdot C \cdot V_c^2 \quad (2.48)$$

Se debe restar la potencia reactiva inductiva del reactor en serie

$$Q_L = 3 \cdot 2\pi \cdot f_n \cdot L \cdot I^2 \quad (2.49)$$

Entonces, la potencia reactiva disponible para compensación es

$$Q_{res} = Q_c - Q_l \quad (2.50)$$

La potencia total disponible para compensación reactiva será menor a la nominal del condensador, esto por la carga inductiva que representan los reactores. En consecuencia, se deberá sobrecompensar para mantener los niveles potencia reactiva. Para dimensionar la sobrecompensación se define el factor M:

$$M = \frac{Q_c}{Q_{res}} \quad (2.51)$$

Luego la potencia nominal de la etapa de compensación será corregida por el factor  $M$  y los parámetros deberán ser calculados para la potencia nominal corregida.

### **2.1.7 Estándares y normas sobre límites de contaminación armónica en redes eléctricas**

Los estándares internacionales IEC 61000-3-6 y IEEE std-519 definen los límites de emisión armónica recomendados para cargas conectadas al sistema de distribución, estos límites son considerados en el punto de conexión común (PCC) entre el usuario y la red de distribución. Para una red industrial típica conectada mediante un transformador de uso exclusivo, el PCC corresponde al primario del transformador y para instalaciones típicamente de uso comercial u oficinas, donde se comparta el transformador de distribución con otros usuarios, el PCC corresponde al lado de BT.

El estándar IEC 61000-2-4 define basado en niveles de compatibilidad electromagnética la tensión armónica total e individual para instalaciones industriales, evaluados en un punto de conexión interno (PCI), el cual se puede referir a los terminales de entrada de un equipo en específico o un nodo donde se conecten un conjunto de estos.

Dado que existe cierta confusión al respecto, el estándar IEEE 519-2014 pone énfasis de que, en ningún caso se deben aplicar los criterios para límites de emisión armónica en evaluaciones realizadas en algún punto interno de la red industrial, puesto que suelen ser significativamente distintos a los índices en el PCC.

Así mismo, en IEC 61000-2-4 se refiere a que cumplir con lo que indica el estándar respecto a armónicos en el PCI no implica que los índices estén dentro de lo recomendado en el estándar IEC 61000-3-6 para el PCC.

#### **2.1.7.1 IEEE std-519-2014**

Los límites expuestos en las tablas 2.7 y 2.8 tienen como referencia las secciones 5.1 y 5.2 del estándar IEEE std-519-2014 [30].

i. Límites recomendados para armónicas de tensión.

Se recomienda limitar las tensiones línea-neutro en el PCC de manera que:

- El percentil 99 de los valores obtenidos mediante intervalos de 3 segundos, durante un periodo de 24 horas de medición, deben ser menor a 1.5 veces los valores dados en la tabla 2.7.
- El percentil 95 de los valores obtenidos mediante intervalos de 10 minutos, durante un periodo de 7 días de medición, deben ser menor a los valores dados en la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Límites en distorsión de tensión

Tensión en PCC	Armónicos individuales (%)	Distorsión armónica total de tensión (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1\text{kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5

Fuente: [30]

Se Observa que en MT ninguna armónica individual debe superar un 3% con respecto a la tensión nominal en el PCC y el  $THD_v$  debe ser menor a 5%. Cabe señalar que lo expuesto en la tabla 2.7 solo aplica para armónicas que sean múltiplos enteros de la fundamental.

ii. Límites recomendados para armónicas de corriente.

Los valores de distorsión en corriente en la tabla 2.8 son válidos para sistemas de entre 120[V] hasta 69[kV]. Los límites de corriente armónica están dados como porcentaje de la corriente de demanda máxima  $I_L$ . Este parámetro debe ser calculado como la suma de la corriente de demanda máxima medida en el PCC de los recientes 12 meses dividida por 12.

Tabla 2.8. Límites de distorsión de corriente para sistemas entre 120V – 69kV

Máxima distorsión de corriente en porcentaje de $I_L$						
Orden de la armónica h (armónicas impares)						
$I_{sc}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
<20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20<50	7	3,5	2,5	1,0	0,5	8
50<100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100<1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Fuente: [30]

De la tabla 2.8 se hacen las siguientes observaciones:

- Los armónicos pares están limitados a un 25% de lo establecido para armónico impares.
- La tabla 2.8 solo aplica para armónicas características.

- $I_L$  corresponde a la máxima corriente de demanda de la componente fundamental medida en el PCC en condiciones normales de operación.
- $I_{SC}$  es la corriente de cortocircuito en el PCC.

Se deben limitar las armónicas en el PCC de modo que:

- El percentil 99 de las corrientes armónicas obtenidas mediante intervalos de 3 segundos, durante un periodo de 24 horas de medición, deben ser menor a 2 veces los valores dados en la tabla 2.8.
- El percentil 99 de las corrientes armónicas obtenidas mediante intervalos de 10 minutos, durante un periodo de 7 días de medición, deben ser menor a 1.5 veces los valores dados en la tabla 2.8.
- El percentil 95 de las corrientes armónicas obtenidas mediante intervalos de 10 minutos, durante un periodo de 7 días de medición, deben ser menor a los valores dados en la tabla 2.8.

### 2.1.7.2 IEC 61000-3-6 [31]

Define los niveles recomendados de distorsión en tensión que pueden ser inyectados desde un dispositivo individual o instalación hacia la red y el criterio para planificar, diseñar redes de distribución en base a los posibles niveles de distorsión de los clientes individuales.

Los valores mostrados en la tabla 2.9 representan los límites de tensión armónica recomendados para equipos o usuarios individuales. Se basan en el principio de niveles de compatibilidad entre los niveles de distorsión y la inmunidad de los equipos conectados al sistema.

Tabla 2.9. Niveles de compatibilidad para armónicas individuales en BT y MT

Armónicas impares no múltiplos de 3		Armónicas impares múltiplos de 3		Armónicas Pares	
orden	Armónica tensión (%)	orden	Armónica tensión (%)	orden	Armónica tensión (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,4	6	0,5
13	3	21	0,3	8	0,5
$17 \leq h \leq 49$	$2.27 \cdot \frac{17}{h} - 0.27$	$21 \leq h \leq 45$	0.2	$10 \leq h \leq 50$	$0.25 \cdot \frac{10}{h} + 0.25$

Niveles de compatibilidad correspondientes para distorsión total en tensión  $THD = 8\%$

### 2.1.7.3 Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución

En la norma chilena se indican los parámetros de calidad que deben ser entregados por la empresa que suministra el servicio y los límites que deben ser cumplidos por los usuarios o clientes. Los niveles de distorsión permitidos están basados en los estándares internacionales IEEE std 519 y IEC 61000-3-6.

Las mediciones de armónicas tanto de corriente como tensión deben cumplir que: en estado normal y durante el 95% del tiempo cualquiera semana del año o siete días corridos de medición y registro, los valores eficaces de tensión o corrientes armónicas individuales, promediados en 15 minutos, deberán ser menores o iguales a los límites indicados [10]. Cabe destacar la importancia de los intervalos para los cuales el instrumento registra los parámetros armónicos; el instrumento debe ser programado para cumplir con lo descrito en la norma vigente.

- i. Artículo 3-7 Distorsión armónica en corriente para usuarios en MT.

Los límites y observaciones son idénticos a lo expuesto en la tabla 2.8.

- ii. Artículo 3-2 Distorsión armónica de tensión.

La tabla 2.10 muestra los límites de tensión armónica individual. Se observa que los límites son idénticos a lo mostrado en la tabla 2.9, a excepción de los armónicos de orden superior.

Tabla 2.10. Límites distorsión en tensión por tipo y orden de armónica.

Armónicas impares no múltiplos de 3		Armónicas impares múltiplos de 3		Armónicas Pares	
orden	Tensión armónica (%)	orden	Tensión armónica (%)	orden	Tensión Armónica (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
>25	1,5				

Nota: los índices de distorsión en tensión corresponden a los medidos en el PCC

Fuente: [10]

En el artículo 3-2 también se indica que: en estado normal y durante el 95% del tiempo de cualquier semana del año o siete días corridos de medición y registro, los valores eficaces de la tensión promediados en 15 minutos, deberán ser tales que la distorsión armónica total de tensión no supere el 8% tanto en BT como MT.

#### 2.1.7.4 IEC 61000-2-4 [55]

Esta norma define los niveles de compatibilidad electromagnética en redes industriales u otras redes no publicas aplicado al punto de conexión interno (PCI) de la instalación, con objeto de establecer los límites de emisión de perturbaciones en una red industrial y como guía para la elección de los límites de inmunidad para los equipos del sistema.

Se define nivel de compatibilidad electromagnética como el nivel especificado de perturbación electromagnética utilizado como nivel de referencia en un entorno especificado para asegurar la coordinación del establecimiento de los límites de emisión e inmunidad. Los niveles de compatibilidad de las componentes armónicas de tensión en las tablas 2.11 a 2.14 están definidos para estados estacionarios o cuasiestacionarios y vienen dados por valores de efectos a largo plazo (niveles de armónicos durante periodos de 10 minutos o más) y de muy corto plazo (niveles de 3 segundos o menos).

Como criterio para definir los niveles de compatibilidad se categorizan tres clases de entornos electromagnéticos:

- Clase 1, redes de compatibilidad inferiores, se relaciona al uso de equipo muy sensible a perturbaciones de la red (equipo de laboratorio).
- Clase 2: entorno de redes industriales en general y otras redes no públicas.
- Clase 3: tiene mayores niveles de compatibilidad y se debería considerar cuando la mayor parte de la carga se alimenta a través de convertidores, hay máquinas de soldar, grandes motores arrancando frecuentemente y variación rápida de carga.

Tabla 2.11. Niveles de compatibilidad para THD

	<b>Clase 1</b>	<b>Clase 2</b>	<b>Clase 3</b>
Tasa de distorsión armónica total (THD)	5%	8%	10%

Capítulo 2: Marco Teórico

Tabla 2.12. Niveles de compatibilidad de armónicos de tensión; órdenes impares con exclusión de los múltiplos de 3

<b>Orden h</b>	<b>Clase 1 <math>U_h</math> %</b>	<b>Clase 2 <math>U_h</math> %</b>	<b>Clase 3 <math>U_h</math> %</b>
5	3	6	8
7	3	5	7
11	3	3,5	5
13	3	3	4,5
17	2	2	4
$17 < h \leq 49$	$2,27 \times \left(\frac{17}{h}\right) - 0,27$	$2,27 \times \left(\frac{17}{h}\right) - 0,27$	$4,5 \times \left(\frac{17}{h}\right) - 0,5$

Tabla 2.13. Niveles de compatibilidad de armónicas de tensión; órdenes impares múltiplos de 3

<b>Orden h</b>	<b>Clase 1 <math>U_h</math> %</b>	<b>Clase 2 <math>U_h</math> %</b>	<b>Clase 3 <math>U_h</math> %</b>
3	3	5	6
9	1,5	1,5	2,5
15	0,3	0,4	2
21	0,2	0,2	1
$21 < h \leq 45$	0,2	0,2	1

Tabla 2.14. Niveles de compatibilidad de armónicos de tensión de orden par.

<b>Orden h</b>	<b>Clase 1 <math>U_h</math> %</b>	<b>Clase 2 <math>U_h</math> %</b>	<b>Clase 3 <math>U_h</math> %</b>
2	2	2	3
4	1	1	1,5
6	0,5	0,5	1
8	0,5	0,5	1
10	0,5	0,5	1
$21 < h \leq 45$	$0,25 \times \left(\frac{10}{h}\right) + 0,25$	$0,25 \times \left(\frac{10}{h}\right) + 0,25$	1

### 2.1.8 Efectos de los armónicos

Las corrientes y tensiones armónicas en sistemas eléctricos tienen consecuencias negativas en los componentes conectados, reduciendo la vida útil, causando pérdidas adicionales, derrateo de equipos, resonancia y mal funcionamiento de dispositivos que basan su operación en la forma de onda de tensión o cruce por cero [32]. En general para redes industriales entre estos componentes se encuentran: condensadores para compensación de reactivos, transformador de distribución, motores de inducción, interruptores, conductores de fase y neutro.

#### 2.1.8.1 Transformador de distribución

Las pérdidas en un transformador de distribución funcionando a frecuencia nominal se pueden expresar como

$$P_T = P_{NL} + P_{LL-R} \quad (2.52)$$

Donde

- $P_T$  : Pérdidas totales
- $P_{NL}$  : Pérdidas sin carga
- $P_{LL-R}$  : Pérdidas con carga a frecuencia nominal.

Las pérdidas generadas por la carga se pueden subdividir en las producidas por  $I^2R$  donde  $I$  representa la corriente *rms* y  $R$  la resistencia en los devanados, pérdidas por corrientes de Foucault en los devanados y otras pérdidas en partes estructurales o núcleo del transformador.

$$P_{LL-R} = P + P_{EC-R} + P_{OSL-R} \quad (2.53)$$

Donde

- $P_{LL-R}$  : Pérdidas con carga a frecuencia nominal
- $P$  : Pérdidas  $I^2R$
- $P_{EC-R}$  : Pérdidas por corrientes de Foucault en condiciones nominales
- $P_{OSL-R}$  : Otras pérdidas en condiciones nominales

Es evidente que las pérdidas  $P$  en condiciones no sinusoidales aumentarán según indica la ecuación (2.12) proporcionalmente al aumento en la corriente *rms* en relación a la distorsión armónica en corriente. Además, como se muestra en la expresión (2.54) para transformadores trifásicos las pérdidas  $I^2R$  se deben corregir por un factor de  $k = 1,5$ .

$$P = 1,5 \times [(I_{R-1})^2 \times R_1 + (I_{R-2})^2 \times R_2] \quad (2.54)$$

Donde

- $P$  : Pérdidas  $I^2R$   
 $I_{R-1}$  : Corriente nominal en el primario  
 $R_1$  : Resistencia medida en devanados del primario  
 $I_{R-2}$  : Corriente nominal en secundario  
 $R_2$  : Resistencia medida en devanados del secundario

Con objeto de cuantificar el impacto de los armónicos en las pérdidas por corrientes eddy y otras pérdidas, en [33] se definen respectivamente los factores  $F_{HL}$  y  $F_{HL-STR}$ .

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{hmax} h^2 I_h^2}{\sum_{h=1}^{hmax} I_h^2} \quad (2.55)$$

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{hmax} h^{0,8} I_h^2}{\sum_{h=1}^{hmax} I_h^2} \quad (2.56)$$

Finalmente, considerando las ecuaciones (2.52), (2.55) y (2.56), las pérdidas con carga en un transformador que alimenta cargas no lineales están dadas por

$$P_{LL} = P + P_{EC}F_{HL} + P_{OSL}F_{HL-STR} \quad (2.57)$$

Donde

- $P_{LL}$  : Pérdidas con cargas no lineales  
 $P$  : Pérdidas  $I^2R$   
 $P_{EC-R}$  : Pérdidas por corrientes de Foucault en los devanados  
 $F_{HL}$  : Factor armónico para pérdidas por corrientes de Foucault  
 $P_{OSL-R}$  : Otras pérdidas  
 $F_{HL-STR}$  : Factor armónico para otras pérdidas

En cuanto al derrateo del transformador, el método desarrollado en [34] nos permite estimar la corriente máxima y pérdida de capacidad en potencia aparente de un transformador de distribución que se encuentre en servicio y alimentando cargas no lineales. Se debe tener en consideración lo siguiente:

- Se tomarán en cuenta solo las pérdidas por corrientes parasitas en los devanados.
- Las pérdidas en el cobre están distribuidas uniformemente.

- En transformadores con corriente nominal menor a 1000[A], las pérdidas por corrientes eddy estarán distribuidas un 60% en el devanado interior y un 40% en el devanado exterior. Si la corriente nominal es mayor a 1000[A], esta distribución será 70% y 30% respectivamente.
- La densidad máxima de pérdidas por corrientes parásitas será de 400% del promedio de la densidad de pérdidas por corrientes eddy.

De las consideraciones anteriormente mencionadas y en valores por unidad de  $P_{EC-R}$ , tomando como base las pérdidas  $I^2R$ , se puede calcular la densidad máxima de pérdidas por corrientes eddy en los devanados de un transformador trifásico de potencia mayor a 630[kVA] y en condiciones nominales como

$$M = MaxP_{EC-R}(p.u) = \frac{2,8 P_{EC-R}}{3(I_{R-2})^2 R_2} \quad (2.58)$$

Donde

- $M$  : Máxima densidad de pérdidas por corrientes parásitas
- $P_{EC-R}$  : Pérdidas nominales por corrientes parásitas
- $R_2$  : Resistencia devanados en secundario
- $I_{R-2}$  : Corriente *rms* nominal en el secundario

Luego, la corriente máxima en valores por unidad del secundario para un transformador alimentando cargas no lineales, utilizando como base la corriente nominal del secundario, se calcula como:

$$I_{\max}(p.u) = \sqrt{\frac{1 + MaxP_{EC-R}(p.u)}{1 + F_{HL} MaxP_{EC-R}(p.u)}} \quad (2.59)$$

El parámetro  $I_{\max}$  indica la corriente máxima a fin de evitar calentamientos excesivos en los devanados del transformador [33]. En un transformador de distribución donde no se considere el impacto de los armónicos, la vida útil del mismo puede verse dramáticamente disminuida [35]

Finalmente, para encontrar la potencia aparente equivalente del transformador bajo condiciones no sinusoidales, se puede utilizar el factor RAPR (del inglés *reduction in apparent power rating*) [36]:

$$RAPR = [1 - I_{\max}(p.u)] \times 100 = \frac{S_R - S_M}{S_R} \quad (2.60)$$

Donde  $S_R$  representa la potencia aparente nominal del transformador y  $S_M$  la potencia aparente recomendada bajo condiciones no sinusoidales.

Es importante señalar que el derrateo del transformador calculado mediante las ecuaciones (2.58), (2.59), (2.60) es recomendado en situaciones donde el transformador de distribución se encuentre en servicio y no se cuente con información detallada por parte del fabricante, es decir, no debería considerarse como criterio de diseño ni cuando el fabricante entregue información detallada al respecto para un transformador en particular [34],[36].

### 2.1.8.2 Motores de inducción

Los armónicos en motores de inducción afectan la temperatura, pérdidas, vida útil y capacidad del torque, también pueden generar ruido acústico y menor eficiencia [4].

Las tensiones armónicas de secuencia negativa (ver tabla 2.1) producen flujos magnéticos en el entre hierro que giran en sentido contrario al flujo generado a frecuencia fundamental y, por tanto, contrario también al giro en el eje del motor, esto resulta en deslizamiento armónico mayor a la unidad. Los flujos magnéticos generados por armónicas de secuencia positiva giran en el mismo sentido que el flujo de frecuencia fundamental, mientras que los armónicos de secuencia cero producen un campo pulsante que no afecta las interacciones electromagnéticas estator-rotor [37].

El estudio realizado en [38] desarrolla las expresiones (2.51) y (2.52) para estimar las pérdidas por armónicas en un motor de inducción alimentado por tensiones no sinusoidales a partir de las pérdidas en condiciones nominales y las armónicas individuales de tensión.

$$\Delta W \approx 35 \sum_{h=5}^{\infty} \frac{1}{h} \left[ \frac{V_h}{V_1} \right]^2 \quad (2.61)$$

Donde

- $h$  : Orden de la armónica
- $V_h$  : Tensión rms para orden de armónica  $h$
- $V_1$  : Tensión rms a frecuencia nominal

Entonces las pérdidas armónicas adicionales a las pérdidas a frecuencia nominal se calculan como

$$P_{armónica} \approx P_{nominal} \cdot \Delta W \quad (2.62)$$

Las ecuaciones (2.51) y (2.52) representan un método práctico para la estimación de pérdidas por tensiones armónicas y su precisión fue verificada en [38] para motores de inducción jaula de ardilla de entre 15 [HP] hasta 5000 [HP].

La eficiencia en condiciones no sinusoidales es la relación entre la potencia mecánica  $P_{mi(h)}$  en watt generada por cada armónico de orden  $h$ , y la potencia de entrada  $P_{(h)}$  en watt para cada armónica de orden  $h$  :

$$\eta = \frac{\sum_{h=1}^{hmax} P_{mi(h)}}{\sum_{h=1}^{hmax} P_{(h)}} \quad (2.63)$$

El estudio realizado en [37] sugiere un modelo equivalente modificado del motor donde los parámetros estén en función de la frecuencia y aplicando el principio de superposición se calcule el impacto de cada armónica por separado.

El mismo estudio encontró que para un motor alimentado con tensiones de 20% del quinto armónico y 15% del séptimo armónico con respecto a la fundamental, no se encontraron bajas significativas en el factor de potencia del motor y la potencia del motor disminuyó hasta en 8% en baja carga y 5% a plena carga. Adicionalmente en [39] se utilizó el mismo modelo equivalente para estudiar la eficiencia para motores de distinta clase de eficiencia, concluyendo que los motores más eficientes son más sensibles a condiciones no sinusoidales.

Otro método para el cálculo de la eficiencia del motor en condiciones no sinusoidales utilizando algoritmos de optimización de forraje bacterial es desarrollado en [40] y [41]. En este trabajo que además tiene como objeto ser aplicable en condiciones industriales, se registraron bajas en la eficiencia de hasta un 7,4% y 3,4% para condiciones de carga del 25% y 100% respectivamente. Lo anterior para un motor alimentado con tensión no sinusoidal con porcentajes respecto a la fundamental del 14% para la quinta armónica y 10% para la séptima armónica.

Debido al aumento de temperatura adicional del motor bajo condiciones no sinusoidales, es necesario disminuir la potencia nominal con objeto de evitar posibles daños en el motor. En la figura 2.11 se muestra la curva de derrateo en función del factor armónico de tensión (HVF) propuesta por NEMA [42], la cual es válida bajo las siguientes suposiciones:

- El motor opera bajo condiciones nominales.
- La presencia de armónicos de orden par o múltiplos de tres es inexistente o despreciable.
- La tensión en fases esta balanceada.

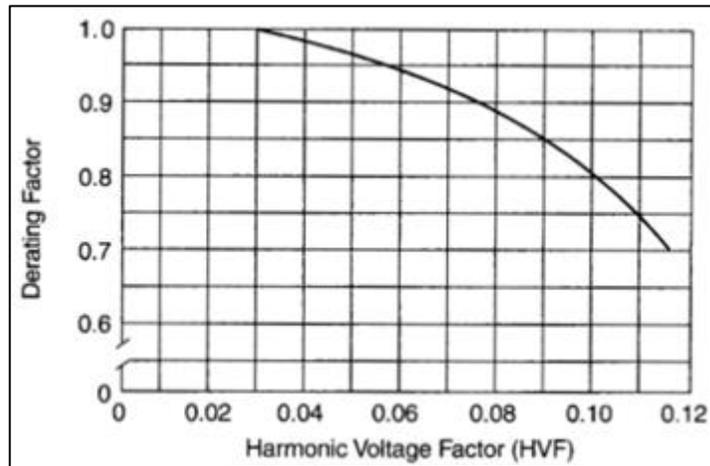


Figura 2.11. Curva de derrateo en función de HVF. Fuente: [42]

En la figura 2.11 el factor de tensión armónica (HVF) es equivalente a la distorsión armónica total  $THD_v$ , en valores por unidad. La potencia recomendada del motor disminuirá según la magnitud de la distorsión total en tensión; la potencia nominal del motor deberá ser multiplicada por el factor de derrateo, donde el producto representará la potencia recomendada.

### 2.1.8.3 Conductores y cables

Los conductores y cables que alimentan cargas no lineales presentan pérdidas adicionales causadas por el aumento en la corriente  $rms$ , efecto pelicular y de proximidad. El efecto pelicular es resultado de la FEM generada en el conductor debido al flujo de corriente alterna, la magnitud de la FEM es mayor en el centro del conductor que en la circunferencia, entonces el flujo de corriente tiende a mayor densidad en los bordes del conductor, disminuyendo así la sección transversal efectiva. El efecto de proximidad es causa de las corrientes de Foucault provocadas por la interacción de los campos electromagnéticos de conductores adyacentes, lo que genera concentración del flujo de corriente en función de la dirección del campo. Tanto el efecto pelicular como el de proximidad se intensifican a mayor frecuencia y afectan la relación  $r_{ac}/r_{dc}$  al aumentar la resistencia del conductor en corriente alterna y, por tanto, aumentan también las pérdidas por efecto Joule. Lo anteriormente mencionado lleva a pérdida de ampacidad de conductores funcionando bajo condiciones de distorsión armónica [43] [44] [45]. Un método general para calcular la pérdida de capacidad del conductor de fase o neutro en presencia de armónicos está dado por la ecuación (2.54) [46]:

$$HDF = \left( 1 + \sum_{h=2}^n \alpha_h^2 \beta_h \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.64)$$

Donde  $\alpha_h = I_h/I_1$  y el factor  $\beta_h$  representa la resistencia en corriente alterna para cada armónica normalizada con respecto a la resistencia para la frecuencia fundamental,  $\beta_h = r_{ac}(h)/r_{ac}(1)$ . Como se ha mencionado la resistencia del conductor está en función de la frecuencia y se debe calcular según se indica en [46] considerando el efecto pelicular y de proximidad.

#### 2.1.8.4 Neutro

En un sistema trifásico de cuatro hilos en presencia de cargas no lineales balanceadas, la corriente del neutro estará en función del contenido armónico en las fases [47].

La tercera armónica es la mayor contribuyente a la corriente en neutro, siendo insignificante el impacto del resto de los armónicos de secuencia cero [6].

Se puede definir el factor  $\rho_1$  como la relación entre la corriente en fase y la corriente en el neutro según [47]:

$$\rho_1 = \frac{I_N}{I_f} = \frac{\sqrt{\sum (3I_{6k+3})^2}}{\sqrt{\sum (3I_{6k+1})^2 + \sum (3I_{6k+3})^2 + \sum (3I_{6k+5})^2}} \quad (2.65)$$

Donde  $k$  representa cualquier entero desde cero y se asume que el sistema está balanceado. Se observa según la ecuación (2.55) que el factor  $\rho_1$  incrementa con el tercer armónico y disminuye al aumentar la corriente de quinta armónica y fundamental.

Según indica la normativa chilena en el Reglamento de Seguridad de Las Instalaciones de Consumo de Energía- decreto 08, pliego técnico normativo RIC N°04, en circuitos trifásicos que sirvan cargas no lineales que generen armónicas en el neutro, éste se debe dimensionar de manera tal que su sección sea a lo menos 50% mayor que la sección de los conductores de fase, excluyendo aquellas instalaciones donde existen filtros instalados directamente en las cargas no lineales [48].

#### 2.1.8.5 Relés de protección

Las ondas de corriente y tensión distorsionadas afectan en diversas formas el comportamiento de los relés de protección, se puede presentar un aumento o disminución del tiempo de operación y activación del relé a menor corriente que la corriente de *pickup*. Una excesiva componente de tercer orden puede originar operación en falso para relés de monitoreo de falla a tierra [6].

Las pruebas realizadas en [49] para relés electromecánicos de sobrecorriente mostraron que la corriente de operación disminuyó hasta en un 8,9% para corrientes con componentes de tercera, quinta y séptima armónicas en 50%, 26% y 9% de la fundamental respectivamente. En [50] los ensayos para un relé electromecánico de sobrecorriente bajo condiciones no sinusoidales, evidenciaron la disminución del tiempo de operación hasta en un 54%, el efecto se atenúa a medida que aumenta la sobrecorriente con respecto a la corriente de plena carga. Se replicaron las pruebas para un relé digital, obteniendo resultados similares.

Con respecto a relés de sobretensión, según [51] el efecto será considerable para 30% de distorsión donde los valores de operación pueden aumentar en un 5%.

Se concluye respecto a la imposibilidad de contar con un método general para la estimar el comportamiento de los relés bajo condiciones no sinusoidales, dado que éste estará en función del diseño de cada relé, además de la influencia del ángulo de desfase entre las componentes armónicas y la fundamental. Por tanto, es necesario considerar las características particulares de distorsión en tensión y corriente, para así cumplir con los criterios de fiabilidad, selectividad y velocidad de las protecciones.

### **2.1.8.6 Bancos de capacitores**

Las armónicas afectan los componentes de bancos de condensadores causando temperatura adicional, estrés dieléctrico en el aislamiento, disminución de la vida útil y fallas en condensadores o protecciones [52].

Al instalar bancos de condensadores bajo condiciones no sinusoidales se deberá tener en consideración que los parámetros no excedan los siguientes límites [53]:

- 110% de la tensión rms nominal.
- 120% de la tensión pico nominal.
- 135% de la corriente rms nominal.
- 135% de la potencia reactiva nominal.

Es importante señalar que, si bien los capacitores no generan armónicas, estos pueden amplificarlas debido al fenómeno de resonancia (ver sección 2.1.5), por lo cual los índices armónicos medidos antes de la instalación podrían cambiar.

## CAPÍTULO 3: Desarrollo

### 3.1 Antecedentes generales AndesDrip Ltda

AndesDrip Ltda es una empresa fundada en 1999 perteneciente a la industria de fabricación de plásticos, ubicada en Vía Nueve 1, Iquique, Tarapacá. La figura 3.1 muestra la ubicación de las instalaciones AndesDrip y demarcado en rojo la superficie disponible, correspondiente a un aproximado de 40.000 m<sup>2</sup>.



Figura 3.1. Ubicación y superficie AndesDrip

La imagen satelital en la figura 3.2 muestra la distribución de los distintos sectores. El perímetro demarcado en rojo es donde se encuentra la mayor actividad productiva y consumo energético, específicamente en los galpones 1 y 2, en los cuales están instaladas las doce líneas de producción.



Figura 3.2. Distribución y sectores.

Los principales productos fabricados en AndesDrip corresponden a goteros para sistema de riego, tuberías de polietileno de alta densidad (HDPE) y tuberías de PVC. Los productos elaborados tienen como clientes objetivos a la industria minera, construcción y agricultura. La tabla 3.1 presenta los productos y características disponibles.

Tabla 3.1. Productos y características fabricados en AndesDrip

<b>Tipo</b>	<b>Producto</b>	<b>Características disponibles</b>
Sistemas de riego	Gotero integrado	Diámetro exterior nominal: 16 y 20 [mm]
	Gotero Pinchado	Caudales: 1,2 – 2,0 – 3,0 [L/h].
	Gotero interlínea	Caudales: 2, 3, 4, 5 [L/h].
	Gotero autocompensado	Caudales: 2 – 4 – 8 [L/h].
HDPE	Tuberías	Según norma ISO 4427 PE 100, diámetro externo desde 20 hasta 280 [mm].
	Corrugados	Pared exterior corrugada o doble corrugado, diámetro exterior: 63 y 110 [mm].
	Fitting	Para tuberías PE 100.
Tuberías PVC	Sanitarias	Según normas NCH n° 1635 y n° 1779. Diámetro exterior desde 40 a 160 [mm].
	Hidráulicas	Clases según presión de trabajo: 4, 6 y 10. Diámetro exterior hasta 200 [mm].
	Industrial	Fabricación a pedido según presión de trabajo, diámetro hasta 323,9 [mm].
	Conduit	Fabricación en tiras de 6 [m], diámetro exterior hasta 160 [mm].
Otros	Films para invernaderos	/
	Flanges	de acero carbono y acero inoxidable.

La figura 3.3 muestra los galpones principales, en (a) el galpón N°1 donde se encuentran las líneas de producción desde la uno a la siete y el galpón N°2 donde están instaladas las líneas ocho hasta la doce.

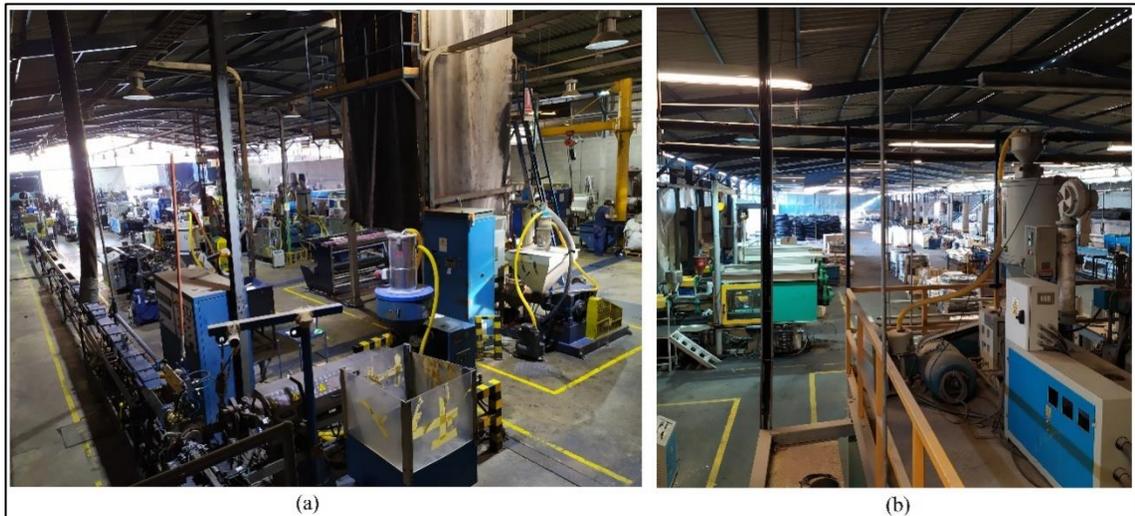


Figura 3.3. Galpones principales AndesDrip.

El proceso para la fabricación de tuberías sea HDPE o PVC, en aspectos generales es similar: comienza con el vertido de pellet de material desde la mezcladora hacia la tolva de una máquina extrusora, posteriormente el material fluye a través del barril de extrusión mientras mediante resistencias tipo abrazaderas se calienta el polímero hasta fundirlo y luego expulsarlo desde la boquilla con la presión necesaria para adherirse al molde que le dará la forma final. La etapa de molde debe repetirse para las tuberías doble corrugadas. Una vez adquirida la forma la tubería pasa por el sistema de enfriamiento para lograr solidez, finalmente para tuberías PVC se realiza un corte en la longitud necesitada. En el caso de las tuberías HDPE deben pasar por una etapa de perforado y finalmente a la máquina bobinadora para posterior almacenaje o distribución. Cabe señalar que el proceso y sus variables en los parámetros del motor (conectado a variador de velocidad), presión y temperatura, son controlados mediante PLC. proceso descrito anteriormente se grafica en la figura 3.4

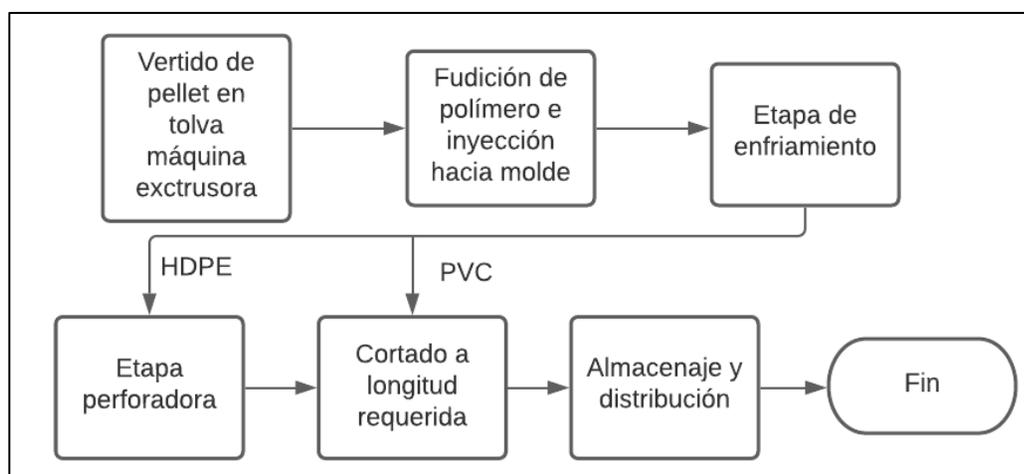


Figura 3.4. Resumen proceso productivo para tuberías HDPE y PVC.

### Capítulo 3: Desarrollo

En cuanto al consumo energético de AndesDrip, durante el periodo comprendido entre marzo 2019 y febrero 2020 se consumió un total de 2.216.169 [kWh]. Lo que equivale a un costo de \$169.531.475. En la tabla 3.2 se muestra el consumo desglosado por mes para energía activa y reactiva obtenidos desde las facturas de CGE. Además, se realiza el cálculo indirecto del factor de potencia mediante la expresión  $FP = \cos\left(\text{tg}^{-1}\left(\frac{Q}{E}\right)\right)$ . Se observa que no se obtuvieron sanciones por bajo factor de potencia durante el periodo evaluado.

Tabla 3.2. Consumo energético y factor de potencia.

Período	E [kWh]	Q [kVARh]	F.P indirecto
01/MAR/19 - 31/MAR/19	250702,8	73092,3	0,960
01/ABR/19 - 30/ABR/19	213435,6	64434,0	0,957
01/MAY/19 - 31/MAY/19	167417,1	60109,8	0,941
01/JUN/19 - 30/JUN/19	177599,7	62054,4	0,944
01/JUL/19 - 31/AGO/19	160559,4	57454,2	0,942
01/AGO/19 - 31/AGO/19	160671,0	58959,0	0,939
01/SEP/19 - 30/SEP/19	188604,4	71851,2	0,934
01/OCT/19 - 31/OCT/19	159171,1	56711,4	0,942
01/NOV/19 - 30/NOV/19	133486,8	48425,4	0,940
01/DIC/19 - 31/DIC/19	154666,5	57087,2	0,938
01/ENE/2020 - 31/ENE/2020	237944,3	95117,0	0,929
01/FEB/2020 - 29/FEB/2020	211911,0	65619,5	0,955
<b>Media</b>	184680,8	64243,0	0,943
<b>Total</b>	2216169,7	770915,4	

Es relevante mencionar que desde marzo de 2019 AndesDrip se rige bajo el sistema de cliente libre o no regulado. Según lo permite la ley 20.805, la cual indica que clientes con potencia conectada desde 500 hasta 5000 [kW] pueden optar por el sistema tarifario no regulado, dándole mayor poder de negociación a los clientes y por tanto acceso a menor costo de energía.

La tabla 3.3 muestra que durante el periodo marzo 2019 – febrero 2020 se obtuvo un ahorro total de 35.088.335\$ en comparación al sistema tarifario anterior (AT 4.3). Cabe mencionar que el monto mostrado en régimen de cliente no regulado incluye costos asociados de transporte de energía y comisión de Atría Energía (empresa generadora y comercializadora) de un 18% sobre el ahorro mensual.

Tabla 3.3. Ahorro total y promedio durante el período de evaluación

<b>Período</b>	<b>Cliente libre</b>	<b>Cliente Regulado AT 4.3</b>	<b>Ahorro</b>
01/MAR/19 - 31/MAR/19	\$16.260.730	\$20.207.902	\$3.947.173
01/ABR/19 - 30/ABR/19	\$14.857.614	\$18.760.288	\$3.902.674
01/MAY/19 - 31/MAY/19	\$12.764.684	\$15.442.001	\$2.677.317
01/JUN/19 - 30/JUN/19	\$13.209.789	\$15.880.474	\$2.670.685
01/JUL/19 - 31/AGO/19	\$12.621.744	\$14.980.501	\$2.358.757
01/AGO/19 - 31/AGO/19	\$12.738.111	\$14.878.577	\$2.140.466
01/SEP/19 - 30/SEP/19	\$15.276.619	\$20.947.457	\$5.670.838
01/OCT/19 - 31/OCT/19	\$13.118.108	\$15.508.656	\$2.390.548
01/NOV/19 - 30/NOV/19	\$11.818.167	\$13.586.957	\$1.768.790
01/DIC/19 - 31/DIC/19	\$11.818.286	\$13.612.049	\$1.793.763
01/ENE/2020-31/ENE/2020	\$18.168.427	\$21.380.704	\$3.212.277
01/FEB/2020 - 29/FEB/2020	\$16.879.196	\$19.434.244	\$2.555.048
<b>Media</b>	\$14.127.623	\$17.051.651	\$2.924.028
<b>Total</b>	\$169.531.475	\$204.619.810	\$35.088.335

Con respecto al contrato entre AndesDrip y Atría Energía en relación a cargos por energía reactiva y condiciones técnicas de consumo, es pertinente destacar lo siguiente:

- Condiciones técnicas del consumo: Las plantas del cliente deberán cumplir con todas y cada una de las exigencias que establece la normativa eléctrica, siendo el cliente responsable de su debido cumplimiento.
- Cargos por energía reactiva: Será transferidos íntegramente al cliente aquellos cargos por energía reactiva que estén asociados a retiros de energía o potencia asociados al suministro, o de acuerdo con el procedimiento que establezca el coordinador o autoridad respectiva.

Es decir, con respecto a los índices de contaminación armónica y factor de potencia se debe cumplir y se aplicaran las sanciones que indican las normas, leyes y reglamentos actuales o sus modificaciones a futuro. Los límites de distorsión para tensión y corrientes armónicas deben cumplir los parámetros indicados en la “Norma Técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución” (ver sección 2.1.7). Las sanciones por bajo factor de potencia especificadas en el Decreto 12T/2018, Numeral 5.2. se establecen en 1% de la factura mensual por cada 0,01 bajo 0,93.

### 3.2 Red Eléctrica AndesDrip

AndesDrip se conecta a la red de distribución en MT a través un transformador propio y de exclusivo uso de la empresa de 750 [kVAR] 13.200/400/231 [V]. Si bien la potencia instalada excede a la del transformador (ver figura 3.5), las particularidades del proceso productivo implican el funcionamiento en conjunto de solo algunas líneas de producción, no superando según el período registrado los 551,17[kVA]. La tabla 3.4 muestra las características del transformador de distribución obtenidas desde la placa de datos.

Tabla 3.4. Parámetros transformador AndesDrip.

Tipo de transformador	Trifásico de ventilación natural (OA)
Fabricante	Schaffner S.A
Potencia nominal	750 [kVA]
Frecuencia nominal	50 [Hz]
Año Fabricación	2001
Elevación de temperatura	65 °C
Conexión	DY1
BIL (nivel básico de aislamiento)	110 kV
Tensión nominal primario	13.200 [V]
Tensión nominal secundario 3Ø	400 [V]
Tensión nominal secundario 1Ø	231 [V]
Corriente nominal primario	32.8 [A]
Corriente nominal secundario	1083 [A]
Pérdidas de corto circuito	10.11 [kW]
Perdidas en vacío	1,33[kW]
Tensión de corto circuito	6,36 %
Resistencia de corriente continua en primario	4,708 [Ω]
Resistencia de corriente continua en secundario	1,06 [mΩ]

Nota: la información no disponible en la placa de datos se calculó mediante fórmulas empíricas.

Según información entregada por jefatura del área eléctrica de AndesDrip la potencia total instalada en la red es de 1300[kW]. La figura 3.5 muestra la distribución de potencia en las doce líneas de producción y en otros equipos o cargas relevantes.

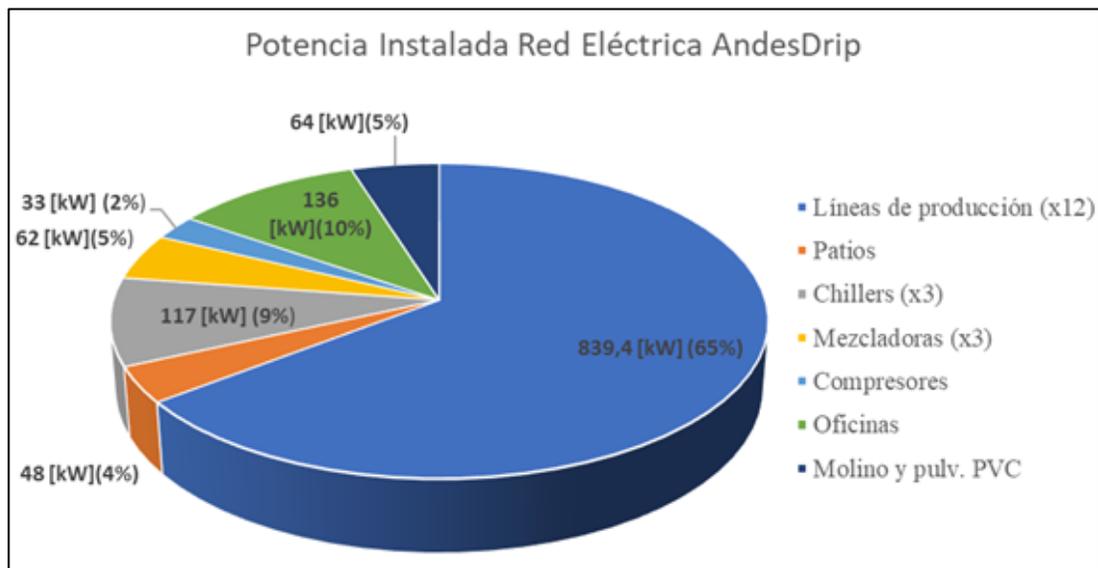


Figura 3.5. Potencia instalada AndesDrip  
Fuente: Basado en información de jefatura eléctrica

Se observa en la figura 3.5 que 839,4 [kW] correspondiente al 65% del consumo se concentra en las líneas de producción. La potencia mostrada para los patios y oficina incluye los sistemas de luminarias.

En las líneas de producción está instalado el mayor porcentaje de cargas no lineales, correspondientes a variadores de velocidad. La tabla 3.5 muestra los principales equipos para control de motores instalados según línea de producción.

Tabla 3.5. Motores y controladores de velocidad

Línea	Motores		Control de motor
	Potencia [kW]	Tipo	
1	60	C.C	Rectificador Siemnes SIMOREG
2	60	C.C	Controlador Allen-Bradley Powerflex DC
3	65	C.C	Convertidor de potencia ABB DCS 400
4	75	C.A	VDF MicroMaster 400
5	140	C.C	Emerson Mentor II DC Drive
6	55 y 90	C.C	Sin información
7	55	C.A	VDF Eaton SVX9000
8	37	C.C	Convertidor de potencia Siemens SIMOREG
9	90	C.C	Convertidor de potencia ABB DCS 400
10	11 × 2	C.A	Sin información
11	30 y 22 × 2	C.A	Sin infomación
12	55	C.A	VDF schneider altivar 71

Para la compensación de energía reactiva AndesDrip cuenta con un banco de condensadores automático de 12 etapas y 355[kVAR], controlado desde el sistema regulador Cicutor *Computer SMART III*.

En la tabla 3.6 se muestran la potencia reactiva nominal por etapa de compensación en contraste con la potencia reactiva real registrada.

Tabla 3.6. Potencia del banco de condensadores por etapa

<b>Etapas</b>	<b>Potencia nominal [kv]</b>	<b>Potencia medida [Kvar]</b>
1	25	23,6
2	25	20,4
3	25	26,8
4	25	24,8
5	25	18
6	25	18
7	30	28
8	30	24,8
9	35	43,6
10	35	37,2
11	35	40,4
12	40	44,4
<b>Total</b>	<b>355</b>	<b>350</b>

Nota: las potencias reactivas reales fueron medidas desde el instrumento regulador.

Nota2: La potencia máxima con respecto a la nominal no supera el 135% (ver sección 2.1.8.6)

Es preciso señalar que las etapas de compensación no cuentan con filtros antirresonantes, a pesar de que un estudio de EE realizado en 2011 recomendaba su implementación dada la alta presencia de cargas no lineales. El estudio mencionado es el único que se tiene registro en la empresa. Del informe de EE AndesDrip 2011 se destacan los siguientes antecedentes:

- Se diseñó un banco de condensadores de mayor potencia debido a que la empresa presentaba multas por bajo F.P.
- La distorsión armónica del transformador en el lado de baja tensión presentó niveles máximos de 11,9% para  $THD_i$  y 4,17% para  $THD_v$ , los índices medios fueron 9,5% y 2,75% respectivamente.
- Como medidas de EE se sugirió el cambio de ballast magnéticos por electrónicos, instalación de luminaria HPL y aislación térmica en cabezales de líneas de producción.

### 3.3 Mediciones de Campo

Las mediciones de parámetros generales y calidad de energía se hicieron principalmente mediante el analizador de redes *Circutor CIR-e plus*. La conexión fue realizada en el lado de BT del transformador con intervalos entre registros de 10 minutos. También se realizaron pruebas adicionales a través del regulador *Computer SMART III* para determinar el impacto de las etapas de compensación reactiva en los índices de distorsión armónica.

#### 3.3.1 Instrumento de medición y conexión

En las secciones siguientes se indican las características del instrumento analizador de redes y diagramas de la conexión realizada.

##### 3.3.1.1 Analizador de Redes Circutor CIR-e+ [16]

La Tabla 3.7 muestra los parámetros de interés medidos y registrados por el analizador. Se observa que cumple lo estipulado en la norma respecto al orden armónico que es capaz de registrar ( $h = 50$ ). La precisión del instrumento se muestra en la Tabla 3.8.

Tabla 3.7. Parámetros medidos y registrados por analizador de redes Cir-e+

Parámetro	L1	L2	L3	III	Máx/Mín
Tensión fase-neutro	X	X	X		X
Tensión fase-f	X	X	X		X
Corriente	X	X	X	X	X
Frecuencia	X				X
Potencia activa consumida	X	X	X	X	X
P. reactiva (inductiva y capacitiva) consumida	X	X	X	X	X
Potencia aparente	X	X	X	X	X
Factor de potencia	X	X	X	X	X
Cos (phi)	X	X	X	X	X
Espectro armónico en tensión (h=50)	X	X	X		
Espectro armónico en corriente (h=50)	X	X	X		
$THD_I$	X	X	X		X
$THD_V$	X	X	X		X
Componente fundamental $V$	X	X	X		
Componente Fundamenta $I$	X	X	X		

Nota: el indicador "III" hace referencia a la suma o promedio (según parámetro) de L1, L2 y L3

Tabla 3.8. Precisión analizador de redes *Cir-e+*.

Parámetro	Precisión
Tensión	0,5%
Corriente	0,5%
Potencia	1%
Energía	1%

El equipo realiza 128 muestras por ciclo de tensión y corriente en verdadero valor eficaz. De las muestras tomadas y para el período de medición programado, el analizador ejecuta el cálculo de la media aritmética y además registra los valores máximos y mínimos. El instrumento *Cir-e+* cuenta con cuatro entradas para sensores de tensión y tres para pinzas de corriente. La lectura de datos es almacenada en memoria SD extraíble para posterior análisis mediante el software compatible *POWERVISION*.

### 3.3.1.2 Conexión CIR-e+

Primeramente, se programó el equipo para registrar datos cada 10 minutos, luego de elegir el rango adecuado para las pinzas de corriente (de 50 a 2000 [A]), se procedió a conectar el dispositivo siguiendo el esquema presentado en la Figura 3.6 entregado por el fabricante.

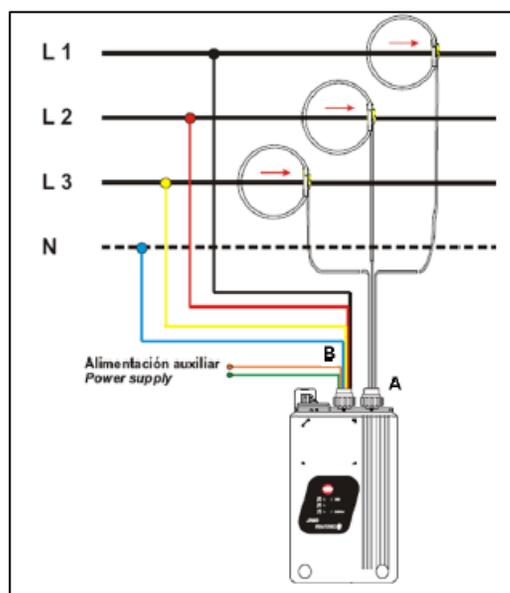


Figura 3.6 Esquema *Cir-e+* para conexión de sensores de tensión y corriente  
Fuente: [56]

El instrumento fue adherido de manera segura a una de las paredes de la sala eléctrica mediante el imán de fijación incorporado en la base de la carcasa, para luego conectar los sensores de corriente y tensión.

Como se mencionó anteriormente el analizador de redes fue conectado en el lado de baja tensión del transformador, en la figura 3.7 (a) se aprecian las pinzas de corriente conectadas aguas arriba del interruptor principal y en (b) los sensores de tensión conectados al barraje de distribución principal. El instrumento registró los datos ininterrumpidamente durante un periodo de siete días.

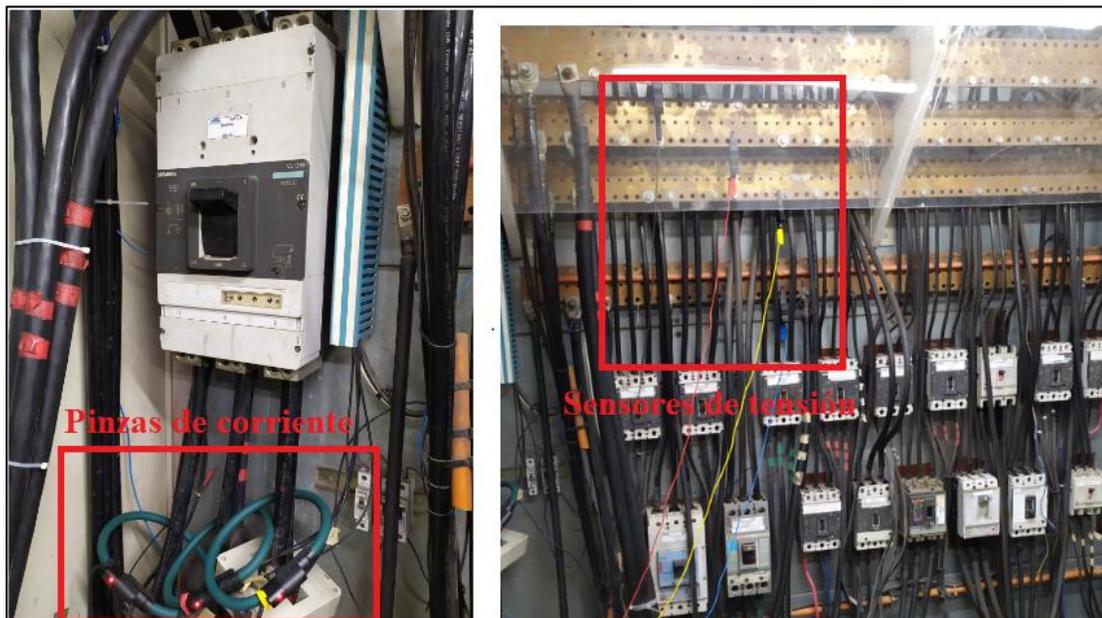


Figura 3.7 (a) conexión pinzas de corriente, (b) conexión sensores de tensión.

### 3.3.2 Resultados y análisis de las mediciones

En las secciones siguientes se exponen los resultados y análisis de las medidas para los parámetros de potencia aparente, factor de potencia,  $\cos(\varphi)$ , índices y espectros armónicos.

Las gráficas y gestión de datos obtenidos desde el analizador de redes se realizaron mediante el software *POWERSVISION PLUS 1.6.5*.

#### 3.3.2.1 Potencia aparente.

La gráfica en la Figura 3.8 muestra la potencia aparente máxima, mínima y promedio correspondientes al periodo de siete días de medición. La máxima alcanzada fue de  $551,17[kVA]$  lo que corresponde a un 73,5% de la capacidad nominal del transformador. La baja notable en potencia registrada el día 8 de marzo es debido a que se detuvieron los procesos de producción, sin embargo, esto no es lo habitual. La media aritmética durante el periodo de medición sin considerar el día 8, fue de  $298,9 [kVA]$ .

Lo anterior sugiere que el transformador de distribución trabaja a potencias mucho más bajas que la nominal, no obstante, aún no se ha considerado el efecto de los armónicos.

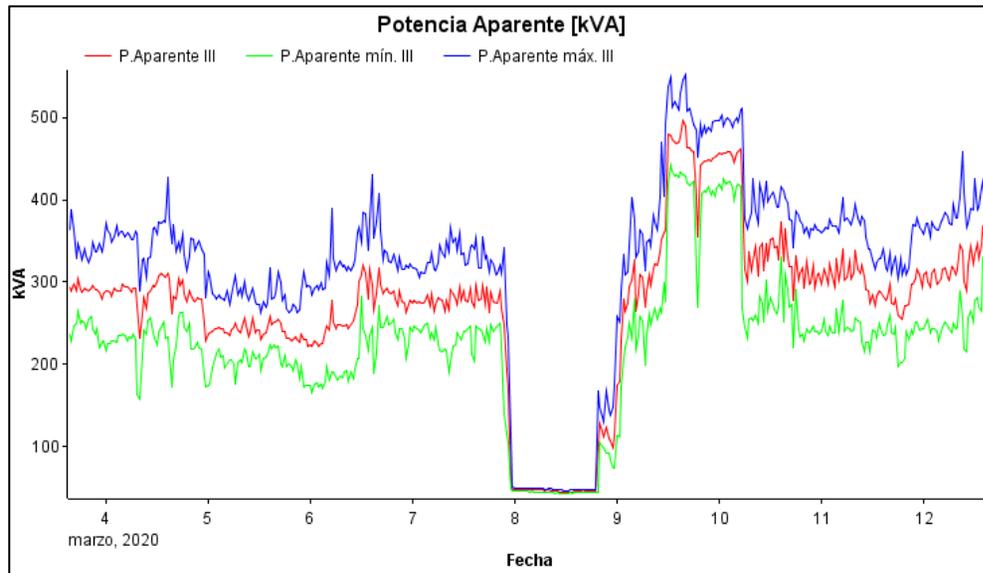


Figura 3.8. Potencia aparente máxima, mínima y promedio.

### 3.3.2.2 Factor de potencia y $\cos(\varphi)$

La ecuación (2.28) nos indica que el factor de potencia en una red con presencia de armónicos variará con respecto a la potencia armónica, la distorsión total ( $THD_i$  y  $THD_v$ ) y la relación entre la potencia activa y potencia aparente generadas por corrientes y tensiones a frecuencia fundamental (ver sección 2.1.3). Solo en una red donde la distorsión armónica sea nula los parámetros de factor de potencia y  $\cos(\varphi)$  tendrán igual magnitud, en caso contrario, mientras más altos sean los índices armónicos menor será el factor de potencia con respecto a  $\cos(\varphi)$ .

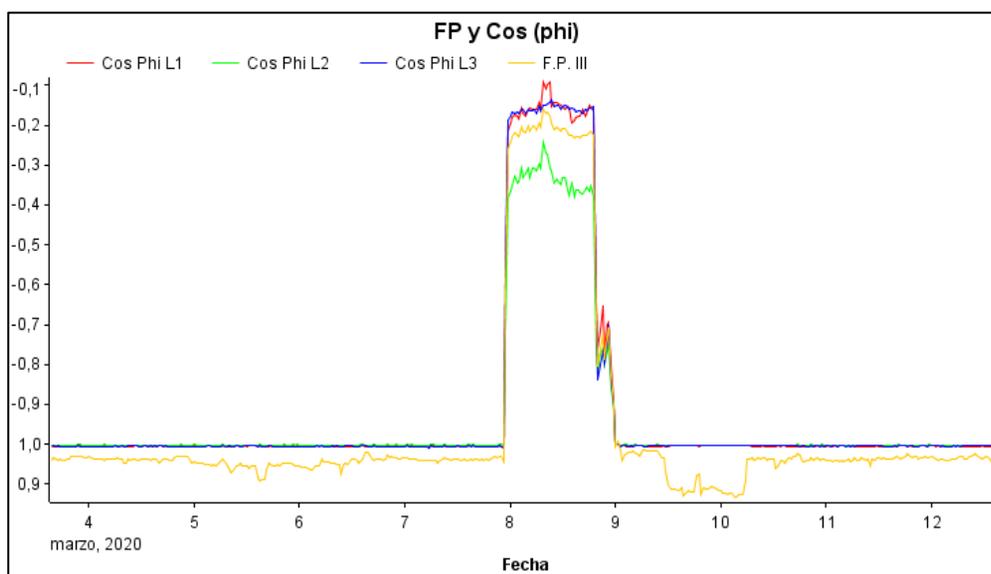


Figura 3.9. Contraste FP y  $\cos(\varphi)$ .

La figura 3.9 muestra la evidente influencia de los armónicos en el factor de potencia. El FP promedio (sin considerar el día 8) fue de 0,953, mientras que el  $\cos(\phi)$  tiende a la unidad, por tanto, se está compensando la totalidad de la potencia reactiva inductiva fundamental. La diferencia máxima registrada entre factor de potencia y  $\cos(\phi)$  fue de 0,133 el promedio de la diferencia de 0,042. La tabla 3.9 muestra el contraste entra las medidas de FP y  $\cos(\phi)$  considerando el total de los valores promedio y mínimos.

Tabla 3.9. Comparación FP y  $\cos(\phi)$

Parámetro	Promedio	Diferencia ( $FP - \cos(\phi)$ )
FP min	0,917	0.043
$\cos(\phi)$ min	0,960	
FP III	0,995	0,042
$\cos(\phi)$ III	0,953	

Nota: No se considera el día 8 de marzo

El gráfico presentado en la figura 3.9 también muestra que existe sobrecompensación de potencia capacitiva para período comprendido entre el día 8 y 9 de marzo, esto fue debido a dos factores; para el periodo mencionado se detuvo la producción (ver figura 3.8) y que adicional al banco de condensadores de 355 [kVAR], la empresa instaló 70 [kVar] extra de potencia reactiva capacitiva de manera permanente. Cabe señalar que según la norma chilena el límite para un factor de potencia capacitivo es de 0.95.

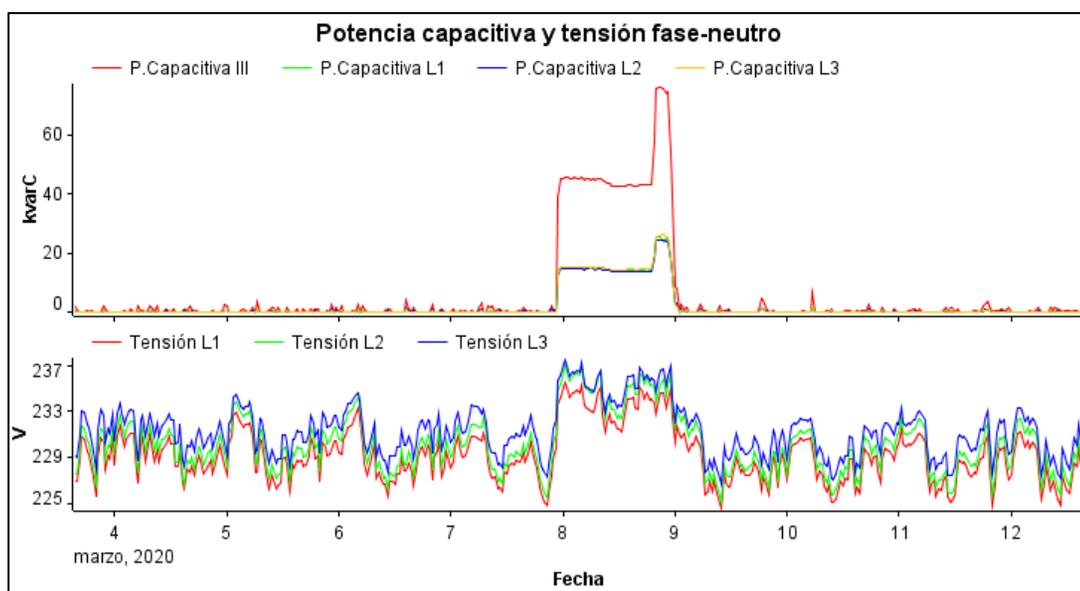


Figura 3.10. Potencia capacitiva y tensión por fases.

La gráfica superior en la figura 3.10 muestra la potencia reactiva capacitiva generada y en el oscilograma inferior la tensión fase-neutro, se observa que durante el período de sobrecompensación la tensión aumentó en un 7,55% del valor nominal.

### 3.3.2.3 Armónicos en corriente

i. Índice de distorsión armónica total en corriente

La gráfica en figura 3.11 expone los resultados de la distorsión total de corriente promedio medidas aguas arriba del interruptor general y considerando hasta la armónica  $h = 50$ . Se observa que el  $THD_i$  alcanzó un máximo promedio de 49,6%, coincidente con el período de mayor carga registrado (ver figura 3.8). El promedio de los valores fue de 28,1%.

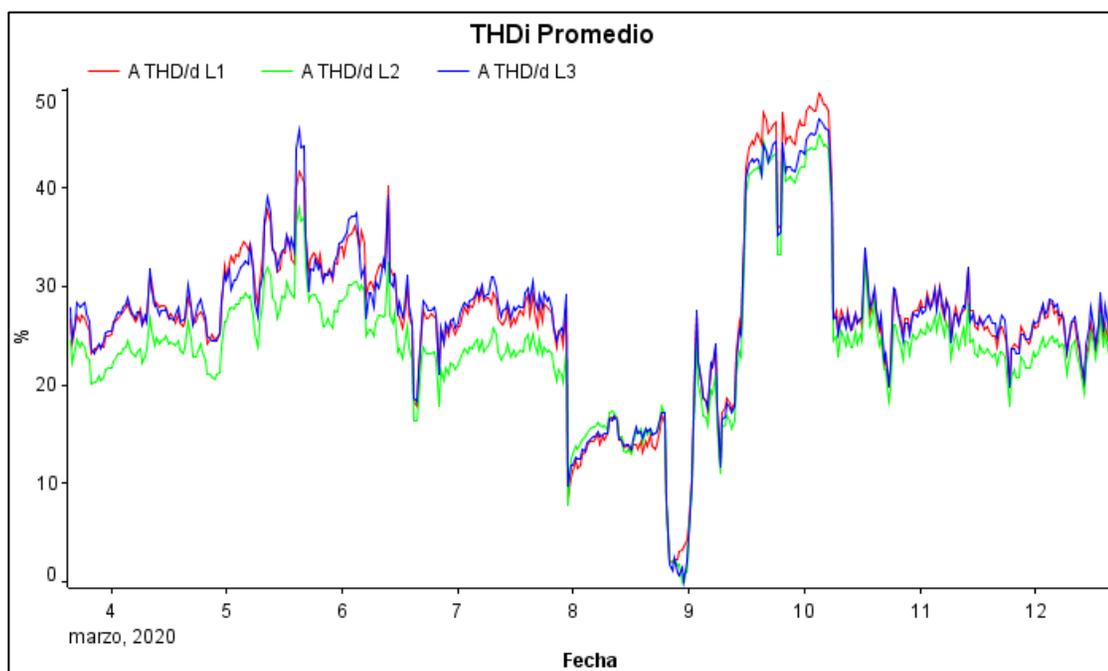


Figura 3.11.  $THD_i$  promedio para cada fase.

Se hacen las siguientes observaciones:

- Estos registros implican un aumento del 316,8% con respecto a los medidos en 2011.
- Desde el estudio mencionado los cambios en las cargas no lineales en la planta incluyen solo la instalación de la línea doce, no obstante, esta no entró en servicio en ningún momento del periodo evaluado.
- En el mejor de los casos, considerando la relación  $r_{ac}(h)/r_{ac}(1) = 1$ , en la ecuación 2.65, la pérdida de capacidad para el conductor si  $THD_i = 49,6\%$  es del 5,3%.

- Según la definición de PCC estudiada en la sección 2.1.7, en este caso no es correcto basarse en la distorsión en corriente para evaluar el TDD según la norma chilena.

La corriente rms total medida considera la sumatoria de todas las componentes armónicas y la corriente a frecuencia fundamental (expresión 2.12), por tanto, las pérdidas por efecto joule del sistema aumentarían en cuanto mayor sea la perturbación armónica en corriente.

La figura 3.12 muestra el contraste entre las corrientes rms y fundamental, el excedente promedio de corriente rms producida por armónicos fue de 18,2 [A]. Como es de esperar la diferencia entre los parámetros alcanza su máximo (73,74 [A]) durante el periodo de mayor  $THD_i$ .

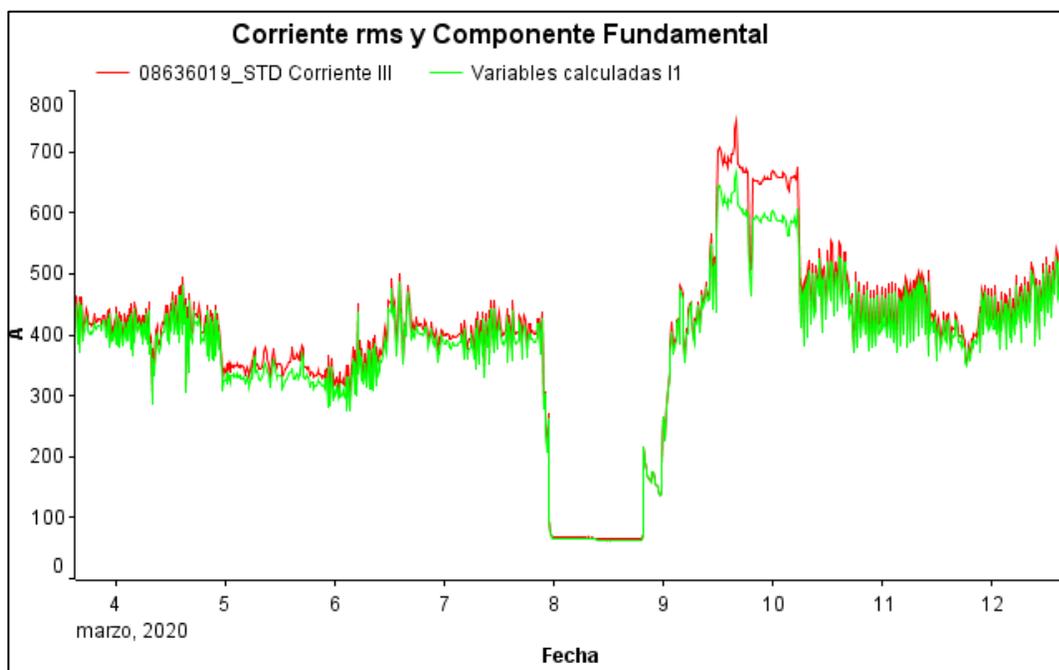


Figura 3.12. Contraste entre  $I_{rms}$  (en rojo) y  $I_1$  (en verde)

ii. Componentes armónicas en corriente

Como muestra la figura 3.13 el orden de las armónicas en corriente presentes son la 5<sup>o</sup>, 7<sup>o</sup>, 9<sup>o</sup> y 11<sup>o</sup>. Se omite el resto de las componentes, dado que la magnitud en porcentaje de la corriente fundamental es despreciable o nulo.

El orden y magnitud de las armónicas es similar al de rectificadores trifásicos de seis pulsos en la tabla (2.5), lo que indica que posiblemente sean generados por los dispositivos de control de velocidad de motores instalados (ver tabla 3.6).

Existe una clara predominancia del armónico de quinto orden con un abrupto aumento de magnitud durante el periodo de alta carga, mientras que el resto de las componentes mantiene un comportamiento estable. Esto nos podría dar indicios de una posible condición de resonancia.

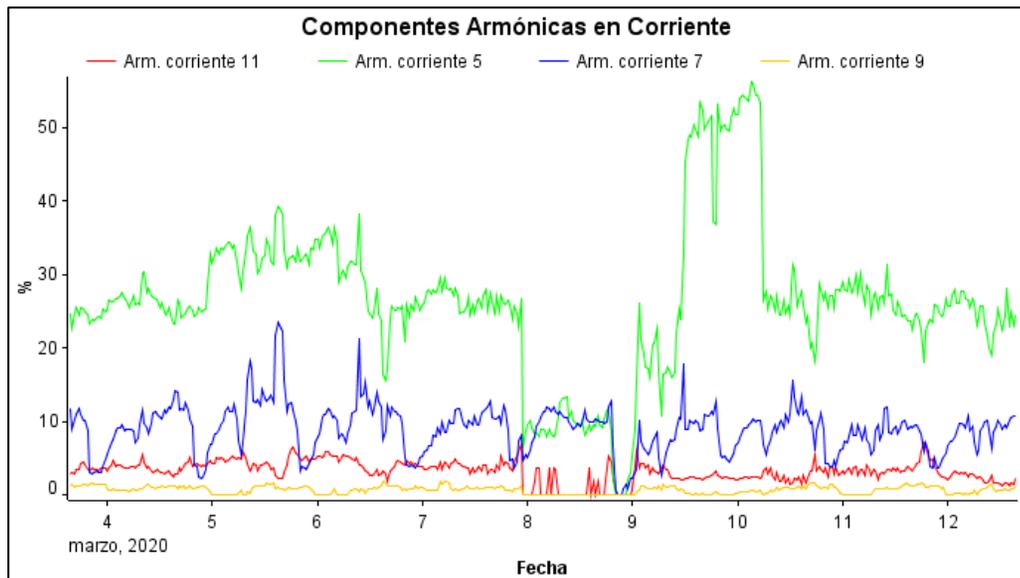


Figura 3.13. Componentes Armónicas en Corriente.

### 3.3.2.4 Armónicos en tensión

- i. Índice de distorsión armónica total en tensión

Se muestra en la Figura 3.14 el  $THD_v$  promedio para cada fase registrado cada 10 minutos.

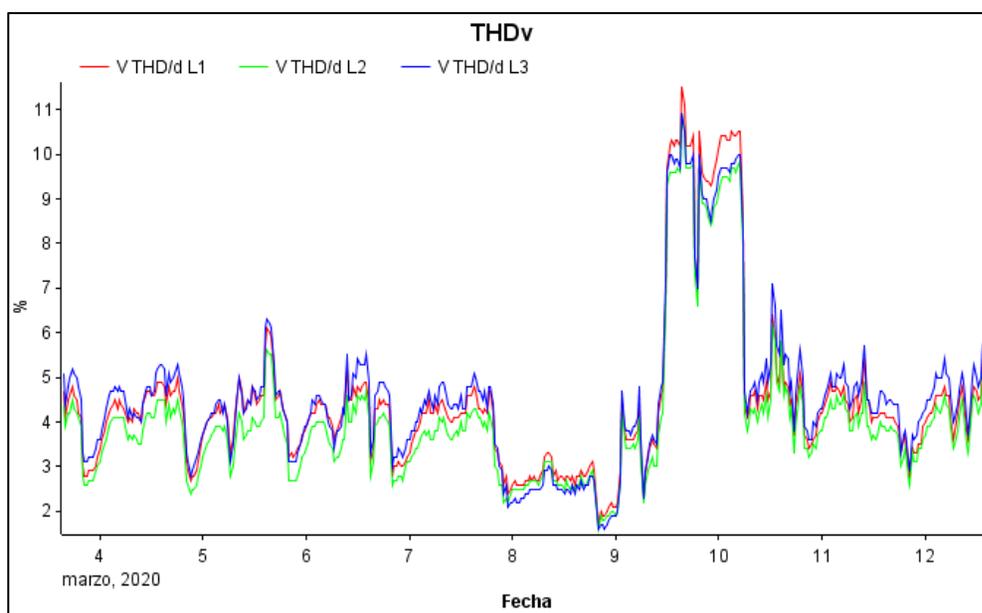


Figura 3.14.  $THD_v$  promedio por fase

Se hacen las siguientes observaciones:

- Basado en la definición de PCC y al igual que los índices de corriente, no se puede evaluar con respecto a la norma IEC 61000-3-6.
- Según el estándar IEC 61000-2-4 (sección 2.1.7.4) y considerando un ambiente electromagnético de clase 3, al que corresponde un nivel de CEM de 10% para el  $THD_v$ . Los índices de  $THD_v$  registrados en el PCI durante el período de alta carga, están al límite o sobrepasan lo sugerido para efectos de los armónicos a largo plazo.

ii. Componentes armónicas en tensión

Se observa en la figura 3.15 que el espectro de frecuencias que componen la onda de tensión son los generados por las corrientes armónicas en los rectificadores trifásicos de 6 pulsos.

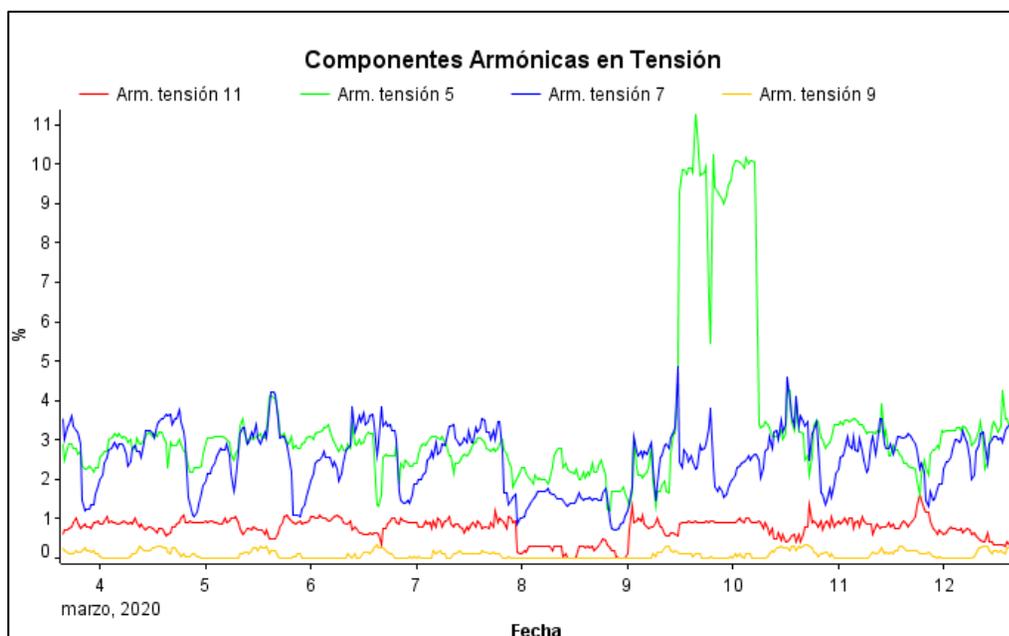


Figura 3.15.  $THD_v$  componentes armónicas en tensión.

Se observa que:

- Como se ha mencionado, no es posible evaluar con respecto al estándar IEC 61000-3-6.
- Considerando un entorno electromagnético de clase 3, los armónicos de orden par, impar y múltiplos de tres están dentro de lo que indica el estándar IEC 61000-2-4, a excepción de la 5° armónica durante el periodo de alta carga, donde se alcanza un valor medio máximo de 10,85%, mientras que el estándar indica un límite de 8%.

### 3.3.2.5 Corriente en el neutro

La Figura 3.16 muestra la corriente en el neutro registrada en el PCI. Se observa que la corriente en el neutro representa un 11% (47[A]) del promedio de la corriente en fases.

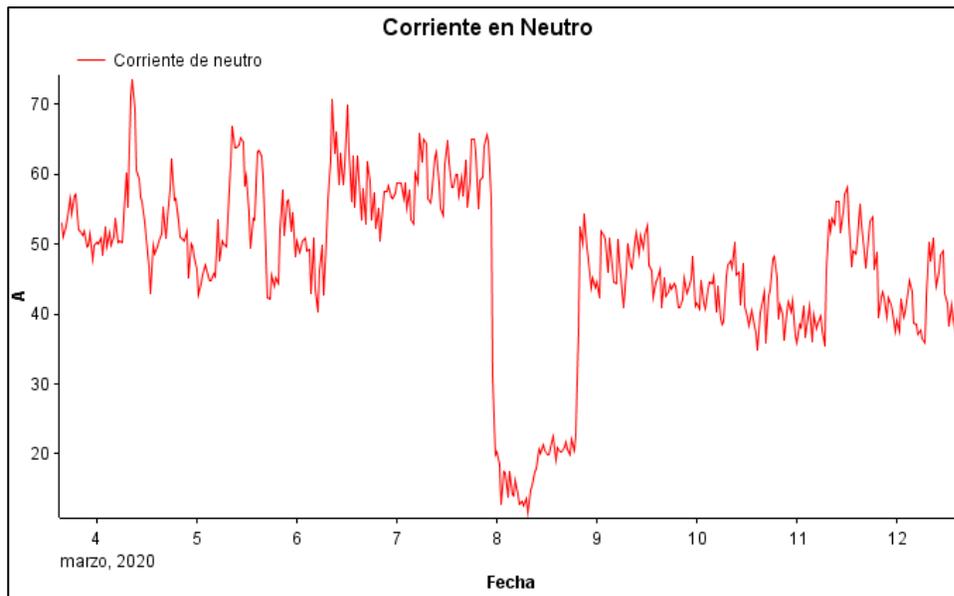


Figura 3.16. Corriente en el Neutro

Según lo estudiado en la sección 2.1.8.4, si se considera un sistema balanceado, la corriente en el neutro será proporcional a las componentes armónicas múltiplo de tres presentes. La figura 3.17 muestra la magnitud de las componentes de secuencia cero presentes en el sistema.

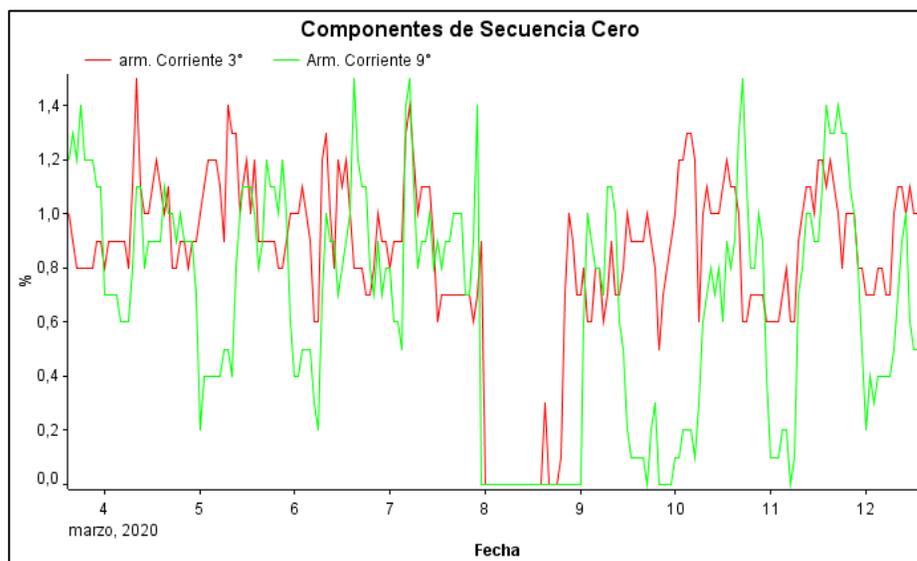


Figura 3.17. Componentes de secuencia cero.

A partir de la ecuación 2.66 para el máximo de  $THD_i$  promedio registrado y con  $I_1 = 545,5[A]$ ,  $I_3 = 12[A]$ ,  $I_5 = 267,2[A]$ ,  $I_7 = 54,55[A]$ . Resulta en una corriente de neutro de 12,5 [A].

La norma chilena [48] exige que el conductor neutro en presencia de armónicos sea a lo menos 50% mayor en sección a los conductores de fase, lo que en este caso y despreciando efecto pelicular y de proximidad, esta sobredimensionado.

### 3.3.3 Prueba en banco de condensadores para determinar resonancia

Del análisis de los índices de distorsión y las observaciones realizadas con respecto al quinto armónico, se realizaron pruebas para verificar el impacto del banco de condensadores en los parámetros de  $THDi$  y  $THDv$ . El proceso consistió en dos pruebas para factores de carga relativamente alto y bajo, donde mediante el regulador Cicutor *Computer SMART III* se desconectó el banco de condensadores durante un periodo breve tiempo, suficiente para registrar los parámetros de interés. Las tablas 3.10 y 3.11 resumen los parámetros registrados.

Tabla 3.10. Prueba N°1 para determinar resonancia

Prueba N°1: nivel de carga bajo							
Banco de condensadores	$THDi$ (%)	$THDv$ (%)	S (kVA)	PF	$\cos(\varphi)$	$I_{rms}$ [A]	$Q_L$ [Kvar]
Conectado	21,6	4	372	0,97	0,99	542,93	49,5
Desconectado	14	2	405,2	0,83	0,84	602,8	214,8

Tabla 3.11. Prueba para determinar resonancia

Prueba N°2: nivel de carga alto							
Banco de condensadores	$THDi$ (%)	$THDv$ (%)	S (kVA)	PF	$\cos(\varphi)$	$I_{rms}$ [A]	$Q_L$ [Kvar]
Conectado	46	10	474,4	0,90	0,98	672	64
Desconectado	16	2	553,6	0,71	0,72	850	376,8

Se aprecia que para la prueba N°1 la distorsión en corriente aumento en 1,5 veces su magnitud y la distorsión en tensión 2 veces su valor. El caso de la prueba N°2 nos indica que el efecto empeora a mayor número de etapas de compensación conectadas; el  $THDv$  aumenta 5 veces, mientras que el  $THDi$  se triplica.

De lo anterior se puede concluir que:

- Si bien la distorsión armónica es generada por los convertidores de potencia instalados, los índices se ven significativamente afectados por el banco de condensadores.

- Del análisis de las medidas de campo y las pruebas del banco de condensador se concluye que la frecuencia de resonancia del sistema se acerca a la quinta armónica a medida que aumentan las etapas del banco de condensador conectadas.
- Es recomendable la instalación de filtros antirresonantes.

### 3.4 Cálculo de pérdida en potencia y capacidad de transformador

se consideran para los cálculos los índices de distorsión promedio máximos, registrados el 10 de marzo de a las 03:30 hrs.

#### 3.4.1 Pérdidas adicionales por armónicos

Para el cálculo de las pérdidas adicionales se utilizará el método descrito en el estándar IEEE std C57.110 [33] y estudiado en la sección 2.1.8.1. Los datos del transformador se muestran en la tabla 3.4.

A partir de la ecuación 2.54 se calculan las pérdidas  $IR^2$  como

$$P = 1.5 \times [32,8^2 \times 4,708 + 1083^2 \times 0,012]$$

$$P = 9462,48[W]$$

Despejando (2.53) con pérdidas de corto circuito  $P_{LL-R} = 10,11[kW]$  y  $P_{TSL-R} = P_{EC-R} + P_{OSL}$

$$P_{TSL-R} = 10110 - 9462,48 = 647,52[W]$$

Según [33] para un transformador de 750[kVA] se estiman las pérdidas por corrientes parásitas como  $0,5 \times P_{TSL-R}$ , entonces  $P_{EC-R} = P_{OSL} = 323,76[W]$ .

En la tabla 3.12 se muestran los parámetros para el cálculo de  $F_{HL}$  y  $F_{HL-STR}$

Tabla 3.12. parámetros para el cálculo de factor de perdida armónica

$h$	$\frac{I_h}{I_1}$	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$	$h^2$	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2$	$h^{0,8}$	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right) h^{0,8}$
1	1	1	1	1	1	1
5	0,0126	0,0002	25	0,0040	3,6239	0,001
7	0,539	0,2905	49	14,2355	4,7433	1,378
9	0,119	0,0142	81	1,1470	5,7995	0,082
11	0,024	0,0006	121	0,0697	6,8095	0,004
$\Sigma$		1,3054		16,4562		2,4646

Dividiendo el resultado de la sumatoria de la columna cinco por el de la columna tres obtenemos que  $F_{HL} = 12,606$  . Repitiendo el proceso para la columna seis y tres se obtiene  $F_{HL-STR} = 1,889$ .

La tabla 3.13 muestra las pérdidas corregidas para el factor de carga y la distorsión armónica registrada.

Para el periodo mencionado el transformador trabajó a 58,9 de su capacidad y la corriente armónica rms en valores por unidad resultante (raíz cuadrada de la sumatoria de la tercera columna en tabla 3.12) es de 1,143. Por tanto, se deben corregir las pérdidas para las condiciones de carga en  $F.C = 1,143^2 \times 0,589^2 = 0,45$ . Si no se considera el aumento en la corriente rms debida a armónicos, entonces  $F.C = 0,35$ .

Tabla 3.13. pérdidas corregidas para transformador AndesDrip de 750[kVA]

Tipo de pérdidas	Pérdidas nominales [W]	Pérdidas corregidas para F.C de 0,35 [W]	Pérdidas corregidas para F.C de 0,45 [W]	Factor armónico	Pérdidas corregidas [W]
En vacío	1330	1330	1330		1330
$IR^2$	9462,48	3311,86	4258,15		4258,15
Corrientes parásitas	327,76	114,716	147,492	12,606	1859,28
Otras	327,76	114,716	147,492	1,889	278,61
Total	11440	4871,338	5883,134		7726,04

Se observa que para las condiciones que para los parámetros de distorsión armónica y condiciones de carga utilizados las pérdidas en el transformador aumentan un 58,6% .

### 3.4.2 Pérdida de capacidad en el transformador

El cálculo de pérdida de capacidad en el transformador se realiza mediante el método desarrollado en [34] y estudiado en la sección 2.1.8.1. Para pérdidas por corrientes eddy de  $P_{EC-R} = 327,76 [W]$  se obtiene la densidad máxima según la ecuación (2.48) como

$$M = MaxP_{EC-R}(p.u) = \frac{2,8 \times 327,76}{3 \times (1083)^2 \times 0,012} = 0,022$$

Luego para  $F_{HL} = 12,606$  la corriente máxima según (2.49) es

$$I_{\max}(p.u) = \sqrt{\frac{1 + 0,022}{1 + 12,61 \times 0,022}} = 0,89$$

Finalmente, la pérdida en capacidad del transformador según (2.50)

$$RAPR = [1 - 0,89] \times 100 = 11\%$$

Es decir, para evitar calentamientos excesivos, el transformador no debería funcionar a más del 89% de su potencia nominal, lo que equivale a 667,5[kVA].

### 3.5 Diseño de banco de condensadores con filtros antirresonantes

Las pruebas realizadas en la sección 3.3.3 deja en evidencia la influencia del banco de condensadores sobre los índices de distorsión. La implementación de otro tipo de filtro significaría sobrecompensar los armónicos amplificados por el efecto de resonancia y en consecuencia equipos de mayor capacidad y costo. Por tanto, como medida para mitigar armónicos se optará inicialmente por filtros antirresonantes.

Se observa que en el método para el cálculo de filtros antirresonantes presentado en [54] (sección 2.1.6.3) se requiere del recalcu de los parámetros del condensador corregido para el factor  $M$ . Para evitar esto y agilizar el procedimiento, se dedujo a partir de las ecuaciones (2.42) - (2.50) una expresión que permite evaluar la potencia reactiva del condensador en función de la potencia reactiva total requerida.

$$Q_{CN} = Q_T \frac{V_{CN}^2 (1 - \rho)}{V_s^2} \quad (3.1)$$

Donde

- $Q_{CN}$  : Potencia reactiva capacitiva a tensión nominal  $V_{CN}$
- $Q_T$  : Potencia total requerida para compensación
- $V_{CN}$  : Tensión nominal del condensador
- $\rho$  : Factor de sobretensión
- $V_s$  : Tensión de la red

Se observa de las mediciones de campo que  $\cos(\varphi)$ , mantuvo un valor de 0,99, Por lo que no se modificará la potencia del banco de condensadores ni se cambiará la relación entre etapas mostrados en la tabla 3.7. Sin embargo, se debe considerar la sobrecompensación debida a las reactancias y condensadores de mayor tensión nominal.

Como se mencionó anteriormente debido la conexión en serie de la reactancia genera un aumento de tensión en el capacitor. Por lo que no es factible utilizar los capacitores ya instalados como parte del filtro antirresonante.

Las mediciones de campo indican baja o nula presencia de la tercera armónica y predominancia del quinto armónico, por consiguiente, se elige una frecuencia de sintonización de 189[Hz], a lo que corresponde un factor de sobretensión de 7%.

De la ecuación (3.1) y para  $\rho = 7\%$ ,  $Q_T = 355[kVAR]$ ,  $V_{CN} = 440[V]$ ,  $V_s = 400[V]$  y  $V_c = 430,1[V]$ , se calcula la capacidad total del banco de condensadores como  $Q_{CN} = 355000 \times 1,125 = 399,375[kVAR]$ .

La tabla 3.14 muestra las potencias reactivas del banco de condensadores con filtro antirresonantes por etapa de compensación calculados mediante las ecuaciones (2.42) -(2.50) y (2.48). Se observa que la compensación adicional debido a los reactores es de 44[kVAR]. En el anexo A.3. se muestran los modelos y características del fabricante CIRCUTOR para los valores necesitados.

Tabla 3.14. Potencias reactivas banco de condensadores con filtro

Etapa	$Q_{CN}[kVAR]$	$Q_C[kVAR]$	$Q_L[kVAR]$	$Q_T[kVAR]$
1	28,13	26,88	1,88	25
2	28,13	26,88	1,88	25
3	28,13	26,88	1,88	25
4	28,13	26,88	1,88	25
5	28,13	26,88	1,88	25
6	28,13	26,88	1,88	25
7	33,76	32,25	2,26	30
8	33,76	32,25	2,26	30
9	39,39	37,63	2,63	35
10	39,39	37,63	2,63	35
11	39,39	37,63	2,63	35
12	45,01	43,03	3,01	40
Total	399	381,7	26,7	355

Nota:  $Q_C$  es la potencia reactiva a la sobretensión calculada  $V_c$ .

En las tablas 3.15 – 3.18 se muestran el resto de las variables calculadas, para las etapas 1-6, 7-8, 9-11 y 12.

Tabla 3.15. Parámetros para etapas de compensación 1-6

$C[F]$	$X_C[\Omega]$	$X_L[\Omega]$	$X_T[\Omega]$	$L[H]$	$I[A]$
$4,6 \times 10^{-4}$	6,9	0,48	6,4	$1,5 \times 10^{-3}$	36,1

Tabla 3.16. Parámetros para etapas de compensación 7-8

$C[F]$	$X_C[\Omega]$	$X_L[\Omega]$	$X_T[\Omega]$	$L[H]$	$I[A]$
$5,5 \times 10^{-4}$	5,7	0,40	5,3	$1,3 \times 10^{-3}$	43,3

Tabla 3.17. Parámetros para etapas de compensación 9-11

$C[F]$	$X_C[\Omega]$	$X_L[\Omega]$	$X_T[\Omega]$	$L[H]$	$I[A]$
$6,7 \times 10^{-4}$	4,9	0,34	4,57	$1,1 \times 10^{-3}$	50,5

Tabla 3.18. Parámetros para etapa de compensación 12

$C[F]$	$X_C[\Omega]$	$X_L[\Omega]$	$X_T[\Omega]$	$L[H]$	$I[A]$
$7,4 \times 10^{-4}$	4,3	0,30	4	$9,6 \times 10^{-4}$	57,7

### 3.6 Simulación DIgSILENT PowerFactory

Para predecir el efecto de reemplazar el banco de condensadores por el diseñado en la sección anterior, se modeló el sistema y se estudió para dos escenarios de operación el comportamiento de los índices de distorsión armónica y respuesta en frecuencia de la red. las líneas de producción se modelaron como cargas no lineales y se utilizó el espectro armónico registrado de las mediciones de campo. Para lograr estimar las impedancias equivalentes de cada línea de producción se ingresó el aporte de corto circuito y la relación  $R/X$  de cada una de estas. Debido a la falta de información y el estado de las placas de los motores, se estimó la corriente de corto circuito como cinco veces la corriente nominal de los motores principales. El transformador de distribución fue modelado según los parámetros de la tabla 3.5, para estimar la impedancia de la red externa se consultaron los niveles de corto circuito con la empresa distribuidora CGE y se definió una relación  $R/X$  de 0,1 (ver anexo A.2).

Además de las corrientes de corto circuito y relación  $R/X$  de cada línea de producción, se ingresaron como datos de entrada la potencia activa y reactiva inductiva de los principales motores, el espectro armónico registrado en las mediciones de campo y la potencia reactiva capacitiva del banco de condensadores. Las líneas de producción conectadas para la simulación se basan en información recopilada desde los informes de planta.

El primer escenario estudiado comprende condiciones de alta carga, altos índices armónicos y las doce etapas de compensación reactiva conectadas. En el segundo escenario se estudió la respuesta para condiciones promedio de operación y conectando desde las etapas 1 a la 7 del banco de condensadores con y sin filtros.

La figura 3.18 muestra el diagrama general utilizado, en azul se muestra el banco de condensadores de doce etapas instalado actualmente en la empresa, en verde se señala el banco de condensadores con reactancias antirresonantes diseñado en la sección 3.5

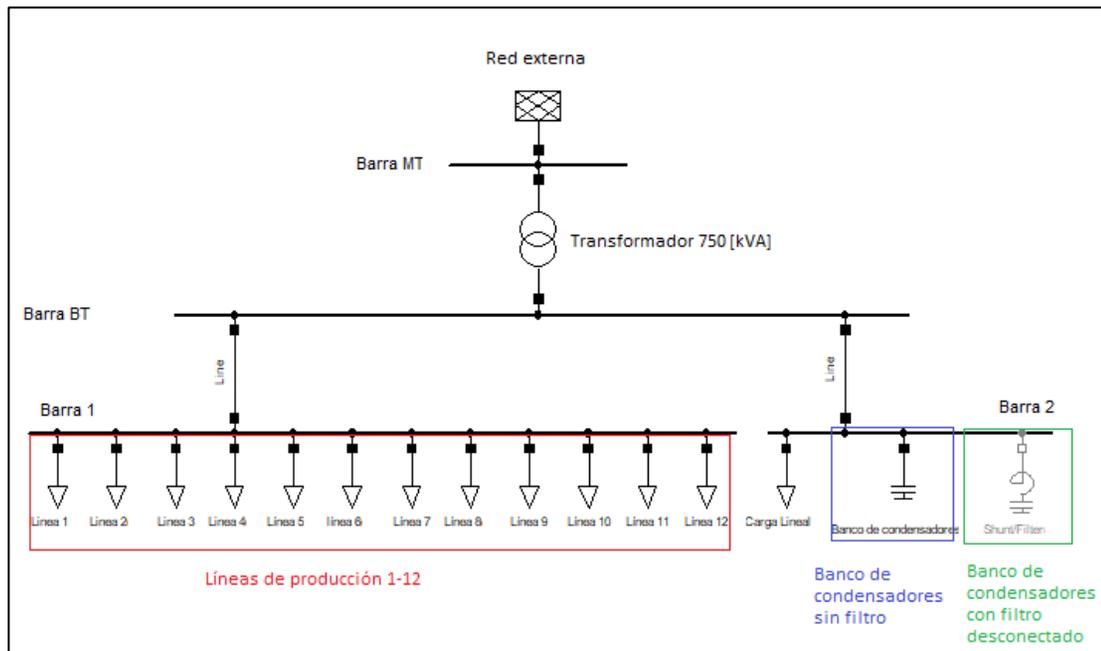


Figura 3.18. Diagrama general para simulación.

### 3.6.1 Escenario N°1

En el primer escenario se consideran las condiciones de operación registradas el 10 de marzo a las 03:00 hrs. Basado en los reportes de operación de planta, en el periodo indicado se conectaron las líneas de producción 1, 2, 4, 5, 6 y 8. De las mediciones de campo se observa una potencia aparente de  $S = 457[kVA]$ . En la tabla 3.19 se muestran los parámetros reales registrados y los simulados. En ambos casos con las doce etapas del banco de condensadores conectadas ( $355[kVAR]$ ).

Tabla 3.19. Comparación parámetros simulados y reales en escenario N°1 banco conectado.

Parámetro	Real	Simulación	Error
$S$	457[kVA]	442[kVA]	3,3%
$THD_i$	46,01%	46,69%	1,5%
$THD_v$	10%	11%	10%
$I_{rms}$	660 [A]	643[A]	2,6%
$FP$	0,874	0,90	2,3%
$cos\phi$	0,99	0,99	0%
$Q_L$	31[kVAR]	35[kVAR]	12,9%

### Capítulo 3: Desarrollo

En la figura 3.19 se observa el espectro armónico de tensión por fase, los resultados son coincidentes con lo registrado en las mediciones de campo y se aprecia predominancia del quinto armónico con un 10,3% respecto a la fundamental.

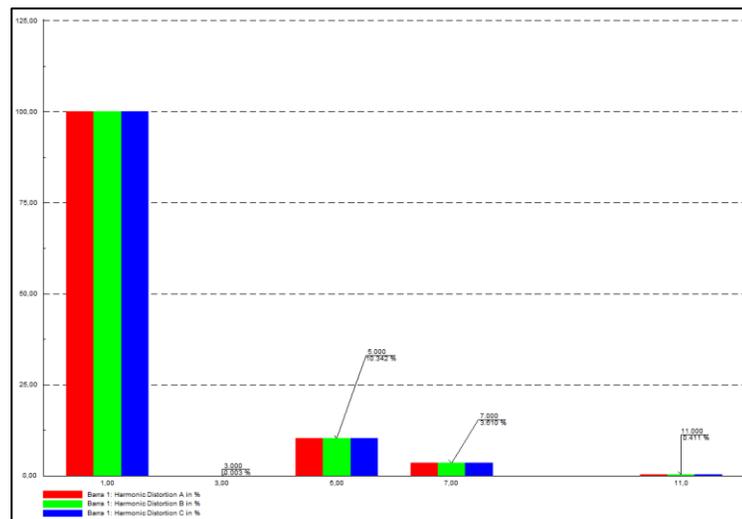


Figura 3.19. Espectro armónico tensión escenario N°1 condensadores conectados

Como se mencionó anteriormente, es necesario estudiar el comportamiento en frecuencia de la red, para esto se creó en *DIgSILENT* la variable de impedancia equivalente del sistema y luego se realizó un barrido de frecuencia. En la figura 3.20 se expone la respuesta en frecuencia del sistema. Se aprecia que la impedancia máxima con una magnitud de 1,775 [ $\Omega$ ] se alcanza a la frecuencia de 302,9[Hz], la cual es cercana a las armónicas de quinto y séptimo orden.

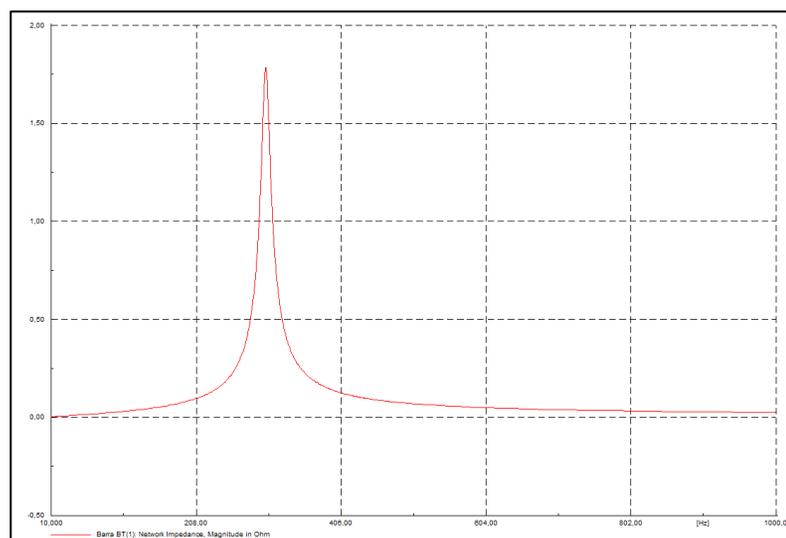


Figura 3.20. Respuesta en frecuencia escenario N°1 con banco conectado.

A fin de verificar la incidencia del banco de condensadores en la respuesta en frecuencia del sistema, se realizó la simulación con las mismas condiciones para el banco de condensadores desconectado.

### Capítulo 3: Desarrollo

En la tabla 3.20 se resumen los parámetros resultantes y en la figura 3.21 el barrido de frecuencia.

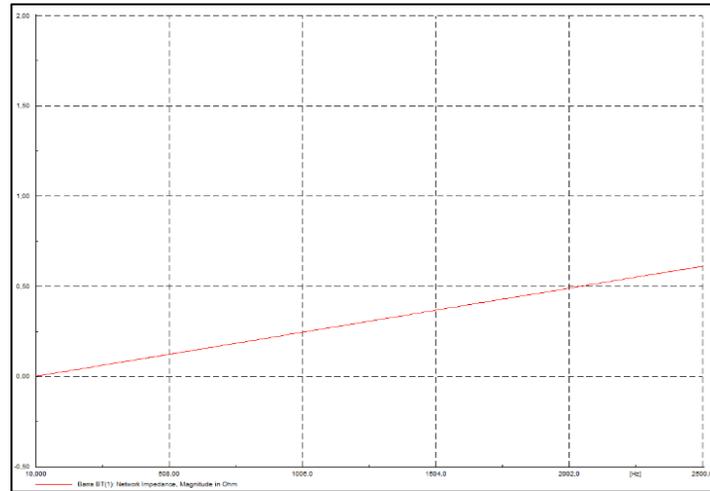


Figura 3.21. barrido de frecuencia escenario N°1 banco condensadores desconectado.

Tabla 3.20. Parámetros escenario N°1 con banco desconectado.

$S$	$THD_i$	$THD_v$	$I_{rms}$	$FP$	$\cos\phi$	$Q_L$
554[kVA]	10,97 %	3,9%	834[A]	0,72	0,72	381[kVAR]

Se observa en la figura 3.21 que la impedancia disminuye para los armónicos de baja frecuencia, pero se produce un aumento lineal a medida que aumenta el orden de los armónicos, esto debido a que sin el banco de condensadores la impedancia equivalente representa una componente de reactancia predominantemente inductiva. Al existir menor impedancia para las frecuencias de quinto y séptimo orden, disminuyen las tensiones armónicas y por tanto también como se aprecia en la tabla 3.21, los índices de distorsión en corriente de estos armónicos. La figura 3.22 muestra el espectro en tensión resultante sin etapas de compensación conectadas.

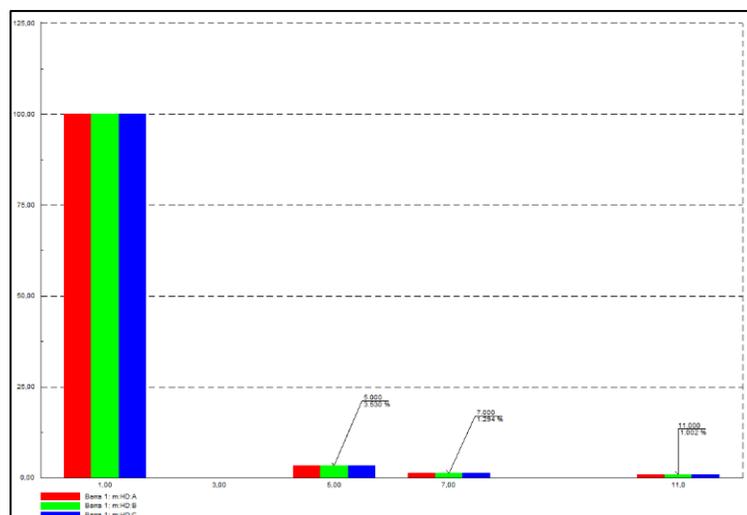


Figura 3.22. Espectro armónico en tensión escenario N°1 con banco desconectado.

Finalmente, se realizó la simulación conectando las doce etapas del banco de condensadores con filtros antirresonantes, la tabla 3.21 muestra los parámetros resultantes del flujo de carga y flujo de carga armónico. Al conectar los filtros se logra mitigar considerablemente la distorsión en corriente y tensión, lo que conlleva además una disminución de 59[A] en corriente y 42[kVA] en potencia aparente, también se logra un factor de potencia real de 0,99.

Tabla 3.21. Parámetros escenario N°1 banco de condensadores con filtros

$S$	$THD_i$	$THD_v$	$I_{rms}$	$FP$	$\cos\phi$	$Q_L$
400[kVA]	8,38 %	2,1%	584[A]	0,99	0,99	35[kVAR]

Del resultado para el barrido de frecuencia mostrado en la figura 3.23, se registra baja impedancia en la frecuencia de resonancia en serie para la que se diseñó el banco de condensadores (189[Hz]), no obstante, se exhibe una nueva frecuencia natural en 161hz resultante en una impedancia de 0,5 [ $\Omega$ ] , esta frecuencia es cercana a la armónica de tercer orden.

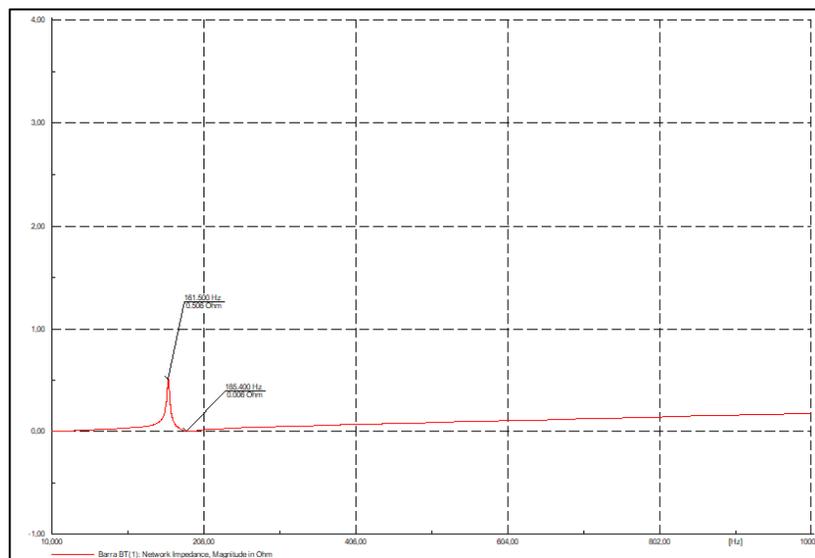


Figura 3.23. barrido de frecuencia escenario N°1 banco de condensadores con filtro antirresonante conectado.

Se observa del gráfico en figura 3.24 que con el filtro conectado las armónicas de tensión de quinto y séptimo orden son de 1,80% y 0,80 % respecto a la fundamental, respectivamente. En el caso de la onceava armónica se produce un aumento en comparación a lo mostrado en la figura 3.18, de 0,48% a 0,67%. Esto causado por el aumento en la impedancia para armónicas de mayor orden mostrado en la figura 3.19.

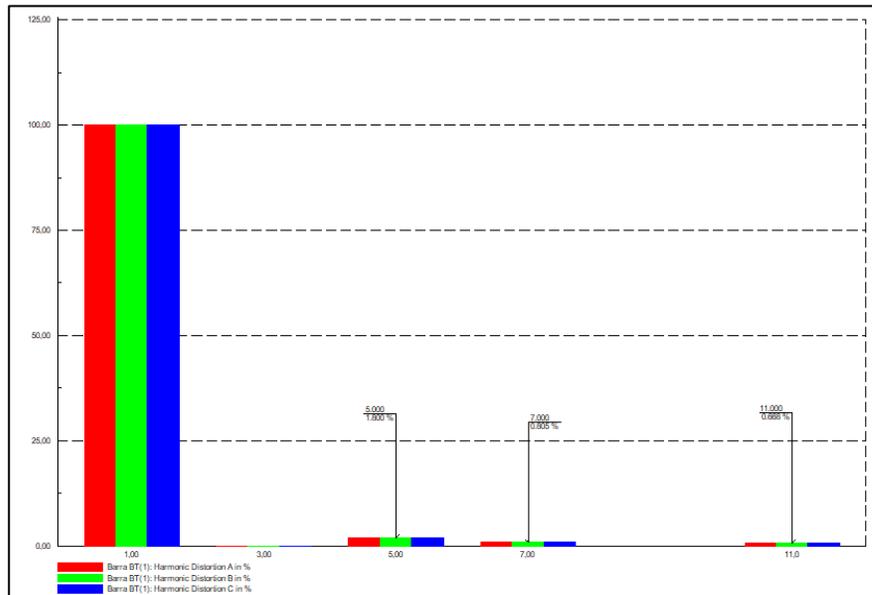


Figura 3.24. Espectro armónico en tensión escenario N°1 con filtro conectado.

La tabla 3.22 muestra en resumen los resultados para los tres casos estudiados en el escenario N°1 de operación. Se observa una mejora general en los parámetros de potencia, índices de distorsión armónicas individuales y totales. A excepción de la onceava armónica donde hay un aumento en los parámetros de distorsión en tensión y corriente, sin embargo, sigue estando dentro del límite recomendado en el estándar IEC 6100 2-4 de 5% de distorsión en tensión para un entorno electromagnético clase tres.

Tabla 3.22. Comparación de casos para escenario N°1.

Parámetro	Banco sin filtros conectado	Banco desconectado	Banco con filtros conectado
$S$	442[kVA]	554[kVA]	400[kVA]
$THD_i$	46,69%	10,97%	8,38%
$THD_v$	11%	3,9%	2,1%
$I_{rms}$	643[A]	834[A]	584[A]
$FP$	0,90	0,72	0,99
$cos\phi$	0,99	0,72	0,99
$Q_L$	35[kVAR]	381[kVAR]	35[kVAR]
$I_C$	584[A]	/	509[A]
$I_5$	45,29%	10,53%	7,84%
$I_7$	11,29%	2,76%	2,52%
$I_{11}$	0,819%	1,36%	1,33%
$V_5$	10,64%	3,53%	1,8%
$V_7$	3,61%	1,29%	0,81%
$V_{11}$	0,41%	1,01%	0,67%

Nota: todos los parámetros de distorsión armónica individual están dados con respecto a la fundamental.

Cabe destacar la disminución en corriente del banco de capacitores  $I_C$ , esto resultaría en menor estrés térmico y, por tanto, un aumento de la vida útil y reducción de fallas en los condensadores.

A modo de ilustrar gráficamente la mejora en la calidad de tensión y corriente, las figuras 3.25 y 3.26 muestran las formas de onda en corriente y tensión para los casos con banco de condensadores sin filtros y con filtros antirresonantes. La figura 2.23 muestra que debido al 8,38% de distorsión total, la onda de corriente no es completamente sinusoidal, si fuera necesario se debería evaluar la posibilidad de instalar un filtro activo o filtro pasivo adicional.

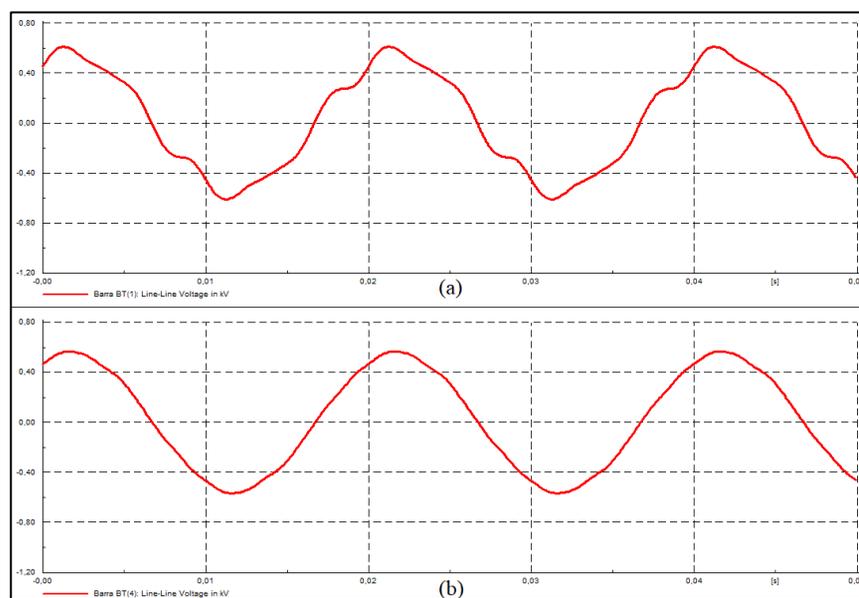


Figura 3.25. Formas de onda de tensión, en (a) banco de condensadores sin filtros y en (b) banco de condensadores con filtros.

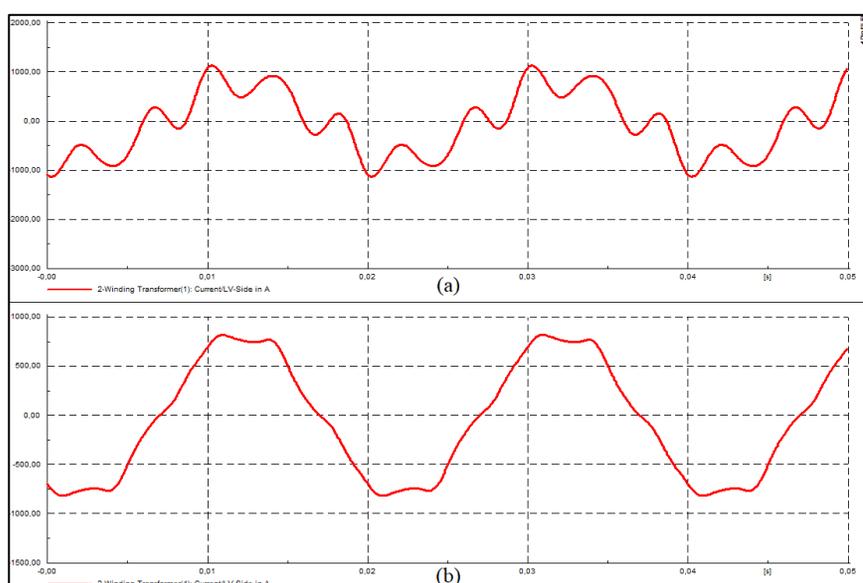


Figura 3.26. Formas de onda de corriente, en (a) banco de condensadores sin filtros y en (b) banco de condensadores con filtros.

### 3.6.2 Escenario N°2

En el escenario N°2 se consideraron condiciones de operación promedio, los datos corresponden a los registrados el 4 de marzo a las 13:15 hrs, donde según reportes de planta se encontraban funcionando las líneas 2, 3 y 6. La potencia aparente registrada según las mediciones de campo fue de  $300[kVA]$ . La potencia reactiva entregada por el banco de condensadores fue de  $180[kVAR]$ , es decir se conectaron desde la etapa uno hasta la siete.

Tabla 3.23. Comparación parámetros simulados y reales en escenario N°2.

Parámetro	Real	Simulación	Error
$S$	$300[kVA]$	$298[kVA]$	0,7%
$THD_i$	26,3%	24,5%	6,5%
$THD_v$	4,7%	4,6%	2,1%
$I_{rms}$	$438,68 [A]$	$433 [A]$	1,3%
$FP$	0,96	0,97	1,1%
$cos\phi$	0,99	0,99	0%

La figura 3.27 muestra el espectro armónico simulado con siete etapas del banco de condensadores conectado y en la figura 3.28 el barrido de frecuencia para las condiciones mencionadas. Se observa que en este escenario la frecuencia de resonancia es de  $401,8[Hz]$  con una impedancia de  $3,59[\Omega]$ . Por lo que, de los armónicos presentes en el sistema, es cercana a la séptima armónica. Sin embargo, en  $350[Hz]$  la impedancia es de  $0,39[\Omega]$ , lo que significa que las armónicas de quinto orden también se verán amplificadas. Dado que la presencia de la séptima armónica en comparación a la de quinto orden es más baja en el sistema, los índices de distorsión en tensión y corriente se ven disminuidos en comparación a lo mostrado en el escenario N°1.

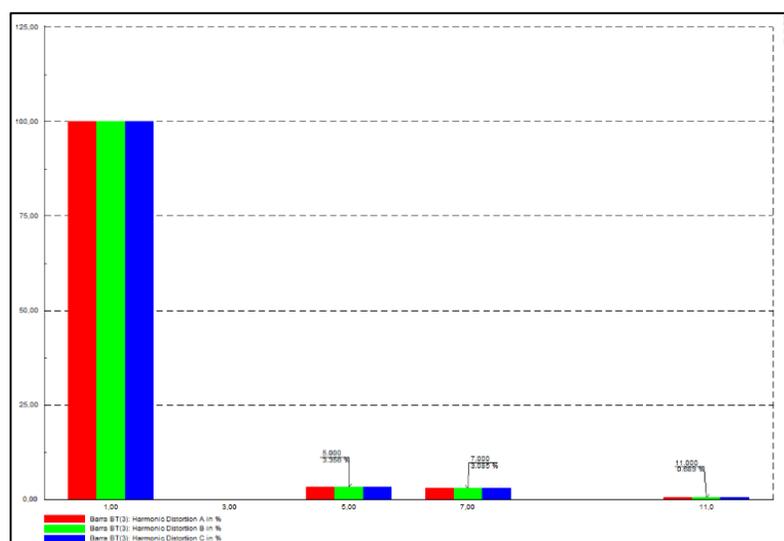


Figura 3.27. Espectro armónico en tensión escenario N°2 sin filtro conectado.

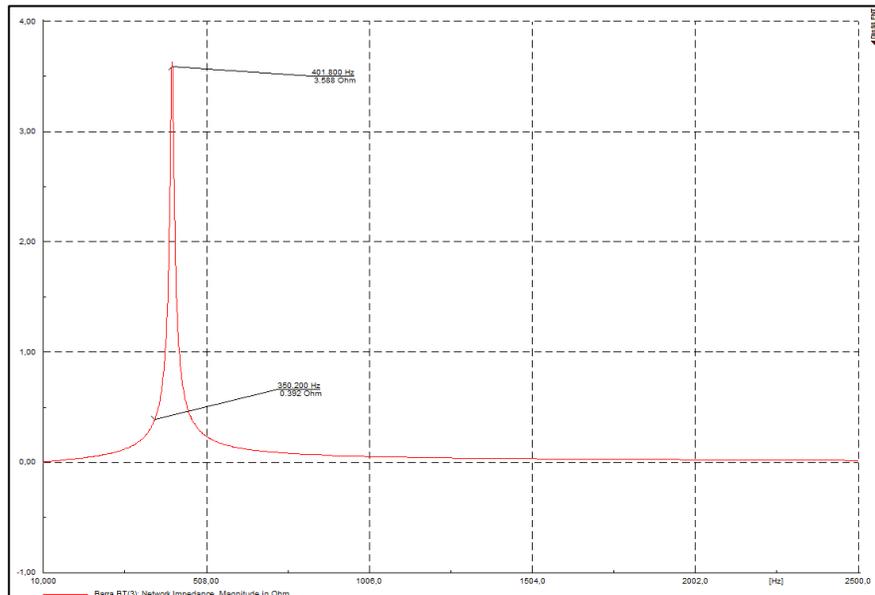


Figura 3.28. Barrido de frecuencia escenario N°2 sin filtro.

Las figuras 3.29 y 3.30 muestran el espectro armónico y respuesta en frecuencia conectando las etapas 1-7 del banco de condensadores con filtros antirresonantes, se aprecia que al igual que el escenario N°1, la frecuencia de resonancia en serie se produce en 189[Hz] y la frecuencia de resonancia paralelo en 172,4[Hz] con impedancia 0,654[Ω].

Del gráfico de espectro armónico en tensión se produce una reducción de 3,085% a 0,59% del séptimo armónico. Como referencia el límite sugerido por el estándar IEC 6100 2-4, es del 7% para un entorno con compatibilidad electromagnética clase 3.

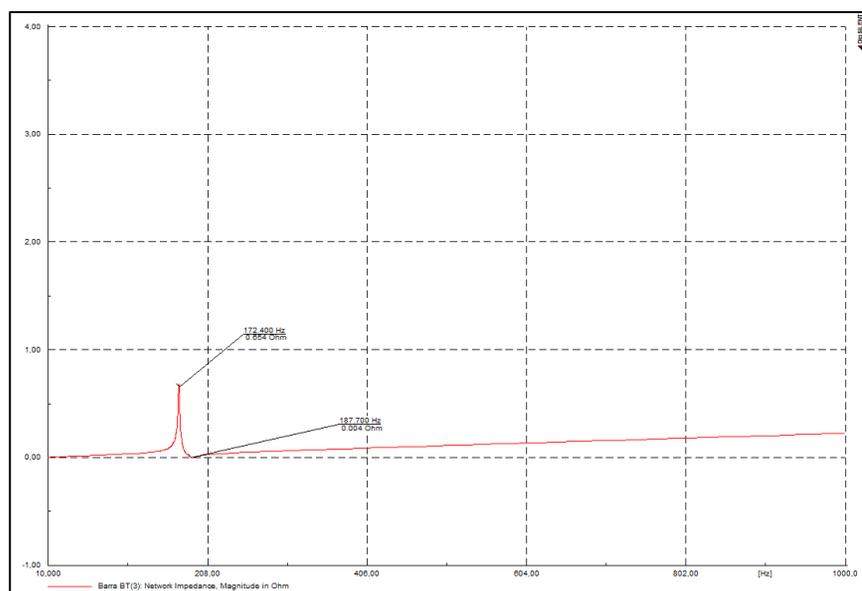


Figura 3.29. Barrido de frecuencia escenario N°2 con filtros antirresonantes.

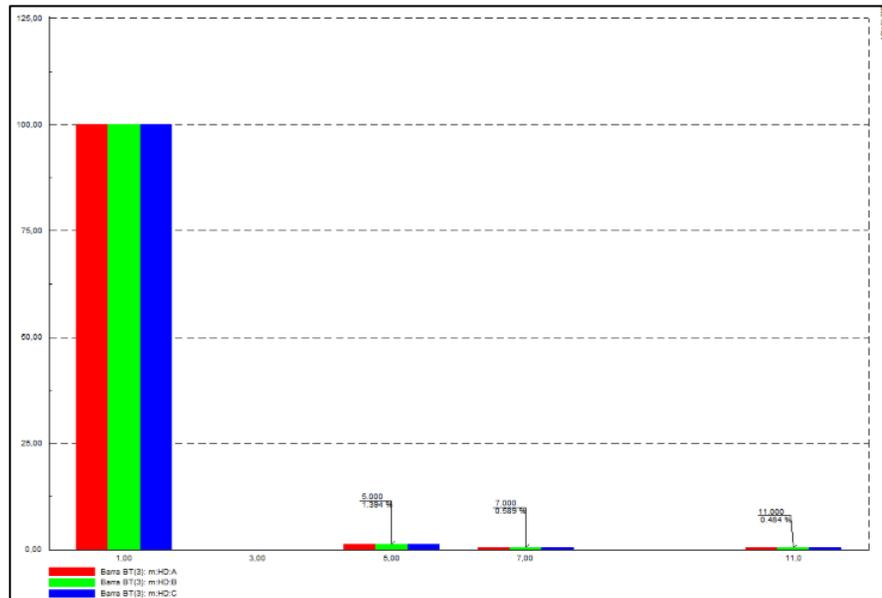


Figura 3.30. Espectro armónico en tensión escenario N°2 con filtros conectados.

La tabla 3.24 muestra los casos estudiados para el escenario N°2, se observa mejora en los parámetros de distorsión armónica total e individual, comparando los casos con y sin filtros antirresonantes se aprecia una disminución en potencia aparente de 8[kVA] y 11[A] en corriente. La corriente a través de los capacitores se reduce en 10[A].

Tabla 3.24. Comparación de resultados para casos en escenario N°2.

Parámetro	Banco sin filtros conectado	Banco desconectado	Banco con filtros conectado
$S$	298[kVA]	342[kVA]	290[kVA]
$THD_i$	24,5%	11,14%	8,99%
$THD_v$	4,6%	2,3%	1,6%
$I_{rms}$	433[A]	502[A]	422[A]
$FP$	0,97	0,84	0,99
$cos\phi$	0,99	085	0,99
$I_C$	268[A]	/	258[A]
$I_5$	20,56%	10,69%	8,51%
$I_7$	13,44%	2,81%	2,57%
$I_{11}$	1,91%	1,4%	1,34%
$V_5$	3,36%	2,13%	1,38%
$V_7$	3,09%	0,78%	0,60%
$V_{11}$	0,89%	0,61%	0,48%

Finalmente se obtienen las gráficas de onda en tensión y corriente para el escenario N°2 con y sin filtro mostradas en las figuras 3.31 y 3.32, respectivamente.

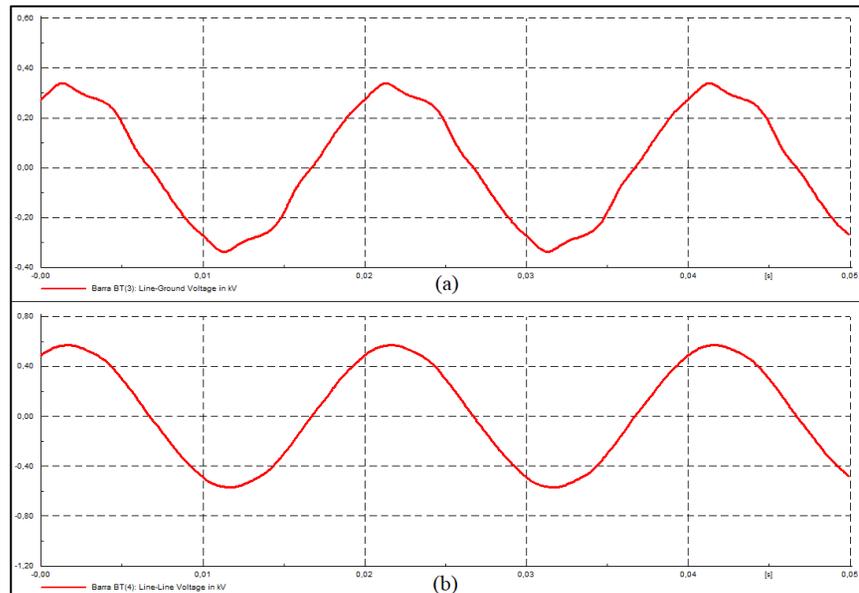


Figura 3.31. Formas de onda de tensión para escenario N°2, en (a) banco de condensadores sin filtros y en (b) banco de condensadores con filtros.

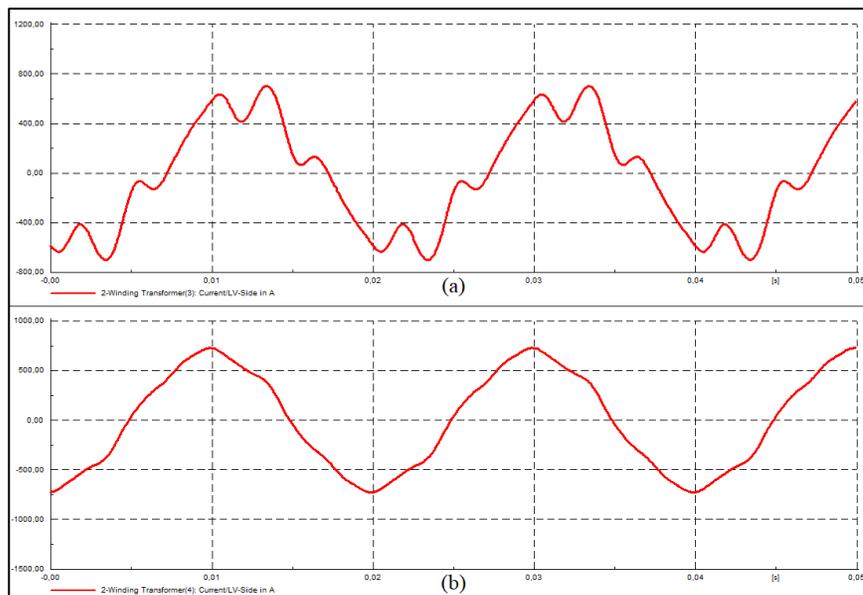


Figura 3.32. Formas de onda de corriente para escenario N°2, en (a) banco de condensadores sin filtros y en (b) banco de condensadores con filtros.

### 3.7 Conclusiones y observaciones

A través de las pruebas realizadas mediante el regulador de potencia reactiva y el barrido de frecuencia en *DIgSILENT*, queda en evidencia la necesidad de considerar reactancias de filtrado en el diseño de banco de condensadores en redes con presencia de cargas no lineales.

La figura 3.20 muestra que la impedancia paralelo equivalente para el escenario N°1 alcanza su punto máximo en 302,9 [Hz]. Las frecuencias de componentes de quinta y séptima armónica inyectadas por rectificadores de seis pulsos son cercanas a la frecuencia de resonancia y como muestra la tabla 3.22, se ven afectadas por el incremento en la impedancia. Considerando las características de la curva de respuesta en frecuencia, un pequeño cambio en las condiciones de operación que implique una variación de la frecuencia de resonancia en dirección a las componentes armónica presentes en la red, resultaría en un aumento exponencial de los índices de distorsión.

En el diseño de filtros para mitigar la distorsión y evitar la resonancia en paralelo, es necesario tener precaución en que la frecuencia de sintonía del filtro no coincida con componentes armónicas presentes en el sistema. Para esto se debe considerar el espectro armónico y características en frecuencia de la red en particular. Cabe señalar que para filtros antirresonantes el factor de sobretensión será inversamente proporcional a la frecuencia de sintonización.

Para evitar confusiones el estándar IEEE-519 deja claro que se debe considerar el PCC como el punto de conexión entre un usuario y la red de distribución, y que los criterios recomendados no deben ser evaluados en algún otro punto interno de la red. Esta aclaración fue incluida en la revisión IEEE-519-2014. La versión IEEE-519-1992 definía el PCC en una planta industrial como el nodo entre cargas no lineales y otras cargas.

La normativa chilena en el Reglamento de Seguridad de Las Instalaciones de Consumo de Energía, pliego técnico normativo RIC N°4, exige que en circuitos trifásicos y presencia de cargas no lineales que generen armónicas en el neutro, la sección de éste debe ser a lo menos 50% mayor que la sección de los conductores de fase. Sin embargo, no especifica el orden de los armónicos o su intensidad. De la bibliografía estudiada en la sección 2.1.8.4 se entiende que deben considerarse como “generadoras de armónicos en el neutro” las armónicas de secuencia cero, con énfasis en la tercera armónica. De las mediciones de campo en la sección 3.3.2.5 y con componentes de secuencia cero de tercera y novena armónica, se registró una corriente en el neutro del 11% con respecto al promedio de corriente en fases. Por tanto, en este caso particular cumplir con lo que exige esta norma implicaría un sobredimensionamiento del neutro.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] " P. E. Sutherland and B. Brusso, "History of Harmonics [History]," in *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 21, no. 3, pp. 6-11, May-June 2015.
- [2] "Outlook for Energy: A perspective to 2040", ExxonMobil's Corporation, Irving, Texas, Estados Unidos, agosto 2019.
- [3] Electricity demand growth by end-use and scenarios in advanced and developing economies 2018-2040, IEA, Paris. Disponible en: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electricity-demand-growth-by-end-use-and-scenarios-in-advanced-and-developing-economies-2018-2040>.
- [4] Grajales, John, y Ramírez, José, y Cadavid, Diego, "Efectos de los armónicos en los motores de inducción: una revisión." *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, vol. , no. 31, 2004, pp.116-123.
- [5] "Energía 2050 : Política Energética de Chile ", Ministerio de Energía, Gobierno de Chile, Santiago, 2016.
- [6] "J.C. Das, *"Power System Harmonics and Passive Filter Designs"*. 1ª ed. Hoboken, New Jersey: Wiley - IEEE Press, 2015.
- [7] "Francisco C. De La Rosa, *"Harmonics, Power Systems, and Smart Grids"*. 2ª ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2015.
- [8] "J.C. Das, *"Power System Analysis, Short - Circuit Load Flow and Harmonics"*. 2ª ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2012.
- [9] T. Hoevenaars, K. LeDoux and M. Colosino, "Interpreting IEEE STD 519 and meeting its harmonic limits in VFD applications," *IEEE Industry Applications Society 50th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference, 2003. Record of Conference Papers.*, Houston, pp. 145-150.
- [10] Ministerio de Energía, " Norma Técnica de Calidad de Servicio Para Sistemas de Distribución", CNE, Santiago de Chile, Diciembre 2019.
- [11] IEEE std. 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", 9 de abril 1993.
- [12] IEEE std. 1459-2010, "IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions", 19 de marzo, 2010.

## Bibliografía

- [13] X. Liang, Y. Luy and D. O. Koval, "Investigation of Input Harmonic Distortions of Variable Frequency Drives," *2007 IEEE/IAS Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference*, Edmonton, Alta., 2007, pp. 1-11.
- [14] Armstrong Fluid Technology, "6 pulse vs. 12 and 18 pulse harmonics effect reduction", 5 de junio, 2015.
- [15] N. Rugthaicharoencheep and S. Chaladying, "Technical and financial evaluation for investment of harmonic mitigation in power network," *2017 IEEE Manchester PowerTech*, Manchester, 2017, pp. 1-5.
- [16] M. S. Villalta and T. Honduras, "Variable frequency drivers: Problems, solution and losses in cooper caused by harmonics in electrical networks," *2015 IEEE Thirty Fifth Central American and Panama Convention (CONCAPAN XXXV)*, Tegucigalpa, 2015, pp. 1-5.
- [17] Shireen, Wajiha & Kulkarni, "Harmonic analysis of three phase PWM inverter systems using MATLAB", in *Proceedings of the 2003 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition*, 2003, pp. 10401-10408.
- [18] M. Alqrimli Fadhil & H. Takleef Kadhum, "A Study of Harmonics in Pulse Width Modulation Power Inverter as a Motor Drive", *Aust. J. Basic and Appl Sci*, pp. 53-63, 2015.
- [19] H. Obara, H. Oguri & Y. Sato, "Theoretical Analysis of Harmonics in PWM Output Waveform of Multi-Level Inverters", *Electrical Engineering in Japan*, vol. 134-D, no. 1 pp. 59-67, Enero 2014.
- [20] N. Eghtedarpour, M. A. Karimi and M. Tavakoli, "Harmonic resonance in power systems - a documented case", *2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Bucharest, 2014, pp. 857-861
- [21] "Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks. I. Concepts, models, and simulation techniques," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 1, pp. 452-465, Jan. 1996.
- [22] Wilsun Xu, Zhenyu Huang, Yu Cui and Haizhen Wang, "Harmonic resonance mode analysis," *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005*, San Francisco, CA, 2005, pp. 2236.
- [23] J. Churio, "Estrategias de Optimización Para el Diseño de Filtros Pasivos" Trabajo fin de Máster, Depto. de Ingeniería Eléctrica, US, Sevilla, 2010.

## Bibliografía

- [24] Compensación del Factor de Potencia y Control de Armónicas en Redes Industriales, IPD-411, Depto. de Electrónica, USM, 2018.
- [25] Yao Xiao, Jie Zhao and Shijie Mao, "Theory for the design of C-type filter," *2004 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power (IEEE Cat. No.04EX951)*, Lake Placid, NY, USA, 2004, pp. 11-15.
- [26] M. Ghadimi, A. Ramezani and K. Bozorgi, "Energy Efficiency and Power Quality Optimization Using a Modified Capacitor Bank: An Industrial Case Study," *2009 Third UKSim European Symposium on Computer Modeling and Simulation*, Athens, 2009, pp. 384-388.
- [27] "Harmonic Filter Bank Tuning; Tuned & De-Tuned Banks", Northeast Power Systems, Inc. Queensbury, New York 12804, 2012.
- [28] L. Gumilar, A. Kusumawardana and M. A. Habibi, "Influence of Detuned Reactor Placement to Power Quality Enhancement in Industrial Customers Distribution Network," *2020 10th Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS)*, Malang, Indonesia, 2020, pp. 15-20.
- [29] F. A. Santoso, " A Comparative Study of Single-Tuned Filter and Detuned Reactor for Improve Power Quality in Microgrid", *1st International Conference on Advanced Engineering and Technology*, Suabaya, Indonesia, 2018.
- [30] "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," in *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)* , vol., no., pp.1-29, 11 June 2014
- [31] McGranaghan and Beaulieu, "Update on IEC 61000-3-6: Harmonic Emission Limits for Customers Connected to MV, HV, and EHV," *2005/2006 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, Dallas, TX, 2006, pp. 1158-1161.
- [32] A. Tejada, A. LLamas, (Enero, 2010). "Efectos de las armónicas en los sistemas eléctricos". Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/228711468\\_Efectos\\_de\\_las\\_Armonicas\\_en\\_los\\_Sistemas\\_Electricos](https://www.researchgate.net/publication/228711468_Efectos_de_las_Armonicas_en_los_Sistemas_Electricos).
- [33] IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid-Immersed and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal

## Bibliografía

- Load Currents," in *IEEE Std C57.110™-2018 (Revision of IEEE Std C57.110-2008)*, vol., no., pp.1-68, 31 Oct. 2018.
- [34] J. Faiz, B. M. Ebrahimi and M. Ghofrani, "Mixed Derating of Distribution Transformers Under Unbalanced Supply Voltage and Nonlinear Load Conditions Using TSFEM," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 2, pp. 780-789, April 2010.
- [35] R. Singh and A. Singh, "Aging of distribution transformers due to harmonics," *Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010*, Bergamo, Italy, 2010, pp. 1-8.
- [36] E. Cazacu and L. Petrescu, "Derating the three-phase power distribution transformers under nonsinusoidal operating conditions: A case study," *2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Bucharest, Romania, 2014.
- [37] D. F. Valencia, E. C. Quispe and V. Sousa, "Estudio del efecto de la distorsión armónica de tensión sobre la operación del motor trifásico de inducción en estado estacionario", *Energética*, vol. 43. pp 63-73. Jun. 2014.
- [38] P. G. Cummings, "Estimating Effect of System Harmonics on Losses and Temperature Rise of Squirrel-Cage Motors," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-22, no. 6, pp. 1121-1126, Nov. 1986, doi: 10.1109/TIA.1986.4504843.
- [39] P. Donolo, M. Pezzani, G. Bossio, E. C. Quispe, D. Valencia and V. Sousa, "Impact of Voltage Waveform on the Losses and Performance of Energy Efficiency Induction Motors," *2018 IEEE ANDESCON*, Santiago de Cali, Colombia, 2018, pp. 1-4
- [40] V. Sousa Santos, "Procedimiento Para Determinar la Eficiencia de Motores Asincrónicos en Presencia de Desbalance y Armónicos en la Tensión", Tesis en Opción al Grado de Científico de Doctor en Ciencias Técnicas", Depto. de Electroenergética, UCLV, Santa Clara, 2014.
- [41] V. Sousa Santos, "Análisis de eficiencia de motores asincrónicos en presencia de desbalances y armónicos en la tensión", *Ingeniería Energética*, vol. XXXIV, núm. 2, pp. 163-173, mayo-agosto 2013.
- [42] A. H. Bonnett and G. C. Soukup, "NEMA motor-generator standards for three-phase induction motors," in *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 5, no. 3,

## Bibliografía

- pp. 49-63, May-June 1999.
- [43] K. O'Connell, M. Battett, J. Blackledge and A. Sung, "Cable Heating Effects due to Harmonic Distortion in Electrical Installations" in Proceedings of the World Congress on Engineering 2012 Vol II WCE 2012, London, U.K.
- [44] A. Hiranandani, "Calculation of cable ampacities including the effects of harmonics," in *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 4, no. 2, pp. 42-51, March-April 1998.
- [45] C. Demoulias, D. P. Labridis, P. S. Dokopoulos and K. Gouramanis, "Ampacity of Low-Voltage Power Cables Under Nonsinusoidal Currents," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 1, pp. 584-594, Jan. 2007.
- [46] A. Hiranandani, "Calculation of conductor temperatures and ampacities of cable systems using a generalized finite difference model," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 1, pp. 15-24, Jan. 1991.
- [47] J. Suárez, G. di Mauro, D. Anaut y C. Agüero, "Parámetros que Afectan la Corriente de Neutro en Presencia de Armónicos", *Información Tecnológica*, Vol. 21, pp. 77-89, 2010.
- [48] SEC - División de Ingeniería de Electricidad, "Reglamento de Seguridad de las Instalaciones de Consumo de Energía Eléctrica - Decreto 08, Pliego normativo RIC N°4: Conductores Materiales y Sistemas de Canalización", Enero 2019.
- [49] A. R. Al-Zyoud, A. Khraiwish and M. Shakarchi, "Protective Relays Performance in a Harmonic Environment," *Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference*, Newcastle upon Tyne, UK, 2006, pp. 890-893
- [50] A. Benjamin and S. K. Jain, "A Review of Literature on Effects of Harmonics on Protective Relays," *2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*, Singapore, 2018, pp. 407-412
- [51] P. M. Donohue and S. Islam, "The Effect of Nonsinusoidal Current Waveforms on Electromechanical and Solid-State Overcurrent Relay Operation," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 6, pp. 2127-2133, Nov.-Dec. 2010
- [52] F. De La Rosa, "*Harmonics and Power Systems*", FL Boca Raton, CRC Press, 2006.

## Bibliografía

- [53] "IEEE Standard for Shunt Power Capacitors," in *IEEE Std 18-2012 (Revision of IEEE Std 18-2002)* , vol., no., pp.1-39, 15 Feb. 2013.
- [54] J. Kepka, " Reactive Power Compensation", Master Thesis, Faculty of Electrical Engineering, Wroclaw University of Technology, Poland.
- [55] UNE-EN 61000-2-4, "Compatibilidad Electromagnética (EMC). Parte 2-4 Entorno: Niveles de Compatibilidad Para las Perturbaciones Conducidas a Baja Frecuencia en las Instalaciones Industriales", Mayo 2004.
- [56] Cicutor " Analizador de Redes CIR-e+ Manual de Instrucciones" M062B01-01-16, Septiembre 2016.

**ANEXOS**

**A.1 Espectro armónico escenario N°1 y N°2.**

Las figuras A.1.1 y A.1.2 muestran el espectro armónico en tensión registrado por el instrumento *CIR-E+* en la fecha y hora simulados en las secciones 3.6.1 y 3.6.2 respectivamente. De igual forma las figuras A.1.3 y A.1.4 muestran el espectro armónico en corriente correspondiente. En las mediciones el banco de condensadores estaba conectado.

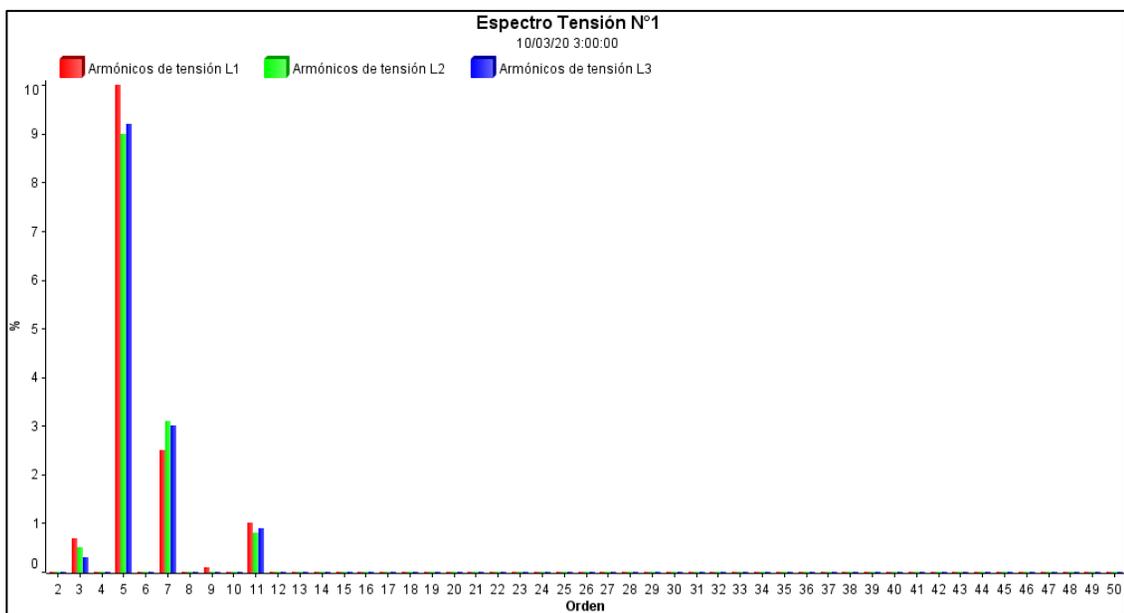


Figura A.1.1. Espectro armónico en tensión N°1.

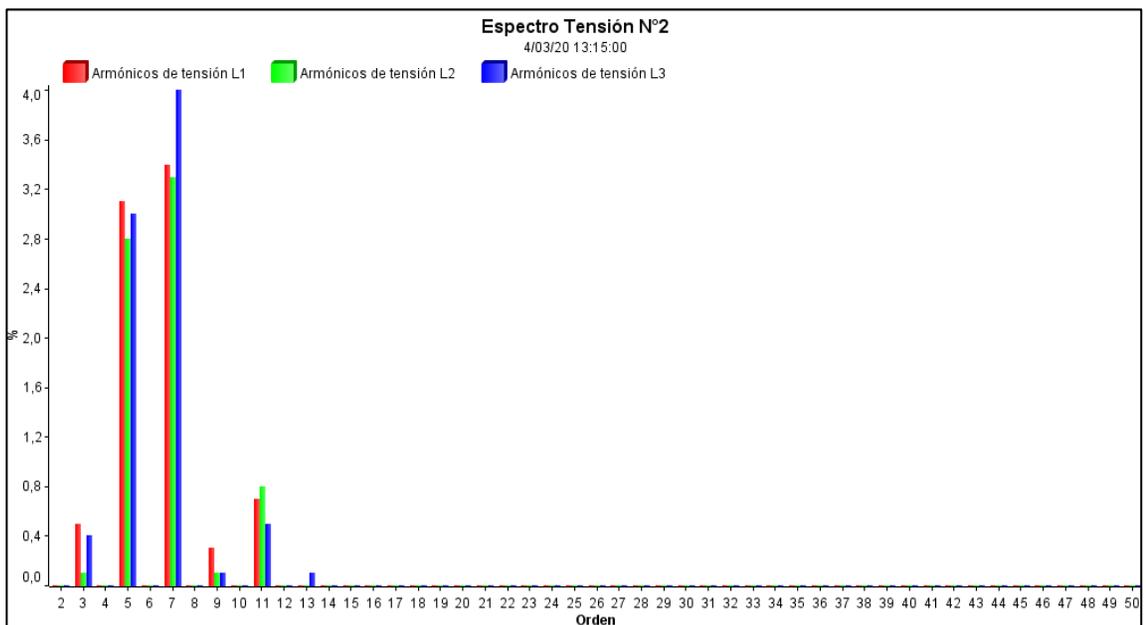


Figura A.1.2. Espectro armónico en tensión N°2.

Anexo

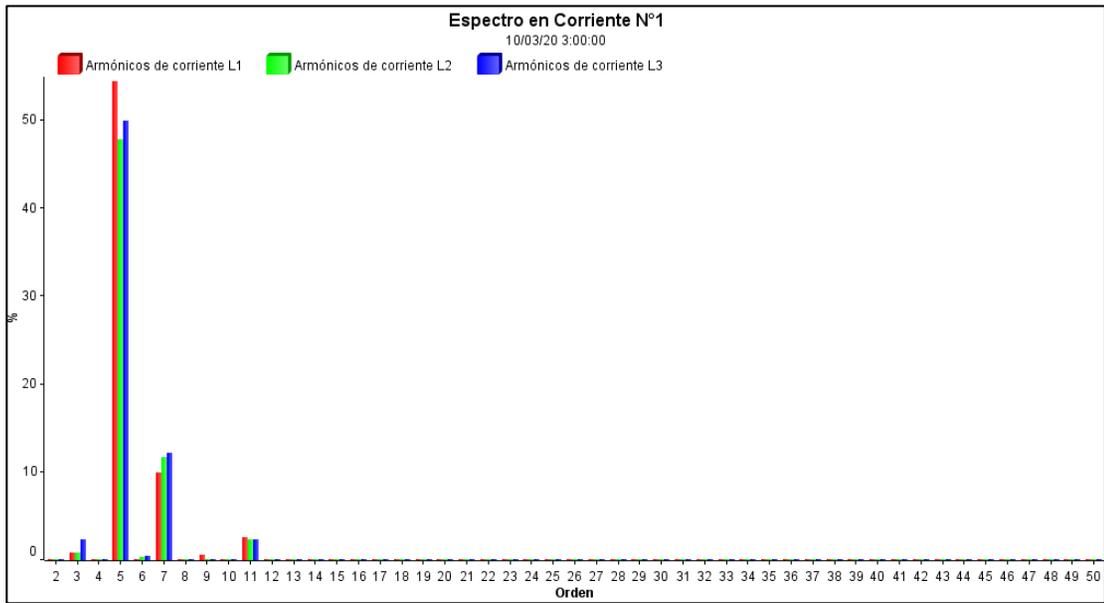


Figura A.1.3. Espectro armónico en corriente N°1.

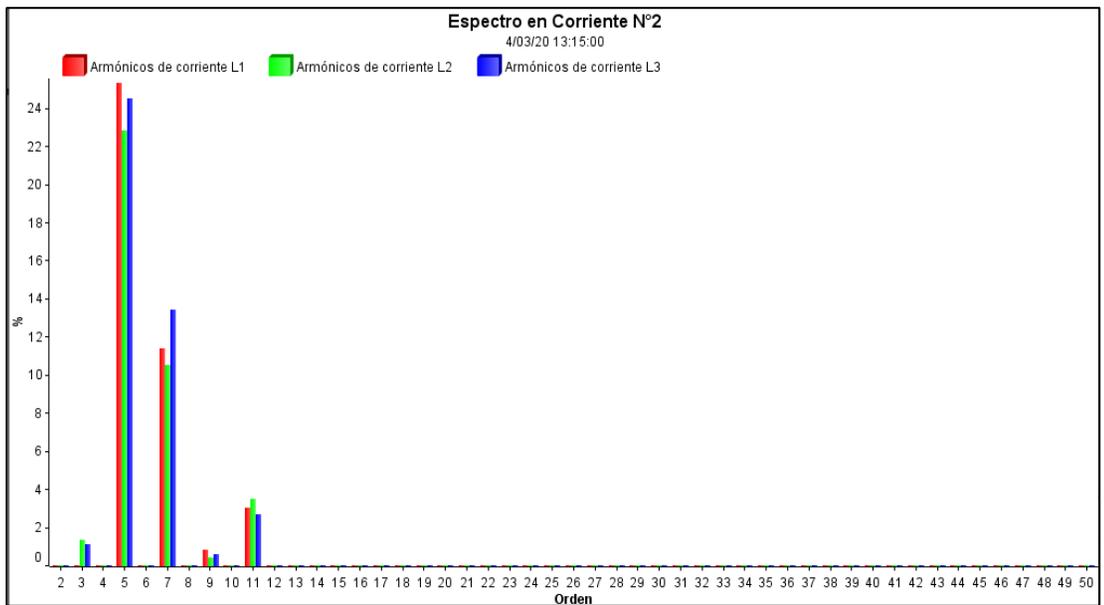


Figura A.1.4. Espectro armónico en corriente N°2.

## A.2 Datos de corto circuito para simulación de red externa.

Las figuras A.2.1 muestra los niveles de cortocircuito entregados por CGE y que fueron utilizados para modelar la red externa en la sección 3.6.

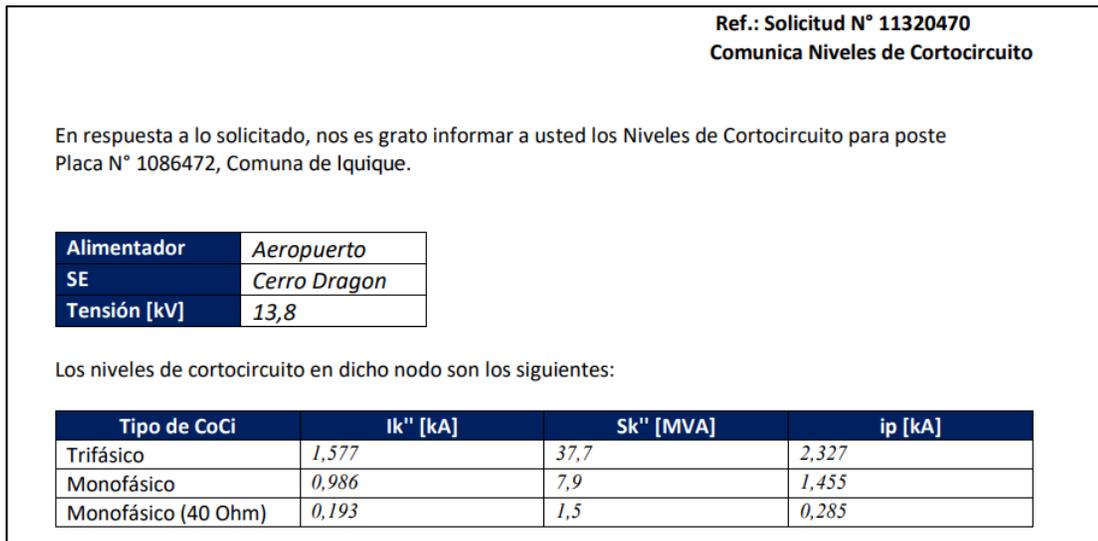


Figura A.2.1. Niveles de corto circuito para red externa.

## A.3 Modelos para reactancias y condensadores.

La tabla A.3.1 muestra los modelos del fabricante Circutor para condensadores y reactancias requeridos según los cálculos realizados en la sección 3.5.

Tabla A.3.1. Modelos de reactancias y condensadores para filtro antirresonante.

Etapa	Condensador	Reactancia	$I_n$ [A]	$Q_c$ total por etapa [Kvar]
1-6	CIZ-FP-46/30-HD	RBZ-25-400	36	25
7-8	2 x CIZ-FP-46/19-HD	RBZ-30-400	43	30
9-11	2 x CIZ-FP-46/19-HD	RBZ-30-400	43	30
	CIZ-FP-46/6,25-HD	RZ-5-400	7,2	5
12	2 x CIZ-FP-46/25-HD	RBZ-40-400	58	40

Nota: las características completas están disponibles en [http://circutor.cat/docs/FT\\_RZ-RBZ\\_ES.pdf](http://circutor.cat/docs/FT_RZ-RBZ_ES.pdf) y [http://circutor.com/docs/FT\\_CLZ-FP-HD\\_SP.pdf](http://circutor.com/docs/FT_CLZ-FP-HD_SP.pdf).