



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

MODALIDAD: INFORME DE INVESTIGACIÓN

Título:

“Análisis de calidad de energía para mejorar los aspectos técnicos responsabilidad del consumidor en las dos estaciones de bombeo del Sistema Quillán Alemania de la EP-EMAPA-A.”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de magister en Electricidad
mención sistemas eléctricos de potencia

Autor:

Ing. Luis Ricardo Curipoma Díaz

Tutor:

Mgs. Jefferson Alberto Porras Reyes

LATACUNGA –ECUADOR

2024

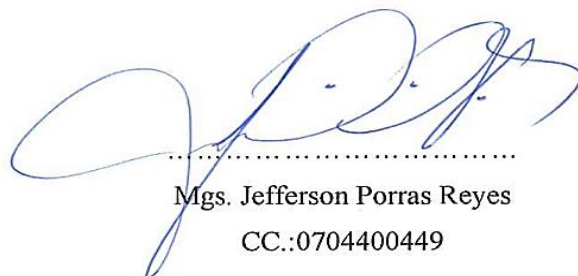
AVAL DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “Análisis de calidad de energía para mejorar los aspectos técnicos responsabilidad del consumidor en las dos estaciones de bombeo del sistema Quillán Alemania de la EP-EMAPA-A.” presentado por Curipoma Díaz Luis Ricardo para optar por el título magíster en Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia.

CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, agosto 12 2024.



.....
Mgs. Jefferson Porras Reyes
CC.:0704400449

AVAL DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: “Análisis de calidad de energía para mejorar los aspectos técnicos responsabilidad del consumidor en las dos estaciones de bombeo del sistema Quillán Alemania de la EP-EMAPA-A.”, ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de Magíster Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

Latacunga, agosto 12 2024.

.....
Ing. Luis Eduardo Hinojosa Guanoluisa Mg.

C.I. 0502365810

Presidente del tribunal

.....
Ing. Carlos Iván Quinatoa Caiza Mg.

C.I. 0503287864

Lector 2

.....
Ing. Fernando Rafael Arjas Atiaja Mg.

C.I. 0502556251

Lector 3

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios por la fortaleza, a mi familia por su apoyo incondicional y a la Universidad Técnica de Cotopaxi por su formación académica.

Luis Ricardo

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación.

Latacunga, agosto 12 2024.



Luis Ricardo Curipoma Díaz

1804780508

RENUNCIA DE DERECHOS

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, agosto 12 2024.



Luis Ricardo Curipoma Díaz

1804780508

AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: “Análisis de calidad de energía para mejorar los aspectos técnicos responsabilidad del consumidor en las dos estaciones de bombeo del sistema Quillán Alemania de la EP-EMAPA-A.” contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, agosto 12 2024



.....
Ing. Luis Eduardo Hinojosa Guanoluisa Mg.

C.I. 0502365810

AUTORIZACIÓN EMAPA



En mi calidad de Jefe de la Unidad de Electromecánica de la Empresa Pública Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ambato autorizo al Ing. Luis Ricardo Curipoma Díaz, Analista Técnico de la Unidad, a realizar la toma de datos en las Estaciones de Bombeo Quillán 1 y Quillán 2 con el fin de realizar la investigación que titula: “Análisis de calidad de energía para mejorar los aspectos técnicos responsabilidad del consumidor en las dos estaciones de bombeo del sistema Quillán Alemania de la EP-EMAPA-A.” para optar por el título magíster en Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia en la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Ambato, agosto 12 2024.



Ing. Fernando Alex Luna Oñate

CC.:0401471180



TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
GRADUATE SCHOOL
MASTER'S DEGREE IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS

Title: "Power quality analysis to improve the technical aspects of consumer responsibility in the two pumping stations of the Quillán Alemania System of the EP-EMAPA-A."

Author: Curipoma Díaz Luis Ricardo

Tutor: Jefferson Porras Reyes Mgs.

ABSTRACT

The current problem of industries when using equipment that works by power electronics is the harmonic pollution generated, the purpose of this work is to know through a power quality analysis, the representative harmonics generated by non-linear loads, 6-pulse variations, installed in two pumping stations, located in the Ambato city, Province of Tungurahua, with the purpose to evaluate compliance with the parameters of individual harmonic current distortion and total demand distortion, as established in Chapter V Quality Consumer Responsibility of Regulation No. ARCERNNR-002/20. Once the system's current state, which has a total power of 738kVA, has been determined, the quality parameters that do not comply with the regulation are established. Through simulation in the ETAP program, the reduction of harmonic contamination levels is verified by incorporating passive filters tuned to the most representative harmonics, which in the case of the two pumping stations are the 5th and 7th harmonic. Once the results have been evaluated, with the incorporation of passive filters in each pumping station, a decrease in the total demand distortion from 28.54% to 6.25% and from 31.47% to 7.16% is obtained, these values being lower than the 8% established in the regulation.

KEYWORD: Harmonics; Individual harmonic distortion; Demand distortion; Passive filters.

Yo, Alison Vanessa Taco Andrade con cédula de identidad número: 1803777166. Licenciada en: PEDAGOGÍA DEL IDIOMA INGLÉS con número de registro de la SENESCYT: 1010-2022-2447249 ; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: **"Análisis de calidad de energía para mejorar los aspectos técnicos responsabilidad del consumidor en las dos estaciones de bombeo del Sistema Quillán Alemania de la EP-EMAPA-A."**de: Luis Ricardo Curipoma Díaz aspirante a Magister en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

Ambato, Agosto, 10, 2024



.....
Alison Vanessa Taco Andrade
1803777166

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	1
Antecedentes.....	1
Planteamiento del problema.....	2
Formulación del problema.....	3
Objetivo General.....	3
Objetivos Específicos:.....	4
Justificación.....	6
Hipótesis.....	6
CAPÍTULO I.....	7
1.1. Antecedentes de la investigación y estado del arte.....	7
1.2. Fundamentación Teórica.....	9
1.2.1. Sistemas de distribución.....	9
1.2.2. Elementos del sistema de distribución.....	10
1.2.2.1. Subestación de distribución.....	10
1.2.2.2. Circuitos primarios.....	10
1.2.2.3. Sistema secundario de distribución.....	11
1.2.3. Calidad de energía.....	11
1.2.4. Tipos de problemas relacionados con calidad de energía.....	11
1.2.4.1. Transitorios.....	12
1.2.4.2. Variaciones de voltaje de corta duración.....	13
1.2.4.3. Variaciones de voltaje de larga duración.....	15
1.2.4.4. Desbalance de voltaje.....	15
1.2.4.5. Distorsión de forma de onda.....	16
1.2.4.6. Fluctuaciones de voltaje.....	19
1.2.4.7. Fluctuaciones de frecuencia.....	19

1.2.5.	Sistemas Eléctricos Industriales.....	19
1.2.6.	Tipos de cargas.....	20
1.2.7.	Normativa.....	21
1.2.7.1.	Parámetros de calidad de producto de la distribuidora.....	21
1.2.7.2.	Parámetro de calidad responsabilidad del consumidor[29].	24
1.2.8.	Evaluación de contaminación armónica.....	26
1.2.9.	Mitigación de contaminación armónica en usuarios finales.....	28
1.2.9.1.	Reactor de línea.....	29
1.2.9.2.	Filtros pasivos.....	30
1.2.9.3.	Dimensionamiento de filtro pasivo [34].	32
1.2.9.4.	Filtros activos.....	37
1.3.	Fundamentación metodológica.....	39
1.3.1.	Modalidad de investigación.....	39
1.3.2.	Tipos de investigación.....	39
1.3.2.1.	Investigación documental.....	40
1.3.2.2.	Investigación de campo.....	40
1.3.2.3.	Investigación descriptiva.....	40
1.3.3.	Métodos de la investigación.....	40
1.3.3.1.	Método deductivo.....	40
1.3.3.2.	Método descriptivo.....	40
1.3.3.3.	Método experimental.....	40
1.3.4.	Técnicas e instrumentos de la investigación.....	41
1.3.4.1.	Mediciones.....	41
1.3.4.2.	Experimento.....	41
1.4.	Conclusiones.....	41
CAPÍTULO II.....		43

2.1.	Título del proyecto.	43
2.2.	Objetivo del proyecto.	43
2.3.	Descripción de la propuesta.	43
2.4.	Metodología.	45
2.4.1.	Definición de los puntos de medición.	45
2.4.2.	Simulación de estado actual de la red.	50
2.4.2.1.	Flujo de potencia.	57
2.4.2.2.	Flujo armónico.	58
2.4.3.	Dimensionamiento del filtro.	62
2.5.	Conclusiones.	77
CAPÍTULO III.		79
3.1.	Análisis de los resultados.	79
3.2.	Validación técnica.	86
3.3.	Análisis económico.	88
3.3.1.	Viabilidad del proyecto.	89
3.4.	Conclusiones.	91
CONCLUSIONES GENERALES.		92
RECOMENDACIONES.		93
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.		94
ANEXOS.		98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama Ishikawa del planteamiento del problema.....	2
Figura 2 Impulso transitorio [24].	12
Figura 3 Transitorio oscilatorio [24].	13
Figura 4 Hueco de voltaje (Sag) [22]	13
Figura 5 Elevación de voltaje (Swell) [23].	14
Figura 6 Interrupciones de corta duración [23].	14
Figura 7 Desbalance de voltaje [25].	16
Figura 8 Componente de continua DC-Offset	16
Figura 9 Onda distorsionada por armónico de orden 3.	17
Figura 10 Muestras causadas por un convertidor [21].	18
Figura 11 Señal de voltaje con ruido [23].	18
Figura 12 Efecto Flicker en la onda de voltaje [24].	19
Figura 13 Relación voltaje corriente de cargas lineales.	20
Figura 14 Señal resultante en una carga no lineal	21
Figura 15 PCC en lado primario del transformador [21].	27
Figura 16 PCC en lado secundario del transformador [21].	27
Figura 17 Instalación de reactores de línea [33].	29
Figura 18 Impedancia vs frecuencia filtro sintonizado [36].	30
Figura 19 Configuración de un filtro de sintonía simple.	31
Figura 20 Filtro pasivo paralelo [37].	31
Figura 21 Filtro pasivo en serie [37].	32
Figura 22 Aplicación de un filtro activo a una carga no lineal [21].	38
Figura 23 Cuarto de máquinas Quillán 1.	44
Figura 24 Cuarto de máquinas Quillán 2.	44
Figura 25 Diagrama de flujo para realizar la investigación.	46
Figura 26 Instalación de registrador en la estación de bombeo Quillán 1.	47
Figura 27 Instalación de registrador en la estación de bombeo Quillán 2.	47
Figura 28 Elaboración del sistema eléctrico Quillán Alemania.....	51
Figura 29 Ingreso de datos de la red de potencia.	51
Figura 30 Ingreso de datos de cables de medio voltaje.....	52
Figura 31 Ingreso de datos de transformadores	52

Figura 32 Ingreso de datos de cables de bajo voltaje.....	52
Figura 33 Ingreso de datos de variadores de frecuencia.....	53
Figura 34 Ingreso de datos de motores.....	53
Figura 35 Espectro armónico Variador Schneider ATV930 - BQ101.....	54
Figura 36 Espectro armónico Variador NIDEC M600 - BQ102.....	54
Figura 37 Espectro armónico Variador NIDEC M600 - BQ202.....	54
Figura 38 Espectro armónico Variador Schneider ATV930 - BQ204.....	55
Figura 39 Ingreso de datos Variador BQ101.....	55
Figura 40 Ingreso de datos Variador BQ102.....	56
Figura 41 Ingreso de datos Variador BQ202.....	56
Figura 42 Ingreso de datos Variador BQ204.....	57
Figura 43 Flujo de potencia del Sistema Quillán Alemania.....	58
Figura 44 Forma de onda de corriente en el Transformador de Quillán 1.....	59
Figura 45 Espectro armónico de corriente en el Transformador Quillán 1.....	59
Figura 46 Forma de onda de corriente en el Transformador de Quillán 2.....	60
Figura 47 Espectro armónico de corriente en el Transformador de Quillán 2.....	60
Figura 48 Filtro 5to armónico Quillán 1.....	80
Figura 49 Filtro 5to armónico Quillán 2.....	80
Figura 50 Forma de onda de la estación Quillán 1 con filtro sintonizado al 5to armónico.....	81
Figura 51 Espectro armónico resultante con filtro sintonizado al 5to armónico. .	81
Figura 52 Forma de onda de la estación Quillán 2 con filtro sintonizado al 5to armónico.....	82
Figura 53 Espectro armónico resultante con filtro sintonizado al 5to armónico. .	82
Figura 54 Forma de onda de la estación Quillán 1 con filtros sintonizados al 5to y 7mo armónico.....	84
Figura 55 Espectro armónico resultante con filtros sintonizados al 5to y 7mo armónico.....	84
Figura 56 Forma de onda de la estación Quillán 2 con filtros sintonizados al 5to y 7mo armónico.....	85
Figura 57 Espectro armónico resultante con filtros sintonizados al 5to y 7mo armónico.....	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Límites de Nivel de Voltaje [29].....	22
Tabla 2 Límites máximos de armónicos de voltaje (% del voltaje nominal) [29].	23
Tabla 3 Niveles máximos de distorsión armónica de corriente [29].....	25
Tabla 4 Datos de demanda Estación de Bombeo Quillán 1	48
Tabla 5 Datos de demanda Estación de Bombeo Quillán 2.....	48
Tabla 6 Valores de cortocircuito proporcionados por la EEASA.....	49
Tabla 7 Valores de cortocircuito en la barra de bajo voltaje de cada transformador.	49
Tabla 8 Límites de armónicos para el caso de estudio.....	50
Tabla 9 Resumen de los armónicos que incumplen la Regulación 002-20.....	50
Tabla 10 Variador conectado a cada equipo de bombeo.....	53
Tabla 11 Resultados de la simulación y las mediciones realizadas.	58
Tabla 12 Porcentaje corriente armónica.....	60
Tabla 13 Porcentaje corriente armónica (continuación).	61
Tabla 14 Porcentaje corriente armónica (continuación).	61
Tabla 15 Porcentaje corriente armónica (continuación).	61
Tabla 16 Porcentaje corriente armónica (continuación).	61
Tabla 17 Porcentaje corriente armónica (continuación).	61
Tabla 18 Contaminación armónica generada.	62
Tabla 19 Resultados del flujo de potencia.	62
Tabla 20 Resultados del flujo de potencia.	70
Tabla 21 Filtros sintonizados al 5to armónico.	79
Tabla 22 Resultados de la simulación del filtro sintonizado al 5to armónico.	83
Tabla 23 Filtros sintonizados al 7mo armónico.	83
Tabla 24 Resultados de la simulación de los filtros sintonizados al 5to y 7mo armónico.....	86
Tabla 25 Resultados en el sistema eléctrico de las estaciones de bombeo con la implementación de los filtros.....	86
Tabla 26 Pérdidas por efecto Joule sin la incorporación de filtros.	87
Tabla 27 Pérdidas por efecto Joule con la incorporación de filtros.	87

Tabla 28 Cargos por energía consumida de la tarifa con demanda horaria para el bombeo de agua.....	87
Tabla 29 Presupuesto referencial	89
Tabla 30 Flujo de efectivo neto proyectado a 5 años.....	90
Tabla 31 Resultados VAN y TIR.....	90

INTRODUCCIÓN

El sistema eléctrico de distribución se ve afectado por el incremento de cargas en sus alimentadores, la mayoría de estas cargas son no lineales, las que, por el comportamiento de su electrónica de potencia, provocan distorsión de onda tanto de voltaje como de corriente en el punto de acoplamiento de las cargas.

Las distorsiones provocadas por el funcionamiento de las cargas no lineales generan diversos problemas en los diferentes elementos del sistema eléctrico, como es calentamiento de conductores, disparo inesperado de protecciones, disminución en el rendimiento de transformadores y motores, errores en los sistemas de medición y control.

Actualmente, la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (ARCERNNR) en su regulación 002/20 establece los límites de distorsión armónica de corriente que deben cumplir los consumidores en el punto de acoplamiento de la carga, con el fin de evitar la contaminación armónica en la red de distribución y que afectaría a los usuarios conectados al mismo alimentador de una carga contaminante.

En el desarrollo del proyecto se determinará los valores de distorsión armónica de corriente en una infraestructura industrial, específicamente dos estaciones de bombeo pertenecientes a la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ambato, y establecer las posibles soluciones para alcanzar los límites establecidos en la Regulación ARCERNNR 002/20.

Antecedentes.

El proyecto se enmarca en la línea de investigación de Energías Alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental de la maestría en Electricidad de la Universidad Técnica de Cotopaxi, dentro de la sub línea de explotación y diseño de sistemas de potencia con una temática correspondiente a la Calidad de Energía.

Los análisis de calidad de energía en las infraestructuras industriales se realizan con un enfoque en el cumplimiento de las obligaciones establecidas en las Regulaciones emitidas por la ARCERNNR, por lo que, la presente investigación enmarca, en cumplir los límites exigidos en la Regulación 002/20.

Planteamiento del problema.

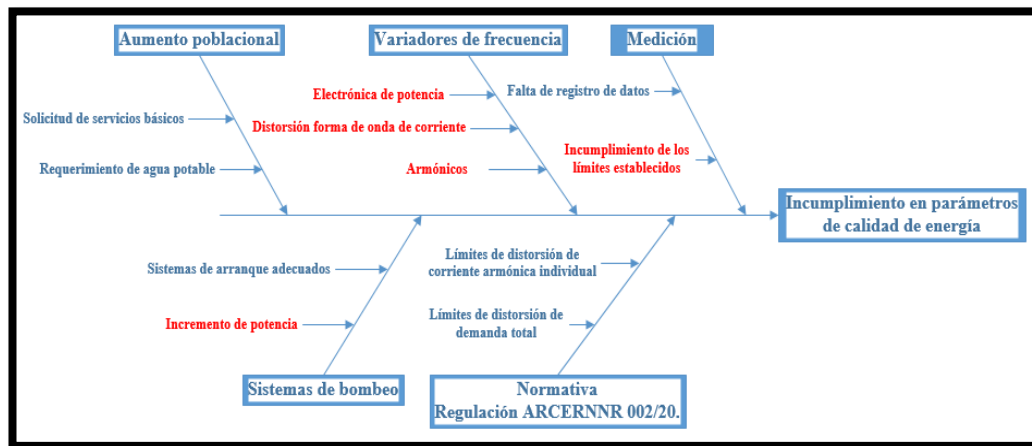


Figura 1 Diagrama Ishikawa del planteamiento del problema.

Durante el transcurso del tiempo se ha incrementado el consumo de energía debido al aumento poblacional, aumento de industrias que cubren las necesidades tecnológicas de los habitantes y mantienen un estatus de vida aceptable; al considerar el aumento poblacional se debe considerar también el incremento de la capacidad de los servicios básicos de los habitantes como es el requerimiento propio de energía eléctrica y otros servicios que requieren electricidad para la distribución del servicio como es la distribución de agua potable.

En los últimos años la ciudad de Ambato ha sufrido un aumento en su población, ejemplo de ello es el incremento de solicitudes de servicio de agua potable ya que de enero 2022 a enero 2024 se han incrementado 4372 nuevas cuentas, por lo que, la Empresa Pública Municipal de Agua Potable de Ambato (EP-EMAPA-A) ha tenido la necesidad de aumentar la capacidad de los sistemas de bombeo para poder distribuir el servicio de agua potable a sus usuarios, consecuentemente se presenta incremento en la potencia de los motores existentes.

Con el incremento de potencia de los equipos de bombeo es necesario la utilización de sistemas adecuados que disminuyan la corriente de arranque de los motores para no repercutir en caídas de voltaje severas en el sistema de distribución, actualmente, para el arranque de motores de mediana y gran potencia se utilizan variadores de frecuencia con lo que se logra el aumento o disminución de la velocidad del motor de una forma lineal variando la frecuencia de salida hacia el motor con respecto al tiempo.

La utilización de la electrónica de potencia en los variadores de frecuencia repercute en la distorsión de la onda sinusoidal de corriente, lo cual afecta a parámetros de calidad de energía, como son la distorsión armónica individual de corriente y la distorsión de demanda total, parámetro que es obligación del consumidor y es controlado por la empresa distribuidora de energía y que si no se cumplen los límites establecidos implican en sanciones, además se presentan problemas técnicos en las instalaciones internas de las estaciones de bombeo como recalentamiento de conductores, corrientes en los conductores de tierra, disparo de protecciones que reducen el rendimiento de los diferentes elementos del sistema eléctrico.

Formulación del problema.

¿En qué medida el estudio de contenido armónico favorece en la calidad de energía responsabilidad del consumidor en las dos Estaciones de Bombeo del Sistema Quillán Alemania de la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ambato?

Objetivo General.

Realizar el estudio de calidad de energía mediante el análisis de contenido armónico en las dos Estaciones de Bombeo del Sistema Quillán Alemania de la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ambato con el fin mejorar los aspectos técnicos responsabilidad del consumidor establecidos en la Regulación 002/20 de la ARCERNNR

Objetivos Específicos:

1. Realizar el estado del arte de los parámetros de calidad de energía enfocado en los aspectos técnicos responsabilidad del consumidor.
2. Recolectar los datos referentes a la calidad de energía y simular el estado eléctrico actual de las dos estaciones de bombeo con el fin de determinar los filtros necesarios que reduzcan la contaminación armónica generada.
3. Analizar los aspectos técnicos responsabilidad del consumidor de las estaciones de bombeo mediante la simulación en software con la incorporación de los filtros diseñados.

Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos.

Objetivos específicos	Actividad (tareas)	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)
Realizar el estado del arte de los parámetros de calidad de energía enfocado en los aspectos técnicos responsabilidad del consumidor.	Revisión de literatura en libros, artículos científicos, manuales técnicos y digitales en la web referentes a calidad de energía. Revisión de literatura y normativa referentes a las formas de mitigación de contaminación armónica.	Conocimiento de la influencia de la distorsión armónica en el los elementos de los sistemas eléctricos. Revisión de alternativas para corregir la contaminación armónica generada.	Investigación en libros, artículos, manuales técnicos de equipos, regulaciones en lo que respecta a la distorsión armónica de corriente y sus sistemas de corrección.

<p>Recolectar los datos referentes a la calidad de energía y simular el estado eléctrico actual de las dos estaciones de bombeo con el fin de determinar los filtros necesarios que reduzcan la contaminación armónica generada.</p>	<p>Revisión de los datos recolectados y análisis de los resultados de la simulación del estado eléctrico actual de las dos estaciones de bombeo. Diseño de los filtros para corregir la distorsión armónica de corriente del sistema eléctrico de las dos estaciones de bombeo.</p>	<p>Obtención de los niveles armónicos en las dos estaciones de bombeo. Cálculo de los parámetros de diseño de los filtros necesarios para la corrección del nivel de distorsión armónico encontrados.</p>	<p>Simulación del sistema eléctrico actual de las estaciones de bombeo mediante software y el diseño de los filtros necesarios para la reducción del nivel de la distorsión armónica de corriente.</p>
<p>Analizar los aspectos técnicos responsabilidad del consumidor de las estaciones de bombeo mediante la simulación en software con la incorporación de los filtros diseñados.</p>	<p>Incorporación de los filtros diseñados en la simulación del sistema eléctrico de las estaciones de bombeo. Análisis de los aspectos técnicos responsabilidad del consumidor de las estaciones de bombeo.</p>	<p>Identificación del cumplimiento de los aspectos técnicos responsabilidad del consumidor en los resultados de simulación con la incorporación de los filtros para la corrección de la distorsión armónica de corriente.</p>	<p>Simulación de los filtros determinados según el nivel de contaminación armónica de cada estación.</p>

Justificación.

Las empresas distribuidoras son las responsables de la distribución de energía eléctrica a los usuarios finales, ya sean residenciales, comerciales e industriales, esta energía entregada debe cumplir ciertos parámetros de calidad en cuanto a niveles de voltaje, flicker, distorsión armónica de voltaje y el desequilibrio de voltaje; sin embargo el consumidor también debe cumplir ciertos parámetros de calidad como es el valor de la distorsión armónica de corriente y la distorsión de demanda total, establecidos en la Regulación No. ARCERNNR - 002/20

Al realizar el análisis de calidad de energía se establecen los índices de calidad que están por debajo de los límites exigidos para el consumidor y así evitar sanciones económicas por parte de la empresa distribuidora y además mejorar las condiciones del sistema eléctrico de las estaciones de bombeo y evitar contaminaciones a la red de la distribuidora que puede llegar a afectar a usuarios aledaños a un punto contaminante.

Con la presente investigación se pretende verificar mediante la simulación del sistema eléctrico el cumplimiento de los aspectos de calidad responsabilidad del consumidor.

Hipótesis.

El análisis de calidad de energía y la simulación del sistema eléctrico de las estaciones de bombeo permite la verificación del cumplimiento de los aspectos de calidad responsabilidad del consumidor establecidos en la Regulación No. ARCERNNR - 002/20.

CAPÍTULO I.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA- METODOLÓGICA.

1.1. Antecedentes de la investigación y estado del arte.

Debido a desarrollo de la tecnología especialmente en el ámbito eléctrico, se hace necesario la actualización de conocimientos a través de la investigación bibliográfica a nivel local e internacional, los desarrollos de interés para el presente trabajo se enmarcan en las soluciones a los problemas de calidad de energía a nivel industrial. Con este antecedente se citan varios estudios realizados respecto a calidad de energía.

La eficiencia de las actividades industriales depende de la calidad de energía en los sistemas de distribución, ya que la distorsión en estos sistemas afecta a las características de funcionamiento de los equipos, considerando la naturaleza operativa del sistema eléctrico de potencia. Los parámetros de calidad de energía en el sistema de distribución son distorsionados por las cargas conectadas al sistema, lo que es imposible evitar, sin embargo, las distorsiones deben estar dentro de unos límites que son dados por normas [1].

Los estudios de calidad de energía son realizados con el fin de que los sistemas eléctricos entreguen energía limpia y libre de perturbaciones a las cargas. Divide a las distorsiones en dos grupos las estacionarias y las no estacionarias, en donde una forma de onda que no se distorsiona con respecto al tiempo, como por ejemplo una distorsión debido a armónicos, se considera una distorsión estacionaria; mientras que cuando la forma de onda sufre cambios no periódicos

respecto al tiempo, por ejemplo, los sag de voltaje, se considera perturbaciones no estacionarias[2].

Las distorsiones de los parámetros de la calidad de energía son producidas, a más del incremento de generadores renovables, uso de las FACTS y HVDC, por los consumidores conectados al sistema de distribución de energía, que para el caso de usuarios industriales y comerciales son dispositivos electrónicos [2], [3], [4].

Para la mitigación de contaminación armónica se pueden emplear dos formas en donde la primera consiste en aislar los equipos sensibles de las generadoras de armónicos, sin embargo, en las instalaciones industriales se agrupan ambas cargas en donde las que sobresalen son las no lineales y para estos casos se requiere dispositivos externos que es la segunda forma de mitigación de armónicos [5].

La mitigación de armónicos principalmente los impares se logra mediante la implementación de reactancias de línea, usadas comúnmente como filtro de entrada en variadores de frecuencia con el fin de evitar sobretensiones en el sistema producida por estas cargas no lineales, sin embargo, este sistema de mitigación es satisfactorio en donde la contaminación armónica no excede de manera considerable los límites exigidos [5], [6], [7].

La implementación de filtros pasivos es una solución para la mitigación de gran contaminación armónica, el cual consta de resistencias, inductores y capacitores con los que se crea un circuito RLC cuya configuración depende de la necesidad de mitigación para ello se establecen filtros pasa bajas, pasa altas, rechazo de bandas y pasa banda [8], [9].

Los filtros activos son dinámicos y se adaptan de acuerdo a los requerimientos de mitigación armónica evitando problemas de resonancia, estos pueden ir conectados en serie o paralelo de acuerdo a la función requerida, por ejemplo los filtros activos en paralelo mitigan los armónicos de corriente y corrigen el factor de

potencia por otro lado los filtros activos en serie cancelan los armónicos de voltaje [9], [10].

En los sistemas industriales se establece la utilización de filtros unificados de potencia activa para la solución de problemas de calidad de energía, ya que el arreglo de este compensador consta de un filtro activo en serie el cual mantiene el voltaje de carga en fase con el voltaje del sistema, y un filtro activo en paralelo que es el encargado de mitigar las corrientes armónicas del sistema [11], [12], [13].

La presencia de distorsión armónica en un sistema eléctrico afecta a los diferentes equipos como es la operación de transformadores debido a que el núcleo se encuentra saturado, aumento de temperatura por efecto Joule en conductores debido a sobrecargas, interferencia en redes de comunicación, sobrevoltajes, elevación de temperatura en equipos; por estas razones se han establecido las diferentes regulaciones en donde se limitan los valores de contaminación armónica [14].

En un estudio realizado se determina que una red con un THD de 25.04% puede llegar a tener pérdidas de potencia de 2.16% y se presenta mayor consumo de potencia activa en las cargas lineales, debido a que la operación de este tipo de cargas depende de la frecuencia del sistema, también se resalta la corriente que circula por el neutro del sistema debido a los armónicos de secuencia homopolar dejando en evidencia que la eficiencia del sistema eléctrico se ve afectado con la presencia de cargas no lineales [15].

1.2. Fundamentación Teórica.

1.2.1. Sistemas de distribución.

El sistema de distribución (SD) es una de las etapas importantes del sistema de potencia (SEP), debido a que la potencia generada y transportada por las diferentes etapas del SEP, es entregada a los diferentes usuarios, que se

encuentran esparcidos en una gran extensión geográfica, mediante las redes de distribución eléctrica. La operación del sistema de distribución resulta más compleja que el de potencia debido a la variación y desbalance de las cargas [16].

1.2.2. Elementos del sistema de distribución

Los sistemas de distribución comienzan su etapa en las subestaciones de distribución las cuales son energizadas mediante el sistema de subtransmisión, estas subestaciones energizan al siguiente elemento del sistema que son los alimentadores primarios a donde se conectan los transformadores de distribución que dotan de energía a los diferentes usuarios del sistema [17].

1.2.2.1. Subestación de distribución.

Este componente del SD es donde se transforma el nivel de voltaje de la etapa de subtransmisión al nivel requerido por los alimentadores primarios, este elemento es dimensionado dependiendo de la importancia y tamaño de la demanda [18]. La subestaciones son ubicadas de manera planificada en el sistema en donde el conjunto de elementos como transformador, protecciones de entrada y de salida, sistemas de control dotan del nivel de voltaje adecuado a los alimentadores que se deriven de la subestación [19].

1.2.2.2. Circuitos primarios.

Son los circuitos que inician a la salida de las subestaciones de distribución y energizan a los diferentes transformadores de distribución los que se encuentran dispersos dentro del área de concesión de la compañía de distribución [18]. Estos circuitos se extienden desde los sectores urbanos hasta los rurales entregando potencia a cada transformador o a los usuarios que requieren conectarse a nivel de voltaje primario [20]. La topología de estos circuitos, comúnmente son de manera radial, es decir que el flujo de potencia toma una sola dirección desde la subestación de distribución hasta cada consumidor [17].

1.2.2.3. Sistema secundario de distribución.

En esta etapa del sistema de distribución se encuentran los transformadores de distribución y los circuitos que abastecen de energía a los usuarios finales como son los clientes de tipo residencial, comercial e industrial, una característica del sistema secundario es su expansión periódica en comparación con las etapas anteriores [18]. Los transformadores de distribución son los encargados de reducir los voltajes primarios a niveles de necesidad de los usuarios [16].

1.2.3. Calidad de energía.

El termino de calidad de energía puede tomar varias definiciones que dependen del enfoque de referencia, como puede ser relacionar el término calidad con la confiabilidad del sistema, desde otro criterio se puede establecer el término calidad como las diferentes características que debe tener el suministro de energía a los usuarios para que sus equipos funcionen correctamente. Cualquier distorsión que se manifieste en voltaje, corriente o frecuencia es considerado como un problema de calidad de energía, que actualmente es un problema generado por los consumidores, lo que puede ocasionar fallas y mal funcionamiento de equipos de los usuarios aledaños [21].

1.2.4. Tipos de problemas relacionados con calidad de energía.

La problemática de calidad de energía va relacionado a la onda resultante de voltaje y corriente que se presenta en los puntos de medición de un sistema, es decir que una forma de onda sinusoidal de voltaje y corriente sin distorsión de magnitud y frecuencia nominales se establece como una calidad de energía limpia, por otro lado si las formas de onda presentan distorsión o sus magnitudes operan fuera de los niveles establecidos como normales de voltaje, corriente o frecuencia se dice que existe un problema de calidad de energía [22].

Los posibles problemas de calidad energía que se presentan en el sistema eléctrico se detallan a continuación:

1.2.4.1. Transitorios.

Impulso.

Se caracteriza por presentar una elevación rápida de nivel de voltaje la cual decrece de manera paulatina, su duración puede extenderse hasta 200ms, la magnitud del impulso se mide desde el punto de la onda en donde inicia el pico [23]. En un impulso transitorio se observa un cambio de frecuencia repentino en las señales de voltaje o de corriente, una fuente de este fenómeno es la corriente generada por un rayo [24]. En la Figura 2 se indica la forma de un impulso.

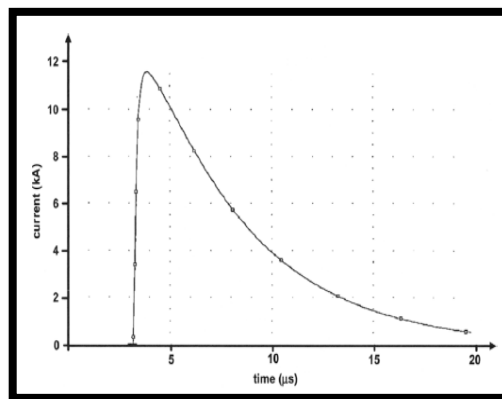


Figura 2 Impulso transitorio [24].

Oscilatorio.

Este tipo de transitorio experimenta una elevación rápida de magnitud y su decrecimiento lo realiza de manera exponencial mediante oscilaciones de baja energía con respecto al impulso, las oscilaciones que se presentan pueden durar desde un ciclo o más [23]. Las oscilaciones generadas presentan ciclos positivos y negativos, las causas para que se presenten los transitorios oscilatorios se relacionan a la apertura o cierre de equipos de seccionamiento, accionamiento de banco de capacitores, la rapidez de los equipos de protección y ferresonancia [24].

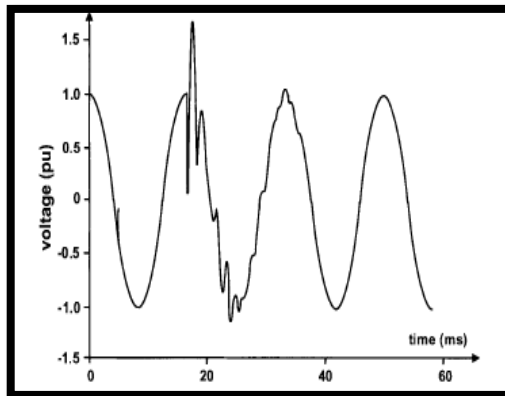


Figura 3 Transitorio oscilatorio [24].

1.2.4.2. Variaciones de voltaje de corta duración.

Huecos de voltaje (Sags)

En la IEEE define a este parámetro como la disminución del nivel de voltaje por un periodo corto de tiempo, que va desde los 8ms a 1min, para ser considerada como una sag la disminución del nivel de voltaje debe estar en el rango del 10 al 90% del valor RMS a frecuencia nominal [22].

En cargas industriales los huecos de voltaje son generados por el encendido de cargas de gran potencia, para el caso que este fenómeno se presente en la alimentación del sistema se debe a fallas en los elementos del sistema de distribución [23]. En la Figura 4 se puede observar el fenómeno de hueco de voltaje.

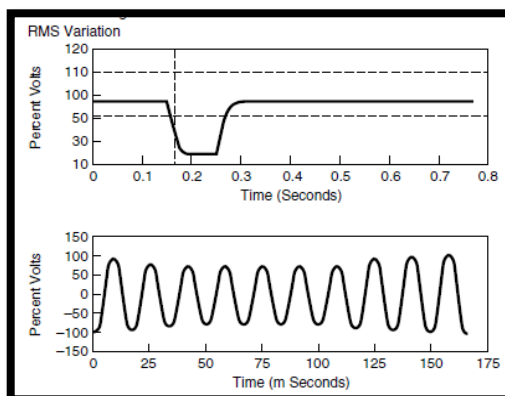


Figura 4 Hueco de voltaje (Sag) [22]

Elevación de voltaje (Swell).

Este fenómeno se da por variaciones del nivel nominal de voltaje que supere el 110% con una duración de menos de 1 minuto, la presencia de este fenómeno es menor que la de los huecos de voltaje, las causas de este problema se dan por daños en el sistema de distribución en donde el incremento de energía puede afectar al funcionamiento de los equipos de los usuarios finales [22], En la Figura 5 se puede observar el fenómeno de elevación de voltaje.

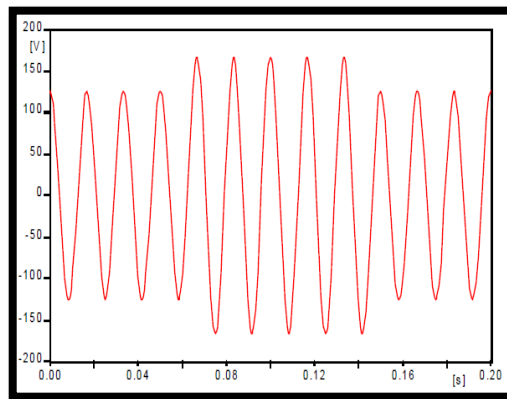


Figura 5 Elevación de voltaje (Swell) [23].

Interrupciones

Este fenómeno se presenta por fallas temporales en el sistema de distribución en donde el voltaje de alimentación o la corriente disminuye por debajo de 0.1pu por un periodo menor a 1 minuto, el tiempo de duración la interrupción por causa de una falla en el sistema de distribución dependerá de los tiempos de ajuste de los equipos de protección [21], en la Figura 6 se observa interrupciones de corta duración debido a la operación de un reconfigurador ante una corriente de falla.

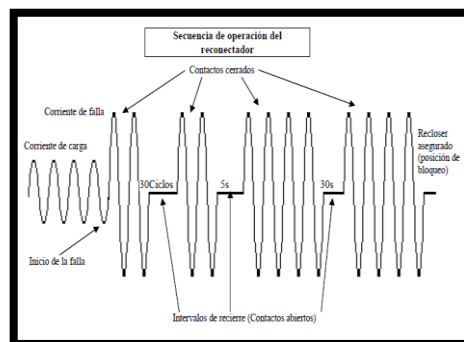


Figura 6 Interrupciones de corta duración [23].

1.2.4.3. Variaciones de voltaje de larga duración.

Sub-voltaje.

Se consideran sub-voltajes de larga duración a la disminución de más del 90% del voltaje nominal por un periodo superior a 1 minuto, este fenómeno es percibido por los usuarios finales con la disminución del flujo luminoso en luminarias y la reducción de velocidad en motores [22].

Sobrevoltajes

Este fenómeno se presenta con el incremento del voltaje nominal a un orden 1.1 a 1.2 pu por un periodo de tiempo mayor a 1 minuto, el problema de sobrevoltajes se presenta por diferentes causas como son fallas de aislamiento, ferresonancia, los intercambiadores de transformadores, excesiva compensación reactiva y una de las principales problemas de sobrevoltaje en los sistemas de distribución se da por las modificaciones en la topología de las redes mediante transferencias o alivio de carga [24].

Interrupción sostenida.

La interrupción sostenida es una de las problemáticas más antiguas de calidad de energía en donde la el voltaje cae completamente a cero y no se restaura automáticamente, el tiempo de duración para definir a una interrupción sostenida según la IEC debe superar los 3 minutos, sin embargo, el periodo que da la IEEE es de más de 1 minuto. Los parámetros de periodicidad de interrupciones sostenidas y el tiempo de duración de las mismas determinan la calidad de servicio que brinda la empresa distribuidora a sus usuarios [24].

1.2.4.4. Desbalance de voltaje.

El desbalance de voltaje se presenta cuando en un sistema trifásico existe desviación de la magnitud de voltaje entre las fases del sistema y no se encuentran desfasadas 120° entre sí. Las causas por las que se presenta este fenómeno tiene relación con la conexión de cargas monofásicas en un sistema trifásico, el daño de un fusible de una de las fases de un banco de compensación reactivo, no realizar transposición de líneas de transmisión [24].

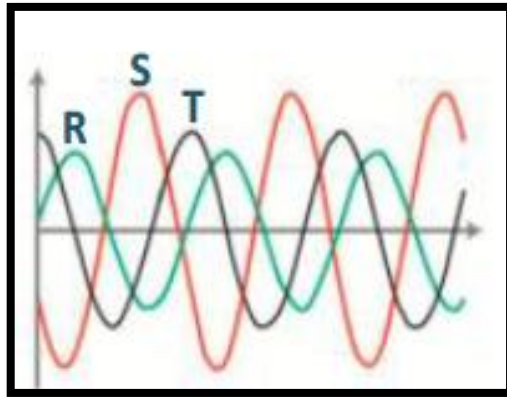


Figura 7 Desbalance de voltaje [25].

1.2.4.5. Distorsión de forma de onda.

La distorsión de forma de onda se presenta como una desviación de estado estable de la onda de frecuencia fundamental del sistema [21], esta distorsión se pueden dar por diversos aspectos como:

DC-Offset.

Es la presencia de una componente de voltaje o corriente directa en un sistema de corriente alterna la cual desplaza la referencia de la onda sinusoidal, esto es provocado por perturbaciones geomagnéticas o la asimetría de los convertidores de potencia, los efectos que genera esta componente de DC es en los transformadores como es la saturación de núcleos, sobre calentamientos lo que reduce el tiempo de operatividad del transformador [21]. En la Figura 8 se indica la consecuencia de tener una componente de continua en un sistema de corriente alterna.

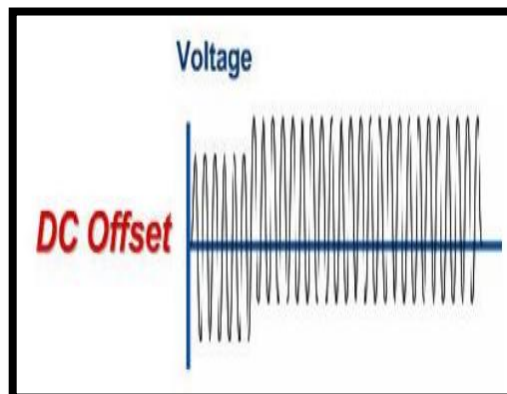


Figura 8 Componente de continua DC-Offset

Armónicos.

Los armónicos son señales sinusoidales de voltaje o corriente con frecuencias de múltiplos enteros a la fundamental, ya sea esta 60Hz o 50Hz, una forma de onda distorsionada se puede definir que es la suma de la frecuencia fundamental más sus frecuencias armónicas [21]. La distorsión armónica se da cuando una forma de onda es no sinusoidal pero periódica, donde el periodo es un ciclo de la frecuencia fundamental del sistema [26]. En la Figura 9 se indica una onda distorsionada.

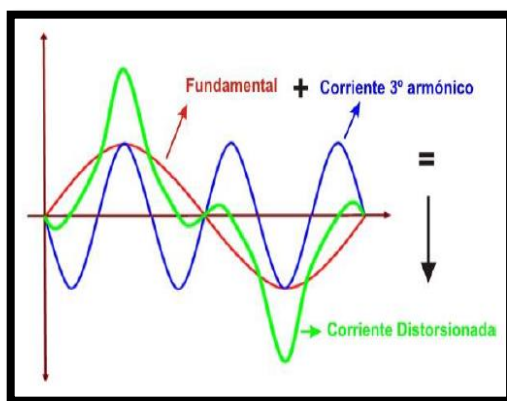


Figura 9 Onda distorsionada por armónico de orden 3.

Interarmónicos.

A diferencia de los armónicos los interarmónicos son señales de voltaje y corriente en donde sus frecuencias son múltiplos no enteros de la fundamental, este problema de calidad es causado debido al gran uso de la electrónica de potencia en las instalaciones [27], los efectos de los interarmónicos son la presencia de efecto flicker, sobre temperaturas en máquinas de inducción y mala operación de los dispositivos de protección [24].

Muestras (Notching).

Son distorsiones de voltaje de manera periódica producidas principalmente por conmutación de los elementos de la electrónica de potencia como son tiristores [24], las muescas son disminuciones sustractivas del voltaje, se puede llegar a perder la señal de voltaje por medio ciclo dependiendo de la electrónica de potencia de los equipos [23], en la Figura 10 se observa la afectación de las muescas a una señal de voltaje.

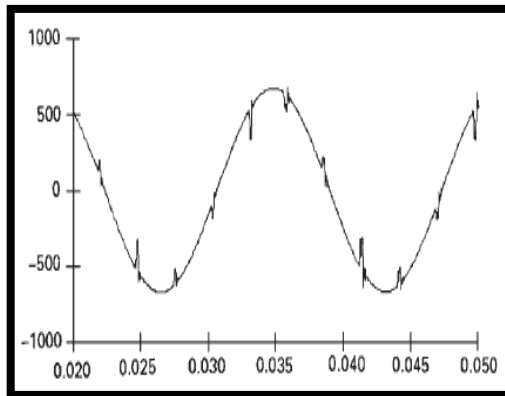


Figura 10 Muestras causadas por un convertidor [21].

Ruido (Noise).

Es una señal indeseable con una ancho de banda menor a 200kHz y que se encuentra sobrepuesta a la onda de voltaje o corriente del sistema, causando problemas de operación a dispositivos susceptibles [23], el problema de ruido es causado por los aparatos con electrónica de potencia, circuitos de control, equipos de soldadura de arco, equipos con rectificadores de estado sólido y fuentes de alimentación conmutadas [21].

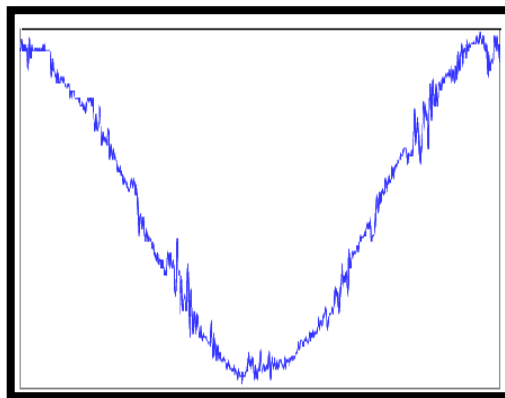


Figura 11 Señal de voltaje con ruido [23].

Flicker.

El efecto flicker son variaciones de voltajes originadas por la variación rápida y continua de la corriente de carga, la observación de efecto flicker se puede dar en el parpadeo de los sistemas de iluminación y que pueden ser percibidos por el ojo

humano, la causa de estas perturbaciones de voltaje se generan por la utilización de hornos de arco [24].

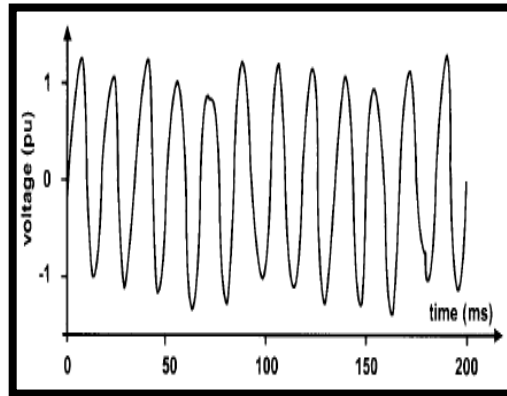


Figura 12 Efecto Flicker en la onda de voltaje [24].

1.2.4.6. Fluctuaciones de voltaje.

Son variaciones en la magnitud de voltaje, envolventes o aleatorias, que por lo general se mantienen en los límites establecidos, las fluctuaciones de voltaje afectan a la eficiencia de operación de los equipos causando que el voltaje y la corriente de los equipos electrónicos no sea estable, las causas de las fluctuaciones de voltaje son las intermitencias de potencia en el sistema de distribución, arranque de equipos que experimentan cambios rápidos de carga [24].

1.2.4.7. Fluctuaciones de frecuencia.

Son las variaciones de frecuencia que se presentan en el sistema, 50Hz o 60Hz, estas variaciones se presentan cuando existe un desbalance entre la generación y carga provocando en las máquinas generadoras una aceleración, cuando la generación es mayor que la carga, y una desaceleración, cuando la carga es mayor que la generación. El tiempo que tome al sistema llegar a valores nominales de frecuencia dependerá de los sistemas de control de velocidad de las máquinas rotatorias generadoras [24].

1.2.5. Sistemas Eléctricos Industriales.

Son los sistemas que dotan de energía a las instalaciones que se encargan de la producción o dotación de servicio desde los sistemas de distribución a un nivel de

voltaje no mayor a 1000V, la energía suministrada debe ser de calidad y continua para garantizar el funcionamiento óptimo de los equipos.

1.2.6. Tipos de cargas.

El desarrollo tecnológico, en cuanto a facilitar la operación de los procesos industriales, ha hecho que en los sistemas eléctricos se conecten diferentes tipos de cargas que por el desarrollo en la utilización de semiconductores en los equipos de los procesos, se presentan diversos problemas que provocan perturbaciones en el sistema de distribución [28].

Los tipos de carga que se conectan a los sistemas eléctricos son de tipo lineal y no lineal, en donde las cargas lineales son aquellas en donde su forma de onda de consumo de corriente se relaciona con la onda de suministro de voltaje como son las resistencias, bobinas y capacitores, en la Figura 13 se observan la relación voltaje corriente para cargas lineales.

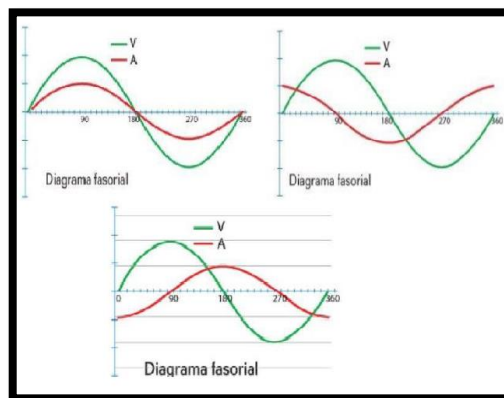


Figura 13 Relación voltaje corriente de cargas lineales.

Las cargas no lineales son aquellas en las que la forma de onda de consumo de corriente es totalmente diferente a la onda del voltaje de suministro como las computadoras, variadores de frecuencia, UPS's, soldadoras de arco, en definitiva, todas las cargas que utilicen para su funcionamiento la electrónica son cargas contaminantes.

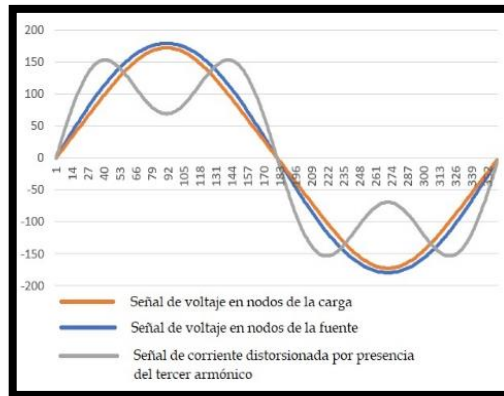


Figura 14 Señal resultante en una carga no lineal

1.2.7. Normativa.

En el Ecuador la Agencia de regulación y control de energía y recursos naturales no renovables mediante Regulación No. ARCERNNR – 002/20 establece los indicadores, índices y límites de calidad que deberán ser cumplidos las empresas distribuidoras y consumidores [29].

1.2.7.1. Parámetros de calidad de producto de la distribuidora.

Los parámetros de calidad referentes al producto entregado por la distribuidora se basa en la evaluación y cumplimiento de los siguientes índices y límites [29]:

Nivel de voltaje.

El indicador de calidad de nivel de voltaje se determinará utilizando la ecuación (1):

$$\Delta V_k = \frac{V_k - V_N}{V_N} \times 100 \text{ [%]} \quad (1)$$

En donde:

ΔV_k : variación del voltaje de suministro respecto al nominal en el punto k.

V_k : voltaje de suministro en el punto k, dado por el promedio de las mediciones registradas en el intervalo de 10 minutos.

V_N : voltaje nominal en el punto k.

Los rangos para el nivel de voltaje son:

Tabla 1 Límites de Nivel de Voltaje [29].

Nivel de voltaje	Voltaje nominal	Rango admisible
Alto voltaje Grupo 1	$> 40\text{kV}$ y $\leq 138\text{kV}$	+/- 5%
Alto voltaje Grupo 2	$> 138\text{kV}$	+/- 5%
Medio voltaje	$> 0.6\text{kV}$ y $\leq 40\text{kV}$	+/- 6%
Bajo voltaje	$\leq 0.6\text{kV}$	+/- 8%

Las empresas distribuidoras cumplen con este índice de calidad cuando el 95% o más de las mediciones realizadas por al menos 7 días continuos se encuentran dentro del rango establecido [29].

Flicker.

La evaluación del índice de flicker será mediante lo indicado en la IEC 6100-4-15, en donde se mide que tan severas son la variaciones periódicas en la amplitud de voltaje a corto plazo, en intervalos de 10 minutos de medición [29]; el índice se determina con la siguiente ecuación:

$$P_{st} = \sqrt{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.0657P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50}} \quad (2)$$

En donde:

P_{st} : Índice de severidad de flicker de corta duración.

$P_{0.1}, P_1, P_3, P_{10}, P_{50}$: Niveles de efecto flicker que sobrepasan el 0.1%, 1%, 3%, 10%, 50% del tiempo total del intervalo de medición.

El índice de severidad flicker en el punto de medición no debe ser mayor a 1 [29].

Las empresas distribuidoras cumplen con este índice de calidad cuando el 95% o más de las mediciones realizadas por al menos 7 días es menor al límite establecido [29].

Distorsión Armónica de Voltaje

La evaluación de este índice será mediante la determinación de la distorsión armónica individual y total de voltaje con la aplicación de las siguientes ecuaciones [29]:

$$V_{h,k} = \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} (V_{h,i})^2} \quad (3)$$

$$DV_{h,k} = \frac{V_{h,k}}{V_{h,i}} \times 100 \text{ [%]} \quad (4)$$

$$THD_k = \left[\frac{1}{V_{h,1}} \sqrt{\sum_{h=2}^{50} (V_{h,k})^2} \right] \times 100 \text{ [%]} \quad (5)$$

En donde:

$V_{h,k}$: Armónico de voltaje h en el periodo k cada 10 minutos.

$V_{h,i}$: Valor eficaz (rms) del armónico de voltaje h (para h = 2,3, ..., 50), medido cada 3 segundos (i = 1, 2, ..., 200).

$DV_{h,k}$: Factor de distorsión individual de voltaje del armónico h (para h = 2, 3, ..., 50) en el intervalo k de 10 minutos.

TDH_k : Factor de distorsión armónica total de voltaje.

$V_{h,1}$: Valor eficaz (rms) fundamental de voltaje en el punto que se realiza la medición.

En la siguiente tabla se indican los límites establecidos para la distorsión armónica individual de voltaje y el factor de distorsión armónica total de voltaje [29].

Tabla 2 Límites máximos de armónicos de voltaje (% del voltaje nominal) [29].

Nivel de voltaje	Factor de distorsión armónica individual (%)	TDH (%)
Bajo Voltaje	5.0	8.0

Medio Voltaje	3.0	5.0
Alto Voltaje Grupo 1	1.5	2.5
Alto Voltaje Grupo 2	1.0	1.5

Las empresas distribuidoras cumplen con este índice de calidad cuando el 95% o más de las mediciones realizadas, en cada una de las fases, por al menos 7 días es menor al límite establecido [29].

Desequilibrio de voltaje.

El desequilibrio de voltaje se determinará utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Desequilibrio de voltaje} = \left| \frac{V^-}{V^+} \right| \times 100 \text{ [\%]} \quad (6)$$

En donde:

V^- : Componente de secuencia negativa de voltaje, se determina mediante el promedio de las mediciones realizadas de al menos cada 3 segundos dentro de un periodo de 10 minutos.

V^+ : Componente de secuencia positiva de voltaje, se determina mediante el promedio de las mediciones realizadas de al menos cada 3 segundos dentro de un periodo de 10 minutos.

El valor límite de este parámetro es de 2% para todos los niveles de voltaje.

Las empresas distribuidoras cumplen con este índice de calidad cuando el 95% o más de las mediciones realizadas por al menos 7 días es menor al límite establecido [29].

1.2.7.2. Parámetro de calidad responsabilidad del consumidor[29].

Los parámetros de calidad que debe cumplir el usuario son:

Distorsión Armónica de Corriente.

En este parámetro de calidad se determinará la distorsión armónica individual de corriente y la distorsión de demanda total [29] mediante las siguientes ecuaciones:

$$I_{h,k} = \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} (I_{h,i})^2} \quad (7)$$

$$DI_{h,k} = \frac{I_{h,k}}{I_{h,1}} \times 100 [\%] \quad (8)$$

$$TDD_k = \left[\frac{1}{I_{h,1}} \sqrt{\sum_{h=2}^{50} (I_{h,k})^2} \right] \times 100 [\%] \quad (9)$$

En donde:

$I_{h,k}$: Armónico de corriente h en el periodo k cada 10 minutos.

$I_{h,i}$: Valor eficaz (rms) del armónico de corriente h (para h = 2,3, ..., 50), medido cada 3 segundos (i = 1, 2, 3, ..., 200).

$DI_{h,k}$: Factor de distorsión individual de corriente del armónico h (para h = 2, 3, ..., 50) en el intervalo k de 10 minutos.

TDD_k : Factor de distorsión de demanda total (armónicos de corriente).

$I_{h,1}$: Valor eficaz (rms) de la componente de corriente a 60Hz.

Los límites establecidos para este parámetro están indicados en la tabla 3:

Tabla 3 Niveles máximos de distorsión armónica de corriente [29].

Nivel máximo de armónicos impares (% de la corriente máxima de demanda)						
Icc/IL	3 ≤ h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h < 50	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0

20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Para el caso de armónicos pares corresponderán al 25% de los límites exigidos.

El consumidor cumple con estos parámetros cuando en el punto de medición el 95% o más de las mediciones realizadas por al menos 7 días se encuentren por debajo los límites [29].

1.2.8. Evaluación de contaminación armónica.

La contaminación armónica de corriente es generada por el funcionamiento de cargas no lineales conectadas en el sistema, las que puede producir perturbaciones de corriente y de voltaje en la red de distribución, el estándar IEEE 519-2014, en el que se basa la regulación 002/20 indica los límites de los niveles de inyección de armónicos individuales el punto de acoplamiento común (PCC), los límites que se indican en la Tabla 3 están dados en porcentaje de la corriente fundamental [21], [30].

El PCC es el punto de conexión entre el usuario final y la empresa distribuidora y puede ser localizado en lado de alto o bajo voltaje del transformador de servicio dependiendo de los consumidores abastecidos, es decir, si los consumidores aledaños al consumidor de caso de estudio se deriva de lado primario del transformador este punto de conexión será considerado como el PCC, por otro lado, si los demás consumidores se conectan en el lado de bajo voltaje del transformador el PCC se localizará en el lado secundario del transformador[21], en la Figura 15 y Figura 16 se indican los diferentes tipos de puntos de conexión común.

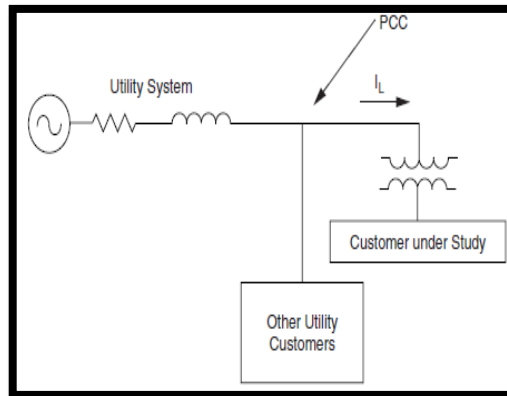


Figura 15 PCC en lado primario del transformador [21].

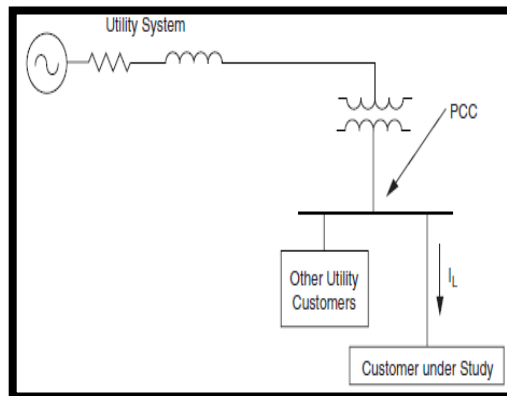


Figura 16 PCC en lado secundario del transformador [21].

La generación de armónicos es más común en el lado de los usuarios finales debido a las cargas no lineales conectadas en sus instalaciones, como consecuencia de los armónicos se tiene altos niveles de distorsión de voltaje en los usuarios cercanos a la fuente contaminante.

Para determinar la relación de cortocircuito que determina los límites de armónicos individuales de la Tabla 3 se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Relación de cortocircuito} = \frac{I_{cc}}{I_L} \quad (10)$$

En donde:

I_{cc} : es la corriente de cortocircuito en el PCC, este valor puede ser obtenido de la empresa distribuidora.

I_L : es la corriente de máxima consumida por la carga.

La corriente de máxima demanda de la carga puede determinarse mediante la siguiente ecuación:

$$I_L = \frac{kW}{PF \times \sqrt{3} \times kV} \quad (11)$$

En donde:

kW : es el promedio de la demanda un año atrás, este valor puede tomarse de la facturación de energía.

PF : es el factor de potencia registrado por la empresa distribuidora, este dato se puede tomar de la facturación de energía.

1.2.9. Mitigación de contaminación armónica en usuarios finales.

En los casos donde la contaminación armónica se presenta por parte de las instalaciones de los usuarios finales, la primera verificación a realizar es la presencia de resonancia debido a la instalación de banco de capacitores para aumentar el factor de potencia, en este caso la solución práctica es aumentar la capacidad de los capacitores [21].

En los casos en donde exista tantos capacitores que es imposible evitar las condiciones resonantes que estos generan es necesario realizar un filtrado, la instalación de filtros en usuarios finales es más económico que la instalación en las redes de distribución [21].

Existen varios tipos de dispositivos que filtran los armónicos generados por las cargas no lineales desde los más simples como los bancos de capacitores o reactores de línea hasta los más complejos como los filtros activos, en las

siguientes líneas se exponen los diferentes formas de mitigación de contaminación armónica [21].

1.2.9.1. Reactor de línea.

Un método sencillo y satisfactorio para controlar la generación de distorsión armónica, especialmente por los variadores de velocidad, es la instalación de un pequeño reactor a la entrada del equipo, logrando así reducir la velocidad a la que se carga el capacitor del bus de corriente continua del equipo, lo que reduce la magnitud de corriente con un contenido de armónicos mucho menor entregando la misma cantidad de energía [21].

Los reactores de línea se clasifican por su porcentaje de impedancia, típicamente del 3% y del 5%, los de impedancia de 3% son generalmente usados para absorber las perturbaciones de la red de alimentación, mientras que los reactores de impedancia al 5% son seleccionados para reducir corrientes armónicas producidas por el variador de velocidad, su selección se basa en la potencia del motor al cual va a controlar el variador de velocidad [31], [32].

En la Figura 17 se muestran las diferentes formas de instalar los reactores de línea dependiendo de la configuración que se encuentra en la instalación.

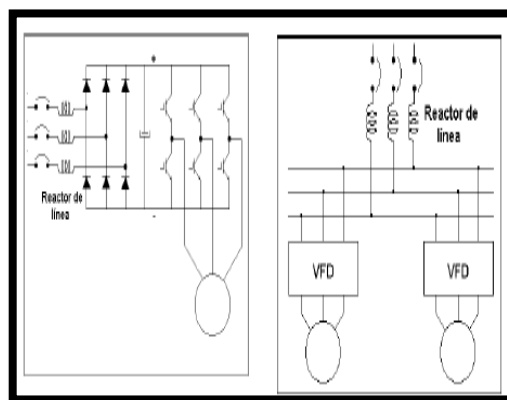


Figura 17 Instalación de reactores de línea [33].

1.2.9.2. Filtros pasivos.

Los filtros pasivos es la alternativa más usada para controlar la distorsión armónica provocada por las cargas no lineales, los mismos que se instalan cercanos a la carga que produce los armónicos con el objetivo de derivar las corrientes armónicas a través del filtro y no ingrese al sistema de potencia [34].

Los filtros pasivos son configuraciones de inductancias, capacitancias y resistencias formando un circuito resonante sintonizado a una frecuencia requerida, estos filtros pueden ser conectados en serie o en paralelo a la carga contaminante con el fin de mitigar la frecuencias armónicas individuales requeridas [35].

El filtro pasivo más usado por su costo económico y por sus resultados para la reducción de armónicos es el filtro de sintonía simple, el cual presenta una baja impedancia a cierta frecuencia armónica como se indica en la Figura 18, la frecuencia de sintonía para este tipo de filtros se determina con un valor menor a la requerida (entre el 3% y el 10%) comportándose para las frecuencias superiores como un inductor su configuración se muestra en la Figura 18 y Figura 19 [21], [23].

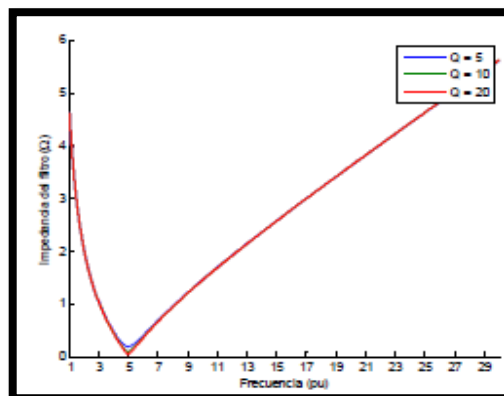


Figura 18 Impedancia vs frecuencia filtro sintonizado [36].

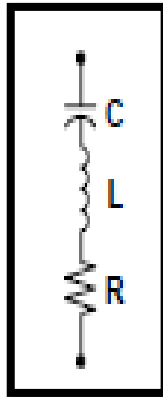


Figura 19 Configuración de un filtro de sintonía simple.

Filtro pasivo paralelo.

Esta configuración de filtro pasivo se conecta en paralelo a la carga contaminante no lineal como se indica en la Figura 20 [37].

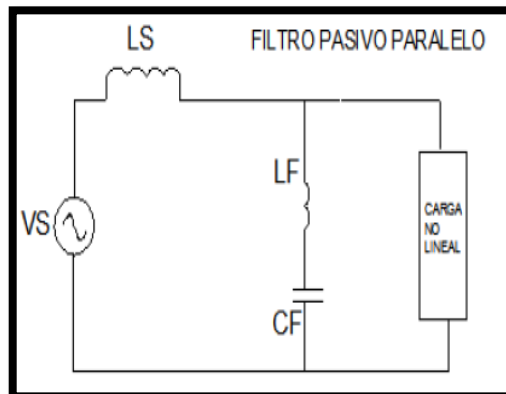


Figura 20 Filtro pasivo paralelo [37].

Este tipo de configuración se emplean con el fin de mitigar armónicos individuales de corriente [35].

Filtro pasivo serie.

La configuración de este tipo de filtro se la realiza conectando en filtro en serie con la carga contaminante como se indica en la , estos tipos de filtros son utilizados para mitigar los armónicos individuales de voltaje [35], [37].

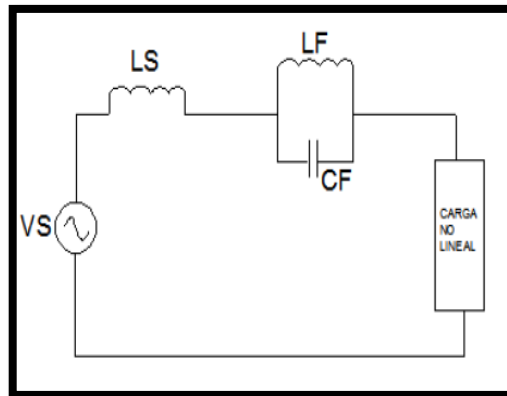


Figura 21 Filtro pasivo en serie [37].

1.2.9.3. Dimensionamiento de filtro pasivo [34].

El dimensionamiento de un filtro para mitigar los armónicos generados por las cargas no lineales requiere algunas consideraciones las cuales se las puede agrupar en dos criterios de funcionamiento y de clasificación.

Los criterios de funcionamiento se refieren a las condiciones normales de operación esperadas como la potencia reactiva requerida, las limitaciones armónicas, las condiciones normales del sistema y las condiciones normales del filtro armónico.

Los criterios de clasificación se refieren a las condiciones inusuales de operación en las que podría llegar a operar el equipo como son las condiciones de contingencia del sistema y las condiciones de contingencia en el filtro de armónicos, en los casos de contingencia la limitación armónica puede ser más flexible.

El diseño del filtro armónico requiere información del sistema de potencia y la generación armónica local como la configuración del sistema, impedancia de los componentes del sistema, voltaje máximo, voltaje nominal, potencia nominal de las cargas, factor de potencia y la generación de armónicos.

Potencia reactiva capacitiva del filtro.

Los componentes principales de un filtro armónico incluyen capacitores, reactancias y resistencias dimensionados para obtener un control adecuado de los armónicos generados por las cargas no lineales.

Los capacitores proveen de potencia reactiva capacitiva al sistema con el fin de mejorar el factor de potencia y ayudar a mantener el nivel de voltaje durante grandes cargas, la potencia reactiva requerida para estos fines se denomina los kVAR's efectivos del filtro de armónicos, con esta consideración la potencia reactiva requerida se determina a partir del flujo de potencia a frecuencia fundamental.

Sintonización del filtro.

La sintonización inicial del filtro tiene como objeto disminuir la distorsión armónica de voltaje y de corriente, sintonización que está dada en base al espectro armónico generado en el sistema y normalmente se realiza a frecuencia más baja de los armónicos significativos, esto debido a que sintonizar un filtro a frecuencias exactas se pueden presentar las siguientes consecuencias:

- Aumento de costos y dimensionamiento de los elementos del filtro debido a la baja impedancia de resonancia.
- Niveles de distorsión armónica inaceptables y amplificación de voltaje debido a las variaciones de impedancia entre el equipo real y los valores diseñados.

Para evitar estos efectos el ajuste del filtro se suele realizar entre el 3% a un 15% por debajo de la frecuencia deseada, en los casos en que sea necesario la sintonización de varias frecuencias se debe considerar el rendimiento del filtro sintonizado a una la frecuencia más representativa, lo que se logra utilizando un software de análisis de armónicos.

La reactancia capacitiva del filtro se determina a partir de la potencia reactiva requerida y se calcula mediante las siguientes ecuaciones.

$$X_C = \left(\frac{h^2}{h^2 - 1} \right) \times X_{eff} \quad (12)$$

$$X_{eff} = \frac{kV_{LLsys}^2}{Q_{eff}(Mvar)} \quad (13)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad (14)$$

Además de la reactancia capacitiva se determina una reactancia inductiva con el fin de crear una resonancia serie entre el inductor y el capacitor en la frecuencia sintonizada, lo que proporciona un camino de baja impedancia para los armónicos del sistema, el cálculo de la reactancia inductiva se determina mediante la siguiente ecuación.

$$X_L = \frac{X_C}{h^2} \quad (15)$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (16)$$

Donde:

X_{eff} : Reactancia efectiva del filtro.

Q_{eff} : Potencia reactiva efectiva del filtro (Mvar).

X_C : Reactancia capacitiva del filtro.

C : Capacitancia del filtro.

X_L : Reactancia del reactor de sintonía.

L : Inductancia del filtro.

h : Orden del armónico a filtrar.

V_{LLsys} : Voltaje línea a línea del sistema.

f : Frecuencia del sistema.

Una vez determinados los parámetros del filtro se procede a validarlos con las siguientes consideraciones:

La relación en porcentaje de la corriente rms y la corriente fundamental debe ser menor o igual al 135%, validación que se realiza mediante las siguientes ecuaciones.

$$\frac{I_{RMS}}{I_{fund}} \times 100 \leq 135\% \quad (17)$$

$$I_{fund} = \frac{\frac{V_{LLsys}}{\sqrt{3}}}{(X_C + X_L)} \quad (18)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2} \quad (19)$$

El voltaje pico del filtro no debe superar el 120% del voltaje pico del sistema, dicha condición se valida mediante las siguientes ecuaciones.

$$\frac{V_{C L-N total pico}}{V_{L-N pico sys}} \times 100 \leq 120\% \quad (20)$$

$$V_{L-N pico sys} = \sqrt{2} \times \frac{V_{LLsys}}{\sqrt{3}} \quad (21)$$

$$V_{C L-N pico} = \sqrt{2} \times (V_C + V_C(h)) \quad (22)$$

$$V_C(\mathbf{h}) = \sum_h^n (V(\mathbf{h})) = \sum_h^n \left(I(\mathbf{h}) \times \frac{X_C}{h} \right) \quad (23)$$

La relación en porcentaje del voltaje rms del filtro y el voltaje rms del sistema no debe superar al 110%, lo cual se valida mediante las siguientes ecuaciones.

$$\frac{V_{C L-N total rms}}{V_{L-N rms sys}} \times 100 \leq 110\% \quad (24)$$

$$V_{L-N rms sys} = \frac{V_{LLsys}}{\sqrt{3}} \quad (25)$$

$$V_{C L-N total rms} = \sqrt{V_C^2 + V_C(2)^2 + V_C(3)^2 + \dots + V_C(n)^2} \quad (26)$$

La potencia reactiva recalculada no debe superar el 135% de la potencia reactiva efectiva, para lo cual se verifica mediante las siguientes ecuaciones.

$$\frac{Q_{3\phi recalculada}}{Q_{eff}} \times 100 \leq 135\% \quad (27)$$

$$Q_{3\phi recalculada} = 3 \times \frac{V_{C L-N total rms}^2}{X_C} \quad (28)$$

Para la validación final de los parámetros calculados del filtro se verifica el calentamiento del dieléctrico del capacitor mediante la siguiente expresión.

$$\left| 3 \times \sum_{h=1}^n (V(\mathbf{h}) \times I(\mathbf{h})) \right| \leq 1.35 \times Q_{3\phi recalculada} \quad (29)$$

La resistencia del filtro establece el factor de calidad del mismo, indicando con esto las pérdidas que se presentan, es decir, que cuanto mayor es el factor de calidad menores son las pérdidas del filtro y por consiguiente la característica

impedancia – frecuencia es más aguda. Los factores de calidad comunes de los filtros sintonizados son entre 20 a 50 siendo el factor de 30 el más utilizado [38]. El valor de resistencia del filtro se determina mediante el siguiente procedimiento.

$$\mathbf{n} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (30)$$

$$\mathbf{R} = \frac{\mathbf{n} \times X_L}{Q} = \frac{X_C}{\mathbf{n} \times Q} \quad (31)$$

En donde:

R : Resistencia del filtro.

Q : Factor de calidad del filtro.

n : Frecuencia de sintonía del filtro.

X_L : Reactancia inductiva del filtro.

X_C : Reactancia capacitiva del filtro.

1.2.9.4. Filtros activos.

Los filtros activos son los más recientes dispositivos para la eliminación de la contaminación armónica, su principio de funcionamiento se basa en la electrónica de potencia y son más costosos que los filtros pasivos, su principal ventaja es que no presentan resonancia con la impedancia del sistema por lo que estos filtros son usados cuando se presentan problemas de resonancia entre la impedancia del sistema y un filtro pasivo [21].

El funcionamiento del filtro activo se basa monitorear la corriente o el voltaje de línea y activar la electrónica de potencia del filtro para hacer que la forma de onda de corriente o de voltaje sea sinusoidal [21] como lo indica en la Figura 22.

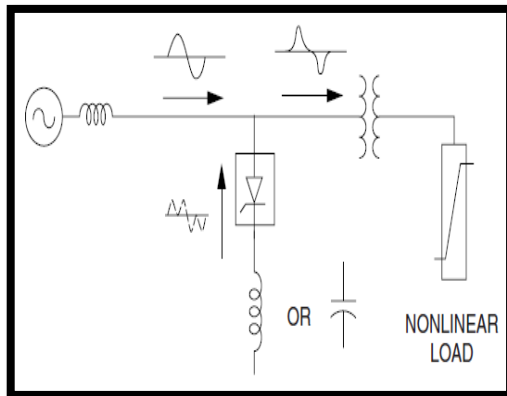


Figura 22 Aplicación de un filtro activo a una carga no lineal [21].

Dimensionamiento de un filtro activo.

En el mercado existen varias marcas que se enfocan en la mitigación de la distorsión armónica en los sistemas eléctricos, para el presente trabajo se hace referencia al equipo Accusine de la marca Schneider [39].

El filtro realiza la medición de la corriente total del sistema determinando su componente fundamental para inyectar una corriente armónica opuesta a la detectada con el fin de cancelar las corrientes armónicas generadas por la carga [39].

Para el dimensionamiento del filtro activo se determina la corriente efectiva armónica mediante la siguiente ecuación:

$$I_H = \frac{I_{RMS}}{\sqrt{\frac{1}{THD_i} + 1}} \quad (32)$$

En donde:

I_{RMS} : Corriente total de la carga.

THD_i : Distorsión armónica de corriente.

I_H : Corriente efectiva armónica.

Se determina la corriente reactiva efectiva necesaria para compensar el factor de potencia, se puede establecer un factor de potencia unitario para los cálculos [39].

$$I_R = \frac{Q_C}{\sqrt{3} \times V_{L-L}} \quad (33)$$

En donde:

I_R : Corriente reactiva efectiva requerida.

Q_C : Voltamperios reactivos que absorbe la carga.

V_{L-L} : Voltaje línea a línea.

Una vez determinadas las corrientes efectivas armónica y reactiva se procede a determinar la corriente del filtro armónico mediante la siguiente ecuación:

$$I_{FILTRO} = \sqrt{I_H^2 + I_R^2} \quad (34)$$

En donde:

I_{FILTRO} : Capacidad requerida del filtro activo.

I_H : Corriente efectiva armónica.

I_R : Corriente efectiva reactiva.

1.3. Fundamentación metodológica.

1.3.1. Modalidad de investigación.

El presente proyecto se enmarca en un enfoque cuantitativo debido a que con los datos recolectados y su análisis se dará respuesta a la hipótesis planteada mediante la medición numérica de los índices de calidad responsabilidad del consumidor estipulados en la Regulación No. ARCERNNR – 002/20.

1.3.2. Tipos de investigación.

La investigación se basa principalmente en la búsqueda bibliográfica sobre la calidad de energía, recolección de datos de campo e interpretación y análisis de datos por lo que los tipos de investigación son:

1.3.2.1. Investigación documental.

La investigación documental constituye la búsqueda de información con el fin de encontrar nuevos conocimientos y metodologías de control de los índices de calidad de energía utilizando diferentes tipos de fuentes bibliográficas.

1.3.2.2. Investigación de campo.

La investigación de campo interviene en la recolección de datos de cada una de las estaciones de bombeo a ser analizadas como son los perfiles de voltaje y de corriente del transformador de la Estación de Bombeo Quillán 1 y Quillán 2.

1.3.2.3. Investigación descriptiva.

La investigación descriptiva aporta en el análisis de los resultados obtenidos en campo comparándolos con los límites establecidos en las regulaciones y pliego tarifario vigente.

1.3.3. Métodos de la investigación.

1.3.3.1. Método deductivo.

Este método se enmarca en extraer las conclusiones necesarias de los conocimientos adquiridos con el fin de aplicarlos en el desarrollo de la investigación.

1.3.3.2. Método descriptivo.

Este método da a conocer el estado actual y real de los aspectos de calidad de energía mediante el análisis objetivo de los datos recolectados y establecer el punto de partida para las alternativas de mejora.

1.3.3.3. Método experimental.

El método experimental da los resultados de modificar la realidad presente en cuanto a los índices de calidad analizados en los datos registrados y mediante el cual controlaremos las variables de la investigación.

1.3.4. Técnicas e instrumentos de la investigación.

1.3.4.1. Mediciones.

Esta técnica permite conocer directamente el estado actual de la calidad de energía de las estaciones de bombeo los instrumentos a utilizar para esta técnica son:

Analizador de energía: se utilizarán los registros de los equipos de medición de la empresa en bajo voltaje, el analizador de redes AEMC 3945-B el equipo debidamente calibrado, en el Anexo 1 se muestra el certificado de calibración del equipo.

1.3.4.2. Experimento.

Esta técnica permite manejar las variables con el fin establecer las mejoras a los problemas encontrados durante la investigación los instrumentos a utilizar para esta técnica son:

Excel: es el instrumento que se utilizara para tabular los datos registrados y realizar los cálculos necesarios para establecer las mejoras a la problemática encontrada

Etap versión demo: es el software de simulación que validara los resultados con las mejoras realizadas.

1.4. Conclusiones.

- Mediante la búsqueda de información se ha revisado y analizado la bibliografía pertinente respecto a la calidad de energía, de acuerdo a los objetivos planteados, con el fin de poder establecer las decisiones necesarias referentes a la contaminación armónica que generan los usuarios finales de la red de distribución.

- Con la revisión de la normativa nacional e internacional se establecen los límites de los parámetros de calidad de energía que se deben considerar a nivel de las empresas distribuidoras y consumidores finales.
- Las perturbaciones que se presentan en la red de distribución son debido principalmente a las cargas no lineales de los consumidores finales por lo que es necesario realizar la mitigación de la contaminación armónica en los puntos de conexión común de la carga objeto de estudio, para lo cual se debe realizar la incorporación de filtros.

CAPÍTULO II

PROPUESTA

2.1. Título del proyecto.

Análisis de calidad de energía en las estaciones de bombeo del Sistema Quillán Alemania de la Empresa Pública Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ambato.

2.2. Objetivo del proyecto.

- Analizar los parámetros de calidad que incumplan los obligados al consumidor en la Regulación No ARCERNNR 002/20 en las dos estaciones de bombeo del sistema de Quillán Alemania de la Empresa Pública Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ambato.

2.3. Descripción de la propuesta.

La Empresa Pública Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ambato se encarga del suministro y distribución de agua potable a la ciudad de Ambato mediante sistemas de bombeo que se encuentran distribuidas en la zona norte, centro y sur de la ciudad, además del suministro de agua mediante bombeo la empresa cuenta con sistemas de distribución a gravedad.

La zona norte de Ambato es la más crítica, en cuanto al suministro de agua potable, debido a que esta zona depende de dos estaciones de bombeo denominadas Quillán 1 y Quillán 2, las cuales abastecen de 120 l/s a toda la zona norte de Ambato,

actualmente las estaciones de bombeo cuentan con conjuntos bomba motor con una potencia de 300HP y trabajan dos conjuntos por cada una de las estaciones.

Los motores de las bombas de turbina vertical se controlan mediante variadores de frecuencia alimentados por un transformador de potencia de 750kVA con una relación de transformación de 13.8/0.460kV instalados en cada estación, en la Figura 23 y Figura 24 se puede observar los cuartos de máquinas de cada una de las Estaciones de Bombeo.



Figura 23 Cuarto de máquinas Quillán 1.



Figura 24 Cuarto de máquinas Quillán 2.

Los transformadores de las dos estaciones de bombeo cuentan con dos puntos de alimentación a nivel de medio voltaje de dos alimentadores denominados Quillán, el cual pertenece a la subestación Península, y otro alimentador denominado San Miguel perteneciente a la subestación Píllaro, las dos subestaciones son operadas por la Empresa Eléctrica Ambato Regional Centro Norte S.A.(EEASA), en el Anexo 2 se indica el diagrama unifilar del Sistema Quillán Alemania perteneciente a la EP-EMAPA-A.

2.4. Metodología.

El propósito de la investigación se basa en establecer los puntos de medición en el sistema eléctrico, con el fin de realizar la recolección de datos para establecer los índices de calidad que incumplan los límites establecidos en la Regulación No ARCERNR 002/20 enfocado principalmente a los obligados al consumidor, de esta manera realizar los correctivos necesarios y establecer la solución más adecuada, en la Figura 25 se indica el diagrama de flujo con el que se realizará la ejecución de la investigación.

2.4.1. Definición de los puntos de medición.

La EEASA registra el consumo de energía de las dos estaciones mediante un medidor de energía multitarifario, el cual se encuentra instalado en medio voltaje mediante transformadores de potencial y de corriente, en este medidor de energía se tienen las medidas de todo el sistema eléctrico, sin embargo, es necesario conocer el estado de cada una de las estaciones por lo que se tomó como punto de medición el lado de bajo voltaje de cada uno de los transformadores.

Para la recolección de datos se instaló el analizador de redes AEMC 3945-B por un lapso de 7 días con un intervalo de registro de 5 minutos, en la Figura 26 y Figura 27 se muestra la instalación del equipo registrador para la toma de datos en cada uno de los transformadores.

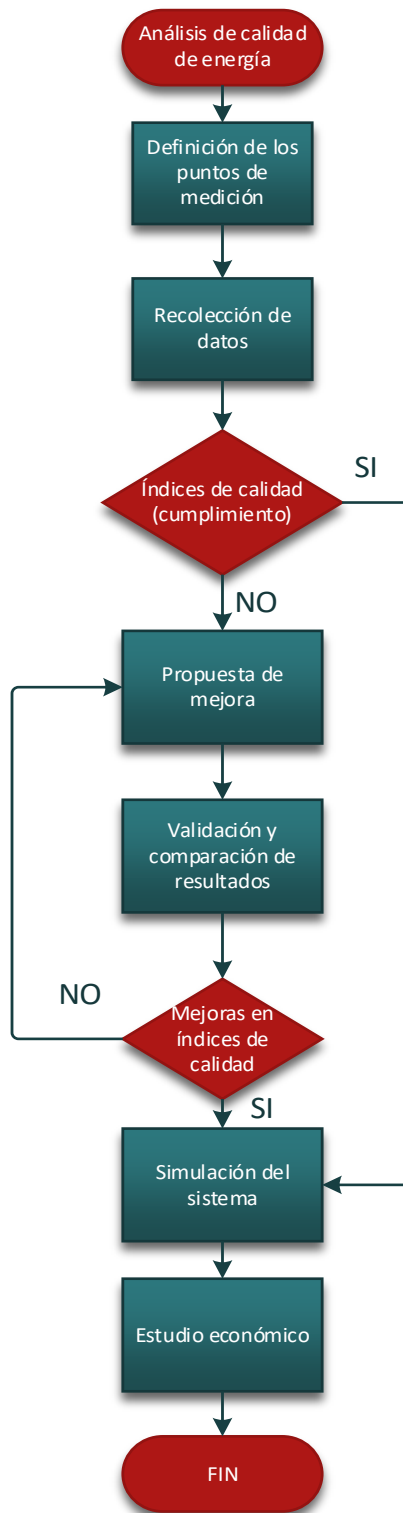


Figura 25 Diagrama de flujo para realizar la investigación.



Figura 26 Instalación de registrador en la estación de bombeo Quillán 1.



Figura 27 Instalación de registrador en la estación de bombeo Quillán 2.

De acuerdo a los datos obtenidos en las mediciones realizadas se obtienen los siguientes datos de demanda en cada una de las estaciones de bombeo.

Tabla 4 Datos de demanda Estación de Bombeo Quillán 1

Descripción	Valor
Voltaje del sistema (V)	451.0
Corriente (A)	474.23
THD de corriente (%)	27.89
Potencia Aparente (kVA)	374.8
Factor de Potencia	0.935

Tabla 5 Datos de demanda Estación de Bombeo Quillán 2

Descripción	Valor
Voltaje del sistema (V)	454.5
Corriente (A)	462.03
THD de corriente (%)	29.70
Potencia Aparente (kVA)	367
Factor de Potencia	0.932

Los datos recopilados por cada una de las estaciones se indican en el Anexo 3 y 4, a partir de estos datos se realiza el cálculo del factor de distorsión de demanda total mediante la ecuación (9).

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

Los factores de distorsión de demanda total en cada una de las estaciones de bombeo son:

Quillán 1: 27.77%

Quillán 2: 28.66%

Con en el fin de establecer los límites de exigidos en la regulación en los puntos de medición se debe conocer los niveles de cortocircuito en el lado de bajo voltaje de cada transformador, para lo cual se realiza el estudio de cortocircuito al sistema

simulado partiendo con los datos de cortocircuito dados por la EEASA y que se detallan en la Tabla 6, los resultados de cortocircuito en las barras de bajo voltaje de los transformadores de cada estación se detallan en la Tabla 7, en el Anexo 5 se muestran los valores de cortocircuito del sistema.

Tabla 6 Valores de cortocircuito proporcionados por la EEASA.

Corrientes de cortocircuito			
Alimentador	3f I_{cc} (A)	1f I_{cc} (A)	I_{cc}
Quillán	1220	900	
San Miguel	1017	776	

Tabla 7 Valores de cortocircuito en la barra de bajo voltaje de cada transformador.

Corriente de cortocircuito BV		
Transformador	3f I_{cc} (kA)	1f I_{cc} (kA)
Quillán 1	15.988	18.640
Quillán 2	15.552	18.129

Con los datos proporcionados y registrados se establece la relación de cortocircuito para cada uno de los transformadores, con el fin de establecer los límites de los niveles armónicos en el punto de medición mediante la ecuación (10).

$$\text{Relación de cortocircuito}_{\text{Quillán 1}} = \frac{I_{cc}}{I_L} = \frac{18640 \text{ A}}{474.23 \text{ A}} = 39.31$$

$$\text{Relación de cortocircuito}_{\text{Quillán 2}} = \frac{I_{cc}}{I_L} = \frac{18129 \text{ A}}{462.03 \text{ A}} = 39.23$$

Con las relaciones obtenidas y de acuerdo a la Tabla 3 se establecen los niveles máximos de armónicos para el caso de estudio como se indica en la Tabla 8.

Tabla 8 Límites de armónicos para el caso de estudio.

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

Con los datos recolectados en los puntos de medición con los límites establecidos en la regulación se evidencian los armónicos que incumplen con los límites los cuales se indica en la Tabla 9

Tabla 9 Resumen de los armónicos que incumplen la Regulación 002-20

	Regulación	Quillán 1	Quillán 2
Armónico 5	7%	26.2%	27.8%
Armónico 7	7%	7.8%	7.90%
TDD	8%	27.77%	28.66%

2.4.2. Simulación de estado actual de la red.

Con estos datos se procede a simular en el programa ETAP 19.0 versión Demo el diagrama eléctrico del sistema de bombeo Quillán Alemania, para lo cual se realiza el esquema unifilar del sistema, ingresando los datos de cada elemento como son el sistema de potencia, cables de medio voltaje con sus respectivas longitudes, transformadores de potencia, cables de bajo voltaje, elementos de protección, variadores de frecuencia y motores como se indica en la Figura 28.

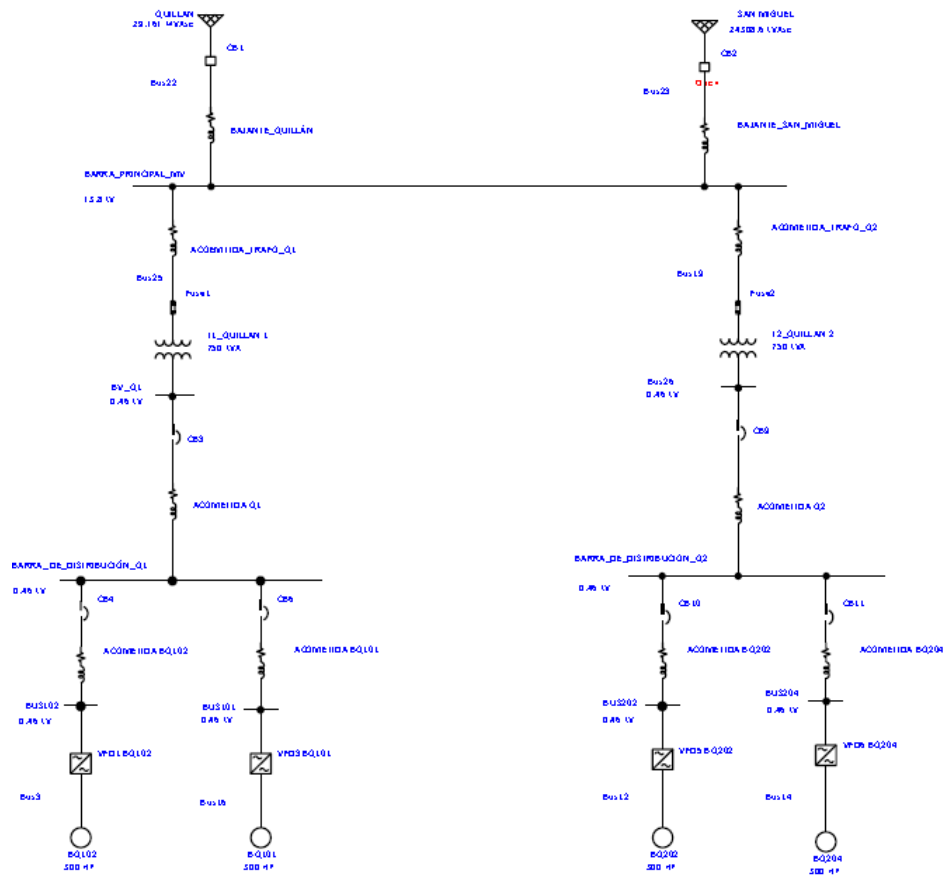


Figura 28 Elaboración del sistema eléctrico Quillán Alemania

Una vez elaborado el esquema unifilar del sistema del caso de estudio se procede a ingresar cada uno de los datos de cada elemento del sistema con los datos obtenidos en campo, como se indica en las siguientes figuras.

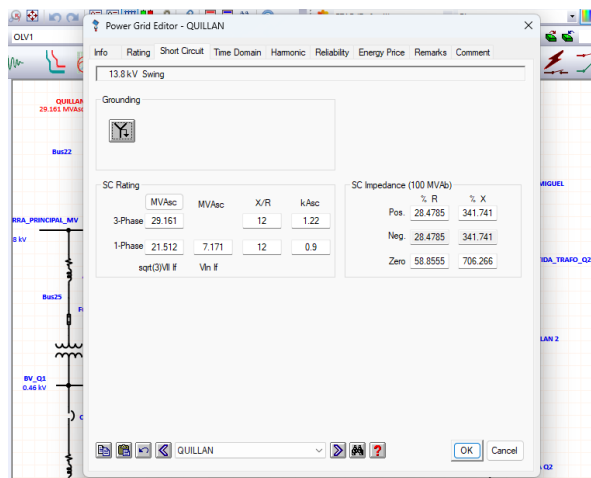


Figura 29 Ingreso de datos de la red de potencia.

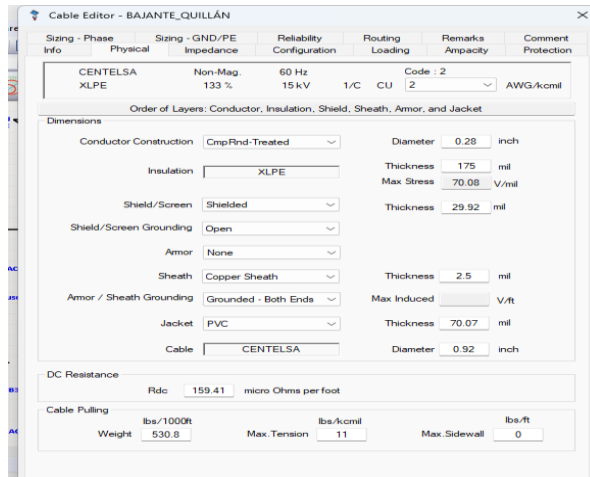


Figura 30 Ingreso de datos de cables de medio voltaje.

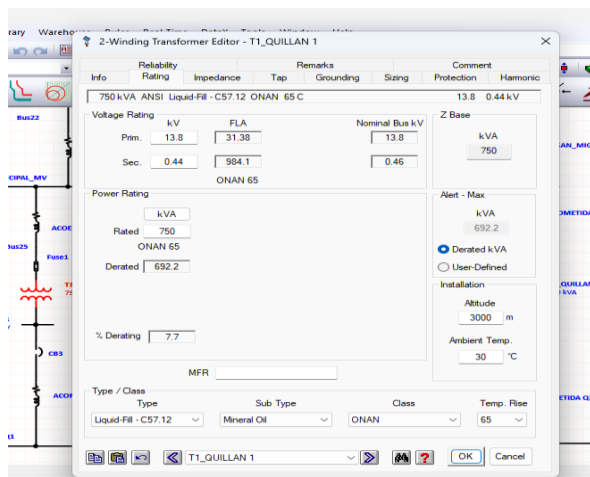


Figura 31 Ingreso de datos de transformadores

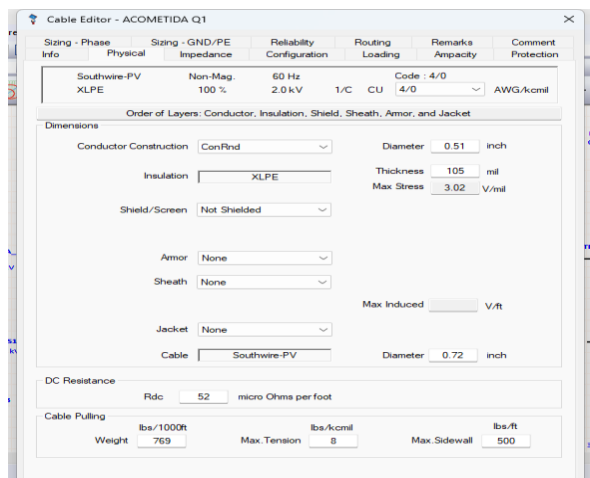


Figura 32 Ingreso de datos de cables de bajo voltaje.

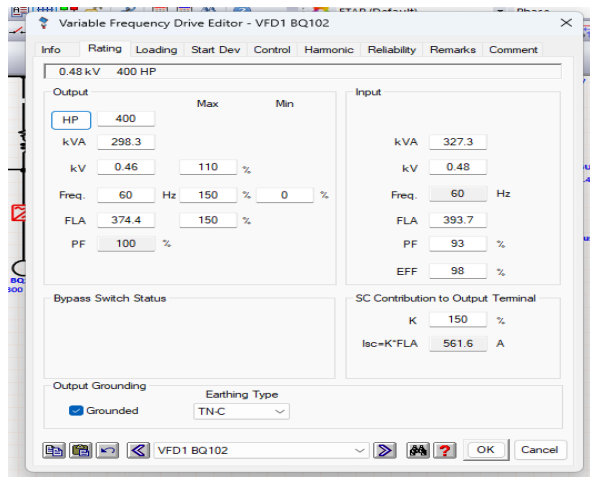


Figura 33 Ingreso de datos de variadores de frecuencia.

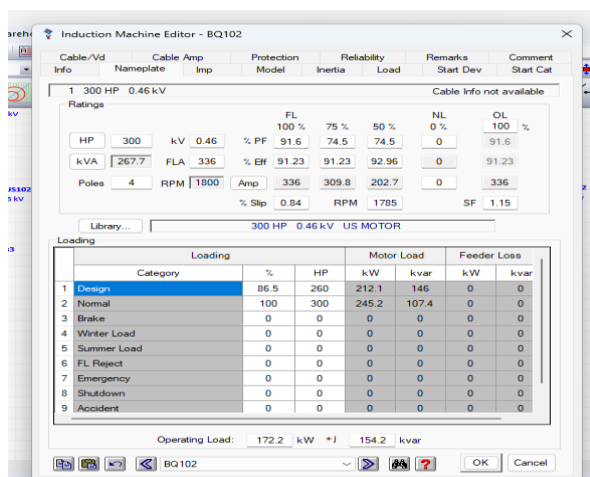


Figura 34 Ingreso de datos de motores.

En las dos estaciones de bombeo a analizar cada conjunto bomba motor funciona con su respectivo variador de frecuencia, cuyos espectros armónicos se ha registrado con el analizador de redes AEMC 3945-B por un lapso de 30 minutos con un intervalo de 1 minuto, en cada variador de frecuencia de cada estación de bombeo.

Tabla 10 Variador conectado a cada equipo de bombeo.

Estación	Nombre equipo	Sistema de arranque
Quillán 1	BQ101	Variador de frecuencia NIDEC M600 350/400hp
	BQ102	Variador de frecuencia Schneider ATV930
Quillán 2	BQ202	Variador de frecuencia NIDEC M600 350/400hp
	BQ204	Variador de frecuencia Schneider ATV930

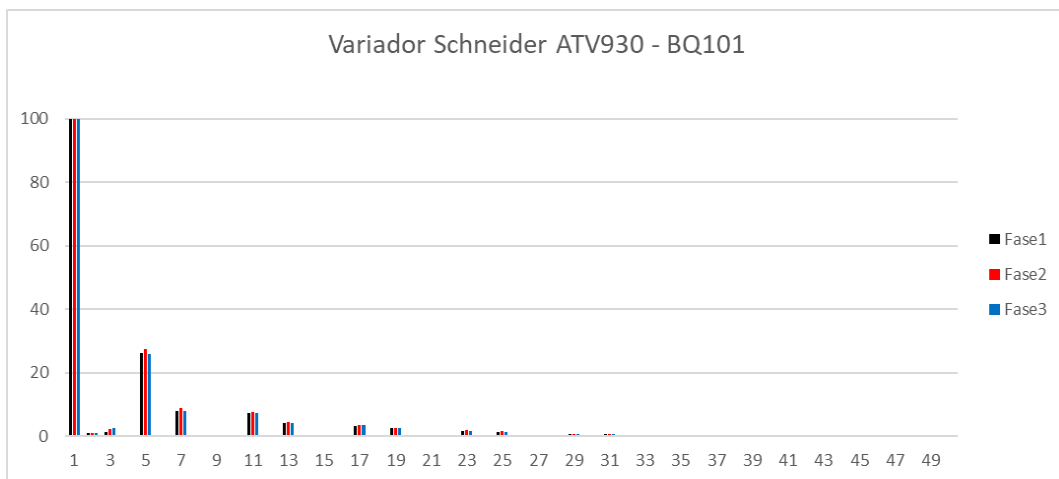


Figura 35 Espectro armónico Variador Schneider ATV930 - BQ101

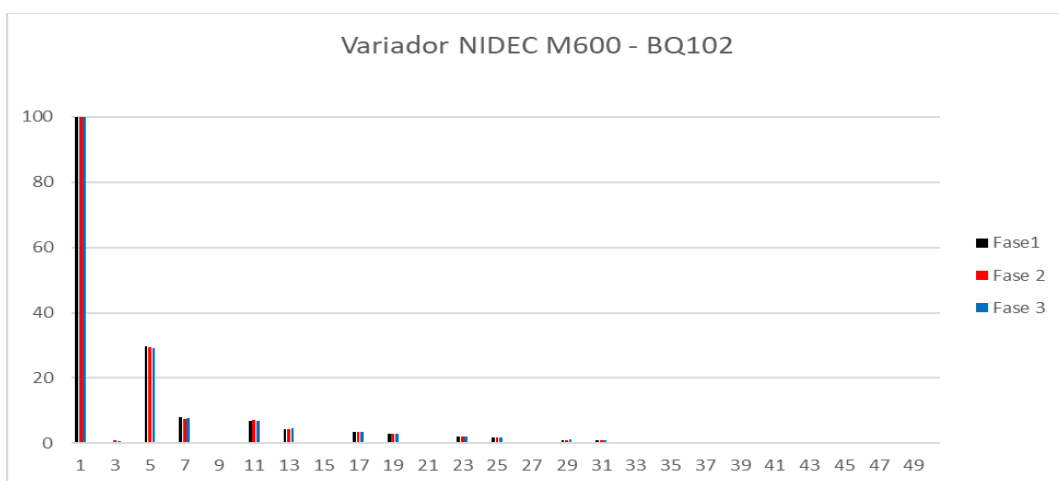


Figura 36 Espectro armónico Variador NIDEC M600 - BQ102

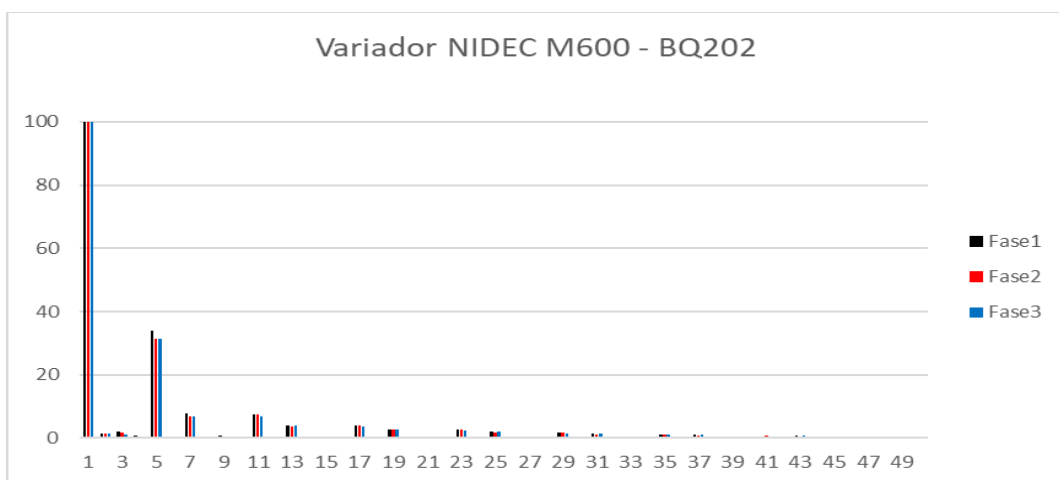


Figura 37 Espectro armónico Variador NIDEC M600 - BQ202

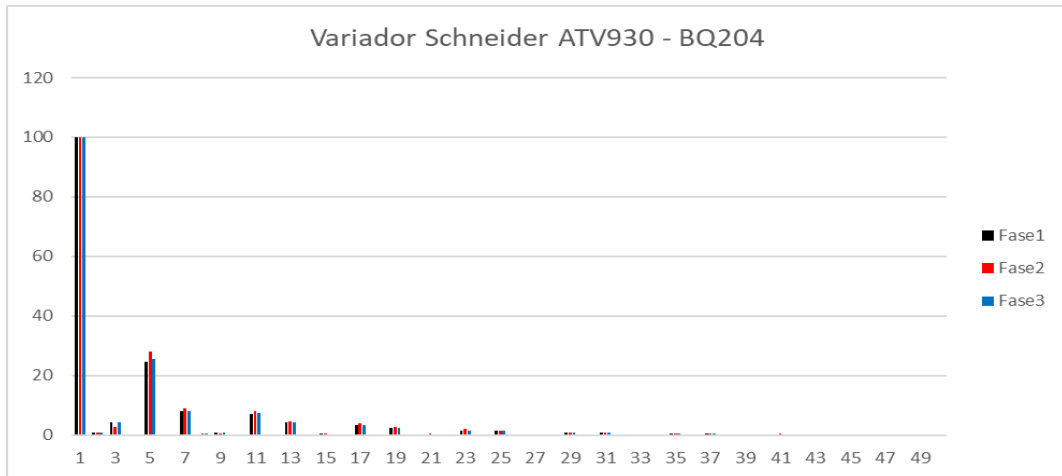


Figura 38 Espectro armónico Variador Schneider ATV930 - BQ204

Una vez establecido el flujo de potencia se procede a ingresar los variadores con su respectivo espectro armónico, para lo cual se hace uso de la funcionalidad de Etap de crear elementos en la librería, que para el caso de fuentes de armónicos se utiliza la librería HARMONIC.

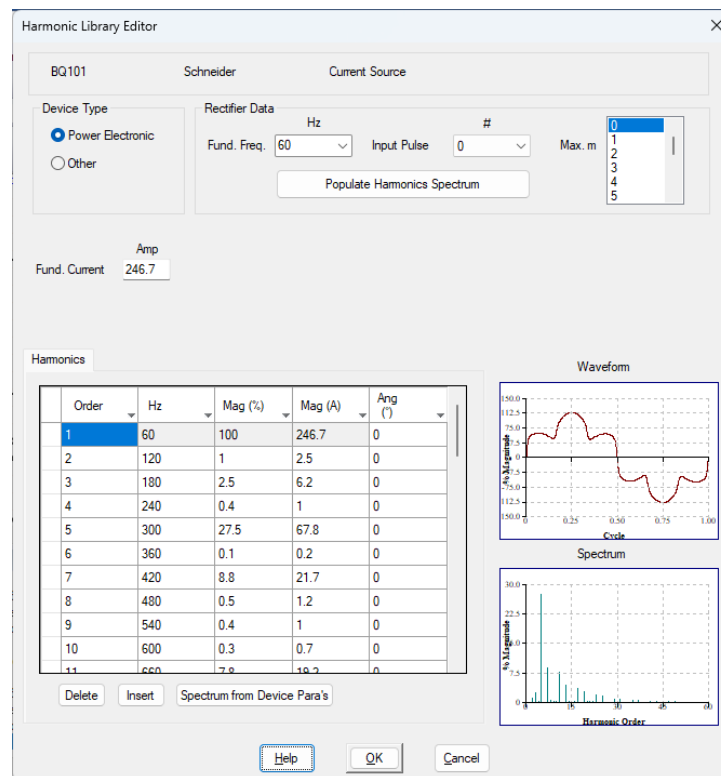


Figura 39 Ingreso de datos Variador BQ101

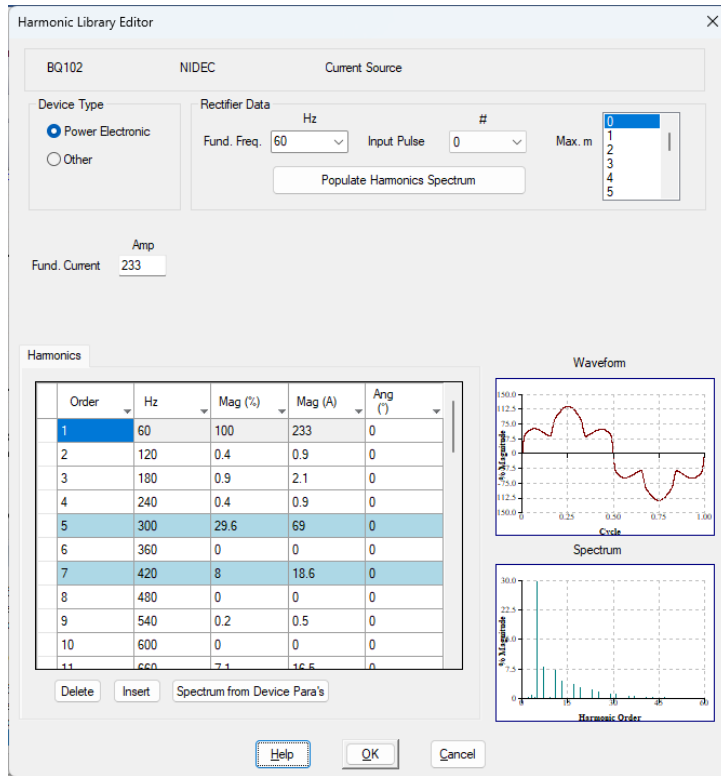


Figura 40 Ingreso de datos Variador BQ102

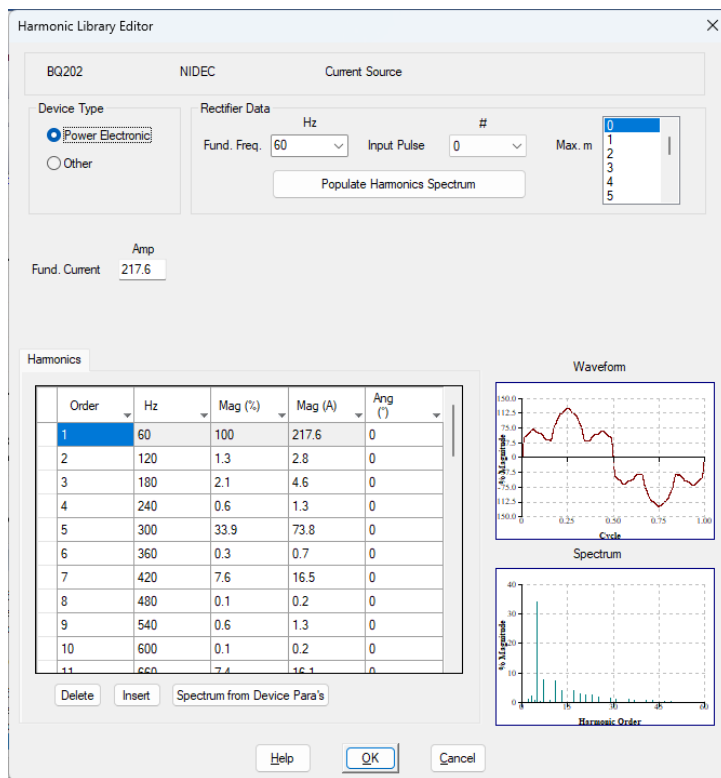


Figura 41 Ingreso de datos Variador BQ202

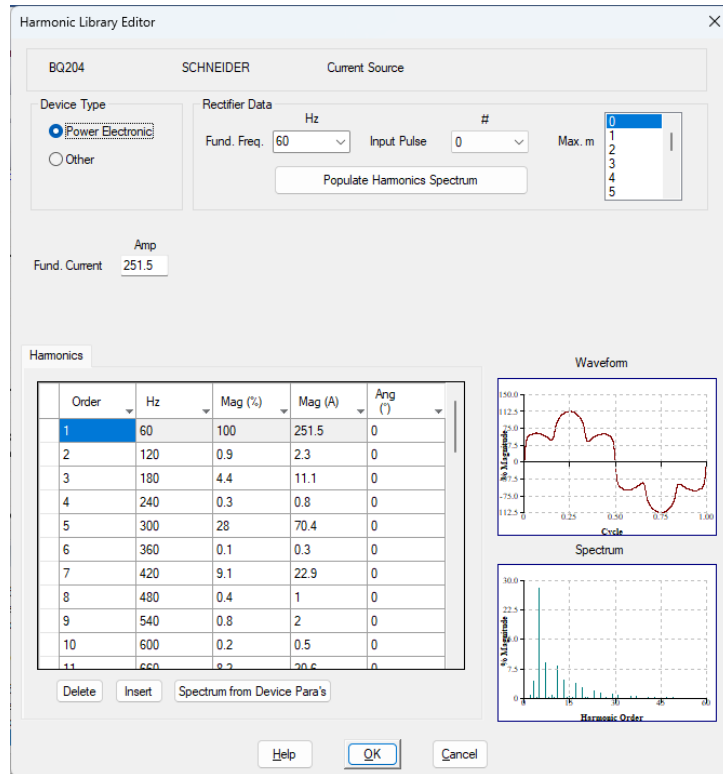


Figura 42 Ingreso de datos Variador BQ204

2.4.2.1. Flujo de potencia

Los resultados del flujo de potencia del sistema de las dos estaciones de bombeo es de vital importancia ya que con ellos se obtienen los valores de corriente de los transformadores de cada estación, bajo condiciones normales y sin tomar en cuenta la contaminación armónica de los variadores de frecuencia, el flujo de potencia simulado se indica en la Figura 43.

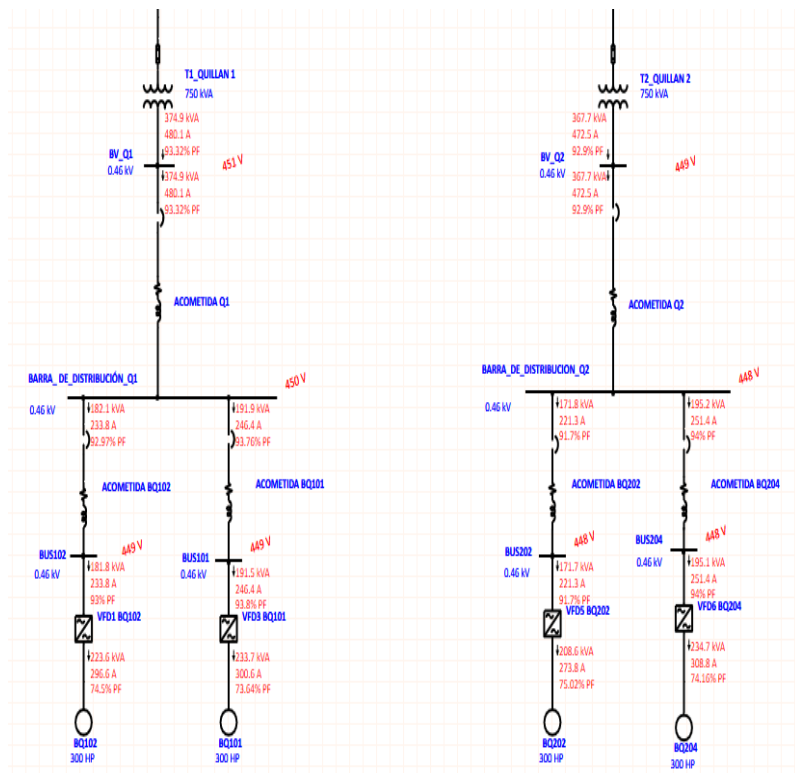


Figura 43 Flujo de potencia del Sistema Quillán Alemania.

En la tabla 11 se detallan los resultados de corriente, factor de potencia y potencia aparente en cada uno de los transformadores, en el Anexo 6 se indica el reporte del flujo de potencia.

Tabla 11 Resultados de la simulación y las mediciones realizadas.

TRANSFORMADOR	Quillán 1		Quillán 2	
	Simulación	Medición	Simulación	Medición
Corriente (A)	475	473.23	462.5	462.03
Factor de potencia	0.933	0.935	0.934	0.932
Potencia Aparente (kVA)	370.9	374.8	363.5	367

2.4.2.2. Flujo armónico.

Para la simulación del flujo armónico se considera los espectros armónicos de cada uno de los variadores que resultaron de las mediciones realizadas.

En las siguientes figuras se puede apreciar los armónicos producidos en el lado de bajo voltaje de cada uno de los transformadores, como también el espectro armónico generado.

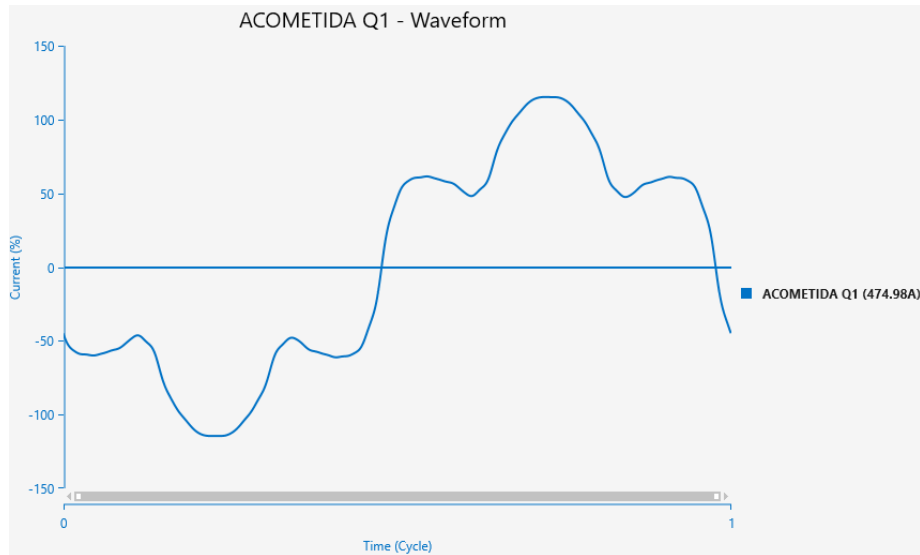


Figura 44 Forma de onda de corriente en el Transformador de Quillán 1.

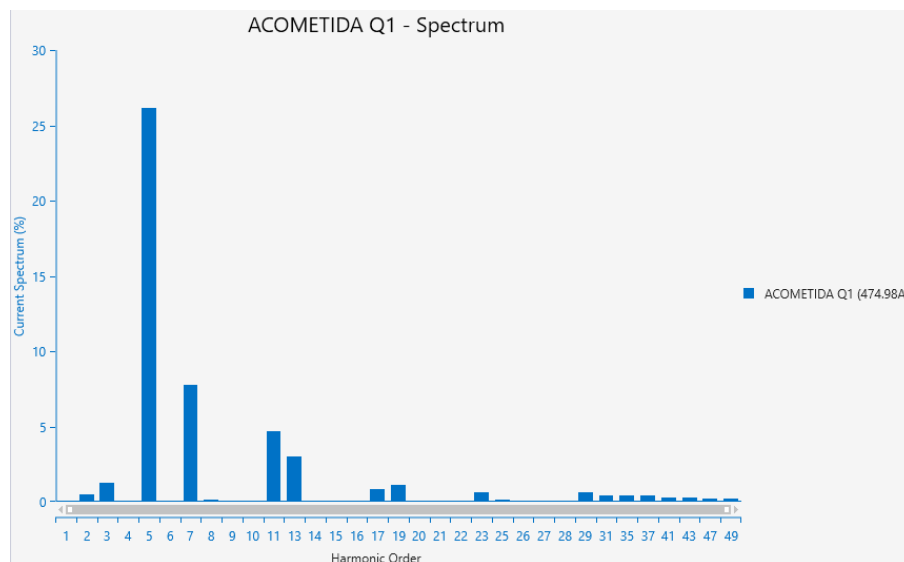


Figura 45 Espectro armónico de corriente en el Transformador Quillán 1.

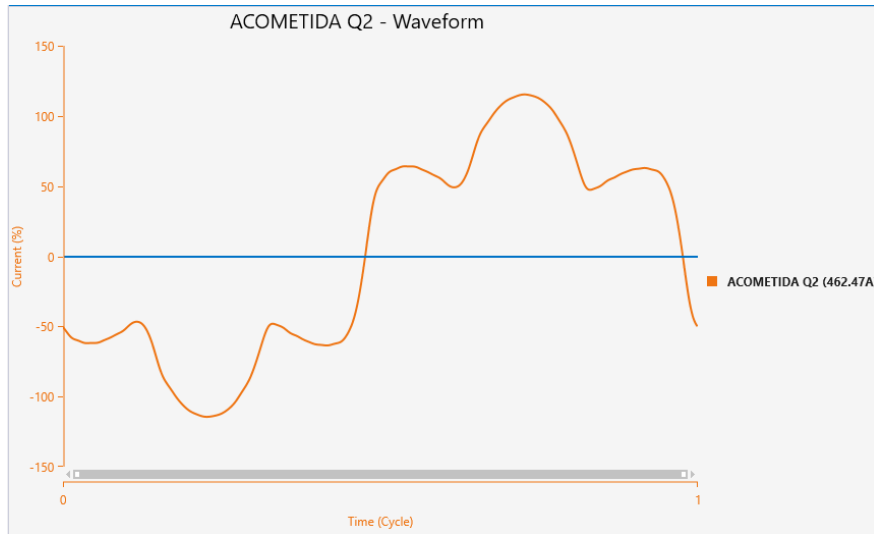


Figura 46 Forma de onda de corriente en el Transformador de Quillán 2.

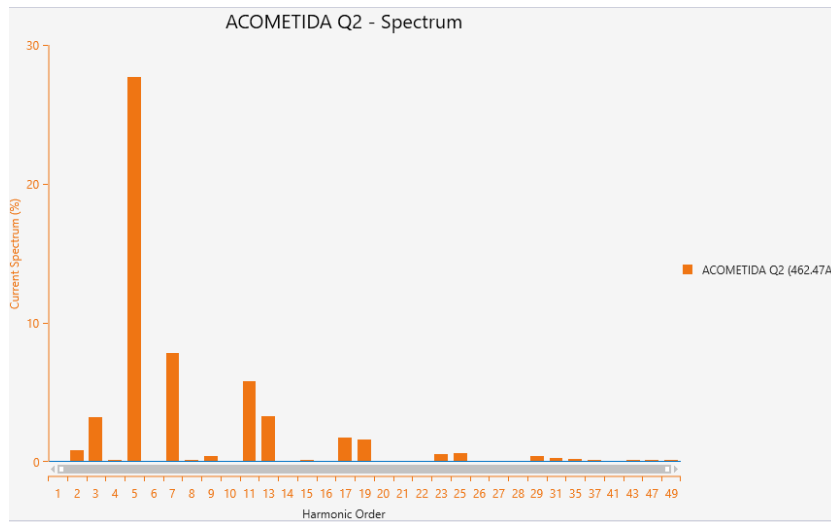


Figura 47 Espectro armónico de corriente en el Transformador de Quillán 2.

En la siguiente tabla se indica el porcentaje armónico en cada uno de los transformadores.

Tabla 12 Porcentaje corriente armónica.

Trafo	Fund (A)	Porcentaje (%)								
		TDH	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8
Q 1	475	27.94	100	0.51	1.24	0.03	26.14	0.01	7.78	0.15
Q 2	462.5	29.82	100	0.82	3.19	0.13	27.76	0.04	7.85	0.12

Tabla 13 Porcentaje corriente armónica (continuación).

Trafo	Porcentaje (%)								
	I9	I10	I11	I12	I13	I14	I15	I16	I17
Q 1	0.05	0.05	4.70	0.00	2.99	0.04	0.04	0.03	0.85
Q 2	0.43	0.03	5.81	0.00	3.33	0.04	0.14	0.03	1.74

Tabla 14 Porcentaje corriente armónica (continuación).

Trafo	Porcentaje (%)								
	I18	I19	I20	I21	I22	I23	I24	I25	I26
Q 1	0.00	1.14	0.03	0.05	0.03	0.63	0.00	0.14	0.01
Q 2	0.00	1.58	0.03	0.00	0.01	0.58	0.00	0.63	0.00

Tabla 15 Porcentaje corriente armónica (continuación).

Trafo	Porcentaje (%)								
	I27	I28	I29	I30	I31	I32	I33	I34	I35
Q 1	0.01	0.01	0.63	0.00	0.45	0.00	0.00	0.00	0.40
Q 2	0.04	0.00	0.41	0.00	0.26	0.00	0.00	0.00	0.20

Tabla 16 Porcentaje corriente armónica (continuación).

Trafo	Porcentaje (%)								
	I36	I37	I38	I39	I40	I41	I42	I43	I44
Q 1	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.29	0.00	0.30	0.00
Q 2	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.12	0.00

Tabla 17 Porcentaje corriente armónica (continuación).

Trafo	Porcentaje (%)					
	I45	I46	I47	I48	I49	I50
Q 1	0.00	0.00	0.20	0.00	0.19	0.00
Q 2	0.00	0.00	0.12	0.00	0.11	0.00

2.4.3. Dimensionamiento del filtro.

De la simulación de las dos estaciones de bombeo se determina que los variadores de 6 pulsos instalados generan una distorsión armónica total de 27.93% para la estación de bombeo Quillán 1 y de 29.91% para la estación de bombeo Quillán 2, de las mediciones realizadas y los resultados obtenidos en la simulación se detectan los siguientes valores representativos de contaminación armónica.

Tabla 18 Contaminación armónica generada.

	Regulación	Quillán 1		Quillán 2	
		Medición	Simulación	Medición	Simulación
Armónico 5	7%	26.2%	26.14%	27.8%	27.76%
Armónico 7	7%	7.8%	7.78%	7.90%	7.85%
TDD	8%	27.77%	27.93%	28.66%	29.91%

Una vez determinados los armónicos representativos en cada una de las estaciones de bombeo se procede con la determinación de los parámetros de los filtros, mediante el procedimiento indicado en el capítulo 1, en el Anexo 7 se indica el reporte de resultados del flujo armónico del estado actual del sistema.

2.4.3.1. Dimensionamiento del filtro para la estación de Quillán 1.

De los resultados del flujo de carga se obtienen los datos para determinar los parámetros del filtro.

Tabla 19 Resultados del flujo de potencia.

Datos		
Potencia Aparente:	370.9	kVA
Voltaje L-L	451	V
Factor de potencia:	0.9332	

Con los datos obtenidos se determina la potencia reactiva efectiva del filtro, para el caso de la estación de Quillán 1 los kVAR necesarios se determinan con el fin de mejorar el factor de potencia de 0.93 a 0.98, utilizando el siguiente procedimiento:

Potencia Activa

$$P = fp \times S$$

$$P = 0.93 \times 370.9 \text{ kVA}$$

$$P = 346.12 \text{ kW}$$

Potencia Reactiva consumida a fp=0.93

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

$$Q = \sqrt{370.9^2 - 346.12^2}$$

$$Q = 133.28 \text{ kVAR}$$

Potencia Reactiva requerida para mejorar el fp a 0.98

$$Q_C = P \times \tan(\cos^{-1}(fp))$$

$$Q_C = 346.12 \times \tan(\cos^{-1}(0.98))$$

$$Q_C = 70.28 \text{ kVAR}$$

Potencia Reactiva efectiva

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

$$Q_{eff} = 133.28 \text{ kVAR} - 70.28 \text{ kVAR}$$

$$Q_{eff} = 63.00 \text{ kVAR}$$

Reactancia capacitiva efectiva

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

$$X_{eff} = \frac{451V^2}{\frac{63.00}{1000}(\text{Mvar})}$$

$$X_{eff} = 3.23 \Omega$$

Reactancia capacitiva del filtro al 3% menos del 5° armónico

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

$$X_C = \left(\frac{(5 \times 0.97)^2}{(5 \times 0.97)^2 - 1} \right) \times 3.23 \Omega$$

$$X_C = 3.37 \Omega$$

Capacitancia del condensador a f=60Hz

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C}$$
$$C = \frac{1}{2 \times \pi \times 60\text{Hz} \times 3.37\Omega}$$
$$C = 786.69 \mu\text{F}$$

Reactancia inductiva del filtro a 3% menos del 5° armónico

$$X_L = \frac{X_C}{h^2}$$
$$X_L = \frac{3.37 \Omega}{(5 \times 0.97)^2}$$
$$X_L = 0.1433 \Omega$$

Inductancia del reactor a f=60Hz

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}$$
$$L = \frac{0.1433 \Omega}{2 \times \pi \times 60\text{Hz}}$$
$$L = 0.3802 \text{ mH}$$

Resistencia del filtro con un factor de calidad Q=30.

$$n = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$$
$$n = \sqrt{\frac{3.37\Omega}{0.1433\Omega}}$$
$$n = 4.85$$
$$R = \frac{n \times X_L}{Q}$$
$$R = \frac{4.85 \times 0.141\Omega}{30}$$
$$R = 0.023\Omega$$

Una vez determinados los parámetros del filtro se procede a validarlos mediante el procedimiento indicado en el capítulo 1.

Corriente fundamental del filtro

$$I_{fund} = \frac{\frac{V_{LLsys}}{\sqrt{3}}}{(X_C + X_L)}$$

$$I_{fund} = \frac{\frac{451V}{\sqrt{3}}}{(3.371\Omega + 0.1433\Omega)}$$

$$I_{fund} = 80.65A$$

En base al espectro armónico resultado de la simulación se determina las corrientes armónicas del filtro como se indica a continuación.

$$I_5 = \frac{I_5\% \times I_{fund}}{100\%}$$

$$I_5 = \frac{26.1\% \times 80.65A}{100\%}$$

$$I_5 = 21.05A$$

Utilizando la metodología anterior se determina las corrientes de cada armónica generado según el espectro generado, corrientes que se indican en la siguiente tabla:

h	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10
%	100	0.52	1.26	0.06	26.1	0.02	7.75	0.15	0.05	0.05
Ih (A)	80.65	0.42	1.02	0.05	21.05	0.02	6.25	0.12	0.04	0.04
h	I11	I12	I13	I14	I15	I16	I17	I18	I19	I20
%	4.7	0	2.99	0.04	0.04	0.03	0.85	0	1.14	0.03
Ih (A)	3.79	0.00	2.41	0.03	0.03	0.02	0.69	0.00	0.92	0.02
h	I21	I22	I23	I24	I25	I26	I27	I28	I29	I30
%	0.05	0.03	0.63	0	0.14	0.01	0.01	0.01	0.63	0
Ih (A)	0.04	0.02	0.51	0.00	0.11	0.01	0.01	0.01	0.51	0.00
h	I31	I32	I33	I34	I35	I36	I37	I38	I39	I40
%	0.45	0	0	0	0.4	0	0.4	0	0	0
Ih (A)	0.36	0.00	0.00	0.00	0.32	0.00	0.32	0.00	0.00	0.00

h	I41	I42	I43	I44	I45	I46	I47	I48	I49	I50
%	0.29	0	0.3	0	0	0	0.2	0	0.19	0
Ih (A)	0.23	0.00	0.24	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.15	0.00

Con las corrientes armónicas se determina la corriente rms

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

$$I_{RMS} = \sqrt{80.65A^2 + 0.42A^2 + 1.02A^2 + \dots + 0.15A^2 + 0A^2}$$

$$I_{RMS} = 83.73A$$

Con estos datos se verifica la siguiente condición:

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

$$\frac{84.633A}{81.522A} \times 100 \leq 135\%$$

$$103.81\% \leq 135\%$$

CUMPLE

Se verifica que voltaje pico del filtro no supere el 120% del voltaje pico del sistema mediante el siguiente procedimiento:

Voltaje pico línea neutro del sistema

$$V_{L-N \text{ pico sys}} = \sqrt{2} \times \frac{V_{LLsys}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{L-N \text{ pico sys}} = \sqrt{2} \times \frac{451V}{\sqrt{3}}$$

$$V_{L-N \text{ pico sys}} = 368.24V$$

Voltaje del capacitor

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

$$V_C = 80.65A \times 3.371\Omega$$

$$V_C = 271.946V$$

Voltaje armónico en el filtro

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

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

h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ih (A)	80.65	0.42	1.02	0.05	21.05	0.02	6.25	0.12	0.04	0.04
Ih/h	80.65	0.21	0.34	0.01	4.21	0.00	0.89	0.02	0.00	0.00
h	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ih (A)	3.79	0.00	2.41	0.03	0.03	0.02	0.69	0.00	0.92	0.02
Ih/h	0.34	0.00	0.19	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.05	0.00
h	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Ih (A)	0.04	0.02	0.51	0.00	0.11	0.01	0.01	0.01	0.51	0.00
Ih/h	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
h	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Ih (A)	0.36	0.00	0.00	0.00	0.32	0.00	0.32	0.00	0.00	0.00
Ih/h	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
h	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Ih (A)	0.23	0.00	0.24	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.15	0.00
Ih/h	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

$$V_C(h) = 21.618V$$

Voltaje armónico línea neutro pico del filtro

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

$$V_{C L-N pico} = \sqrt{2} \times (271.946V + 21.618V)$$

$$V_{C L-N pico} = 415.162V$$

Con estos datos se verifica la siguiente condición:

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

$$\frac{415.162V}{368.239V} \times 100 \leq 120\%$$

$$112.742\% \leq 120\%$$

CUMPLE

Se verifica que voltaje rms del filtro no supere el 110% del voltaje rms del sistema mediante el siguiente procedimiento:

Voltaje RMS del sistema.

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

$$V_{L-N rms sys} = \frac{451V}{\sqrt{3}}$$

$$V_{L-N rms sys} = 260.384V$$

Voltaje RMS del filtro

$$V_C = I(h) \times X_C$$

h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ih (A)	80.65	0.42	1.02	0.05	21.05	0.02	6.25	0.12	0.04	0.04
Vc(V)	271.95	1.41	3.43	0.16	70.98	0.05	21.08	0.41	0.14	0.14
h	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ih (A)	3.79	0.00	2.41	0.03	0.03	0.02	0.69	0.00	0.92	0.02
Vc(V)	12.78	0.00	8.13	0.11	0.11	0.08	2.31	0.00	3.10	0.08
h	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Ih (A)	0.04	0.02	0.51	0.00	0.11	0.01	0.01	0.01	0.51	0.00
Vc(V)	0.14	0.08	1.71	0.00	0.38	0.03	0.03	0.03	1.71	0.00
h	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Ih (A)	0.36	0.00	0.00	0.00	0.32	0.00	0.32	0.00	0.00	0.00
Vc(V)	1.22	0.00	0.00	0.00	1.09	0.00	1.09	0.00	0.00	0.00
h	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Ih (A)	0.23	0.00	0.24	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.15	0.00
Vc(V)	0.79	0.00	0.82	0.00	0.00	0.00	0.54	0.00	0.52	0.00

$$V_{C L-N total rms} = \sqrt{V_C^2 + V_C(2)^2 + V_C(3)^2 + \dots + V_C(n)^2}$$

$$V_{C L-N total rms} = 282.324V$$

Con estos datos se verifica la siguiente condición:

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

$$\frac{282.324V}{260.384V} \times 100 \leq 110\%$$

$$108.425\% \leq 110\%$$

CUMPLE

Se debe cumplir con la condición de que la nueva potencia reactiva no supere el 135% de la potencia reactiva efectiva del sistema mediante el siguiente procedimiento.

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

$$Q_{3\phi recalculada} = 3 \times \frac{282.324 V^2}{3.37\Omega}$$

$$Q_{3\phi recalculada} = 70.917 kVAR$$

Con el dato calculado se valida la siguiente condición:

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

$$\frac{70.917kVAR}{63.000kVAR} \times 100 \leq 135\%$$

$$112.56\% \leq 135\%$$

CUMPLE

Para culminar la validación de los parámetros del filtro se determina el calentamiento del dieléctrico del capacitor mediante el siguiente procedimiento.

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

$$70.917 kVAR \leq 1.35 \times 70.917 kVAR$$

$$70.917 \text{ kVAR} \leq 95.738 \text{ kVAR}$$

CUMPLE

2.4.3.2. Dimensionamiento del filtro para la estación de Quillán 2.

De los resultados del flujo de carga se obtienen los datos para determinar los parámetros del filtro.

Tabla 20 Resultados del flujo de potencia.

Datos		
Potencia Aparente:	363.5	kVA
Voltaje L-L	454	V
Factor de potencia:	0.934	

Con los datos obtenidos se determina la potencia reactiva efectiva del filtro, para el caso de la estación de Quillán 2 los kVAR necesarios se determinan con el fin de mejorar el factor de potencia de 0.93 a 0.98, utilizando el siguiente procedimiento:

Potencia Activa

$$P = fp \times S$$

$$P = 0.934 \times 363.5 \text{ kVA}$$

$$P = 339.509 \text{ kW}$$

Potencia Reactiva consumida a fp=0.934

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

$$Q = \sqrt{363.5^2 - 339.509^2}$$

$$Q = 129.86 \text{ kVAR}$$

Potencia Reactiva requerida para mejorar el fp a 0.98

$$Q_C = P \times \tan(\cos^{-1}(fp))$$

$$Q_C = 339.509 \times \tan(\cos^{-1}(0.98))$$

$$Q_C = 68.94 \text{ kVAR}$$

Potencia Reactiva efectiva

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

$$Q_{eff} = 129.86 \text{ kVAR} - 68.94 \text{ kVAR}$$

$$Q_{eff} = 60.92 \text{ kVAR}$$

Reactancia capacitiva efectiva

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

$$X_{eff} = \frac{454V^2}{\frac{60.92}{1000}(Mvar)}$$

$$X_{eff} = 3.382 \Omega$$

Reactancia capacitiva del filtro al 3% menos del 5° armónico

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

$$X_C = \left(\frac{(5 \times 0.97)^2}{(5 \times 0.97)^2 - 1} \right) \times 3.382\Omega$$

$$X_C = 3.546\Omega$$

Capacitancia del condensador a f=60Hz

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C}$$

$$C = \frac{1}{2 \times \pi \times 60\text{Hz} \times 3.546\Omega}$$

$$C = 747.847 \mu F$$

Reactancia inductiva del filtro a 3% menos del 5° armónico

$$X_L = \frac{X_C}{h^2}$$

$$X_L = \frac{3.546 \Omega}{(5 \times 0.97)^2}$$

$$X_L = 0.1507 \Omega$$

Inductancia del reactor a f=60Hz

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

$$L = \frac{0.1507 \Omega}{2 \times \pi \times 60 \text{Hz}}$$

$$L = 0.3999 \text{ mH}$$

Resistencia del filtro con un factor de calidad Q=30.

$$n = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$$

$$n = \sqrt{\frac{3.546\Omega}{0.150\Omega}}$$

$$n = 4.85$$

$$R = \frac{n \times X_L}{Q}$$

$$R = \frac{4.85 \times 0.1507\Omega}{30}$$

$$R = 0.024\Omega$$

Una vez determinados los parámetros del filtro se procede a validarlos mediante el procedimiento indicado en el capítulo 1.

Corriente fundamental del filtro

$$I_{fund} = \frac{\frac{V_{LLsys}}{\sqrt{3}}}{(X_C + X_L)}$$

$$I_{fund} = \frac{\frac{454 \text{ V}}{\sqrt{3}}}{(3.546\Omega + 0.1507\Omega)}$$

$$I_{fund} = 77.180 \text{ A}$$

En base al espectro armónico resultado de la simulación se determina las corrientes armónicas del filtro como se indica a continuación.

$$I_5 = \frac{I_5\% \times I_{fund}}{100\%}$$

$$I_5 = \frac{27.76\% \times 77.180A}{100\%}$$

$$I_5 = 21.425A$$

Utilizando la metodología anterior se determina las corrientes de cada armónica generado según el espectro generado, corrientes que se indican en la siguiente tabla:

h	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10
%	100	0.82	3.19	0.13	27.76	0.04	7.85	0.12	0.43	0.03
Ih (A)	77.180	0.633	2.462	0.100	21.425	0.031	6.059	0.093	0.332	0.023
h	I11	I12	I13	I14	I15	I16	I17	I18	I19	I20
%	5.81	0	3.33	0.04	0.14	0.03	1.74	0	1.58	0.03
Ih (A)	4.484	0.000	2.570	0.031	0.108	0.023	1.343	0.000	1.219	0.023
h	I21	I22	I23	I24	I25	I26	I27	I28	I29	I30
%	0	0.01	0.58	0	0.63	0	0.04	0	0.41	0
Ih (A)	0.000	0.008	0.448	0.000	0.486	0.000	0.031	0.000	0.316	0.000
h	I31	I32	I33	I34	I35	I36	I37	I38	I39	I40
%	0.26	0	0	0	0.2	0	0.17	0	0	0
Ih (A)	0.201	0.000	0.000	0.000	0.154	0.000	0.131	0.000	0.000	0.000
h	I41	I42	I43	I44	I45	I46	I47	I48	I49	I50
%	0.05	0	0.12	0	0	0	0.12	0	0.11	0
Ih (A)	0.039	0.000	0.093	0.000	0.000	0.000	0.093	0.000	0.085	0.000

Con las corrientes armónicas se determina la corriente rms

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

$$I_{RMS} = \sqrt{77.180A^2 + 0.633A^2 + 2.462A^2 + \dots + 0.085A^2 + 0A^2}$$

$$I_{RMS} = 80.559A$$

Con estos datos se verifica la siguiente condición:

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

$$\frac{80.559A}{77.180A} \times 100 \leq 135\%$$

$$104.378\% \leq 135\%$$

CUMPLE

Se verifica que voltaje pico del filtro no supere el 120% del voltaje pico del sistema mediante el siguiente procedimiento:

Voltaje pico línea neutro del sistema

$$V_{L-N \text{ pico sys}} = \sqrt{2} \times \frac{V_{LLsys}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{L-N \text{ pico sys}} = \sqrt{2} \times \frac{454V}{\sqrt{3}}$$

$$V_{L-N \text{ pico sys}} = 370.68V$$

Voltaje del capacitor

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

$$V_C = 77.180A \times 3.5469\Omega$$

$$V_C = 273.75V$$

Voltaje armónico en el filtro

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

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

h	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10
Ih (A)	77.180	0.633	2.462	0.100	21.425	0.031	6.059	0.093	0.332	0.023
Ih/h	77.180	0.316	0.821	0.025	4.285	0.005	0.866	0.012	0.037	0.002
h	I11	I12	I13	I14	I15	I16	I17	I18	I19	I20
Ih (A)	4.484	0.000	2.570	0.031	0.108	0.023	1.343	0.000	1.219	0.023
Ih/h	0.408	0.000	0.198	0.002	0.007	0.001	0.079	0.000	0.064	0.001
h	I21	I22	I23	I24	I25	I26	I27	I28	I29	I30
Ih (A)	0.000	0.008	0.448	0.000	0.486	0.000	0.031	0.000	0.316	0.000
Ih/h	0.000	0.000	0.019	0.000	0.019	0.000	0.001	0.000	0.011	0.000

h	I31	I32	I33	I34	I35	I36	I37	I38	I39	I40
Ih (A)	0.201	0.000	0.000	0.000	0.154	0.000	0.131	0.000	0.000	0.000
Ih/h	0.006	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000
h	I41	I42	I43	I44	I45	I46	I47	I48	I49	I50
Ih (A)	0.039	0.000	0.093	0.000	0.000	0.000	0.093	0.000	0.085	0.000
Ih/h	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.002	0.000

$$V_C(h) = 25.544V$$

Voltaje armónico línea neutro pico del filtro

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

$$V_{C L-N \text{ pico}} = \sqrt{2} \times (273.75V + 25.544V)$$

$$V_{C L-N \text{ pico}} = 423.27V$$

Con estos datos se verifica la siguiente condición:

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

$$\frac{423.273V}{370.68V} \times 100 \leq 120\%$$

$$114.185\% \leq 120\%$$

CUMPLE

Se verifica que voltaje rms del filtro no supere el 110% del voltaje rms del sistema mediante el siguiente procedimiento:

Voltaje RMS del sistema.

$$V_{L-N \text{ rms sys}} = \frac{V_{LLsys}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{L-N \text{ rms sys}} = \frac{454V}{\sqrt{3}}$$

$$V_{L-N \text{ rms sys}} = 262.117V$$

Voltaje RMS del filtro

$$V_C = I(h) \times X_C$$

h	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10
Ih (A)	77.180	0.633	2.462	0.100	21.425	0.031	6.059	0.093	0.332	0.023
Vc(V)	273.755	2.245	8.733	0.356	75.994	0.110	21.490	0.329	1.177	0.082
h	I11	I12	I13	I14	I15	I16	I17	I18	I19	I20
Ih (A)	4.484	0.000	2.570	0.031	0.108	0.023	1.343	0.000	1.219	0.023
Vc(V)	15.905	0.000	9.116	0.110	0.383	0.082	4.763	0.000	4.325	0.082
h	I21	I22	I23	I24	I25	I26	I27	I28	I29	I30
Ih (A)	0.000	0.008	0.448	0.000	0.486	0.000	0.031	0.000	0.316	0.000
Vc(V)	0.000	0.027	1.588	0.000	1.725	0.000	0.110	0.000	1.122	0.000
h	I31	I32	I33	I34	I35	I36	I37	I38	I39	I40
Ih (A)	0.201	0.000	0.000	0.000	0.154	0.000	0.131	0.000	0.000	0.000
Vc(V)	0.712	0.000	0.000	0.000	0.548	0.000	0.465	0.000	0.000	0.000
h	I41	I42	I43	I44	I45	I46	I47	I48	I49	I50
Ih (A)	0.039	0.000	0.093	0.000	0.000	0.000	0.093	0.000	0.085	0.000
Vc(V)	0.137	0.000	0.329	0.000	0.000	0.000	0.329	0.000	0.301	0.000

$$V_{C L-N total rms} = \sqrt{V_C^2 + V_C(2)^2 + V_C(3)^2 + \dots + V_C(n)^2}$$

$$V_{C L-N total rms} = 285.74V$$

Con estos datos se verifica la siguiente condición:

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

$$\frac{285.74V}{262.117V} \times 100 \leq 110\%$$

$$109.012\% \leq 110\%$$

CUMPLE

Se debe cumplir con la condición de que la nueva potencia reactiva no supere el 135% de la potencia reactiva efectiva del sistema mediante el siguiente procedimiento.

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

$$Q_{3\phi \text{ recalculada}} = 3 \times \frac{285.74 V^2}{3.546\Omega}$$

$$Q_{3\phi \text{ recalculada}} = 69.057 kVAR$$

Con el dato calculado se evalúa la siguiente condición:

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

$$\frac{69.057 kVAR}{60.928 kVAR} \times 100 \leq 135\%$$

$$113.341\% \leq 135\%$$

CUMPLE

Para culminar la validación de los parámetros del filtro se determina el calentamiento del dieléctrico del capacitor mediante el siguiente procedimiento.

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

$$69.057 kVAR \leq 1.35 \times 69.057 kVAR$$

$$69.057 kVAR \leq 93.227 kVAR$$

CUMPLE

2.5.Conclusiones.

- La contaminación armónica generada en las estaciones de bombeo Quillán 1 y Quillán 2 se deben principalmente al uso de variadores de frecuencia de 6 pulsos para el arranque de los conjuntos bomba-motor.
- Los armónicos más representativos en el espectro generado por los variadores de 6 pulsos son los de orden 5 y 7, que para el caso de estudio son el 26.14% y 7.78% respectivamente para el caso de la estación de bombeo Quillán 1 y el 27.76% y 7.85% respectivamente para el caso de la estación de bombeo Quillán 2.

- Los parámetros determinados para los filtros de las estaciones de bombeo Quillán 1 y Quillán 2 cumplen con los criterios que debe soportar los equipos del filtro establecidos en la IEEE 1531-2003 Guía para la aplicación y especificación de filtros armónicos.

CAPÍTULO III

APLICACIÓN Y/O VALIDACION DE LA PROPUESTA

3.1. Análisis de los resultados.

Con los parámetros de los filtros sintonizados al 5to armónico, determinados en el capítulo II, se procede a validarlos mediante la simulación de los mismo en el software Etap 19.0.1, para lo cual se ingresan los parámetros de los filtros según los cálculos realizados para cada una de las dos estaciones de bombeo, para el dato de los kVAr del capacitor que se debe ingresar en los parámetros del filtro es necesario determinar los kVAr por fase necesarios los cuales se obtienen a partir de los reactivos efectivos como se indica a continuación:

$$kVAR_{fase} = \frac{Q_{eff}}{3}$$

Aplicando la relación con los datos obtenidos para las dos estaciones los parámetros a ingresar en el software se detallan en la Tabla 21.

Tabla 21 Filtros sintonizados al 5to armónico.

FILTROS SINTONIZADOS A h=5		
Parámetro/ Estación	QUILLÁN 1	QUILLÁN 2
Capacitor (kVAr)	21.00	20.31
Inductancia (mH)	0.3802	0.3999
Resistencia (Ω)	0.023	0.024

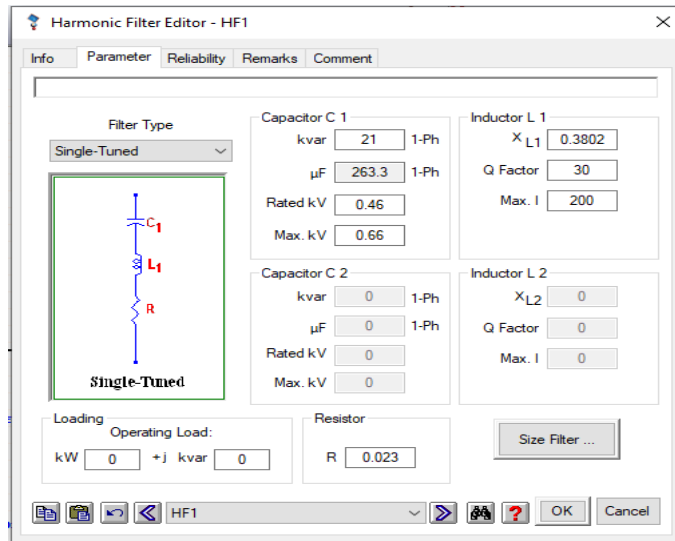


Figura 48 Filtro 5to armónico Quillán 1

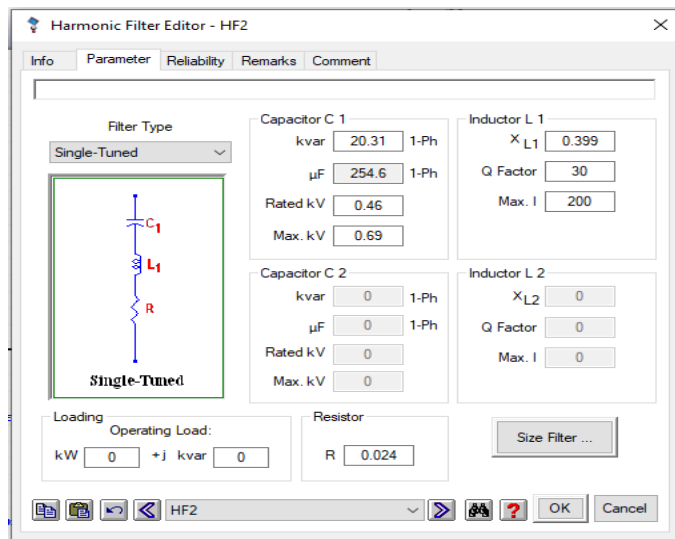


Figura 49 Filtro 5to armónico Quillán 2.

Con los datos ingresados se procede a ejecutar el módulo de análisis armónico del software ETAP obteniendo los resultados de forma de onda y espectro armónico que se muestran en la Figura 50 y Figura 51 para la estación de bombeo Quillán 1 y en la Figura 52 y Figura 53 para la estación de bombeo Quillán 2.

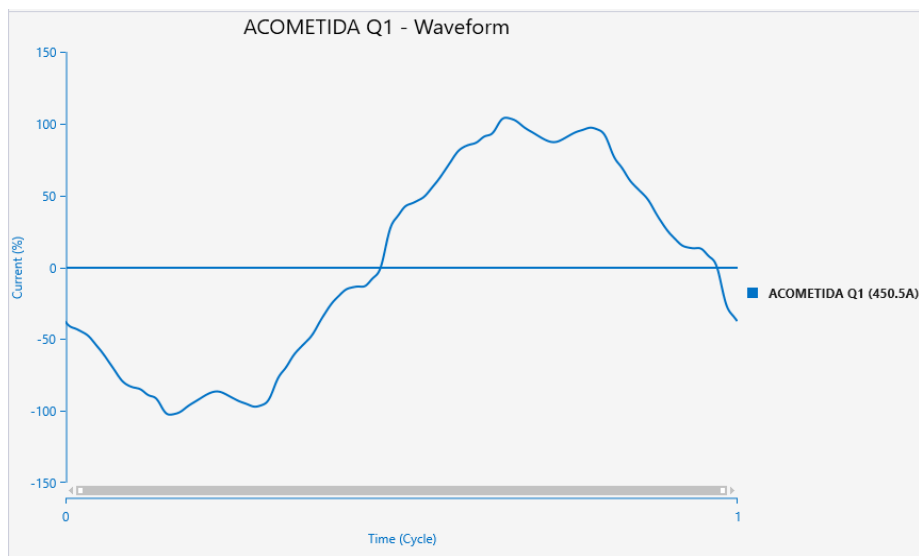


Figura 50 Forma de onda de la estación Quillán 1 con filtro sintonizado al 5to armónico

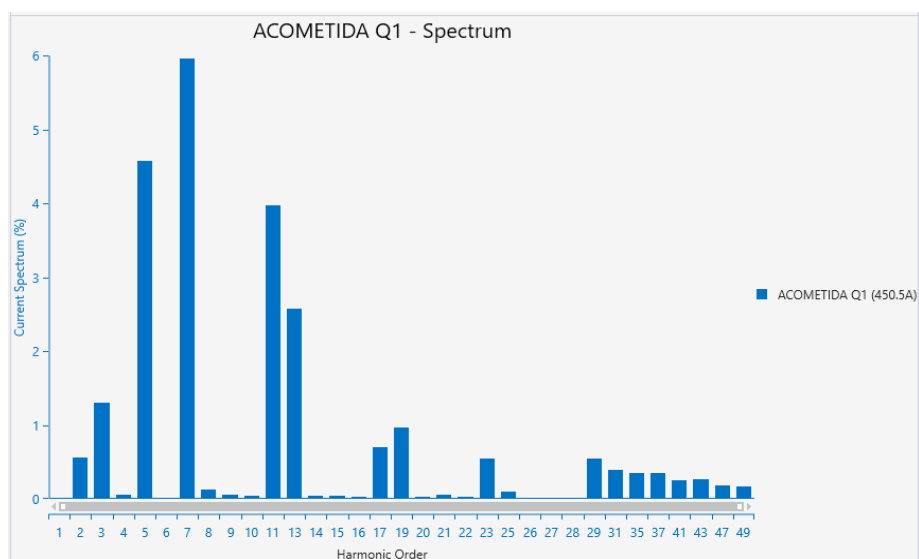


Figura 51 Espectro armónico resultante con filtro sintonizado al 5to armónico.

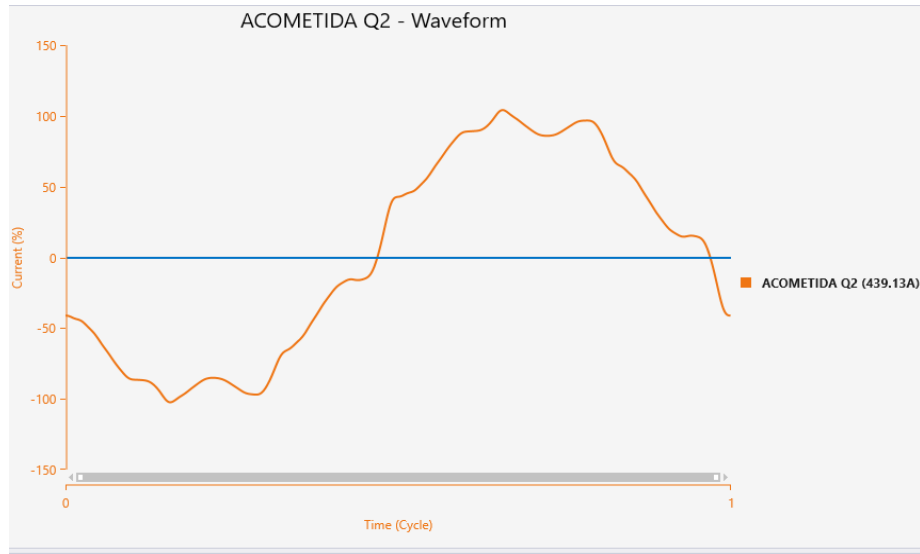


Figura 52 Forma de onda de la estación Quillán 2 con filtro sintonizado al 5to armónico

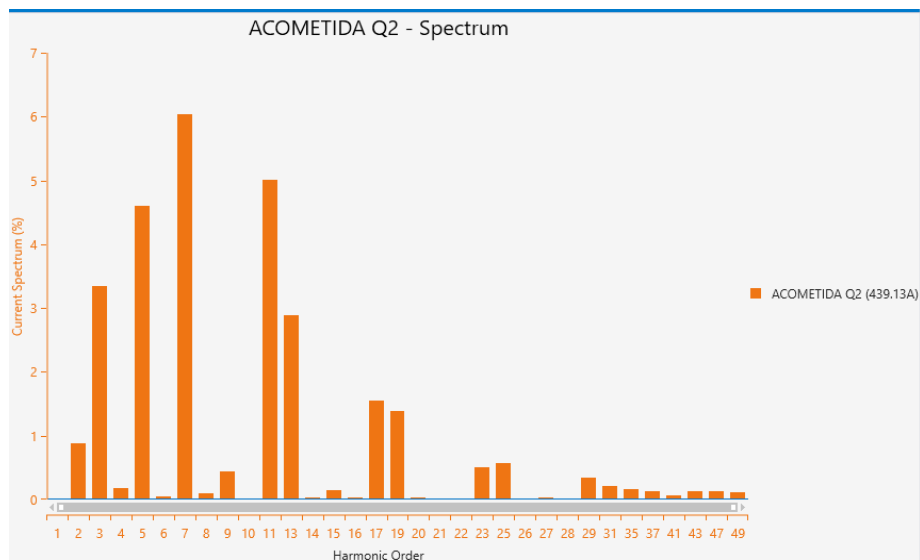


Figura 53 Espectro armónico resultante con filtro sintonizado al 5to armónico.

Como se puede observar en las figuras anteriores las formas de onda y los espectros armónicos resultantes presentan una reducción del porcentaje del 5to armónico, sin embargo, la distorsión de demanda total (TDD) no cumple con la Regulación 002-20; en la tabla 22 se indican los armónicos representativos que se presentan con la instalación del filtro armónico sintonizado al 5to armónico.

Tabla 22 Resultados de la simulación del filtro sintonizado al 5to armónico.

Armónico	Limite	Sin Filtro		Con Filtro h=5		Observacion
		Quillán 1	Quillán 2	Quillán 1	Quillán 2	
5	7%	26.2%	27.8%	4.58%	4.61%	Cumple
7	7%	7.8%	7.90%	5.96%	6.03%	Cumple
TDD	8%	27.77%	27.93%	9.14%	10.42%	No cumple

Como se puede apreciar en la tabla anterior con la incorporación de un filtro sintonizado al 5to armónico se logra reducir un alto porcentaje de distorsión, así también se reduce levemente el porcentaje del 7mo armónico con lo que logramos estar dentro del porcentaje límite exigido por la Regulación 002-20.

Sin embargo, con la reducción mínima del porcentaje del 7mo armónico no se logra que la distorsión de demanda total cumpla con el límite exigido, para lo cual se incorpora un filtro sintonizado al 7mo armónico cuyos parámetros se determinan con el procedimiento indicado en el capítulo II, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 23 Filtros sintonizados al 7mo armónico.

FILTROS SINTONIZADOS A h=7		
Parámetro/ Estación	QUILLÁN 1	QUILLÁN 2
Capacitor (kVAr)	21.00	20.31
Inductancia (mH)	0.189	0.199
Resistencia (Ω)	0.016	0.017

Con los parámetros determinados se procede a incorporar los filtros en el software ETAP para realizar la simulación, las formas de onda y espectros resultantes con los dos filtros sintonizados al 5to y 7mo armónico se muestran en la Figura 54 y Figura 55 para la estación de bombeo Quillán 1 y en la Figura 56 y Figura 57 para la estación de bombeo Quillán 2.

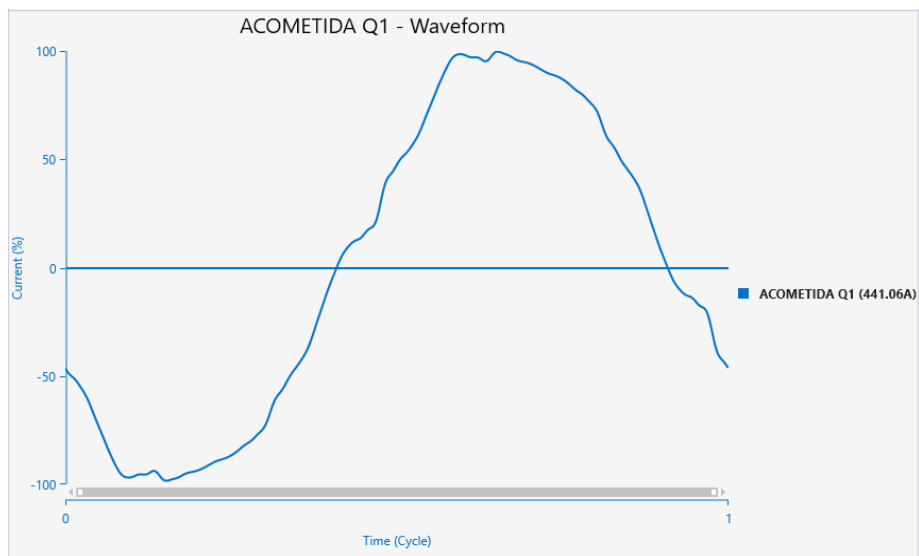


Figura 54 Forma de onda de la estación Quillán 1 con filtros sintonizados al 5to y 7mo armónico.

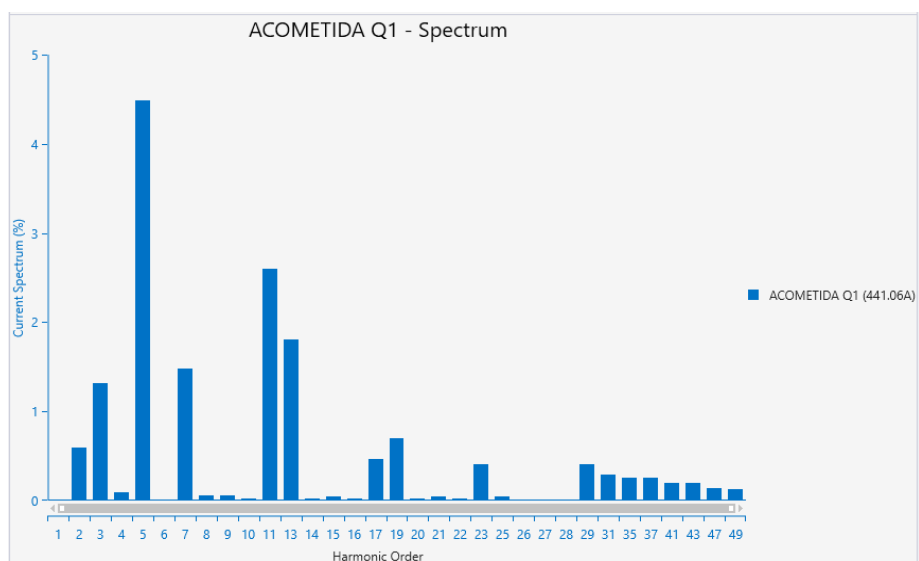


Figura 55 Espectro armónico resultante con filtros sintonizados al 5to y 7mo armónico.

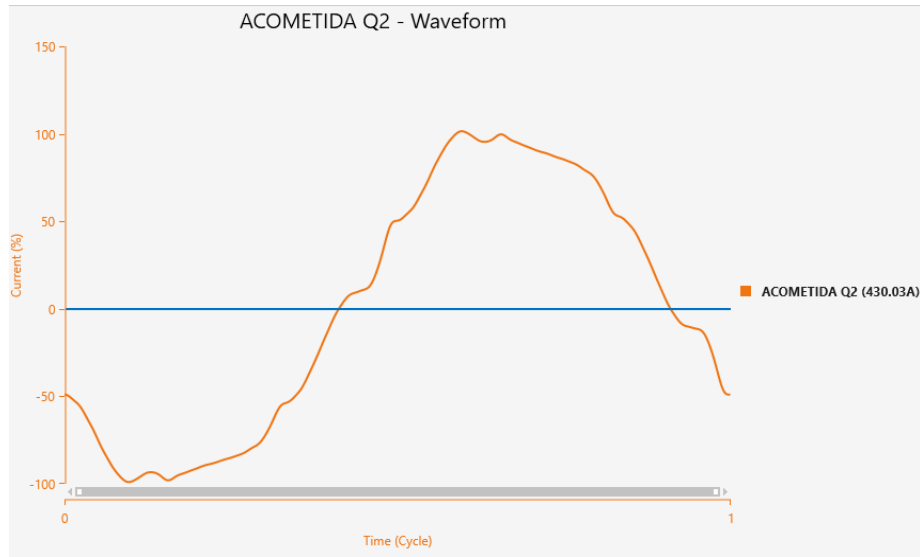


Figura 56 Forma de onda de la estación Quillán 2 con filtros sintonizados al 5to y 7mo armónico.

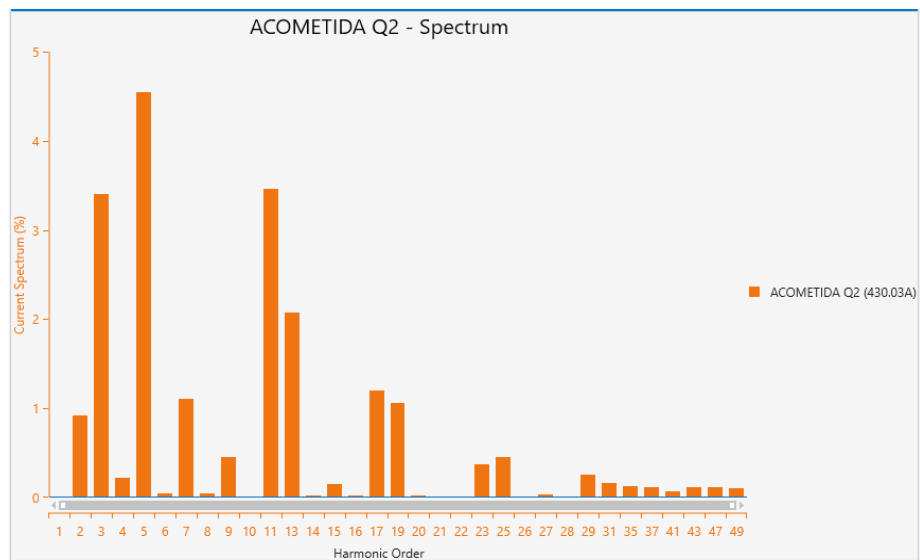


Figura 57 Espectro armónico resultante con filtros sintonizados al 5to y 7mo armónico.

Con la incorporación de un filtro sintonizado al 7mo armónico se puede observar la reducción significativa del espectro armónico de cada estación de bombeo obteniendo los resultados que se indican en la Tabla 24.

Tabla 24 Resultados de la simulación de los filtros sintonizados al 5to y 7mo armónico.

Armónico	Limite	Sin Filtro		Con Filtros h=5 y 7		Observación
		Quillán 1	Quillán 2	Quillán 1	Quillán 2	
5	7%	26.2%	27.8%	4.49%	4.55%	Cumple
7	7%	7.8%	7.90%	1.48%	1.10%	Cumple
TDD	8%	27.77%	27.93%	5.98%	7.34%	Cumple

3.2. Validación técnica.

De los resultados obtenidos en la simulación se valida el cumplimiento de los aspectos técnicos responsabilidad del consumidor establecidos en la Regulación N° ARCERNR – 002/20, además se evidencia una disminución de la corriente total rms con la implementación de los filtros como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 25 Resultados en el sistema eléctrico de las estaciones de bombeo con la implementación de los filtros.

Parámetro	Sin Filtro		Con Filtros h=5 y 7	
	Quillán 1	Quillán 2	Quillán 1	Quillán 2
Corriente (A)	475	462.5	441.1	430
Voltaje (V)	451	454	453	456
Potencia Aparente (kVA)	370.9	374.8	346.4	340.0
Factor de potencia	93.32%	93.44%	100%	100%

Con los resultados obtenidos se evidencia una disminución de corriente de 33.9A en el transformador de Quillán 1 y 32.5A en el transformador de Quillán 2, consecuentemente se presenta una reducción en la potencia aparente total de las dos estaciones de bombeo con lo que se reduce la cargabilidad de cada uno de los transformadores, a pesar de que el factor de potencia actual no presenta penalizaciones por parte de la Empresa Eléctrica Ambato con la implementación de los filtros se mejora el actual factor de potencia en las dos estaciones de bombeo en el Anexo 8 se indica el reporte del flujo de potencia con la incorporación de los filtros.

Con la reducción de la corriente se reducen las pérdidas provocadas por efecto Joule en los transformadores y los alimentadores aguas arriba del punto de instalación de los filtros, la comparación de las pérdidas actuales y proyectadas se detallan en las siguientes tablas.

Tabla 26 Pérdidas por efecto Joule sin la incorporación de filtros.

Parámetro	Quillán 1 (kW)	Quillán 2 (kW)	Total
Acometida en Medio Voltaje	0.007	0.09	0.097
Transformador	1.58	1.4	2.98
Acometida en Bajo Voltaje	0.53	0.456	0.986
TOTAL (kW)			4.063

Tabla 27 Pérdidas por efecto Joule con la incorporación de filtros.

Parámetro	Quillán 1 (kW)	Quillán 2 (kW)	Total
Acometida en Medio Voltaje	0.006	0.086	0.092
Transformador	1.36	1.33	2.69
Acometida en Bajo Voltaje	0.46	0.437	0.897
TOTAL (kW)			3.679

De las simulaciones realizadas en el software ETAP se evidencia una reducción 0.384 kW en las pérdidas por efecto Joule en el transformador y los alimentadores de medio y de bajo voltaje

Al considerar que el sistema de medida de las dos estaciones de bombeo es en medio voltaje con una tarifa con demanda horaria para el bombeo de agua para el SPAP se tienen los siguientes cargos por consumo de energía en diferentes horarios.

Tabla 28 Cargos por energía consumida de la tarifa con demanda horaria para el bombeo de agua

	Tarifa \$/kWh
Energía Activa Horaria (L-V 08h00-18h00)	0.043
Energía Activa Horaria (L-V 18h00-22h00)	0.073
Energía Activa Horaria (L-V 22h00-08h00 S-D 00h00-18h00)	0.034
Energía Activa Horaria (S-D 18h00-22h00)	0.043

Del análisis realizado un año atrás sobre la reducción en dólares por concepto de pérdidas de efecto Joule se tiene un ahorro de 245.48 USD/año.

3.3. Análisis económico.

Una vez determinados y validados mediante simulación la incorporación de los filtros sintonizados a los armónicos 5 y 7, se procede a la búsqueda en el mercado un filtro que cumpla con las condiciones requeridas con el fin de establecer el presupuesto referencial para la adquisición e instalación de los filtros.

De la búsqueda realizada se encontró en el mercado el filtro pasivo Matrix® AP Passive Harmonic Filter de la corporación MTE el cual tiene las siguientes especificaciones técnicas [40]:

- Cumple con los estándares IEEE-519 para mitigación de armónicos en un amplio rango de carga.
- Equipo de fácil instalación.
- Diseño más pequeño, ligero y duradero.
- Cuenta con tecnología pasiva adaptativa.
- Tecnología para adaptarse a cargas variables.
- Aumenta la vida útil del equipo.
- Reducción de los costos de energía con mayor eficiencia y menor pérdida de calor.
- El filtro no resonará con la red distribuidora.

De acuerdo a los modelos de filtros Matrix® AP Passive Harmonic Filter se escoge el modelo MAPG0636D de acuerdo a la corriente de línea obtenida en las simulaciones, el cual asciende a un costo de \$42,600.00 cada filtro, tomando en cuenta las dos estaciones de bombeo el presupuesto para la adquisición de los filtros se indica en la siguiente tabla.

Tabla 29 Presupuesto referencial

Item	Descripción	Unid.	Cant.	P.U.	P. Total
1	Filtro Pasivo adaptativo 480VCA 636A incluye instalación	U	2	\$42,600.00	\$85,200.00

3.3.1. Viabilidad del proyecto.

Para el cálculo de la viabilidad del proyecto se utilizan los indicadores financieros VAN y TIR con el fin de saber si es rentable económicamente invertir en el proyecto de instalación de filtros.

Para la determinación del flujo de caja se exponen las siguientes consideraciones que fueron proporcionadas por el departamento financiero y la unidad de control y pérdidas de la EP-EMAPA-A.

El sistema de Quillán Alemania suministra 120 l/s a la Zona Norte de la ciudad de Ambato lo que equivale a un suministro de 3'784,320 metros cúbicos al año, de los datos proporcionados por la Unidad de Control y Perdidas se establece un porcentaje de 30% de índice de agua no contabilizada en las zonas que abastece el sistema Quillán Alemania teniendo una producción efectiva distribuida de 2'649,024 metros cúbicos.

En base a los estudios de costos, el Departamento Financiero de la EP-EMAPA-A ha determinado que los costos de operación y mantenimiento que generan las dos estaciones de bombeo Quillán 1 y Quillán 2 a razón de mantenimiento electromecánico, personal operativo y técnico, pago de consumo de energía y gastos administrativos son de 0.30 USD por cada metro cúbico producido.

De los estudios realizados por el Departamento Comercial y el Departamento Financiero determinan que el precio de distribución por metro cúbico producido de las dos estaciones de bombeo Quillán 1 y Quillán 2 es de 0.45 USD

En la elaboración del flujo de efectivo proyectado se considera el ahorro por concepto de la reducción de pérdidas por efecto Joule al mismo que se considera una tasa de rendimiento del 8.23% dato establecido por el Banco Central del Ecuador para los proyectos de inversión pública.

Debido a que el sistema de Quillán Alemania tiene una concesión de utilización agua de 120 l/s se realiza una producción fija durante los próximos 5 años, de igual manera los gastos de operación anuales se consideran fijos para determinar los índices VAN y TIR.

Tabla 30 Flujo de efectivo neto proyectado a 5 años

Año	Inversión	Ingresos	Ahorro por pérdidas	Egresos por O y M	Flujo Neto
0	-\$85,200.00	\$1,192,060.80	\$245.00	\$1,135,296.00	-\$28,190.20
1		\$1,192,060.80	\$265.16	\$1,135,296.00	\$57,029.96
2		\$1,192,060.80	\$286.99	\$1,135,296.00	\$57,051.79
3		\$1,192,060.80	\$310.61	\$1,135,296.00	\$57,075.41
4		\$1,192,060.80	\$336.17	\$1,135,296.00	\$57,100.97
5		\$1,192,060.80	\$363.83	\$1,135,296.00	\$57,128.63

Con la utilización de las funciones financieras del programa Excel se determinan los índices VAN y TIR que se indican a continuación.

Tabla 31 Resultados VAN y TIR

VAN	TIR
\$98,032.84	30.01%

Considerando que un proyecto es rentable y factible si el VAN es mayor que cero y la TIR sea mayor que la tasa de descuento que para el caso de estudio es de 8.23%, con los datos determinados se establece que el proyecto es rentable y factible.

3.4. Conclusiones.

- En un espectro donde los armónicos representativos son los de orden 5 y 7, la sintonización del filtro en el 5to armónico reduce aproximadamente el 23% al armónico de orden 7.
- La sintonización de los filtros a los armónicos 5 y 7 mejora considerablemente la distorsión de demanda total a un 5.98% para el caso de Quillán 1 y a un 7.34% para Quillán 2, siendo estos valores inferiores al 8% establecido en la Regulación N° ARCERNNR – 002/20
- Al lograr reducir el contenido armónico en las dos estaciones de bombeo se reduce además la corriente total en un 7.13% en la estación de Quillán 1 y en un 7.02% en la estación de Quillán 2.

CONCLUSIONES GENERALES

- De la revisión del estado del arte, los parámetros de calidad responsabilidad del consumidor son la distorsión armónica individual de corriente y la distorsión de demanda total según lo establecido en la Regulación No ARCERNNR-002/20, para el cumplimiento de estos parámetros se ha desarrollado la implementación de filtros que pueden ser pasivos o activos, en donde los filtros pasivos son configuraciones RLC sintonizadas al armónico que se desea reducir o mitigar y los filtros activos son equipos que contrarrestan los armónicos encontrados en el sistema mediante electrónica de potencia.
- En el proceso de recolección de datos del sistema actual se determina que los parámetros de calidad responsabilidad del consumidor que incumplen los niveles establecidos en la Regulación No ARCERNNR-002/20 son para la distorsión armónica de corriente individual el 5to y 7mo armónico cuyos valores son del 26.2% y el 7.8% para la Estación de Bombeo Quillán 1 y el 27.8% y 7.90% para la Estación de Bombeo Quillán 2, siendo el límite máximo el 7% para el 5to y 7mo armónico, consecuentemente, el parámetro de distorsión de demanda total tiene un valor del 27.77% en la Estación de bombeo Quillán 1 y 27.93% en la Estación de Bombeo Quillán 2 incumpliendo el límite máximo de 8%.
- Con el estado de la contaminación armónica actual se determinan matemáticamente los parámetros para los filtros sintonizados al 5to y 7mo armónico y se valida el cumplimiento de los criterios establecidos en el estándar IEEE Std 1531.
- Con la incorporación de los filtros pasivos en la simulación del sistema se evidencia una disminución en la distorsión armónica de corriente individual el 5to y 7mo armónico al 4.49% y al 1.48% para la Estación de Bombeo Quillán 1 y al 4.55% y 1.10% para la Estación de Bombeo

Quillán 2, cumpliendo con el límite máximo del 7% para el 5to y 7mo armónico, los nuevos valores del parámetro de distorsión de demanda total son del 5.98% en la Estación de bombeo Quillán 1 y el 7.34% en la Estación de Bombeo Quillán 2 cumpliendo con el límite máximo de 8%.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar el análisis de calidad de energía en las industrias con el fin de verificar el cumplimiento de la Calidad responsabilidad del consumidor establecido en la Regulación No ARCERNNR-002/20 así no exista penalizaciones por parte de la Empresa Distribuidora.
- Se recomienda realizar un monitoreo a tiempo real con la instalación de equipos registradores fijos para dar seguimiento al espectro armónico en el transcurso del tiempo y las posibles variaciones de cargas.
- A las industrias que demandan altos consumos de energía se recomienda establecer los correctivos necesarios a sus sistemas eléctricos, en cuanto a calidad de energía, para reducir pérdidas eléctricas y aliviar al sistema de distribución.
- Se recomienda realizar un análisis económico en cuanto a las pérdidas técnicas (pérdidas por efecto Joule) que se presentan en las industrias que tienen problemas de contaminación armónica y establecer el ahorro económico que representa cumplir con la calidad responsabilidad del consumidor.
- Se recomienda realizar un análisis técnico-económico comparativo entre la utilización de filtros pasivo y filtros activos, y establecer parámetros de eficiencia energética con la utilización de filtros activos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] O. Ceaki, G. Seritan, R. Vatu, and M. Mancasi, “THE 10th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING Analysis of Power Quality Improvement in Smart Grids,” pp. 797–801, 2017.
- [2] P. Khetarpal and M. M. Tripathi, “A critical and comprehensive review on power quality disturbance detection and classification,” *Sustain. Comput. Informatics Syst.*, vol. 28, p. 100417, 2020, doi: 10.1016/j.suscom.2020.100417.
- [3] T. Zhong, S. Zhang, G. Cai, and N. Huang, “Power-quality disturbance recognition based on time-frequency analysis and decision tree,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, no. 18, pp. 4153–4162, 2018, doi: 10.1049/iet-gtd.2018.5780.
- [4] O. Churio Silvera, M. Vanegas Chamorro, and G. Valencia Ochoa, “Estudio y diagnóstico de la calidad de la energía de un campus universitario en la costa norte de Colombia,” *Av. Investig. en Ing.*, vol. 15, no. 1, pp. 271–285, 2018, doi: 10.18041/1794-4953/avances.1.4739.
- [5] G. Velarde, “Estudio de las perturbaciones armónicas en la calidad de energía eléctrica en la Universidad de Piura - campus Lima,” 2022.
- [6] C. Veganzones, “Estudio del efecto de armónicos producidos por inversores en los transformadores de las subestaciones de plantas fotovoltaicas,” 2022.
- [7] M. Micael, “Estudio de la distorsión armónica generada aguas arriba de un variador de velocidad monofásico con salida trifásica,” Universidad Nacional de Córdoba, 2018. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/11086/6538>
- [8] A. Ríos, “Evaluación e Operación De Filtro Pasivo Armónico En Red Eléctrica Desbalanceada Contaminada Con Armónicos,” no. 10, p. 155, 2021, [Online]. Available: <https://rinacional.tecnm.mx/handle/TecNM/1669>
- [9] R. R. Trejo, “Mitigación de la distorsión armónica e interarmónica en redes

- eléctricas utilizando filtros digitales,” Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2021. doi: file:///C:/Users/LUIS/Documents/MEGA/MEGAsync/TITULACION/TESIS/BIBLIOGRAFIA/Análisis de distorsión armónica en iluminación LED.pdf.
- [10] C. Caballero, L. Cortez, G. Muñoz, and J. Castañeda, “Filtro activo de potencia para compensar la distorsión armónica de un sistema fotovoltaico autónomo,” *Artic. Rev. Tecnol. e Innovación Diciembre*, vol. 3, no. 9, pp. 76–84, 2016, [Online]. Available: www.ecorfan.org/bolivia
- [11] P. Tupiza, W. Pavón, and M. Jaramillo, “Una Mejora de la calidad de energía mediante el uso de un UAPF-PV,” *Rev. Técnica “energía,”* vol. 19, no. 1, pp. 92–99, 2022, doi: 10.37116/revistaenergia.v19.n1.2022.522.
- [12] S. Devassy and B. Singh, “Implementation of Solar Photovoltaic System with Universal Active Filtering Capability,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, no. 4, pp. 3926–3934, 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2906297.
- [13] S. Devassy and B. Singh, “Control of Renewable Energy Integrated Universal Active Filter for Modern Distribution Systems,” *India Int. Conf. Power Electron. IICPE*, vol. 2018-Decem, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/IICPE.2018.8709525.
- [14] L. Antonio and N. Vega, “Analysis of Harmonic Distortion in LED Lighting,” vol. 14, no. 2, pp. 95–107, 2017.
- [15] Í. Solís, “Flujo de cargas en redes eléctricas de distribución con cargas no-lineales.,” Universidad de Oviedo, 2017.
- [16] J. Cervantes, *Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica*, vol. 52, no. 1. 1995.
- [17] W. H. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*. CRC PRESS, 2017. [Online]. Available: <https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results>
- [18] A. Naranjo, *Proyecto-Del-Sistema-de-Distribucion-Elctrico-Alberto-Naranjo.pdf*. Equinoccio, 2008.
- [19] T. Gonen, *Electric Power Distribution System Engineering - Second Edition*. California, 2008. [Online]. Available:

<https://books.google.com.pe/books?id=JIDSBQAAQBAJ>

- [20] S. R. Castano, *Redes De Distribucion De Energia*. 2004.
- [21] W. Are *et al.*, *Electrical Power Systems Quality , Second Edition*. McGraw - Hill.
- [22] B. W. Kennedy, *Power Quality Primer, McGraw Hill*. 2013.
- [23] S. Ramirez Castaño and E. A. Cano Plata, *Calidad del servicio de Energía Eléctrica*, Primera. Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, 2006. [Online]. Available: <https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results>
- [24] E. F. Fuchs and M. A. S. Masoum, *Power Quality in Electrical Machines and Power Systems*, vol. 4, no. 1. AP, 2008.
- [25] BRAYAN DAVID SIMBA REYES, “Metodología para reducir el desbalance de la demanda mediante sistemas de medio voltaje en corriente directa,” Universidad Politécnica Salesiana, 2021. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19778>
- [26] M. H. J. Bollen and I. Y. H. Gu, *Signal Processing of power quality disturbances*. Power Engineering, 2006. [Online]. Available: <https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results>
- [27] Z. Hanzelka and A. Bien, “Guía de Calidad de la Energía Eléctrica - Interarmónico,” *Potencia*, UK, p. 28, Jul. 2004.
- [28] S. B. Efe, “Harmonic filter application for an industrial installation,” *2015 13th Int. Conf. Eng. Mod. Electr. Syst. EMES 2015*, pp. 31–34, 2015, doi: 10.1109/EMES.2015.7158395.
- [29] ARCERNNR, “Regulación 002/20 - Calidad del servicio de distribución y comercialización.” p. 36, 2020. [Online]. Available: <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/01/Regulacion-002-20.pdf>
- [30] D. Committee, I. Power, and E. Society, “IEEE Std 519™-2014,” *IEEE Std 519-2014 (Revision IEEE Std 519-1992)*, vol. 2014, 2014.
- [31] C. MTE, “Reactores RL”.
- [32] M. T. E. Corporation and M. Falls, “Tablas de selección de reactor MTE RL Reactores de línea / carga RL”.

- [33] E. Téllez, “Programa De Ahorro De Energia,” *Autom. Product. y Calid.*, 2020, [Online]. Available: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/36273500/Distorsion_Armonica-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1661304986&Signature=V14nLhhxbhWzUvChTi5SRxk1ZEY882i99ZmRCzKWvYkCh1zOFDYII~F2bY~5WGGZf7KARatNqACtk6lSjUIO0n8ZFxxYj7PIRvrNOEfddS0QRcrmx6M1ejsNbj~a4wUKJ4vNnQj3G
- [34] D. Committee, I. Power, and E. Society, “IEEE 1531-2003 IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters,” *IEEE Acoust. Speech, Signal Process. Newsl.*, vol. 37, no. 1, pp. 5–6, 2012, doi: 10.1109/msp.1976.237495.
- [35] M. Carrasco, “Influencia de un filtro eficiente para mitigar las corrientes armónicas en baja tensión del SED 598 del centro comercial ‘El Molino I’ - Cusco,” 2020. [Online]. Available: <http://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/5181/253T20201002.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [36] Pérez Abril; Ignacio, “Cálculo de parámetros de filtros pasivos de armónicos; Calculation of the harmonics passive filters parameters,” *Ing. Energética*, vol. XXXIII, no. 2, pp. 134–143, 2012.
- [37] Y. C. C. J. Mora Sanchez, “ESTUDIO Y ANALISIS DE CALIDAD DE ENERGIA ENFOCADO EN NIVEL DE ARMONICOS EN EL SISTEMA ELECTRICO DE LA SUBESTACION ENFRIADORA 1 DE HOLCIM ECUADOR PLANTA GUAYAQUIL,” Universidad Politécnica Salesiana, 2013. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/6848>
- [38] L. V. L. Enrique, “Metodología para el análisis de las perturbaciones armónicas en los sistemas industriales en baja tensión,” *Intituto Politécnico Nac.*, p. 155, 2007.
- [39] E. Filtro, “AccuSine ® Filtro activo de armónicos Como pueden los filtros activos de armónicos resolver los.”
- [40] S. Profile, “Meeting IEEE-519 with a Six-Pulse VFD,” pp. 1–2, [Online].

Available: <https://mtecorp.com/blog/2018/03/19/meeting-ieee-519-limits-with-a-six-pulse-vfd/>

ANEXOS

ANEXO I
CERTIFICADO DE CALIBRACION REGISTRADOR AEMC
3945 B

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN / CALIBRATION CERTIFICATE

INNOVATECIS CIA LTDA

General José Maria Guerrero N69-170 y Alfonso del Hierro

Quito, Ecuador

(+593) 02 6040 607

innovatec@innovatec.com.ec

Certificado No. (Certificate #): 30303**Fecha de Recepción** (Reception Date): 2022-11-22**Fecha de Calibración** (Calibration Date): 2022-12-02**Próxima Fecha de Calibración** (Calibration Due): 2024-12**Fecha de Emisión** (Emission Date): 2022-12-02

Cliente (Client): EP-EMPRESA MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DE AMBATO
ANTONIO CLAVIJO 10-24 Y ISAIAS SANCHEZ, AMBATO, TUNGURAHUA

Información del Instrumento (Instrument Information)

Equipo (Instrument):	Analizador de Energía	Int. de Medición: (Measurement Range)	600 VAC; 600 VDC; 6500 AAC	Ubicación: (Location)	*****
Marca (Brand):	AEMC Instruments	División de escala: (Resolution)	0.1 V; 0,1 A	Lugar de Calibración: (Place of Calibration):	Lab. INNOVATEC INNOVATEC's Lab.
Modelo (Model):	Model 3945-B				
Serie (Serial #):	164687DJ DV				

Datos de Calibración (Calibration Info)**Procedimiento** (Procedure): INN-PC-08**Condiciones Ambientales** (Environmental Conditions)**Temperatura** (Temp): (21.1 °C a 21.1 °C)**Humedad** (Humidity): (45 %HR a 45 %HR)**Trazabilidad** (Traceability Info)

Patrón (Standard)	Marca (Brand)	Cert. #	Última Calibración (Last Cal.)	Período (Period)
Multicalibrador Patrón	Transmille	AC-26847	2021-09-27	2 años
Current Adapter	Transmille	35157	2018-01-18	-

Resultados (Results)

Ver Resultados en Hoja Adjunta

See results in attached Sheet

El presente Certificado de Calibración posee la trazabilidad en esta magnitud hacia el Patrón Nacional, a través de la realización de la unidad de medida en el NPL, NIST, u otro Laboratorio Nacional reconocido al Sistema Internacional de Medidas. La calibración fue realizada bajo un Sistema de Gestión de Laboratorio conforme a la Norma ISO/IEC 17025:2017. Los resultados y su incertidumbre reportada con un nivel de confianza de $k=2$, 95% son relacionados a este instrumento y en el tiempo que se realizó las medidas. Este Laboratorio no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado del instrumento calibrado. La reproducción parcial es prohibida, la reproducción total deberá hacerse con la autorización escrita aprobada por INNOVATEC Industrial Solutions. *This Certificate of Calibration provides traceability of measurement to the National Standard, through units of measurement realized at the NPL, NIST or other recognized National Standard Laboratories to the International System of Units. The calibration was performed under a Laboratory Management System in accordance with the ISO/IEC 17025:2017 Standard. The results and the reported uncertainty at a confidence level of $k=2$, 95% are related only to this instrument and at the time of measurement. This Laboratory is not responsible for any damages that may result from improper use of the calibrated instrument. Partial reproduction is forbidden, the total reproduction must have an approved written authorization by INNOVATEC Industrial Solutions.*

Comentarios: Para medición de corriente alterna, se calibró L1 con pinza S/N:317820103; L2 con pinza S/N:317820099; L3 con pinza S/N:317820100 y N con pinza S/N:317820098.

Calibrado por: Ing. Mateo Bórquez
Calibrated by:

Aprobado por:
Approved by:



Firmado electrónicamente por
Diego Almeida
Gerente General

Fin de Certificado (End of Certificate)

Certificado No.: 30303

Equipo (Instrument):

Analizador de Energía

Fecha de Calibración:

2022-12-02

Marca (Brand):

AEMC Instruments

Tipo (Type)	Rango (Range)	Patrón (Standard)	UBP (UUT)	Error (Error)	Incertidumbre (Uncertainty)
Tensión Continua L1	50 V	50 V	49.8 V	-0.2 V	± 12 mV
Tensión Continua L2	50 V	50 V	49.8 V	-0.2 V	± 12 mV
Tensión Continua L3	50 V	50 V	49.5 V	-0.5 V	± 12 mV
Tensión Continua L1	220 V	220 V	219.5 V	-0.5 V	± 12 mV
Tensión Continua L2	220 V	220 V	219.6 V	-0.4 V	± 12 mV
Tensión Continua L3	220 V	220 V	219.7 V	-0.3 V	± 12 mV
Tensión Continua L1	440 V	440 V	439.6 V	-0.4 V	± 12 mV
Tensión Continua L2	440 V	440 V	439.6 V	-0.4 V	± 12 mV
Tensión Continua L3	440 V	440 V	439.5 V	-0.5 V	± 12 mV
Tensión Alterna @ 60 Hz L1	50 V	50 V	50.0 V	0.0 V	± 0.11 V
Tensión Alterna @ 60 Hz L2	50 V	50 V	50.0 V	0.0 V	± 0.11 V
Tensión Alterna @ 60 Hz L3	50 V	50 V	49.9 V	-0.1 V	± 0.11 V
Tensión Alterna @ 60 Hz L1	220 V	220 V	219.9 V	-0.1 V	± 0.13 V
Tensión Alterna @ 60 Hz L2	220 V	220 V	219.8 V	-0.2 V	± 0.13 V
Tensión Alterna @ 60 Hz L3	220 V	220 V	219.9 V	-0.1 V	± 0.13 V
Tensión Alterna @ 60 Hz L1	440 V	440 V	440.2 V	0.2 V	± 0.13 V
Tensión Alterna @ 60 Hz L2	440 V	440 V	439.8 V	-0.2 V	± 0.13 V
Tensión Alterna @ 60 Hz L3	440 V	440 V	439.7 V	-0.3 V	± 0.13 V
Potencia Eléctrica L1	3000 W	10 W	10.02 W	0.02 W	± 0.15 %
Potencia Eléctrica L1	3000 W	20 W	20.02 W	0.02 W	± 0.15 %
Potencia Eléctrica L1	3000 W	50 W	50.02 W	0.02 W	± 0.15 %
Potencia Eléctrica L1	3000 W	120 W	119.99 W	-0.01 W	± 0.15 %
Potencia Eléctrica L1	3000 W	500 W	489.99 W	-10.01 W	± 0.14 %
Potencia Eléctrica L1	3000 W	1000 W	989.89 W	-10.11 W	± 0.15 %
Potencia Eléctrica L2	3000 W	10 W	10.03 W	0.03 W	± 0.15 %
Potencia Eléctrica L2	3000 W	20 W	20.03 W	0.03 W	± 0.15 %
Potencia Eléctrica L2	3000 W	50 W	49.97 W	-0.03 W	± 0.15 %
Potencia Eléctrica L2	3000 W	120 W	119.93 W	-0.07 W	± 0.15 %
Potencia Eléctrica L2	3000 W	500 W	489.99 W	-10.01 W	± 0.14 %
Potencia Eléctrica L2	3000 W	1000 W	989.89 W	-10.11 W	± 0.15 %
Potencia Eléctrica L3	3000 W	10 W	10.04 W	0.04 W	± 0.15 %
Potencia Eléctrica L3	3000 W	20 W	20.04 W	0.04 W	± 0.15 %
Potencia Eléctrica L3	3000 W	50 W	49.93 W	-0.07 W	± 0.15 %
Potencia Eléctrica L3	3000 W	120 W	119.93 W	-0.07 W	± 0.15 %
Potencia Eléctrica L3	3000 W	500 W	489.99 W	-10.01 W	± 0.14 %
Potencia Eléctrica L3	3000 W	1000 W	989.89 W	-10.11 W	± 0.15 %
Frecuencia	110 V @ 50 Hz	50 Hz	50.000 Hz	0.000 Hz	± 1.8 mHz
Frecuencia	110 V @ 60 Hz	60 Hz	60.000 Hz	0.000 Hz	± 1.8 mHz
Intensidad Eléctrica L1 @ 50 Hz	500 A	50 A	49.8 A	-0.2 A	± 1.1 A
Intensidad Eléctrica L2 @ 50 Hz	500 A	50 A	49.8 A	-0.2 A	± 1.1 A
Intensidad Eléctrica L3 @ 50 Hz	500 A	50 A	50.1 A	0.1 A	± 1.1 A
Intensidad Eléctrica L1 @ 50 Hz	500 A	150 A	149.6 A	-0.4 A	± 1.1 A
Intensidad Eléctrica L2 @ 50 Hz	500 A	150 A	150.2 A	0.2 A	± 1.1 A
Intensidad Eléctrica L3 @ 50 Hz	500 A	150 A	149.5 A	-0.5 A	± 1.1 A
Intensidad Eléctrica L1 @ 50 Hz	500 A	250 A	250.0 A	0.0 A	± 3.6 A
Intensidad Eléctrica L2 @ 50 Hz	500 A	250 A	250.3 A	0.3 A	± 3.6 A
Intensidad Eléctrica L3 @ 50 Hz	500 A	250 A	249.7 A	-0.3 A	± 3.6 A

Certificado No.: 30303

Equipo (Instrument):

Analizador de Energía

Fecha de Calibración:

2022-12-02

Marca (Brand):

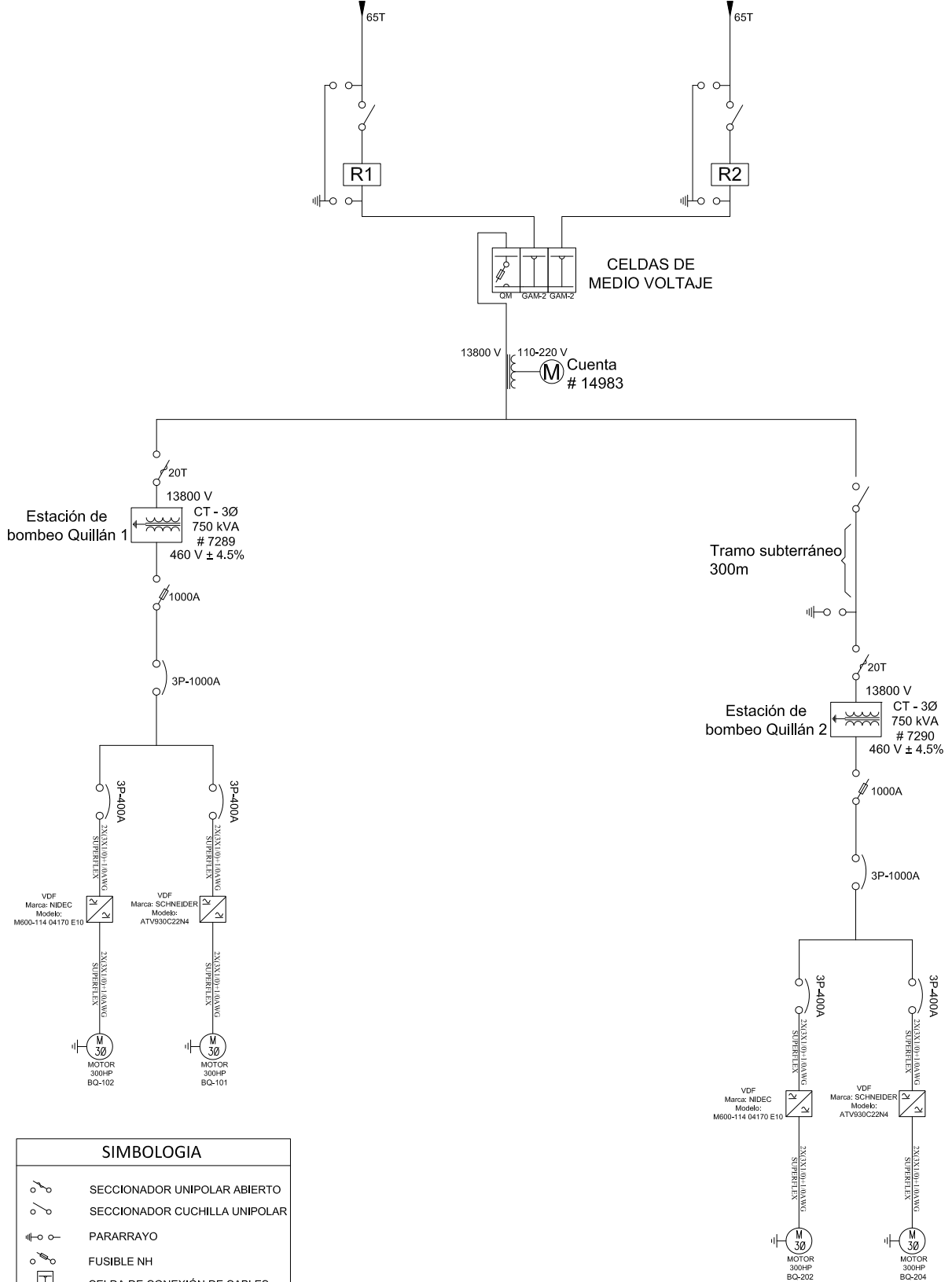
AEMC Instruments

Tipo (Type)	Rango (Range)	Patrón (Standard)	UBP (UUT)	Error (Error)	Incertidumbre (Uncertainty)
Intensidad Eléctrica L1 @ 50 Hz	500 A	350 A	349.4 A	-0.6 A	± 3.6 A
Intensidad Eléctrica L2 @ 50 Hz	500 A	350 A	350.9 A	0.9 A	± 3.6 A
Intensidad Eléctrica L3 @ 50 Hz	500 A	350 A	348.8 A	-1.2 A	± 3.6 A
Intensidad Eléctrica L1 @ 50 Hz	500 A	500 A	500.9 A	0.9 A	± 3.6 A
Intensidad Eléctrica L2 @ 50 Hz	500 A	500 A	502.4 A	2.4 A	± 3.6 A
Intensidad Eléctrica L3 @ 50 Hz	500 A	500 A	499.6 A	-0.4 A	± 3.6 A

ANEXO II
DIAGRAMA UNIFILAR SISTEMA QUILLÁN ALEMANIA

RED EEASA - ALIMENTADOR
QUILLÁN

RED EEASA - ALIMENTADOR
SAN MIGUELITO



SIMBOLOGIA


	SECCIONADOR UNIPOLAR ABIERTO
	SECCIONADOR CUCHILLA UNIPOLAR
	PARARRAYO
	FUSIBLE NH
	CELDA DE CONEXIÓN DE CABLES
	CELDA DE PROTECCIÓN
	MEDIDOR DE ENERGÍA
	INTERRUPTOR TERMOMAGNÉTICO
	TRANSFORMADOR
	TRANSFORMADORES DE MEDIDA TP's y TC's
	RECONECTOR (n=1,2,3...)
	VARIADOR DE FRECUENCIA
	MOTOR TRIFÁSICO



DIAGRAMA UNIFILAR

SISTEMA QUILLÁN ALEMANIA

FECHA:	JULIO/2024
ESCALA:	SIN ESCALA
DIBUJO:	LUIS CURIPOMA
HOJA:	HOJA 1 DE 1

ELECTRICIDAD

TESIS DE POSGRADO

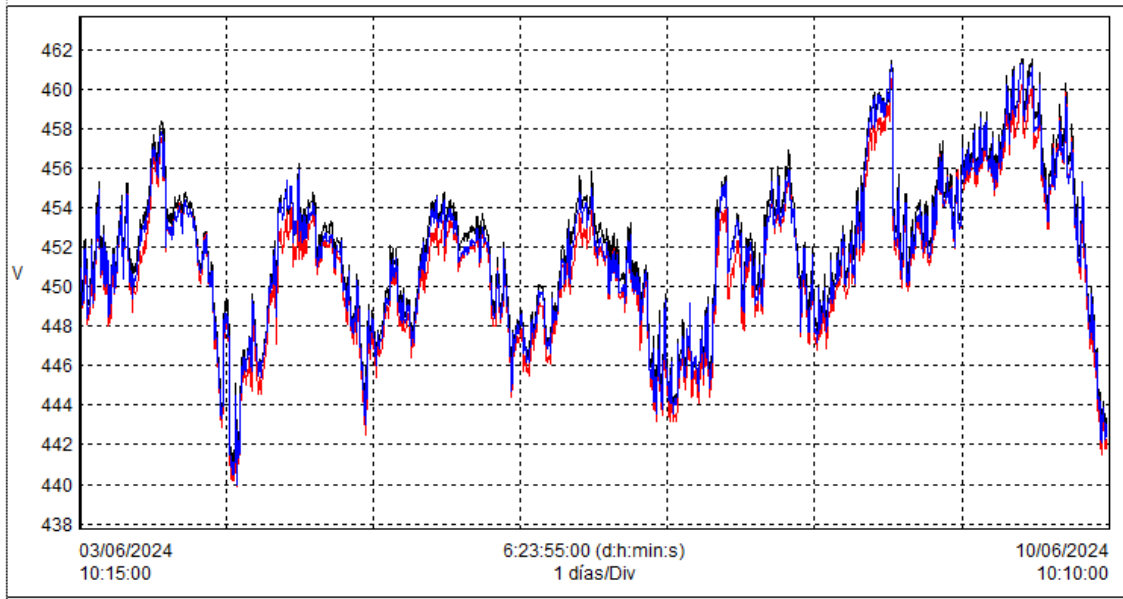
DISEÑO

PROYECTO:	REVISÓ:	APROBÓ:
ING. LUIS CURIPOMA	Mgs. Jefferson Porras	Mgs. Jefferson Porras

ANEXO III
REGISTRO DE DATOS ESTACIÓN DE BOMBEO QUILLÁN 1

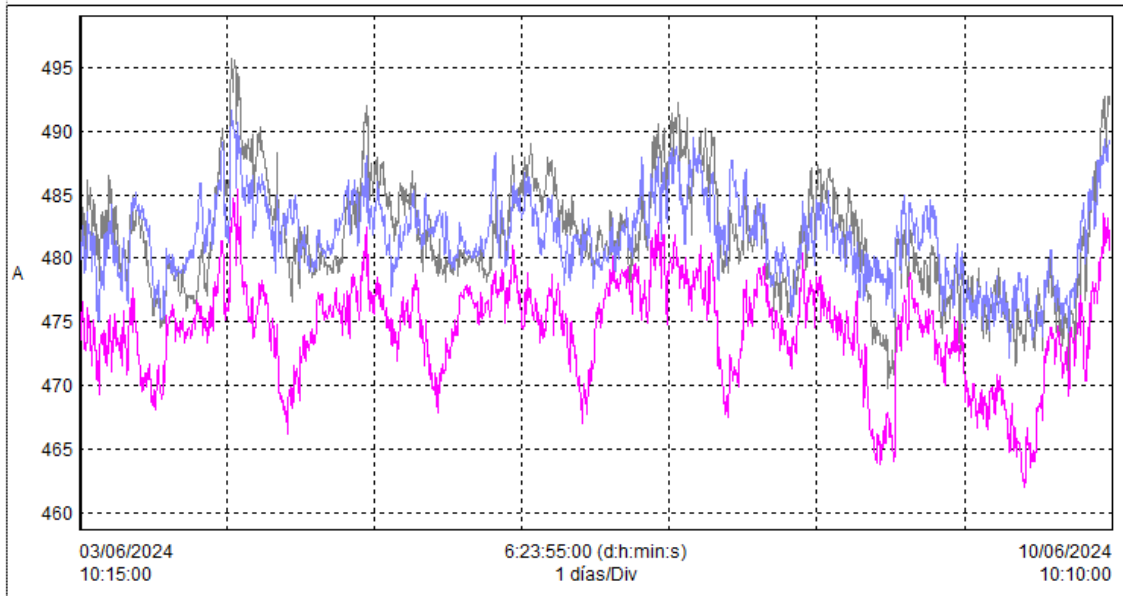
ANEXO 3.A PERFIL DE VOLTAJE

Nombre	Fecha	Hora	PROM	MIN	MAX	Unidades	Duración	Unidades
U1 RMS	03/06/2024	10:15:00	451.9	440.6	461.5	V	7:00:00:00	(d:h:min:s)
U2 RMS	03/06/2024	10:15:00	451.0	439.9	460.5	V	7:00:00:00	(d:h:min:s)
U3 RMS	03/06/2024	10:15:00	451.5	440.0	461.3	V	7:00:00:00	(d:h:min:s)



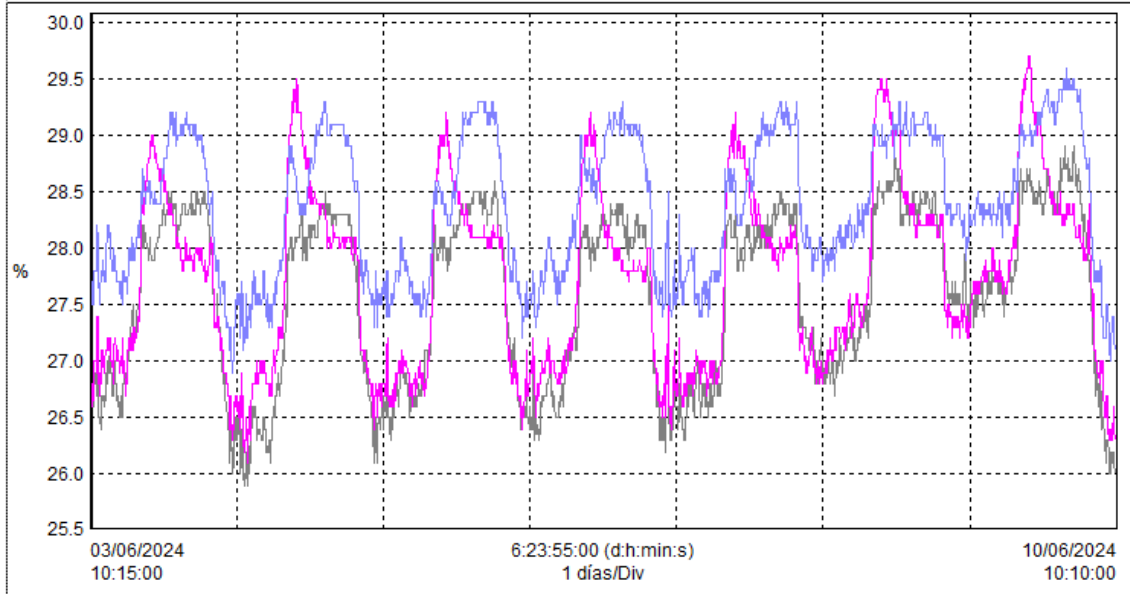
ANEXO 3.B PERFIL DE CORRIENTE

Nombre	Fecha	Hora	PROM	MIN	MAX	Unidades	Duración	Unidades
A1 RMS	03/06/2024	10:15:00	481.6	469.7	495.7	A	7:00:00:00	(d:h:min:s)
A2 RMS	03/06/2024	10:15:00	474.4	462.0	485.4	A	7:00:00:00	(d:h:min:s)
A3 RMS	03/06/2024	10:15:00	481.6	472.1	491.7	A	7:00:00:00	(d:h:min:s)



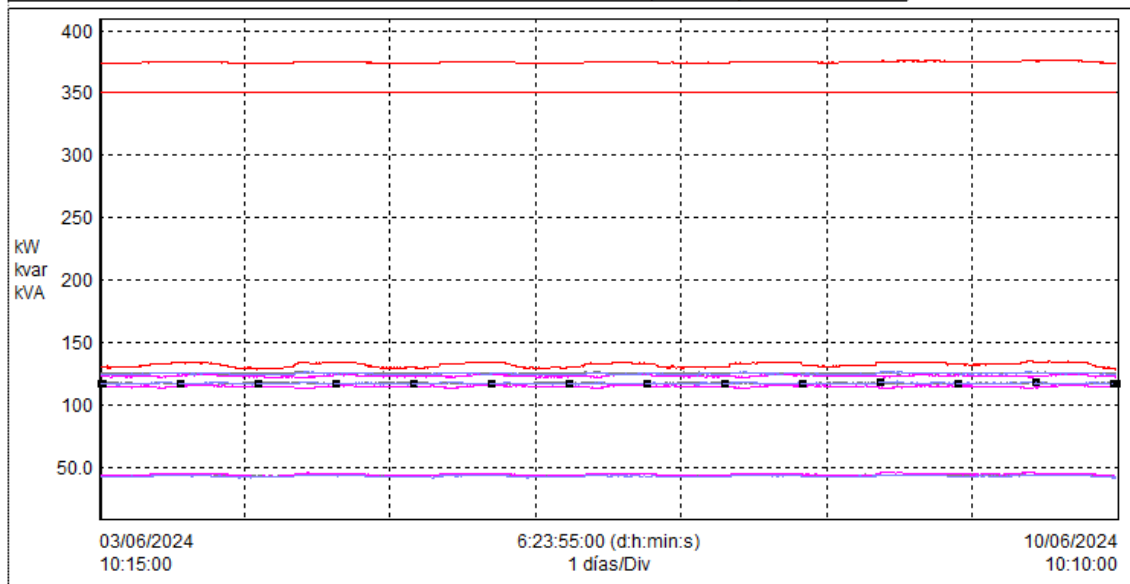
ANEXO 3.C DISTORSION ARMONICA TOTAL (THD%)

Nombre	Fecha	Hora	PROM	MIN	MAX	Unidades	Duración	Unidades
A1 THD	03/06/2024	10:15:00	27.58	25.90	28.90	%	7:00:00:00	(d:h:min:s)
A2 THD	03/06/2024	10:15:00	27.73	26.10	29.70	%	7:00:00:00	(d:h:min:s)
A3 THD	03/06/2024	10:15:00	28.38	26.90	29.60	%	7:00:00:00	(d:h:min:s)



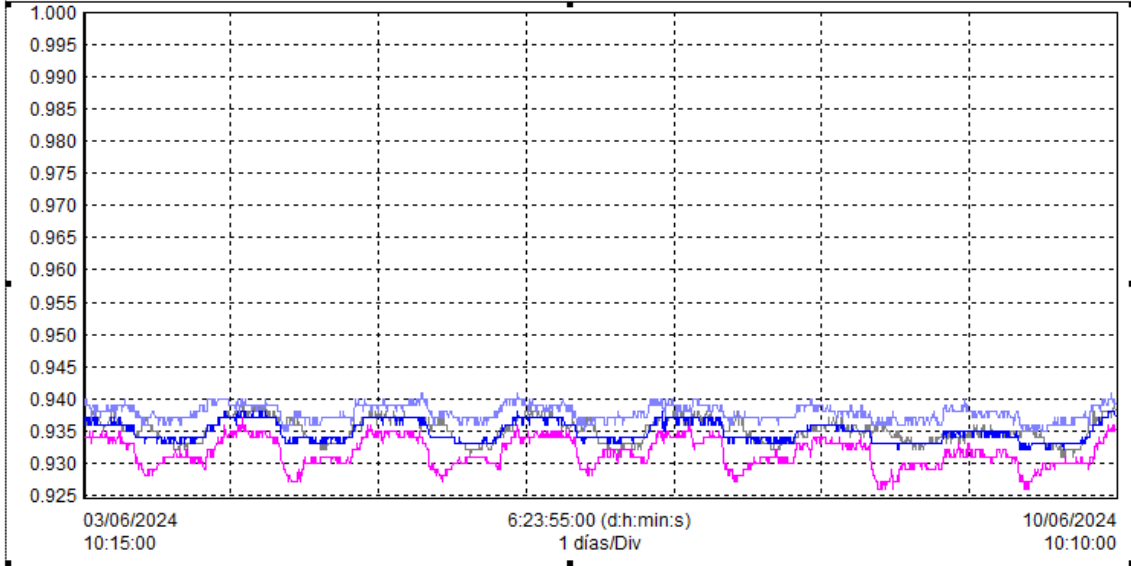
ANEXO 3.D PERFIL DE POTENCIAS

Nombre	Fecha	Hora	PROM	MIN	MAX	Unidades	Duración	Unidades
VA Total	03/06/2024	10:15:00	374.8	373.5	375.8	kVA	7:00:00:00	(d:h:min:s)
VA1	03/06/2024	10:15:00	125.8	124.4	126.9	kVA	7:00:00:00	(d:h:min:s)
VA2	03/06/2024	10:15:00	123.6	122.2	125.0	kVA	7:00:00:00	(d:h:min:s)
VA3	03/06/2024	10:15:00	125.4	124.1	127.1	kVA	7:00:00:00	(d:h:min:s)
var Total	03/06/2024	10:15:00	132.6	128.7	135.3	kvar	7:00:00:00	(d:h:min:s)
var1	03/06/2024	10:15:00	44.41	43.15	45.63	kvar	7:00:00:00	(d:h:min:s)
var2	03/06/2024	10:15:00	44.77	43.02	46.59	kvar	7:00:00:00	(d:h:min:s)
var3	03/06/2024	10:15:00	43.38	42.12	44.65	kvar	7:00:00:00	(d:h:min:s)
W Total	03/06/2024	10:15:00	350.5	350.2	350.9	kW	7:00:00:00	(d:h:min:s)
W1	03/06/2024	10:15:00	117.7	116.1	119.0	kW	7:00:00:00	(d:h:min:s)
W2	03/06/2024	10:15:00	115.2	113.3	116.5	kW	7:00:00:00	(d:h:min:s)
W3	03/06/2024	10:15:00	117.6	116.5	119.3	kW	7:00:00:00	(d:h:min:s)

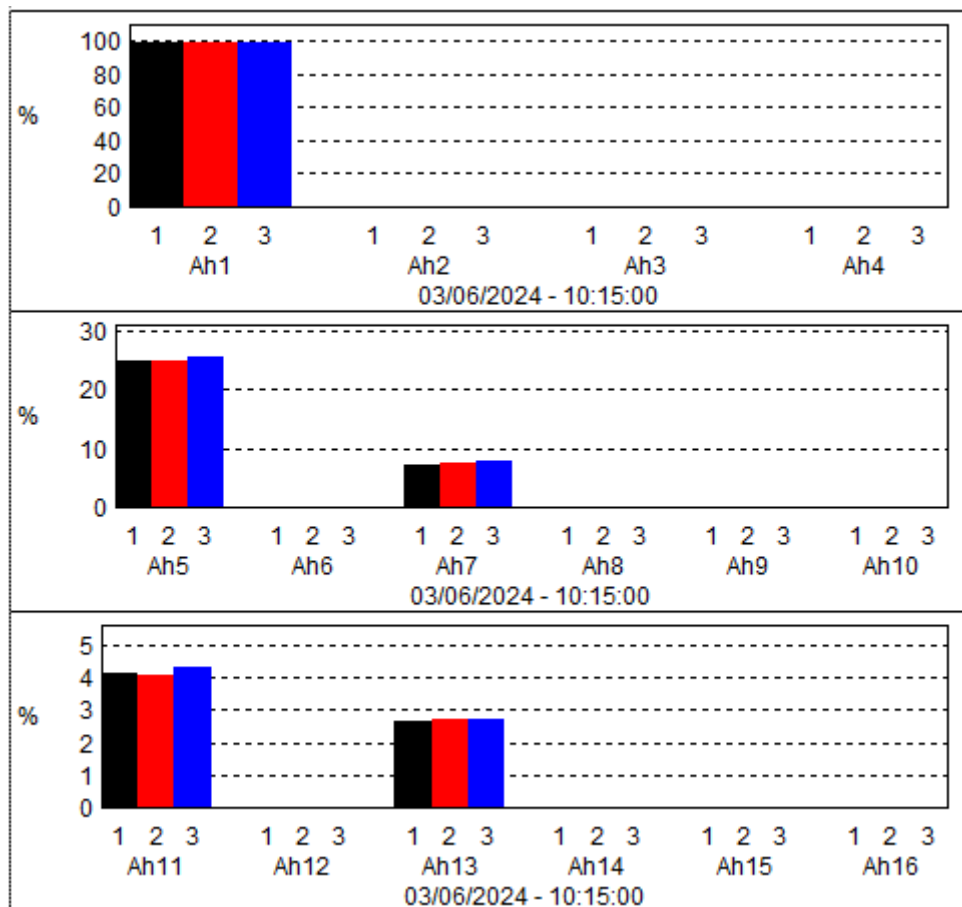


ANEXO 3.E FACTOR DE POTENCIA

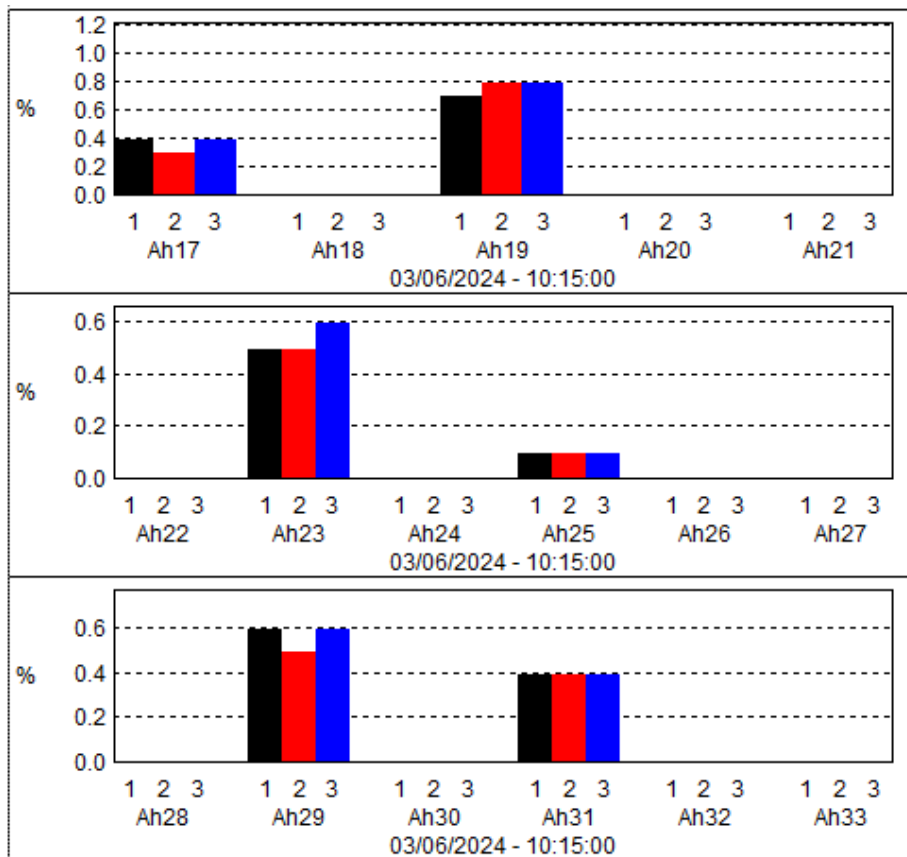
Nombre	Fecha	Hora	PROM	MIN	MAX	Unidades	Duración	Unidades
PF Mean	03/06/2024	10:15:00	0.935	0.932	0.938		7:00:00:00	(d:h:min:s)
PF1	03/06/2024	10:15:00	0.935	0.931	0.939		7:00:00:00	(d:h:min:s)
PF2	03/06/2024	10:15:00	0.932	0.926	0.937		7:00:00:00	(d:h:min:s)
PF3	03/06/2024	10:15:00	0.938	0.935	0.941		7:00:00:00	(d:h:min:s)



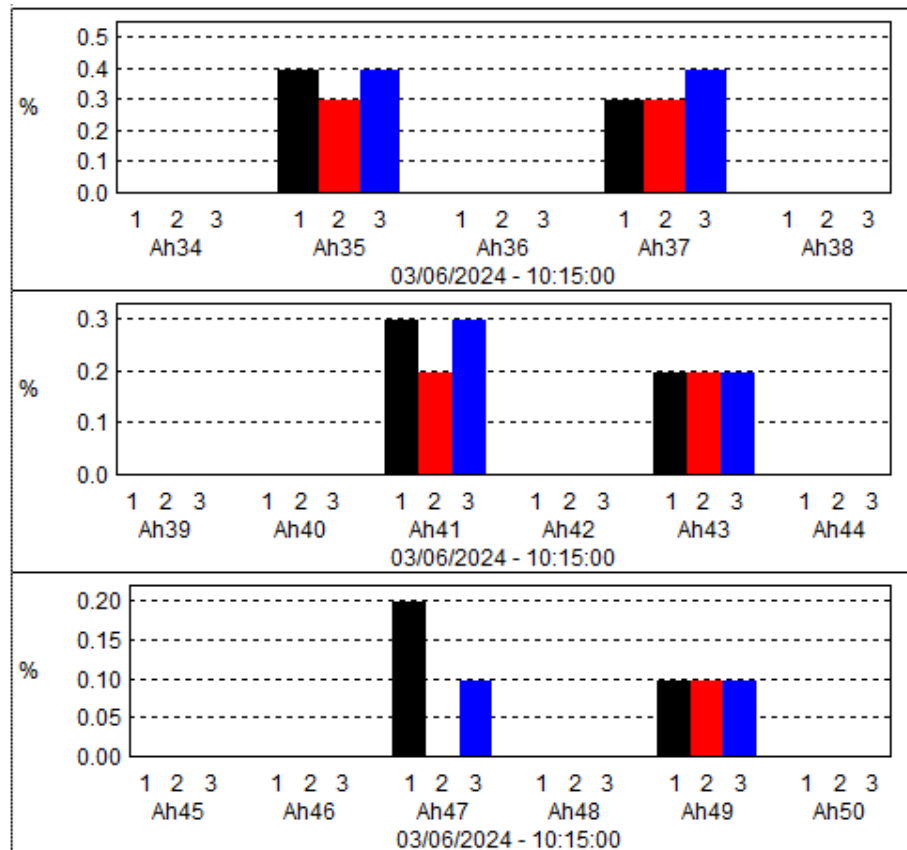
ANEXO 3.F ESPECTRO ARMÓNICO 1 A 16



ANEXO 3.G ESPECTRO ARMONICO 17 A 33



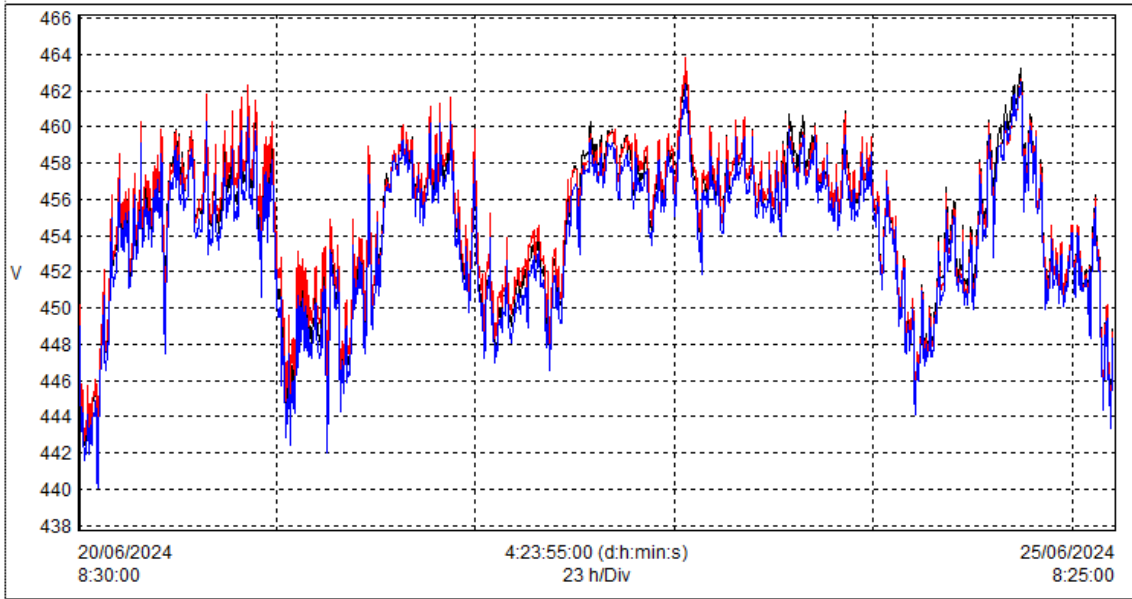
ANEXO 3.H ESPECTRO ARMÓNICO 34 A 50



ANEXO IV
REGISTRO DE DATOS ESTACIÓN DE BOMBEO QUILLÁN 2

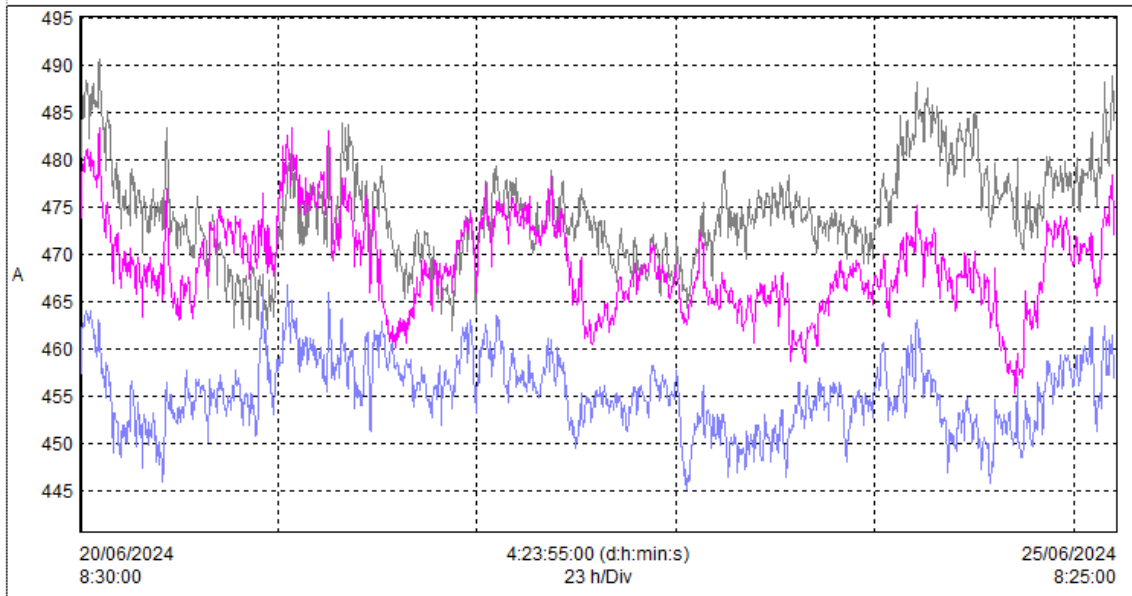
ANEXO 4.A PERFIL DE VOLTAJE

Nombre	Fecha	Hora	PROM	MIN	MAX	Unidades	Duración	Unidades
U1 RMS	20/06/2024	8:30:00	454.7	441.4	463.5	V	5:00:00:00	(d:h:min:s)
U2 RMS	20/06/2024	8:30:00	454.9	441.5	463.8	V	5:00:00:00	(d:h:min:s)
U3 RMS	20/06/2024	8:30:00	453.9	440.1	462.5	V	5:00:00:00	(d:h:min:s)



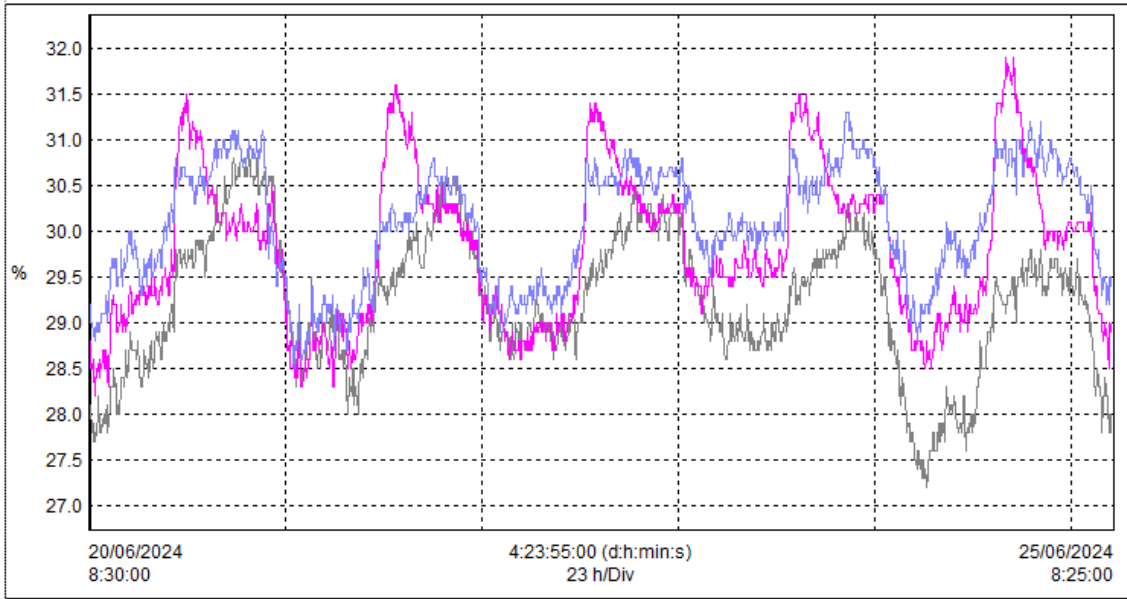
ANEXO 4.B PERFIL DE CORRIENTE

Nombre	Fecha	Hora	PROM	MIN	MAX	Unidades	Duración	Unidades
A1 RMS	20/06/2024	8:30:00	474.4	461.9	490.6	A	5:00:00:00	(d:h:min:s)
A2 RMS	20/06/2024	8:30:00	468.8	455.3	483.4	A	5:00:00:00	(d:h:min:s)
A3 RMS	20/06/2024	8:30:00	455.3	445.2	466.8	A	5:00:00:00	(d:h:min:s)



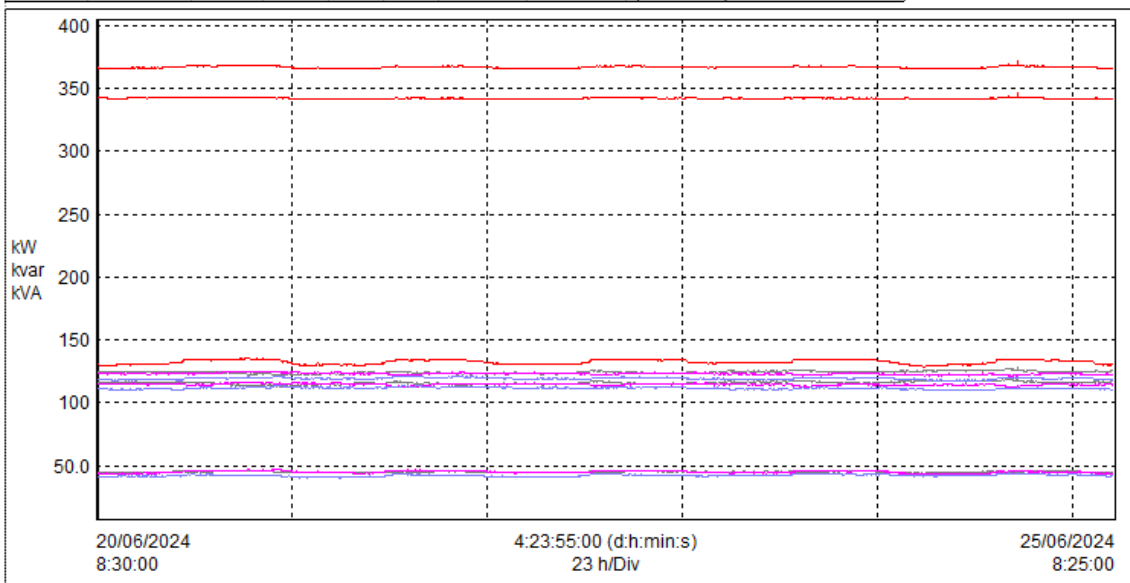
ANEXO 4.C DISTORSION ARMONICA TOTAL (THD%)

Nombre	Fecha	Hora	PROM	MIN	MAX	Unidades	Duración	Unidades
A1 THD	20/06/2024	8:30:00	29.23	27.20	30.90	%	5:00:00:00	(d:h:min:s)
A2 THD	20/06/2024	8:30:00	29.82	28.20	31.90	%	5:00:00:00	(d:h:min:s)
A3 THD	20/06/2024	8:30:00	30.06	28.50	31.30	%	5:00:00:00	(d:h:min:s)



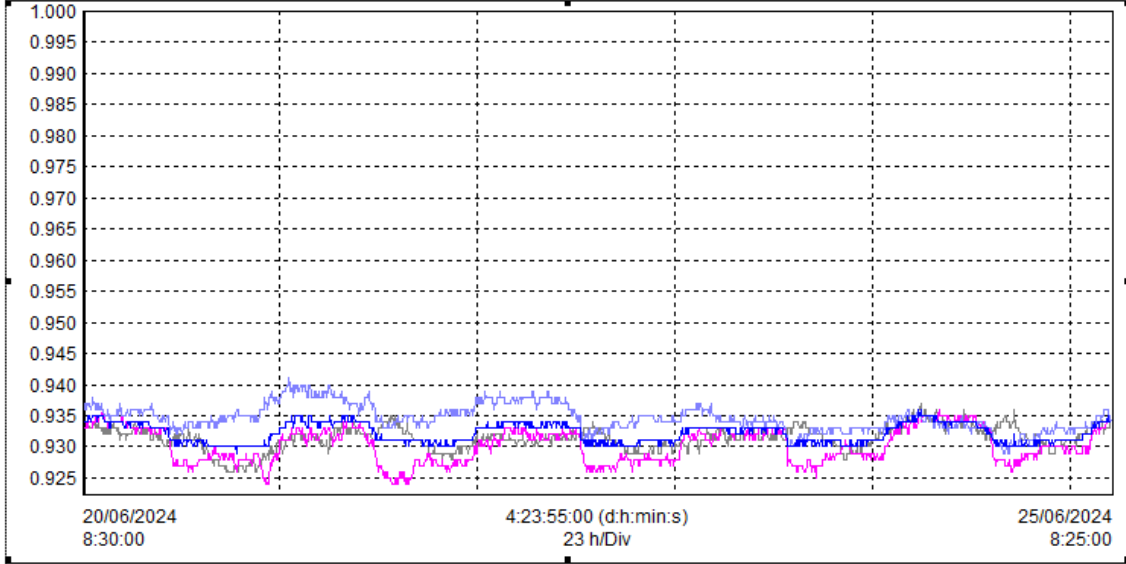
ANEXO 4.D PERFIL DE POTENCIAS

Nombre	Fecha	Hora	PROM	MIN	MAX	Unidades	Duración	Unidades
VA Total	20/06/2024	8:30:00	367.0	365.5	371.6	kVA	5:00:00:00	(d:h:min:s)
VA1	20/06/2024	8:30:00	124.4	121.6	127.8	kVA	5:00:00:00	(d:h:min:s)
VA2	20/06/2024	8:30:00	123.2	121.4	125.2	kVA	5:00:00:00	(d:h:min:s)
VA3	20/06/2024	8:30:00	119.4	117.4	121.7	kVA	5:00:00:00	(d:h:min:s)
var Total	20/06/2024	8:30:00	132.5	128.6	135.4	kvar	5:00:00:00	(d:h:min:s)
var1	20/06/2024	8:30:00	45.13	43.82	46.47	kvar	5:00:00:00	(d:h:min:s)
var2	20/06/2024	8:30:00	45.05	42.96	47.39	kvar	5:00:00:00	(d:h:min:s)
var3	20/06/2024	8:30:00	42.29	40.32	44.28	kvar	5:00:00:00	(d:h:min:s)
W Total	20/06/2024	8:30:00	342.3	341.9	346.3	kW	5:00:00:00	(d:h:min:s)
W1	20/06/2024	8:30:00	115.9	113.0	119.7	kW	5:00:00:00	(d:h:min:s)
W2	20/06/2024	8:30:00	114.7	112.5	116.8	kW	5:00:00:00	(d:h:min:s)
W3	20/06/2024	8:30:00	111.6	109.6	114.1	kW	5:00:00:00	(d:h:min:s)

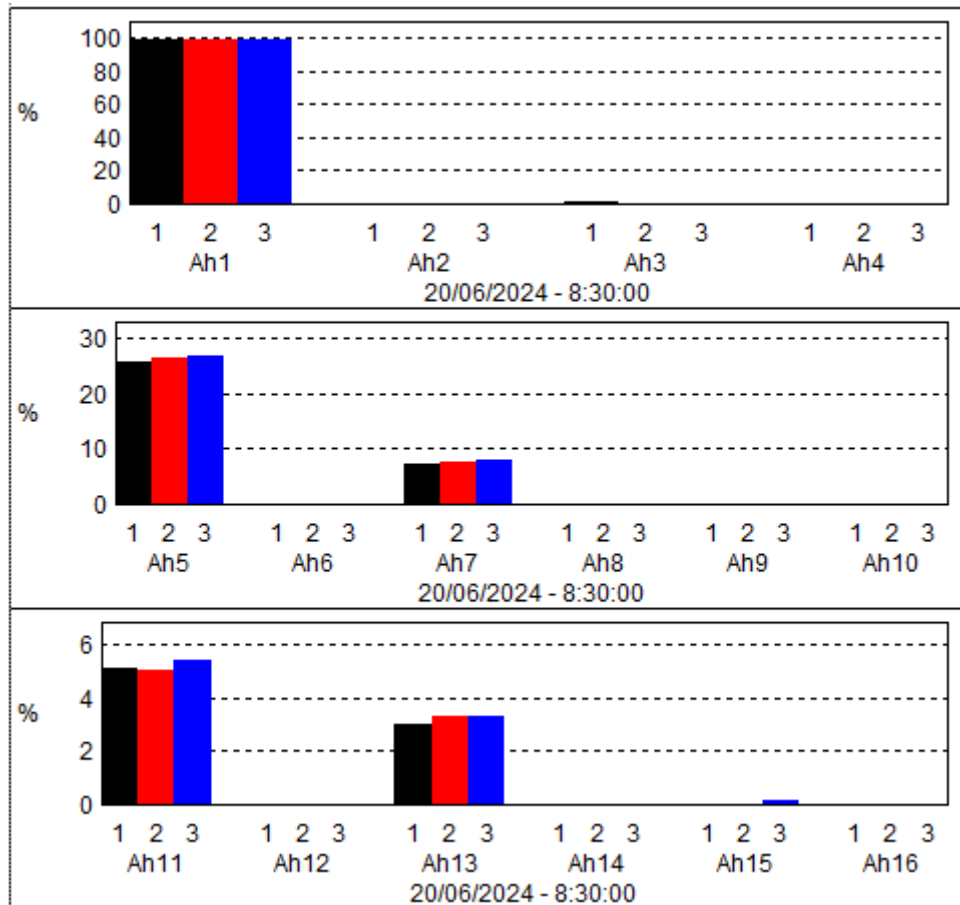


ANEXO 4.E FACTOR DE POTENCIA

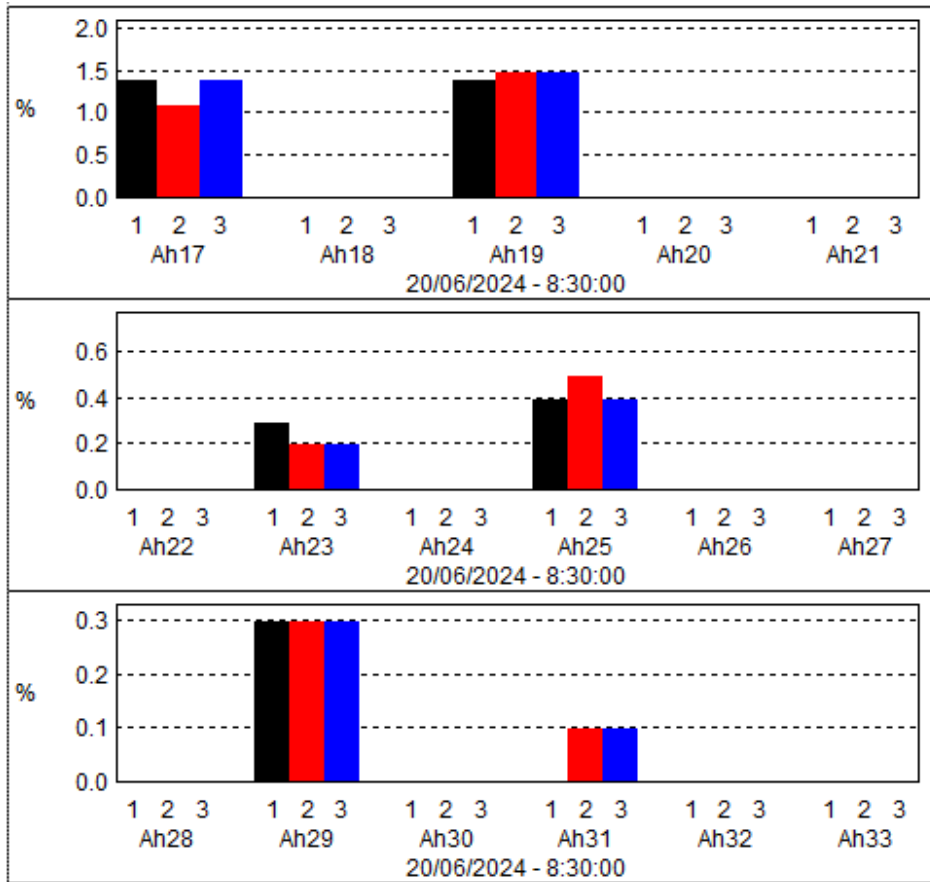
Nombre	Fecha	Hora	PROM	MIN	MAX	Unidades	Duración	Unidades
PF Mean	20/06/2024	8:30:00	0.932	0.929	0.936		5:00:00:00	(d:h:min:s)
PF1	20/06/2024	8:30:00	0.931	0.926	0.937		5:00:00:00	(d:h:min:s)
PF2	20/06/2024	8:30:00	0.930	0.924	0.936		5:00:00:00	(d:h:min:s)
PF3	20/06/2024	8:30:00	0.935	0.929	0.941		5:00:00:00	(d:h:min:s)



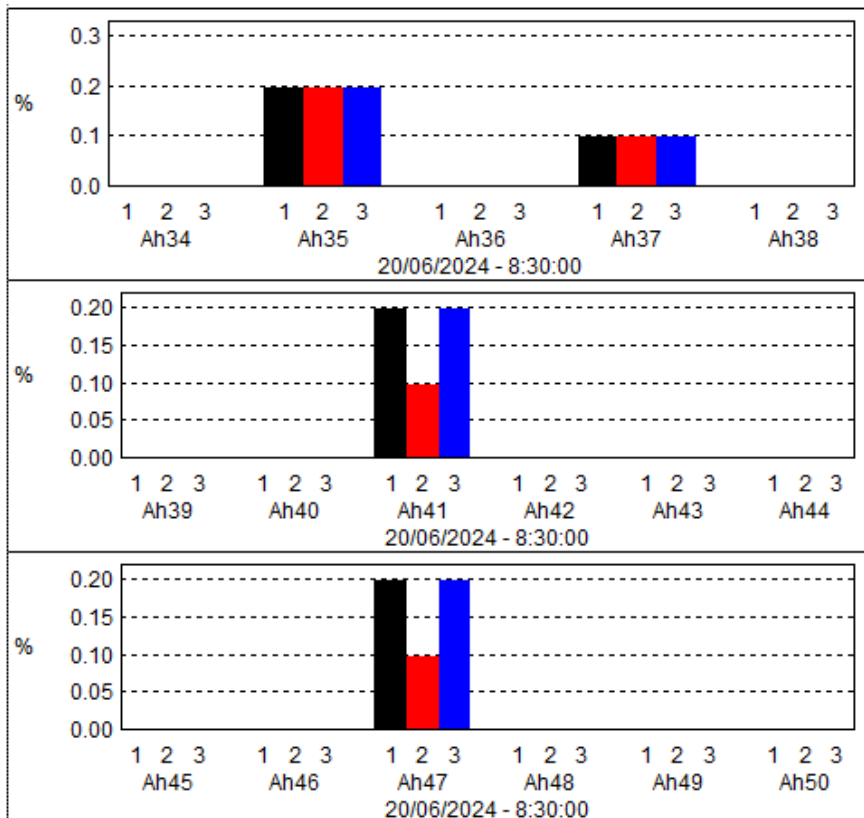
ANEXO 4.F ESPECTRO ARMÓNICO 1 A 16



ANEXO 4.G ESPECTRO ARMONICO 17 A 44

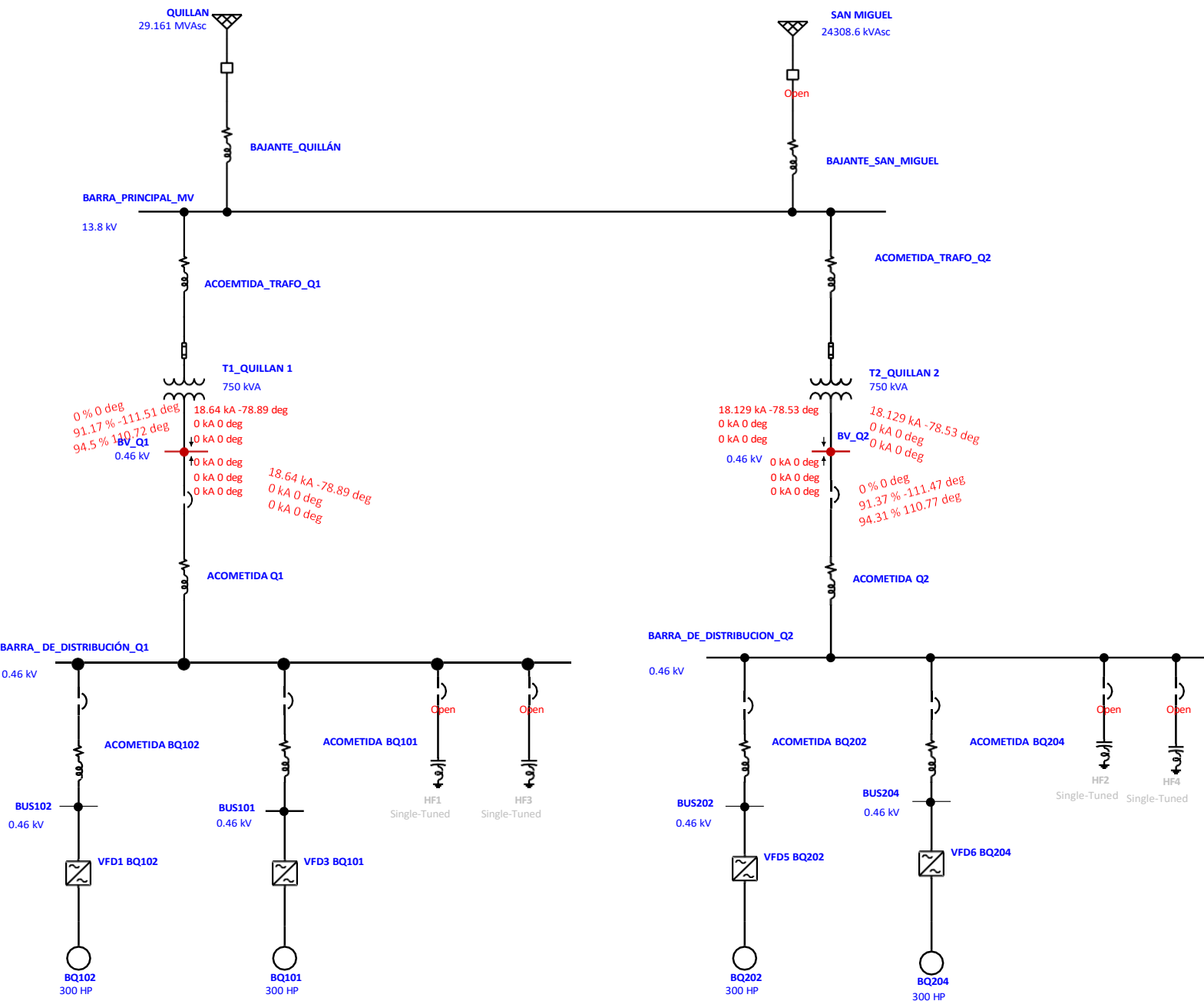


ANEXO 4.H ESPECTRO ARMÓNICO 44 A 50

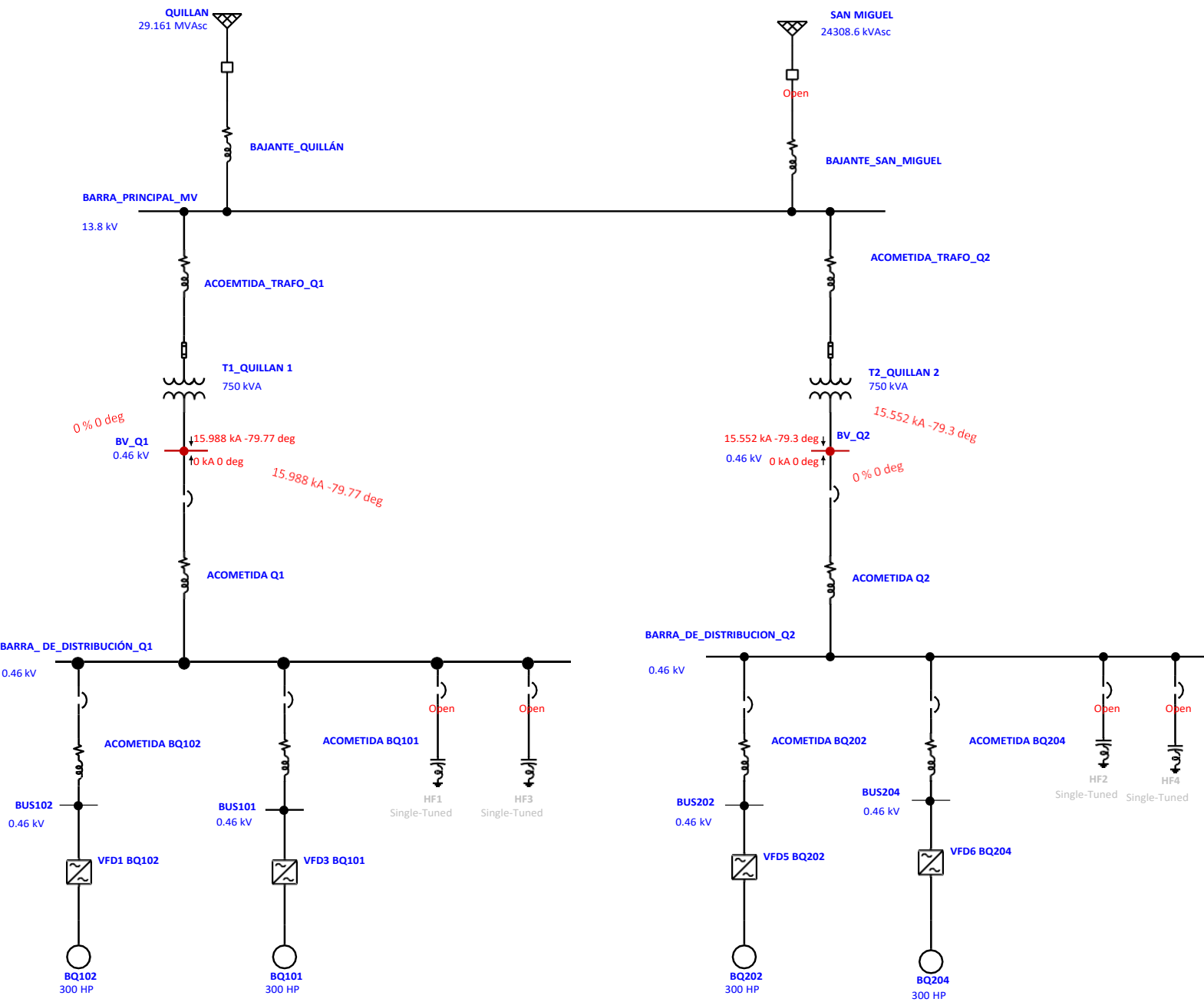


ANEXO V
ESTUDIO DE CORTOCIRCUITO AL SISTEMA ACTUAL

One-Line Diagram - OLV1 (Short-Circuit Analysis) – 1 Phase

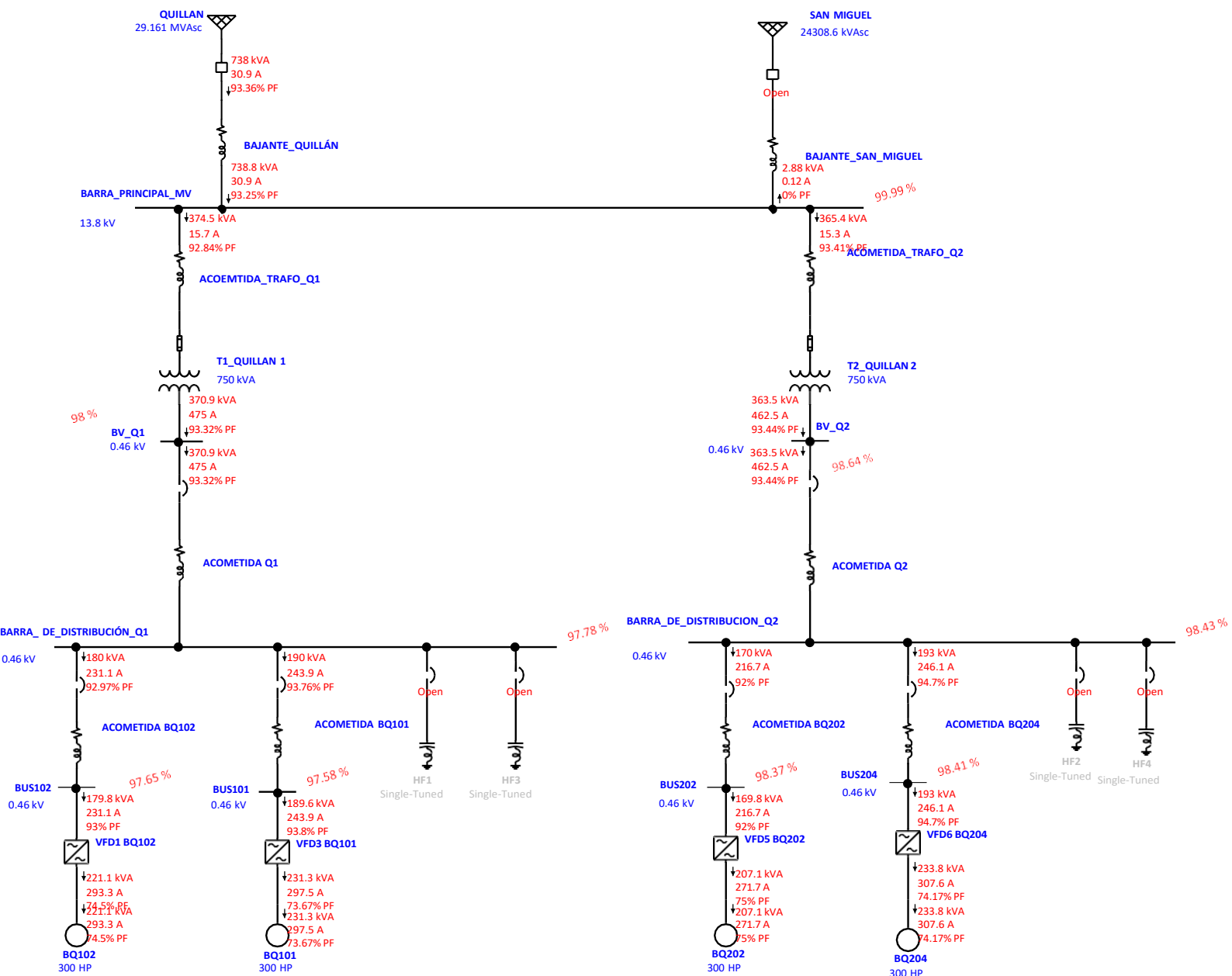


One-Line Diagram - OLV1 (Short-Circuit Analysis) – 3 Phase



ANEXO VI
FLUJO DE POTENCIA DEL SISTEMA ACTUAL

One-Line Diagram - OLV1 (Load Flow Analysis)



ANEXO VII
ANÁLISIS ARMÓNICO DEL SISTEMA ACTUAL

ETAP
19.0.1C

Project:
Location:
Contract:
Engineer:

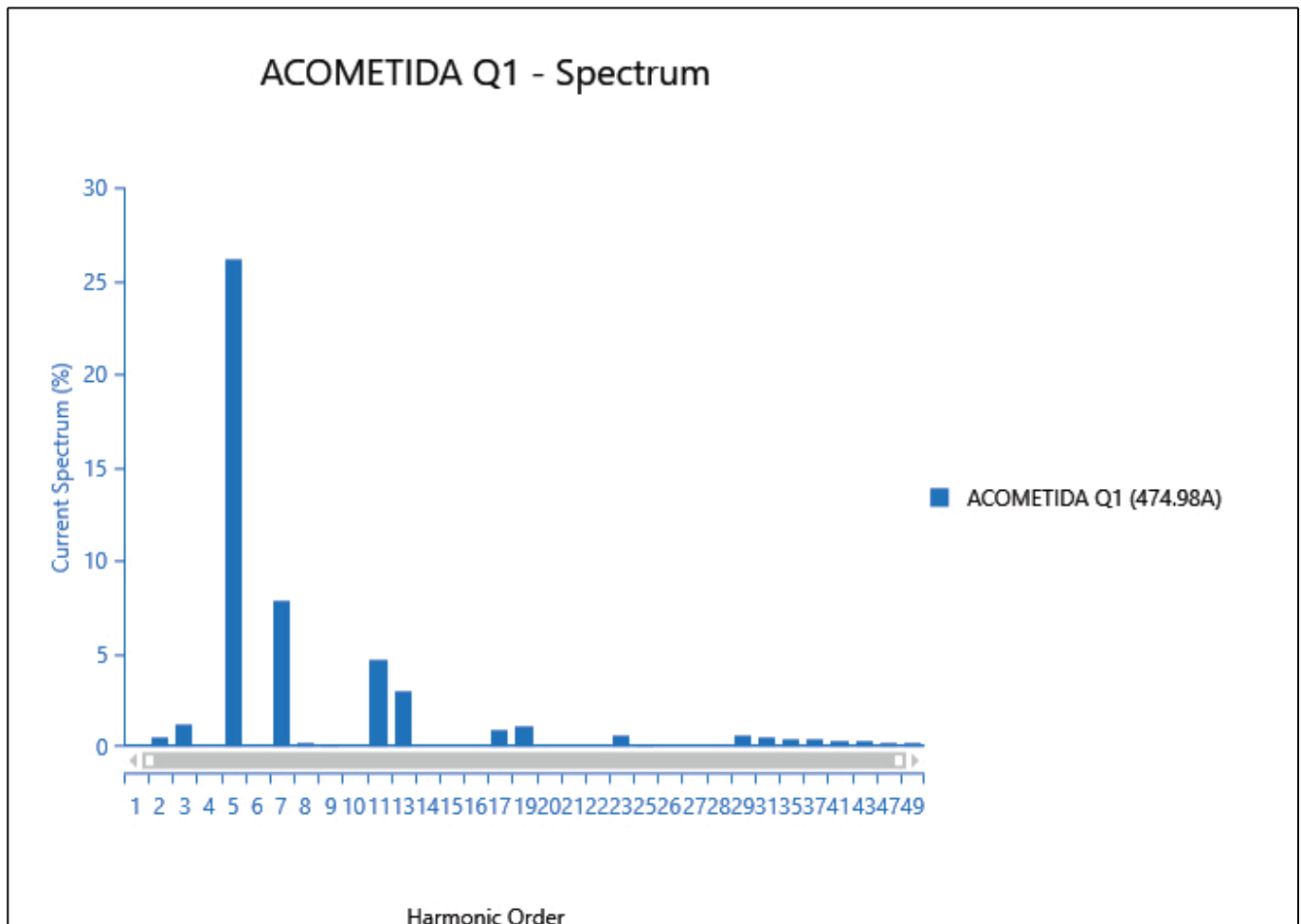
Study Case: HA

Date: 23/07/2024
SN:
Revision: Base
Config: Normal

Project File: C:\Users\LUIS\Documents\MEGA\TITULACION\SIMULACIÓN\1 -V0

Output Report: C:\Users\LUIS\Documents\MEGA\TITULACION\SIMULACIÓN\1 -V0\Untitled.hfp

HALF



ETAP
19.0.1C

Project:
Location:
Contract:
Engineer:

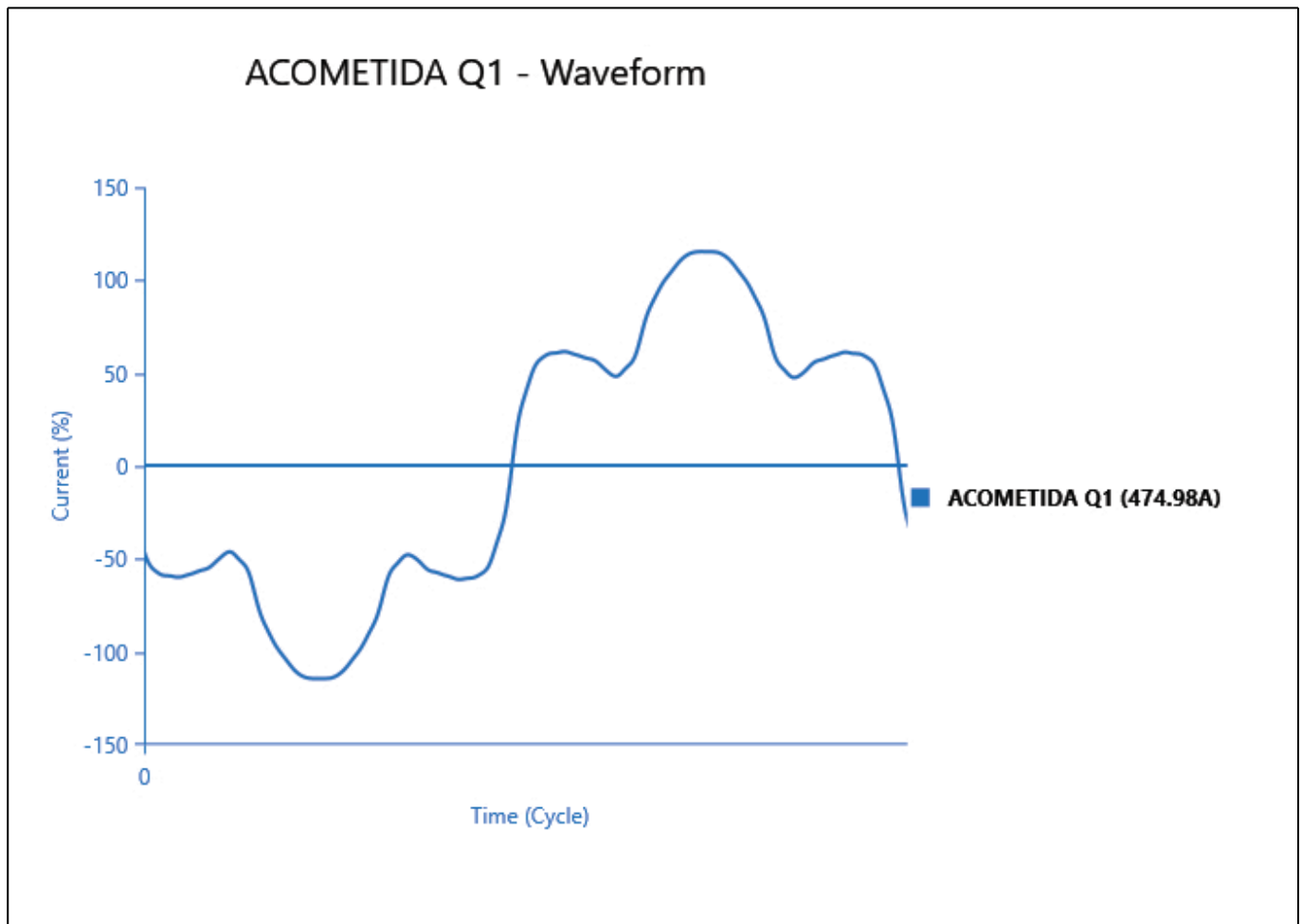
Study Case: HA

Date: 23/07/2024
SN:
Revision: Base
Config: Normal

Project File: C:\Users\LUIS\Documents\MEGA\TITULACION\SIMULACIÓN\1 -V0

Output Report: C:\Users\LUIS\Documents\MEGA\TITULACION\SIMULACIÓN\1 -V0\Untitled.hfp

HALF



ETAP
19.0.1C

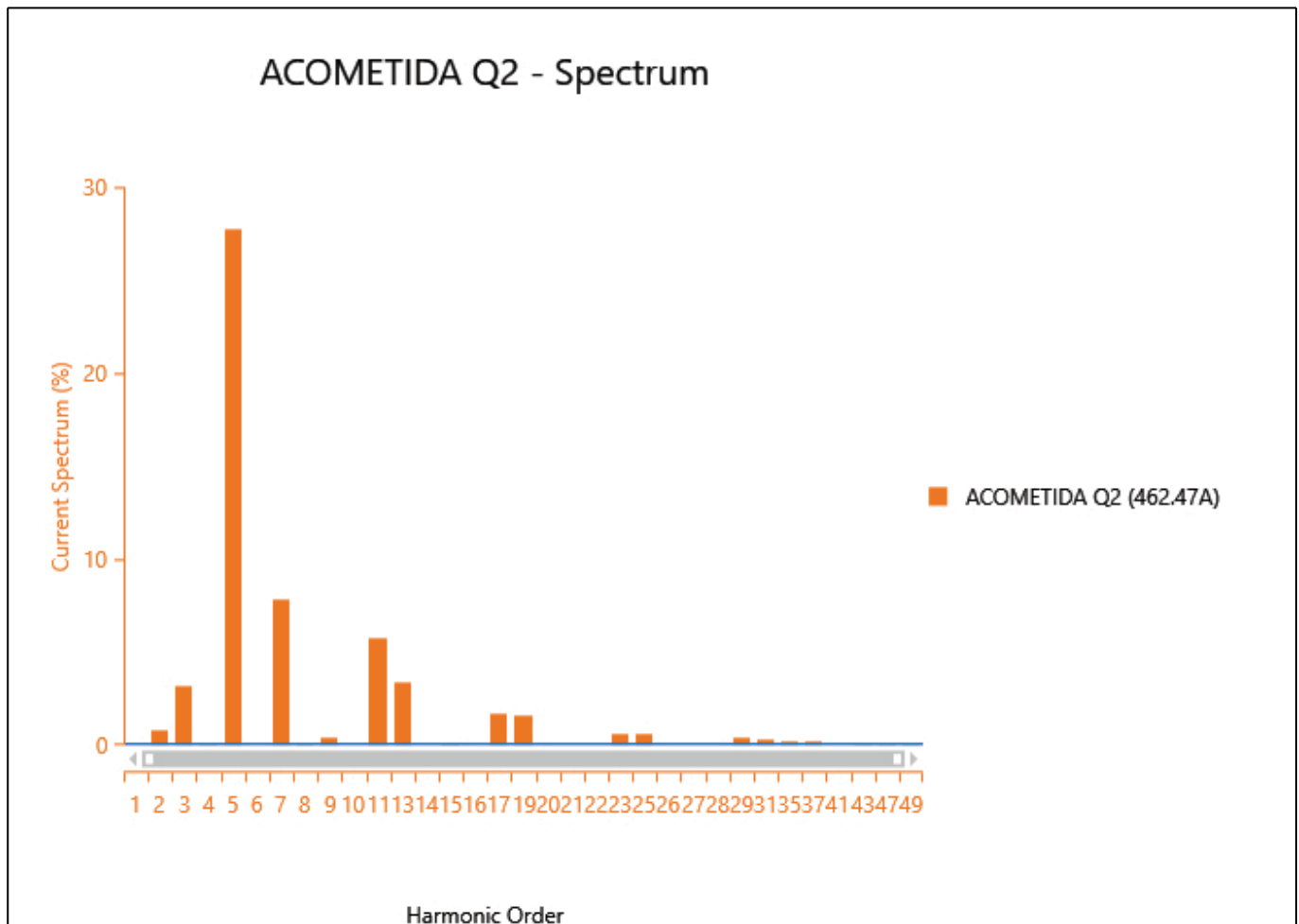
Project:
Location:
Contract:
Engineer:

Study Case: HA

Date: 23/07/2024
SN:
Revision: Base
Config: Normal

Project File: C:\Users\LUIS\Documents\MEGA\TITULACION\SIMULACIÓN\1 -V0
Output Report: C:\Users\LUIS\Documents\MEGA\TITULACION\SIMULACIÓN\1 -V0\Untitled.hfp

HALF



ETAP
19.0.1C

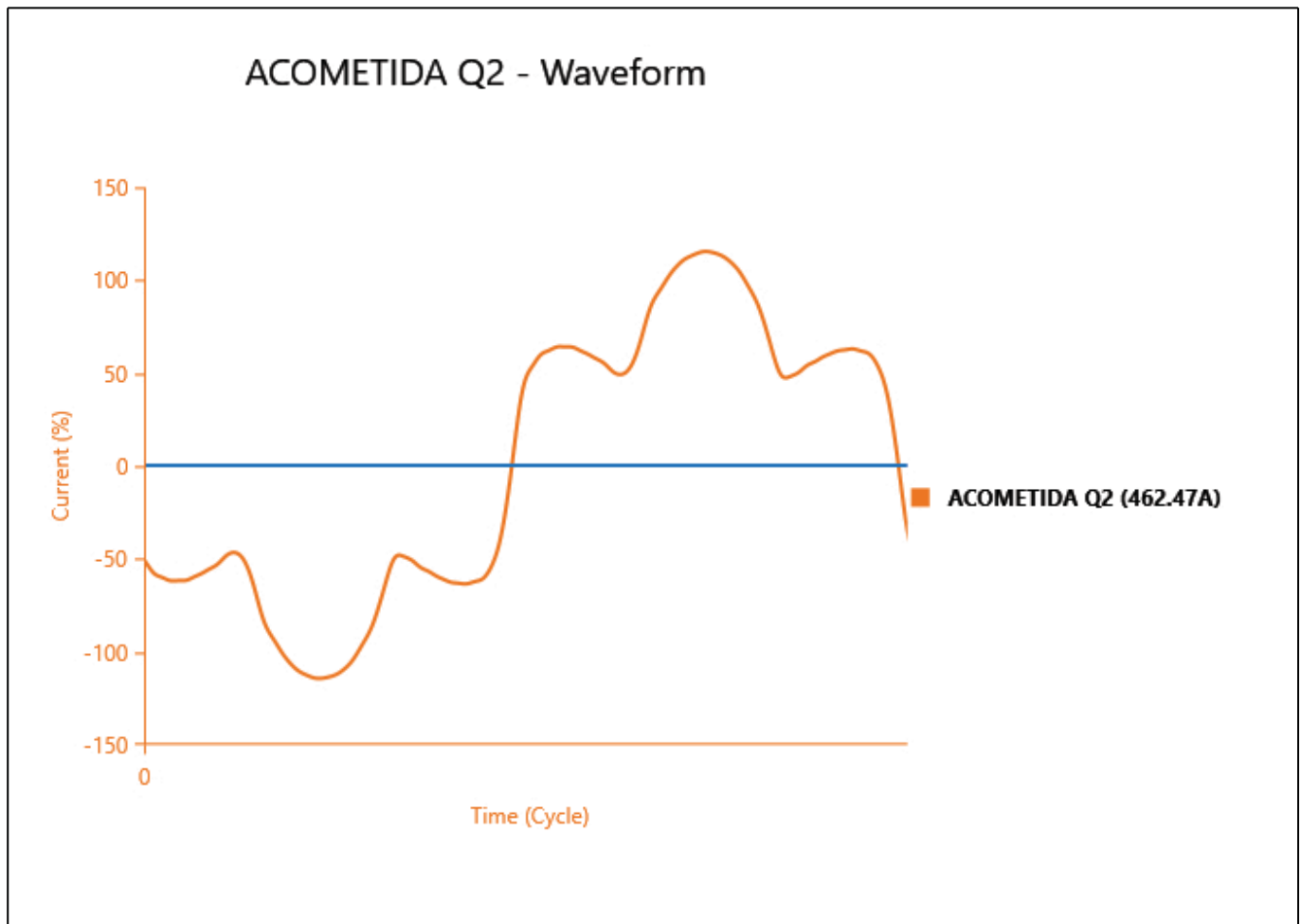
Project:
Location:
Contract:
Engineer:

Study Case: HA

Date: 23/07/2024
SN:
Revision: Base
Config: Normal

Project File: C:\Users\LUIS\Documents\MEGA\TITULACION\SIMULACIÓN\1 -V0
Output Report: C:\Users\LUIS\Documents\MEGA\TITULACION\SIMULACIÓN\1 -V0\Untitled.hfp

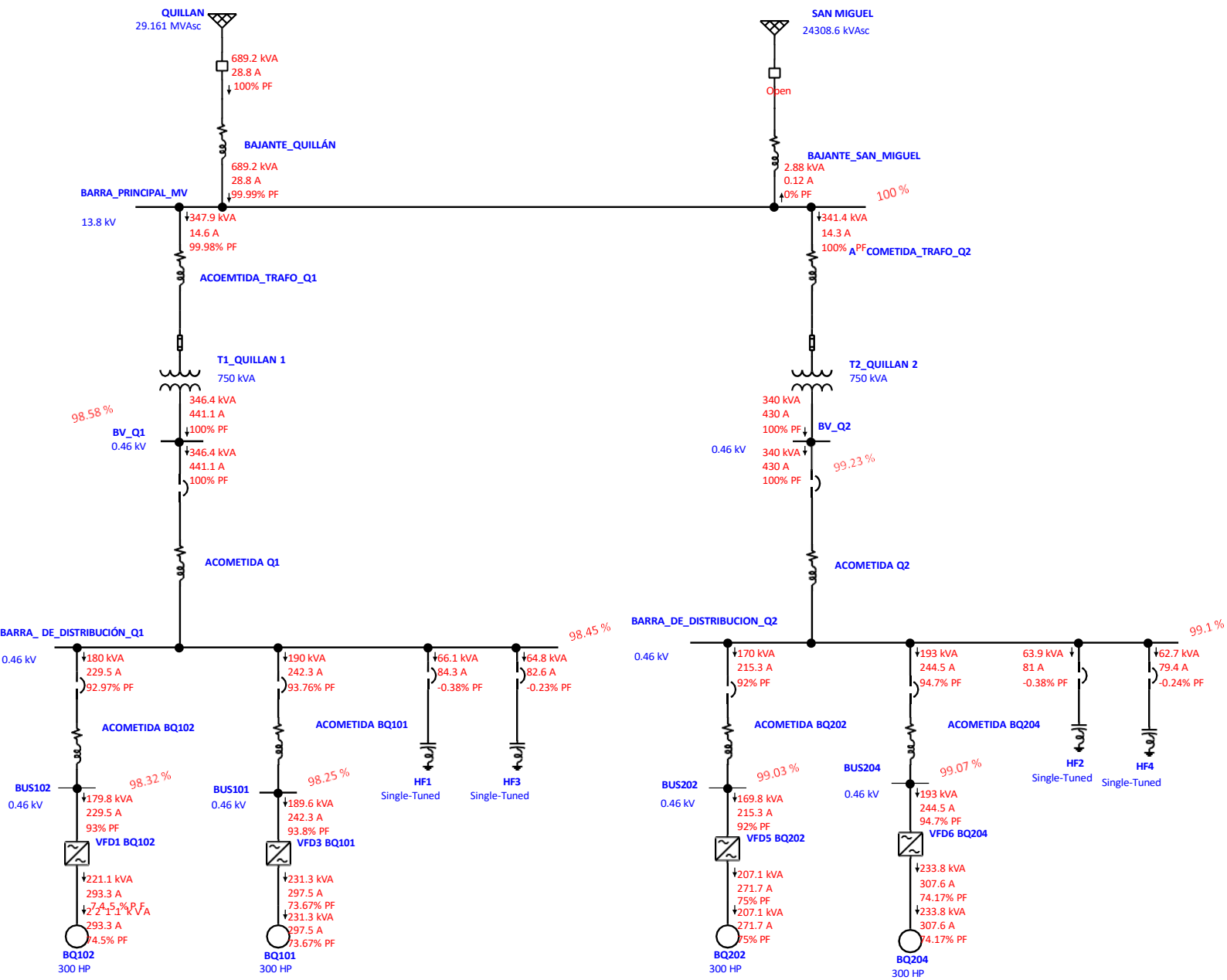
HALF



ANEXO VIII

FLUJO DE POTENCIA Y ANÁLISIS ARMÓNICO DEL SISTEMA CON LA INCORPORACIÓN DE FILTROS

One-Line Diagram - OLV1 (Load Flow Analysis)



ETAP
19.0.1C

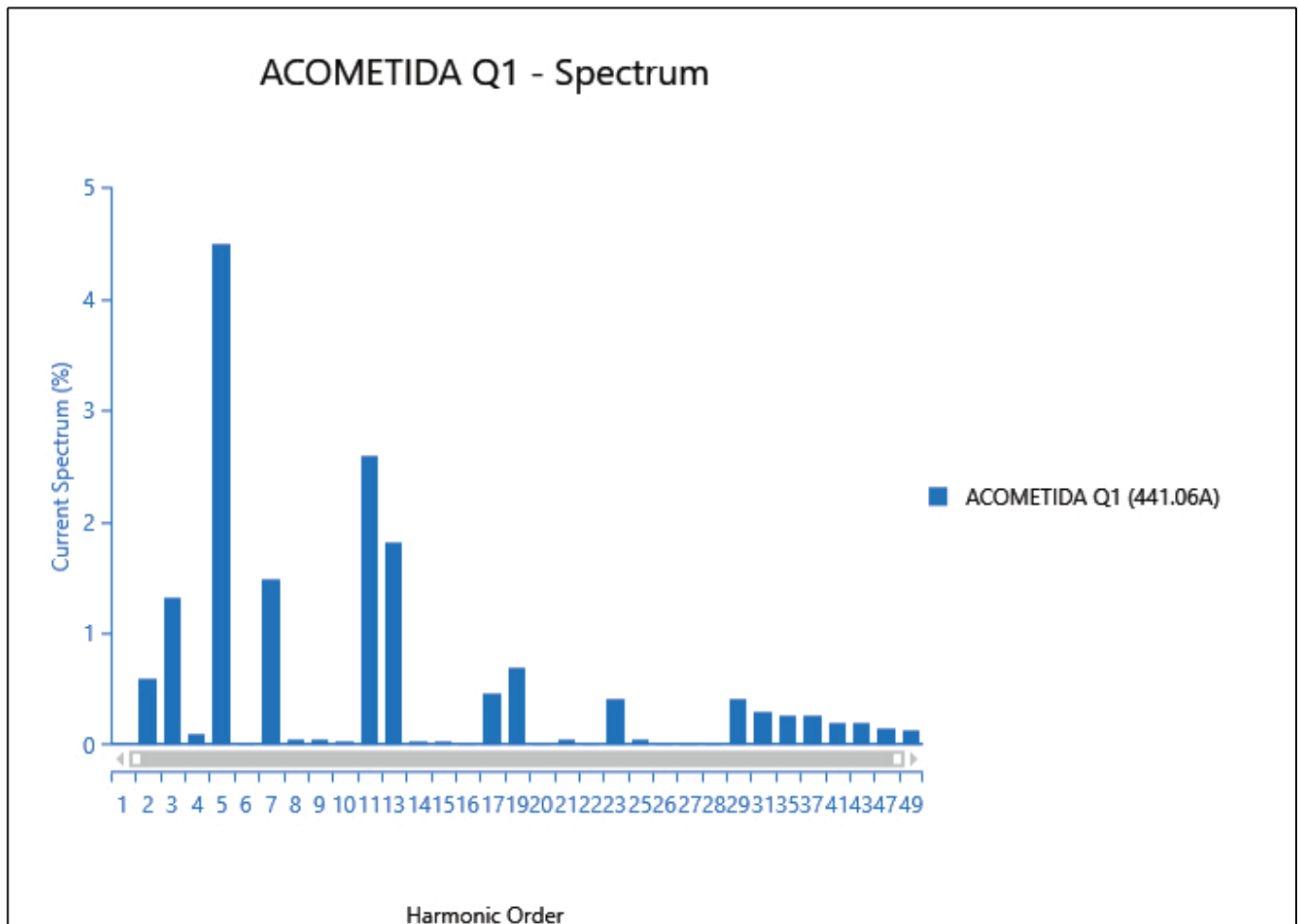
Project:
Location:
Contract:
Engineer:

Study Case: HA

Date: 23/07/2024
SN:
Revision: Base
Config: Normal

Project File: C:\Users\LUIS\Documents\MEGA\TITULACION\SIMULACIÓN\1 -V0
Output Report: C:\Users\LUIS\Documents\MEGA\TITULACION\SIMULACIÓN\1 -V0\Untitled.hfp

HALF



ETAP
19.0.1C

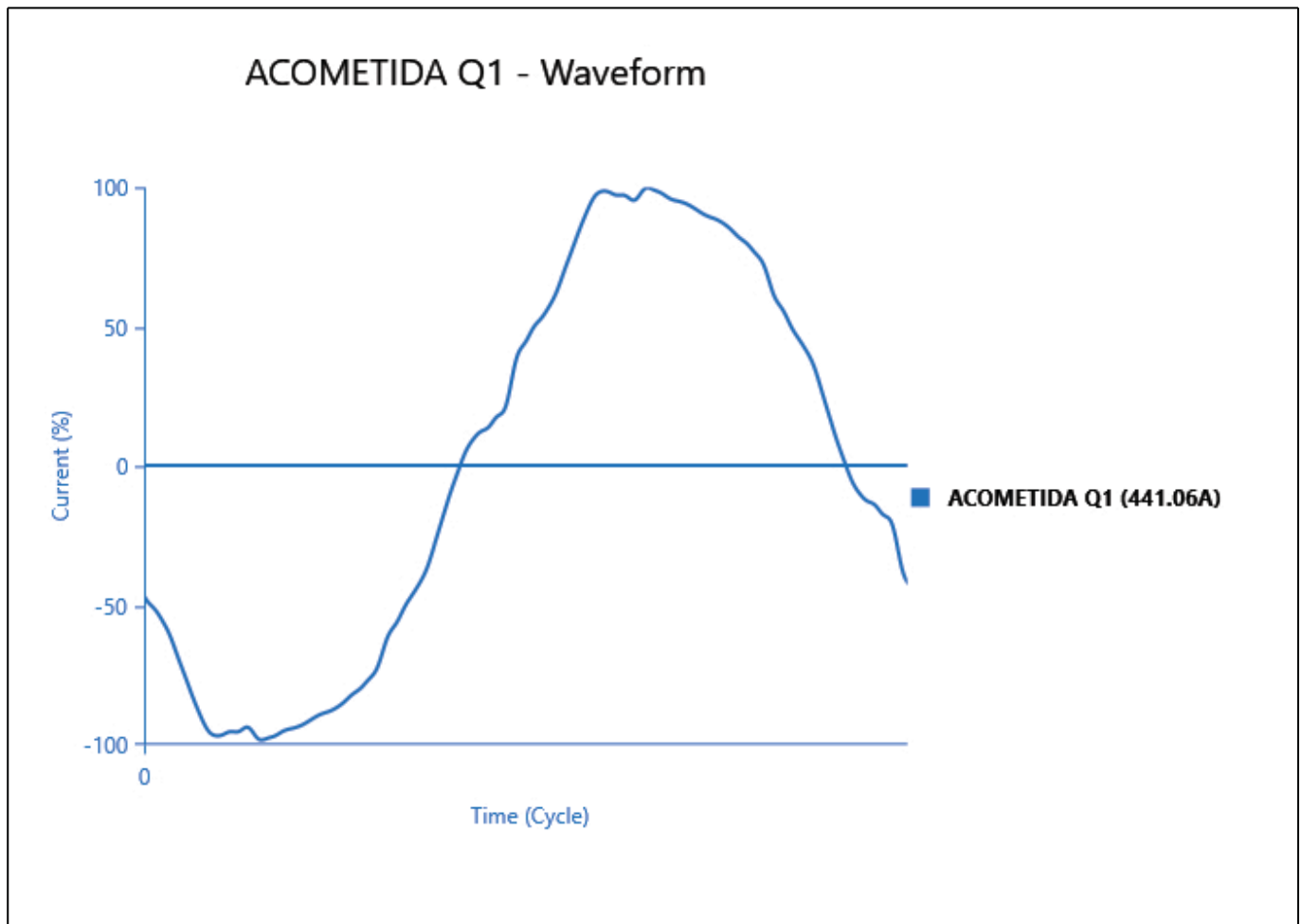
Project:
Location:
Contract:
Engineer:

Study Case: HA

Date: 23/07/2024
SN:
Revision: Base
Config: Normal

Project File: C:\Users\LUIS\Documents\MEGA\TITULACION\SIMULACIÓN\1 -V0
Output Report: C:\Users\LUIS\Documents\MEGA\TITULACION\SIMULACIÓN\1 -V0\Untitled.hfp

HALF



ETAP
19.0.1C

Project:
Location:
Contract:
Engineer:

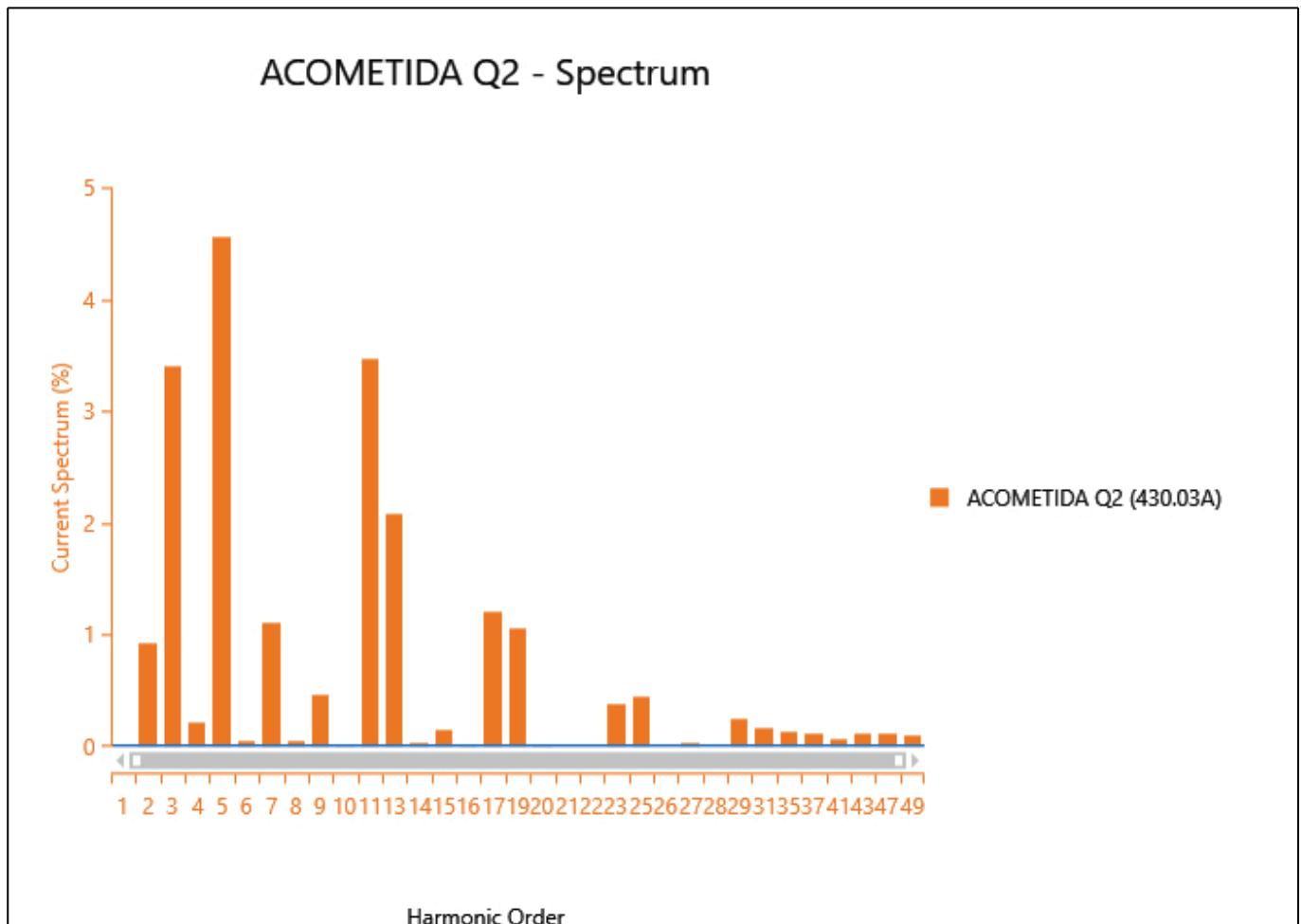
Study Case: HA

Date: 23/07/2024
SN:
Revision: Base
Config: Normal

Project File: C:\Users\LUIS\Documents\MEGA\TITULACION\SIMULACIÓN\1 -V0

Output Report: C:\Users\LUIS\Documents\MEGA\TITULACION\SIMULACIÓN\1 -V0\Untitled.hfp

HALF



ETAP
19.0.1C

Project:
Location:
Contract:
Engineer:

Study Case: HA

Date: 23/07/2024
SN:
Revision: Base
Config: Normal

Project File: C:\Users\LUIS\Documents\MEGA\TITULACION\SIMULACIÓN\1 -V0
Output Report: C:\Users\LUIS\Documents\MEGA\TITULACION\SIMULACIÓN\1 -V0\Untitled.hfp

HALF

