

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,
INFORMÁTICA Y MECÁNICA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



TESIS

**PROPUESTA PARA REDUCIR LA DISTORSIÓN ARMÓNICA
EN LA SUB ESTACION DE DISTRIBUCIÓN 0010921,
MEDIANTE LA MODIFICACIÓN DE LA MATRIZ JACOBIANA**

PRESENTADO POR:

Br. YONATAN CRUZ VILLAFUERTE

Br. ROSALIO LUPINTA SANCHEZ

**PARA OPTAR AL TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO
ELECTRICISTA**

ASESOR:

M. SC. JOHONEL CÁCERES ESPINOZA

CUSCO – PERÚ

2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por resolución Nro. CU – 303 – 2020 – UNSAAC)

El que suscribe, Asesor del trabajo de investigación/ tesis titulada: PROPUESTA PARA REDUCIR LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA SUB ESTACION DE DISTRIBUCIÓN COLO921, MEDIANTE LA MODIFICACIÓN DE LA MATRIZ JACOBIANA

Presentado por ROSALIO LUPINTA SANCHEZ DNIN° 45139839

Presentado por YONATAN CRUZ VILLAFUERTE DNIN° 43046401

Para optar el título profesional de INGENIERO ELECTRICISTA

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 Veces mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 03 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grados académicos o título profesional, tesis.

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (x)
Del 1 al 10 %	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor al 31 %	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras paginas del reporte del Sistema Aniplagio.

Cusco, 15 de agosto de 2025

Johanel Cacares Espinoza
Firma

POST FIRMA: Johanel Cacares Espinoza

Nro. de DNI: 42119449

ORCID del Asesor 0000-0002-9191-0901

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace de Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: o Id: 27259:483742025

Rosalio-Yonatan Lupinta Sanchez - Cruz Villafuerte

Propuesta para Reducir la Distorcion Armonica en la SED 0010921, mediante la modificacion de la matr

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:483742025

157 Páginas

Fecha de entrega

15 ago 2025, 10:35 a.m. GMT-5

35.619 Palabras

195.825 Caracteres

Fecha de descarga

15 ago 2025, 10:39 a.m. GMT-5

Nombre de archivo

Propuesta para Reducir la Distorcion Armonica en la SED 0010921, mediante la modificacion de l....pdf

Tamaño de archivo

5.1 MB

3% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 20 palabras)

Fuentes principales

- 3%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 3%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
361 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.
-  **Texto oculto**
159 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

PRESENTACIÓN

Señor Decano de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Informática y Mecánica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Señores docentes, miembros jurados de la Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica.

En concordancia y cumplimiento del reglamento de grados y títulos vigente y con el objetino de optar al título profesional de Ingeniero Electricista, ponemos a vuestra consideración la presente tesis denominada " **PROPUESTA PARA REDUCIR DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA SUB ESTACION DE DISTRIBUCION 0010921, MEDIANTE LA MODIFICACIÓN DE LA MATRIZ JACOBIANA**", el mismo que propone atenuar la distorsión armónica producida en un sistema de distribución, específicamente en al sub estación de distribución 0010921 mediante la modificación de la matriz jacobiana en tres etapas: La compiladción de datos, análisis y procesamiento del archivo fuente del analizador de redes, métodos utilizados para determinar la distorsión armónica y contrastar resultados con un software reconocido (en este caso usaremos el software digsilent) y la aplicación del metodo por modificación de la matriz Jacoviana para la reducción de la distorcion armonica, para finalmente desarrollar un programa iterativo en Matlab que sea amigable y dinámico, que ayude a reducir la distorsión armónica producida en la subestación de distribución 0010921 mediante la modificalión de la matriz jacobiana .

Consideramos este trabajo como aporte en el estudio para reducir la distorsión armónica producida en la subestación de distribución 0010921 mediante un nuevo método, la modificación de la matriz jacobiana. y esperamos gustosamente que tanto el documento como el software presentado contribuyan al objetivo planteado.

Br. Cruz Villafuerte Yonatan.

Br. Lupinta Sanchez Rosalio.

DEDICATORIA

A mis padres, hermanos y hermanas por su apoyo y motivación incondicional.

A los amores de mi vida, mi esposa Eliza Milagros, mis hijos, Liam Dariel y Enzo Gabriel.

Dedicado en especial a mamá “Charito” Rosario Sanchez Huamanñahui por su sacrificio enorme en educarme y quien siempre soñó verme llegar a este punto.

Rosalio Lupinta Sanchez

Este trabajo lo dedico enteramente a mis queridos padres Wilfredo Cruz Huarancca, mi querida madre Leonarda Tintaya Lopez, quienes aún en la distancia siempre han estado conmigo, brindándome su apoyo incondicional, gracias por el cariño brindado; los debo todo lo que soy y gracias por ello, gracias por las horas de consejos, regaños, reprimendas, tristezas y de muchas alegrías que estoy seguro que fue con mucho amor.

En especial A mi amada esposa Flor Susan Portilla Villegas y mis tesoros Ian Gabriel y Enzo Bastian, por ser el motivo principal para seguir adelante y lograr este gran anhelo.

A mis hermanos y hermanas, por su fuerza y apoyo incondicional.

Ustedes, Mi familia son el principal motivo de seguir adelante, los quiero mucho.

Yonatan Cruz Villafuerte

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la oportunidad de dar este paso, a nuestro asesor, M. Sc. Ingeniero Johonel Cáceres Espinoza por aceptar y apoyar este camino llamado “tesis”.

A nuestra querida UNSAAC y la Escuela profesional de Ingeniería Eléctrica, por formar profesionales de calidad dando buenos conocimientos que los ponemos en práctica.

A mamá “Charito” por quien estaré eternamente agradecido por todo el sacrificio y amor que me brindó.

Rosalio Lupinta Sanchez

A Dios, por darme la sabiduría y fortaleza en los momentos más difíciles de mi vida y por las experiencias vividas desde siempre.

De igual manera agradecer sinceramente a nuestro asesor el Ing. Johonel Cáceres Espinoza, por brindarnos, su apoyo incondicional, conocimiento, orientación, paciencia y motivación que nos han conllevado a la culminación del presente trabajo de tesis.

Me viene a la memoria, un sin fin de personas especiales que me gustaría agradecer por su apoyo incondicional, ánimo y compañía, algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en el corazón, sin importar donde estén y si alguna vez llegan a leer estas líneas les agradezco por formar parte de mi vida.

Por último, pero no menos importante también quiero agradecer a mi amigo y compañero de tesis por compartir momentos agradables y difíciles en todo este trayecto de la tesis, pero esos momentos son los que uno recordara por siempre.

Yonatan Cruz Villafuerte

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es realizar un estudio para la reducción de la contaminación armónica en la subestación de distribución 0010921, con la ayuda de, un analizador de redes, un software de elaboración propia para la simulación y el software DIGSILENT PowerFactory que nos ayudará a comparar y validar los resultados.

Para el desarrollo de la tesis, se realizó un diagnóstico de la cantidad de armónicos en el lado de baja tensión (0.23 kV) del transformador de distribución 0010921, usando un analizador de redes, obteniendo de éste valores de corrientes armónicas, los cuales se encuentran fuera de los niveles recomendados por el estándar IEEE. 519-2014.

Mediante el uso de la plataforma de Programación MATLAB, se elaboró un algoritmo de programación, esta es una herramienta versátil que nos ayudará a simular un sistema de distribución con contaminación armónica en tensión y corriente, el cual modificará la matriz jacobiana para darnos como resultado filtros pasivos, que nos ayuden a reducir la distorsión armónica en un sistema de distribución. Los resultados obtenidos en la simulación del software de elaboración propia fueron comparados con la simulación en el software DIGSILENT PowerFactory, verificando la similitud de los resultados.

Este algoritmo elaborado es un programa versátil que nos ayudará a seguir mejorándolo de acuerdo a las necesidades o inquietudes que puedan surgir durante su uso.

Palabras Clave: Reducción de la distorsión armónica, sistemas de distribución radial, software de simulación, estándar IEEE 519-2014 corriente y tensión armónicas, matriz jacobiana, filtros pasivos, distorsión armónica.

ABSTRACT

The objective of THD's work is to conduct a study aimed at reducing harmonic contamination in the distribution substation 0010921, using a network analyzer, custom-developed simulation software, and the DIgSILENT PowerFactory software to compare and validate the results.

For the development of the thesis, a diagnosis of the harmonic levels on the low-voltage side (0.23 kV) of the distribution transformer 0010921 was performed using a network analyzer. THD's device provided harmonic current values, which were found to exceed the levels recommended by the IEEE 519-2014 standard.

Using the MATLAB programming platform, a programming algorithm was developed as a versatile tool to simulate a distribution system with harmonic contamination in both voltage and current. THD's algorithm modifies the Jacobian matrix to generate passive filters that help reduce harmonic distortion in a distribution system. The results obtained from the custom-developed simulation software were compared with the simulation results from DIgSILENT PowerFactory, verifying the consistency of the outcomes.

THD's algorithm is a versatile program that can be further improved according to the needs or challenges that may arise during its use.

Palabras Clave: Harmonic distortion reduction, Radial distribution systems, Simulation software, IEEE 519-2014 standard, Harmonic current and voltage, Jacobian matrix, Passive filters, Harmonic distortion.

INDICE GENERAL

PRESENTACIÓN.....	II
RESUMEN	III
ABSTRACT	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS	XIV
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	XV
ÍNDICE ANEXOS.....	XVI
CAPÍTULO I.....	1
1. GENERALIDADES	1
1.1. Ámbito Geográfico	1
1.2. Problema de Investigación	1
1.2.1. Planteamiento del Problema.....	1
1.2.2. Formulación del Problema.....	6
1.2.2.1.Problema Principal	6
1.2.2.2.Problemas Específicos.....	6
1.3. Objetivos	7
1.3.1. Objetivo General	7
1.3.2. Objetivos Específicos.....	7
1.4. Justificación del Estudio.....	7
1.4.1. Justificación Social	7
1.4.2. Justificación Económica.....	8
1.4.3. Justificación Académica.....	8
1.4.4. Justificación Técnica	8
1.5. Alcances y Limitaciones	9
1.5.1. Alcances	9
1.5.2. Limitaciones	9
1.6. Hipótesis	10
1.6.1. Hipótesis General	10
1.6.2. Hipótesis Específicas	10
1.7. Variables e Indicadores	10

1.7.1.	Variables Independientes	10
1.7.2.	Variables Dependientes.....	10
1.7.3.	Indicadores.....	10
1.8.	Metodología	10
1.8.1.	Tipo de Investigación	10
1.8.2.	Nivel de Investigación	11
1.8.3.	Diseño de Investigación.....	11
1.8.4.	Población y Muestra.....	11
1.8.5.	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	11
1.9.	Matriz de Consistencia.....	13
CAPÍTULO II.....		14
2.	MARCO TEORICO	14
2.1.	Introducción	14
2.2.	Antecedentes	14
2.3.	Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica	16
2.3.1.1.	Topología Radial	17
2.3.1.2.	Topología en Anillo.....	17
2.3.1.3.	Topología Enmallada.....	18
2.3.2.	Parámetros Eléctricos de los Conductores	19
2.3.3.	Transformadores de Distribución	19
2.4.	Representación de los Armónicos	20
2.5.	Medición de la Distorsión Armónica	21
2.5.1.	Valores RMS del Voltaje y Corriente	21
2.5.2.	Factores de Distorsión del Voltaje y Corriente.....	22
2.5.4.	Potencia Aparente	23
2.5.5.	Potencia Distorsionada	23
2.5.6.	Factor de Potencia.....	24
2.6.	Consideraciones de los Filtros Pasivos para Armónicos	24
2.7.	Filtros Amortiguados	31
2.7.1.	Modelos de Filtros Amortiguados.....	31
2.8.	Efectos de los Armónicos en los Sistemas Eléctricos	35

2.8.1.	Efectos de los Armónicos en los Transformadores.....	36
2.8.2.	Efectos de los Armónicos en el Conductor Neutro.....	36
2.8.3.	Efectos de los Armónicos en los Fusibles	36
2.8.4.	Efectos de los Armónicos en los Relés Electrónicos	37
2.9.	Marco Regulatorio	37
2.9.1.	Estándar IEEE Std 519 – “Practicas Recomendables y Requerimientos para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia”	37
2.9.2.	Norma IEC 61000	40
2.9.3.	Decreto Supremo N° 020-97-EM	41
2.9.4.	IEEE 1531 – “Guía de Aplicación y Especificación para Filtros en Armónicos”	44
2.10.	Método de Newton Raphson	46
2.10.1.	Ventajas del Método de Newton – Raphson	48
2.10.2.	Desafíos y Limitaciones	48
2.10.3.	Pasos a Seguir en la Aplicación del Método de Newton Raphson	48
CAPÍTULO III.....		50
3.	METODOLOGÍAS UTILIZADAS PARA DETERMINAR LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA SED 0010921	50
3.1.	Introducción	50
3.2.	Modelamiento de los Elementos de un Sistema de Distribución	50
3.2.1.	Red Externa.....	51
3.2.2.	Líneas y Cables.....	52
3.2.3.	Transformadores.....	53
3.2.4.	Banco de Capacitores	53
3.2.5.	Cargas	53
3.2.6.	Tipos de Cargas	54
3.4.	Aplicación del método de Newton Raphson en Flujo de Potencia	59
3.4.1.	Formulación de las Ecuaciones de Flujo	59
3.4.2.	Aplicación del Método de Newton Raphson.....	62
3.4.3.	Newton Raphson aplicado al SED 0010921	64
3.4.4.	Calculo de las corrientes armónicas en la SED 0010921	67
3.4.5.	Calculo de las tensiones armónicas en la SED 0010921	70

3.4.6. Características de la contaminación armónicas en la SED 0010921.....	72
CAPÍTULO IV	75
4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA POR MODIFICACION DE LA MATRIZ JACOBIANA PARA LA REDUCCION DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA SED 0010921	75
4.1. Introducción.....	75
4.2. Diseño de Filtros Pasivos de Simple Sintonizado	75
4.3. Modificación de la Matriz Jacobiana	78
4.4. Características del Sistema con la Modificación de la Matriz Jacobiana	80
CONCLUSIONES	86
RECOMENDACIONES	87
BIBLIOGRAFÍA.....	88
ANEXOS.....	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01:	Ubicación Geográfica del Departamento del Cusco.....	11
	(b)Diagrama Unifilar AMT QU07.	1
	(c) Ubicación Geográfica del AMT-QU07 y la SED 0010921.	2
Figura 02:	Evolución del disturbio Armónico en Europa.....	2
Figura 03:	Mediciones de la quinta y séptima armónica de corriente.....	4
Figura 04:	Representación de un Sistema de Distribución Radial.....	17
Figura 05:	Diagrama de un sistema de Distribución en Anillo	18
Figura 06:	Diagrama de un sistema de Distribución Enmallado	18
Figura 07:	Modelamiento de un Transformador de Distribución Real	20
Figura 08:	Clasificación de los Filtros en Derivación más Utilizados	25
Figura 09:	Diagrama de un circuito serie RLC	26
Figura 10:	Resonancia de un circuito serie RLC (a) Impedancia vs Frecuencia (b) Ángulo vs Frecuencia.	28
Figura 11:	Impedancia vs Frecuencia, para diferentes valores del Factor de Calidad..	30
Figura 12:	Tipos de Filtros Amortiguados: (a) Primer Orden; (b) Segundo Orden; (c) Tercer Orden; (d) Tipo “C”.	31
Figura 13:	Filtro Amortiguado de segundo Orden: Magnitud de la Impedancia vs Frecuencia, para diferentes magnitudes D.	33
Figura 14:	Filtro Amortiguado de tercer Orden: Magnitud de la Impedancia vs Frecuencia, para diferentes magnitudes D.	34
Figura 15:	Punto común de Acoplamiento (a) En el lado de Media Tensión (b) En el lado de Baja Tensión.	38
Figura 16:	Sistema de distribución de una planta industrial	38
Figura 17:	Filtro que desvía la corriente armónica entre la carga productora de armónicos y la fuente de alimentación	45
Figura 18:	Filtro armónico de sintonización simple	45
Figura 19:	Ilustración de la Iteración primera de Newton Raphson	47
Figura 20:	Diagrama de Flujo del Método de Newton Raphson	49
Figura 21:	Representación General de un Sistema de Distribución	51
Figura 22:	Representación de la Red (a) Frecuencia Fundamental (b) Frecuencias Armónicas	52

Figura 23:	Representación de la Línea (a) Frecuencia Fundamental (b) Frecuencias Armónicas	52
Figura 24:	Ejemplo de la relación entre el voltaje y la corriente de una carga (a) Carga Lineal (b) Carga no Lineal.....	53
Figura 25:	Representación del modelo de carga como fuente de corriente constante	54
Figura 26:	Representación de la carga como modelo Norton	55
Figura 27:	Representación de la carga como modelo de Matriz de Admitancias	55
Figura 28:	Niveles de Agregación de Cargas.....	57
Figura 29:	Modelamiento de Simplificación de Cargas	57
Figura 30:	Diagrama de carga de la SED 0010921 (a) Por cada 15 minutos durante 7 días; (b) Valores máximos por cada hora, durante 7 días; (c) Valores promedio por cada hora, durante 7 días (d) Común de los valores promedios, de los 7 días.....	59
Figura 31:	Variables de una Barra de un Sistema de Potencia.....	60
Figura 32:	Diagrama Unifilar del Sistema de Distribución N° 0010921 con Simulación en Matlab.....	64
Figura 33:	Diagrama de Flujo para determinar la distorsión armónica en Sistemas de Distribución Radiales.	66
Figura 34:	Diagrama Unifilar del Sistema de Distribución N° 0010921 con Simulación en Digsilent.....	67
Figura 35:	Corriente armónica producida por la SED 0010921 (a) Corriente fundamental respecto al tiempo; (b) Corriente armónica total respecto al tiempo; (c) Espectro de la corriente armónica en valores eficaces; (d) Espectro de la corriente armónica en valores porcentuales v/s el límite establecido en la IEEE std. 519.	68
Figura 36:	Características del Sistema de Distribución, respecto al cálculo y comparación del THD'I y THD'V.	69
Figura 37:	Corriente armónica producida por la SED 0010921 en el programa Digsilent (a) Corriente armónica total respecto al tiempo; (b) Espectro de la corriente armónica en valores eficaces	70
Figura 38:	Tensión armónica producida en la barra 03 de la SED 0010921 (a) Voltaje fundamental respecto al tiempo; (b) Tensión armónica total respecto al tiempo; (c) Espectro de la tensión armónica en valores porcentuales v/s el límite establecido en la IEEE std. 519; (d) Espectro de la corriente armónica	

	en valores porcentuales v/s el límite establecido en el DS N° 020-97 – NTCSE	71
Figura 39:	Tensión armónica producida por la SED 0010921 en el programa Digsilent (a) Tensión armónica total respecto al tiempo; (b) Espectro de la tensión armónica en valores eficaces	72
Figura 40:	Vectores de los principales armónicos producidos en la SED 0010921 (a) Voltaje, corriente e impedancia respecto al 5to armónico; (b) Voltaje, corriente e impedancia respecto al 7mo armónico; (c) Voltaje, corriente e impedancia respecto al 11vo armónico.....	73
Figura 41:	(a) Potencia aparente armónica total producida en la barra 03 de la SED 0010921 (b) Potencia aparente de todos los armónicos producidos en la barra 03 de la SED 0010921; (c) Espectro de la potencia aparente en valores eficaces producidos en la barra 03 de la SED 0010921	74
Figura 42:	Corrección del Factor de Potencia por Triángulo de Potencias.....	76
Figura 43:	Algoritmo desarrollado en el programa Matlab, para la reducción de los armónicos de corriente y voltaje, mediante la modificación de la matriz Jacobiana	78
Figura 44:	Características de los filtros: (a) Módulo de la impedancia del filtro de 5ta armónica; (b) Ángulo de la impedancia del filtro de la 5ta armónica; (c) Módulo de la impedancia del filtro de 7ma armónica; (d) Ángulo de la impedancia del filtro de la 7ma armónica.....	78
Figura 45:	(a) Matriz Jacobiana Tradicional sin Filtro; (b) Matriz Jacobiana Modificada con Filtro.....	80
Figura 46:	Corriente armónica reducida en la SED 0010921 (a) Corriente fundamental respecto al tiempo; (b) Corriente armónica total respecto al tiempo; (c) Espectro de la corriente armónica en valores eficaces; (d) Espectro de la corriente armónica en valores porcentuales v/s el límite establecido en la IEEE std. 519.....	81
Figura 47:	Tensión en la barra 03 de la SED 0010921 con la conexión de filtros pasivos (a) Voltaje fundamental respecto al tiempo; (b) Tensión armónica total respecto al tiempo; (c) Espectro de la tensión armónica en valores porcentuales v/s el límite establecido en la IEEE std. 519; (d) Espectro de la corriente armónica en valores porcentuales v/s el límite establecido en el DS N° 020-97 – NTCSE.....	82
Figura 48:	Comparación de resultados, respecto a la utilización de filtros: (a) Perdidas de Potencia Activa en los elementos de distribución (b) Perdidas de	

	Potencia Reactiva en los elementos de distribución (c) Tensiones en los nodos del sistema.....	83
Figura 49:	Diagrama de Flujo para determinar el control de voltaje y los armónicos en Sistemas de Distribución con Filtros Pasivos.....	85
Figura 50:	Subestacion 0010921.	92
Figura 51:	Cortadora.	93
Figura 52:	Faja Transportadora.	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Amónicos de tensión en la SED 0010921.....	5
Tabla 2.	Amónicos de corriente en la SED 0010921	5
Tabla 3.	Cuadro de cargas pertenecientes a la SED 0010921	6
Tabla 4.	Matriz de Consistencia	13
Tabla 5.	Estándar de Armónicos de Voltaje, conforme a la IEEE Std. 519	39
Tabla 6.	Estándar de Armónicos de Corriente, conforme a la IEEE Std. 519.....	40
Tabla 7.	Limite de Vi' y THD según NTCSE	43
Tabla 8.	Clasificación de los Tipos de Barras	61

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

COES-SINAC	: Comité de Operaciones Económicas del Sistema Interconectado nacional
SEIN	: Sistema Eléctrico Interconectado Nacional.
IEEE	: Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos.
DFT	: Transformada Discreta de Fourier.
IEC	: Comisión Electrotécnica Internacional.
NTCSE	: Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos.
RMS	: Valor Eficaz de una Sola Onda Senoidal.
EMTP	: Electromacnetic transients program
L, C, R	: Inductancia, Capacitancia, Resistencia.
Q	: Factor de Calidad
DS	: Decreto Supremo
THD	: Distorción Armónica Total.
THD'V	: Distorcion total de armónicos de Voltaje.
THD'I	: Distorcion total de Armónicos de Corriente.
SED	: Subestación Electrica de Distribución.
P, Q, S	: Potencia Activa, Potencia Reactiva y Potencia Aparente

ÍNDICE ANEXOS

Anexo 01: Fotografías Subestacion de Distribucion 0010921	92
Anexo 02: Principales Cargas no Lineales en la Subestacion de Distribución 0010921.....	93
Anexo 03: Algoritmo desarrollado en el programa MATLAB 2016.a	95
Anexo 04: Características del equipo analizador de redes, WIN PQ MOBIL - PQ Box 100 EXPERPT.	126

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1. Ámbito Geográfico

El ámbito geográfico bajo estudio, se encuentra comprendido dentro del área de concesión de la empresa de distribución eléctrica Electro Sur Este S.A.A. - ELSE, corresponde a la Sub Estación de Transformación de Quencoro, que alimenta al Sub Sistema de Distribución Primaria en 10.5 kV (SSDP - QU07) y este alimenta a su vez a la Sub Estación de Distribución 0010921, sub estación en estudio que contiene contaminación armónica debido a cargas no lineales presentes, este se encuentra comprendida en la ciudad de Cusco, Distrito de San Jerónimo.

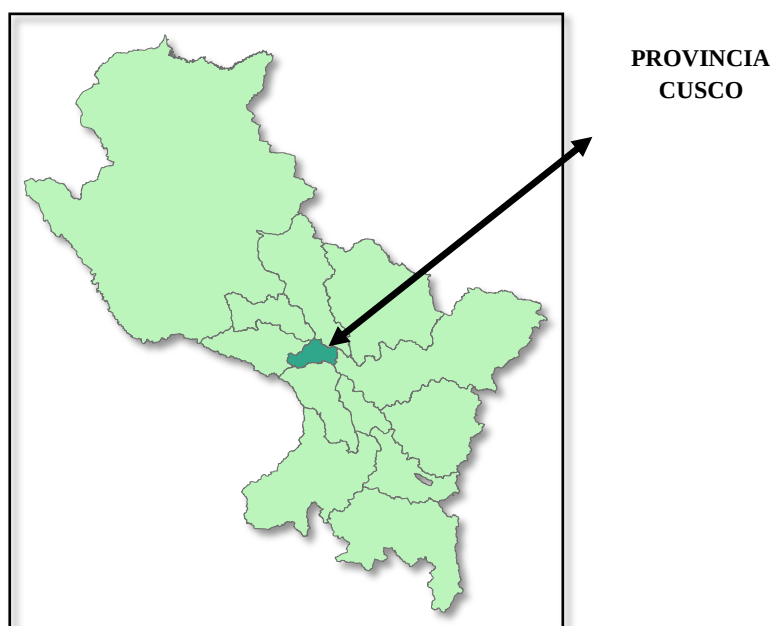


Figura 01: Ubicación Geográfica del Departamento del Cusco

Fuente: Elaboración propia

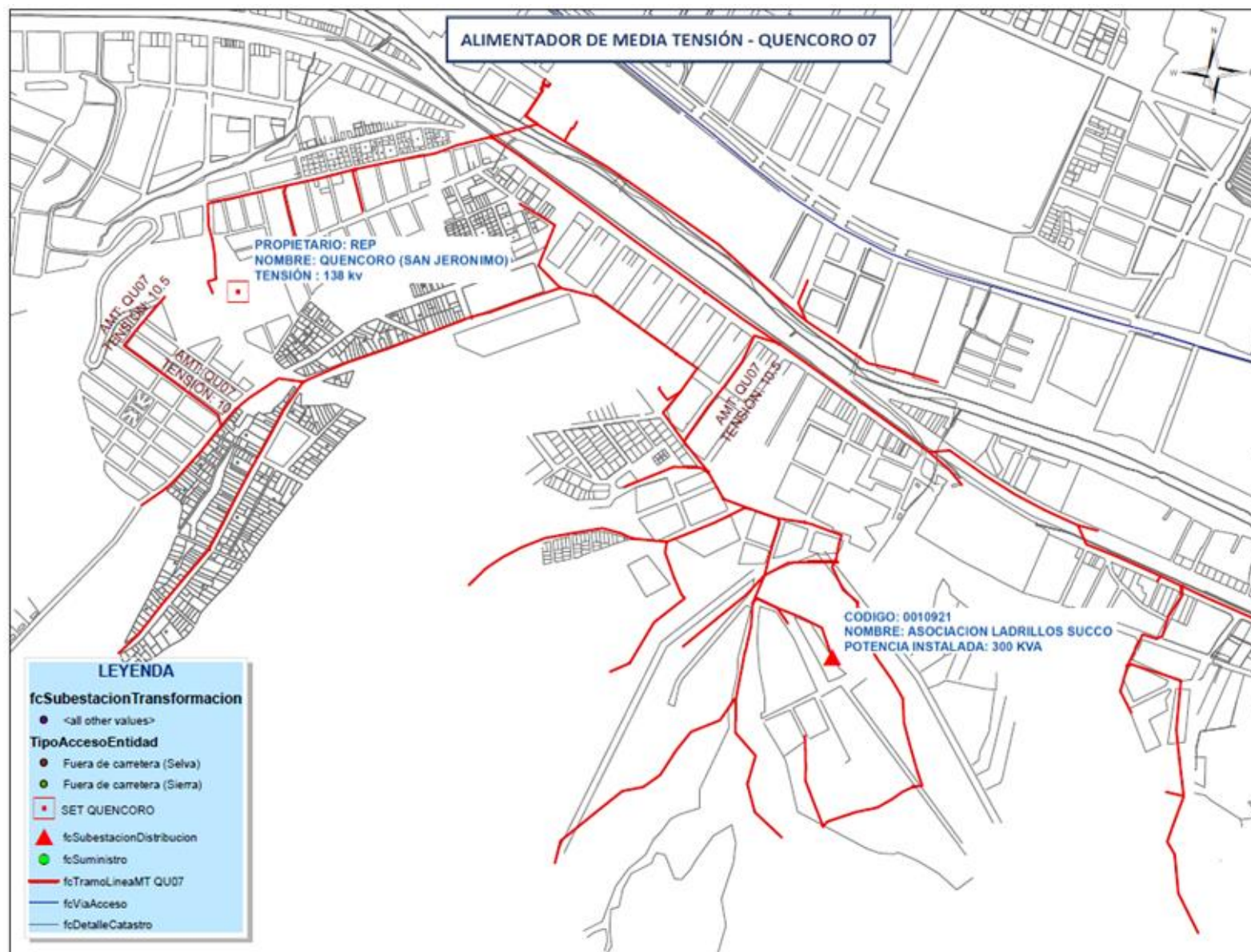


Figura 01(c): Ubicación Geográfica del AMT-QU07 y la SED 0010921.

Fuente: Elaboración propia

1.2. Problema de Investigación

1.2.1. Planteamiento del Problema

En los últimos años, el uso de dispositivos electrónicos, y la utilización de cargas no lineales como fluorescentes, dispositivos led, computadores, televisores, motores, etc. Ha producido un incremento significativo en la inyección de corrientes armónicas en las redes eléctricas. Estas corrientes armónicas, dan como resultado, que las ondas de voltajes se distorsionen (Wakileh, 2001), causando serios problemas en los sistemas de distribución, como:

- Envejecimiento y disminución de capacidad de los componentes de un sistema de distribución (Das, 2017b).
- Reducción de la eficiencia de los sistemas de distribución (Das, 2017b).
- Sobre calentamiento de los conductores, especialmente en el neutro de las instalaciones (De La Rosa, 2006).
- Disminución del factor de potencia, de los sistemas de distribución (De La Rosa, 2006).
- Calentamiento, degradación del aislamiento de los transformadores de distribución (Wakileh, 2001).
- Distorsión de la forma de onda del voltaje y por consiguiente el mal funcionamiento de los aparatos eléctricos; etc.

Todos estos problemas, acarrearán pérdidas económicas importantes debido a que se deben implementar, formas de mitigar, reducir o disminuir esta contaminación armónica (Brameller, 1992), como:

- Sobredimensionamiento de los conductores e incremento de las potencias contratadas de las instalaciones.
- Necesidad de sustitución y con mayor frecuencia de los aparatos y máquinas dañadas por armónicos de voltaje y corriente.
- Paradas de producción, debidas a los disparos intempestivos de los elementos de protección y de mando.
- Compra de equipos adicionales, para la reducción de los armónicos, como filtros activos, pasivos, utilización de transformadores en paralelo, etc.

De acuerdo al informe definitivo del COES-SINAC, respecto al estudio de armónicos de tensión, en el SEIN, todo incremento en la demanda, conlleva también a un incremento de la distorsión armónica, siendo uno de estos factores, la utilización de las cargas no líneas existentes y nuevas, presentes en las redes de distribución pública, cargas industriales, clientes libres, etc.

Esto significa que, si no se controla y se monitorea el crecimiento armónico, se puede llegar a una política de restricción comercial sobre los aparatos de uso final, como es el caso de la evolución del disturbio armónico en Europa, donde se tomaron medidas para corregir esta situación (Norma Técnica de Calidad de Los Servicios Electricos, 1997).

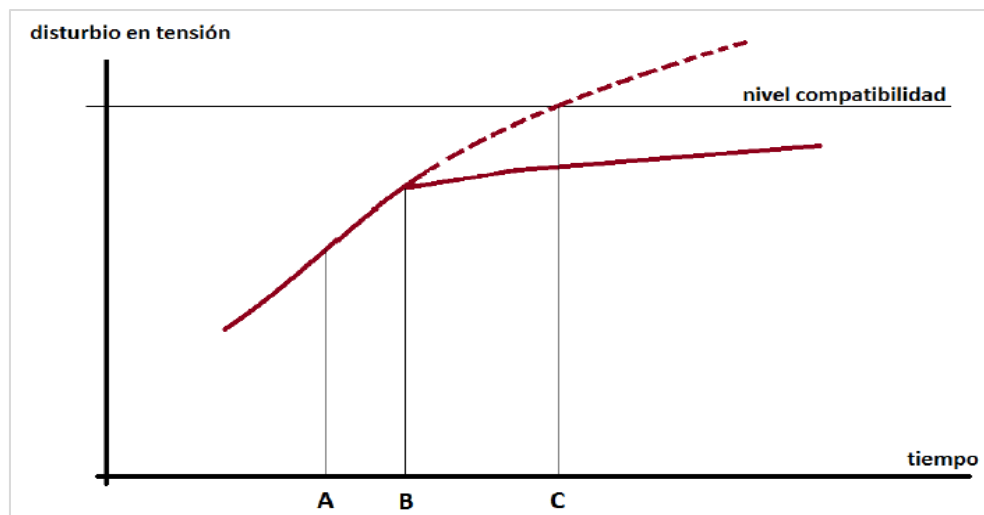


Figura 02: Evolución del disturbio Armónico en Europa.

Fuente: Estudio de Armónicos en Muy Alta Tensión del Sistema de Transmisión del SEIN

Estos resultados, nos llevan a la conclusión que el monitoreo de los armónicos de tensión en las redes de Perú, tengan que considerarse muy cuidadosamente, de manera de disminuir la distorsión, por debajo del valor establecido en la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (NTCSE) y el Osinergmin es el encargado de supervisar su cumplimiento, por parte de las empresas concesionarias (Norma Técnica de Calidad de Los Servicios Electricos, 1997).

En la actualidad, la empresa concesionaria Electro Sur Este S.A.A. licita procesos de contratación para el servicio de Mejoramiento de la Calidad de Producto, como es el caso del procedimiento de selección CP-021-2022-ELSE, donde se debe

garantizar la prestación del servicio eléctrico, de manera que se garantice a los usuarios, un suministro eléctrico continuo, adecuado, confiable y oportuno (Norma Técnica de Calidad de Los Servicios Electricos, 1997).

Asimismo, para dichos estudios, se utiliza el software Digsilent Power Factory, donde se debe tener conocimiento de la herramienta Harmonics/Power Quality, siendo la introducción de la base de datos y procesamiento de los resultados del analizador de redes, en forma manual, y aún más complicado el diseño de filtros pasivos/activos, debido a que dichos parámetros se deben calcular en forma independiente del software Digsilent Power Factory, para luego ser probados y verificados (COES, 2012), a manera que cumple con la NTCSE.

Cabe mencionar, que el software Digsilent Power Factory, lleva en sus simulaciones, mucha información relevante, respecto a la operación de los sistemas eléctricos, los cuales no se llegan a visualizar, debido a que el software funciona como una herramienta cerrada, no pudiéndose observar el comportamiento de los vectores individuales de cada armónico, el comportamiento de los filtros utilizados para mitigar la contaminación armónica, como son las potencias armónicas transmitidas en el sistema eléctrico, etc. Esto significa, que se deben utilizar algoritmos y herramientas amigables, que faciliten en forma rápida y precisa, la detección de aquellos armónicos que se encuentren fuera de los márgenes de seguridad, de acuerdo a la NTCSE.

Actualmente, las nuevas cargas que se conectan a los sistemas de distribución, tienen una configuración radial, que se encuentra compuesto por una línea de distribución primaria y un transformador de distribución (configuraciones radiales, que también tienen las empresas mineras que se conectan a la SEIN), como es el caso de la SED 0010921, donde se observa la existencia de armónicos debido a las cargas no lineales presentes, siendo estos mayores, respecto a la 5ta y 7ma armónica, tal como se muestra en las Figuras 03 (a) y (b), el cual se tomara como sistema de prueba, para la veracidad del algoritmo a desarrollarse.

Para verificar efectivamente la presencia de armónicos se realizarón ocho mediciones, *entre los días del seis al catorce de octubre del año 2021* donde se

muestra la presencia del $\text{THD}'V=3.2577\%$ y un $\text{THD}'I=14.3608\%$, el cual se usará, como se mencionó anteriormente, para desarrollar el algoritmo.

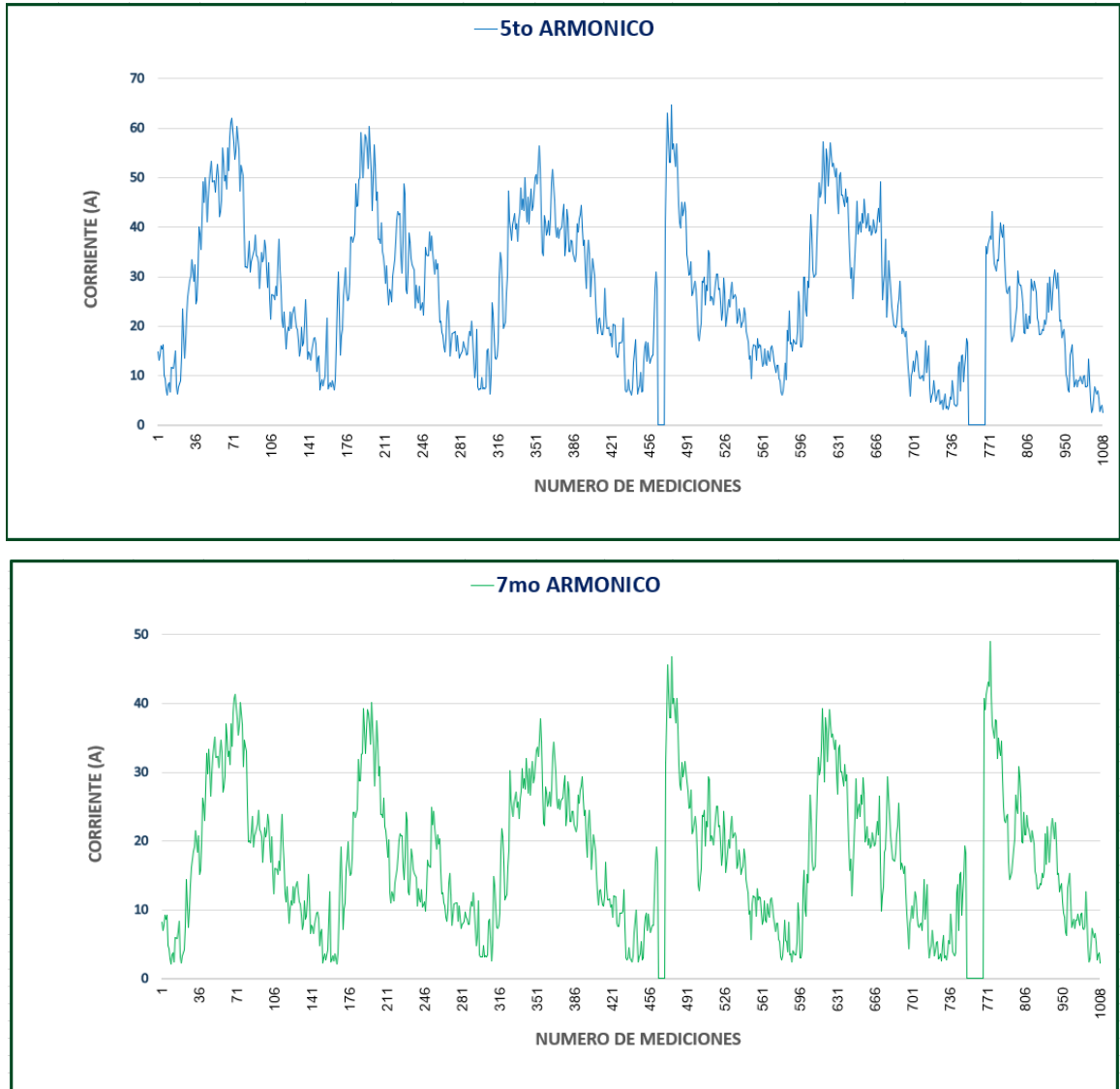


Figura 03: (a) Mediciones de la quinta armónica de corriente

(b) Mediciones de septima armónica de corriente

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 1. Armónicos de tensión en la SED 0010921

ARMÓNICO	TOLERANCIA NTCSE	TOLERANCIA IEEE 519-2014(%)	VALORES (MAX)		
			FASE 12	FASE 23	FASE 31
			(%)	(%)	(%)
3ro	5	5	0.0856	0.2093	0.1299
5to	6	5	3.7949	3.8969	3.6910
7mo	5	5	0.8336	0.8220	0.9255
9no	1.5	5	0.0255	0.0420	0.0477
11vo	3.5	5	0.4424	0.4701	0.3882
THD'V			3.2577		

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Analizador de redes, datos de la NTCSE. (Lectura del 06/10/2021 al 14/10/2021)

De la tabla 01 se observa que los armónicos de voltaje no exceden los límites establecidos según la NTCSE peruana ni de la IEEE Std 519-2014.

Tabla 2. Armónicos de corriente en la SED 0010921

ARMÓNICO	TOLERANCIA NTCSE	TOLERANCIA IEEE 519-2014(%)	VALORES (MAX)		
			FASE 1	FASE 2	FASE 3
			(%)	(%)	(%)
3ro	-	7	6.5128	6.9759	4.6380
5to	-	7	11.8017	11.4626	13.8095
7mo	-	7	7.7920	9.8280	8.2848
9no	-	7	3.1349	3.8396	1.1412
11vo	-	3.5	2.9283	3.4900	2.4188
THD'I			14.3608		

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Analizador de redes, la IEEE Std 519- 2014. (Lectura del 06/10/2021 al 14/10/2021)

De la tabla 02 se observa que los armónicos de corriente exceden los límites establecidos de la IEEE Std 519-2014

Las distintas fuentes de cargas no lineales que introducen armónicos al sistema de distribución son.que se detallan a continuación:

Tabla 3. Cuadro de cargas pertenecientes a la SED 0010921

CUADRO DE CARGAS								
MAQUINA	MARCA	SERIE	Potencia (KW)	Potencia (HP)	MOTOR	F.P	VOLTAJE (V)	CORRIENTE (A)
Soplador 1	SIEMENS	112 -4YA80	3.73	5	3 Φ	0.78	220/380/440	15.8/9.1/7.9
Soplador 2	SIEMENS	1LA7 - 112	3.73	5	3 Φ	0.78	220/380/440	15.8/9.1/7.9
Soplador 3	ABB	162 112	17.5	23.45	3 Φ	0.82	380/440	30/30
Soplador 4	SIEMENS	1LE0142	2.98	4	3 Φ	0.85	220/440	12.7/7.3
Soplador 5	SIEMENS	MSX90S-4	3.73	5	3 Φ	0.78	220/380/440	15.8/9.1/7.9
Soplador 6	SIEMENS	1LA7 - 112	3.73	5	3 Φ	0.78	220/380/440	15.8/9.1/7.9
Succionador de aire frio 1	MARK	412033936	11	14.74	3 Φ	0.84	220/440	4.8/4.9
Succionador de aire frio 2	SIEMENS	EN60034	2.6	3.5	3 Φ	0.84	230/400	4.8/4.9
Cortadoras 1	SOUZA		0.736	0.986	1 Φ	0.84	220	-
Cortadoras 2	SIEMENS	106 - 4AA10	2.6	3.5	3 Φ	0.84	230/400	4.8/4.9
Laminadoras 1	RAINBOW	18010 - 113	2.6	3.5	3 Φ	0.81	220/380	5.16/8.91
Laminadoras 2	BERTAN	LB500	2.576	3.451	3 Φ	0.86	220/380	7.1/10.2
Faja Transportadora 1	ABB	1406038	18.65	25	3 Φ	0.86	220/380/440	68/39/23
Faja Transportadora 2	MARK	2.11E+09	11	14.74	3 Φ	0.84	220/440	4.8/4.9
Faja Transportadora 3	SIEMENS	315M - 4	150	200	3 Φ	0.89	220/380/440	215.2/239.7/207.6
Mezcladora	TYP	IM B3	55	73.7	3 Φ	0.86	400/690	102/58

Fuente: Elaboración propia

1.2.2. Formulación del Problema

1.2.2.1. Problema Principal

¿De que manera se reducirá la distorsión armónica en la SED 0010921, mediante la propuesta de modificación de la matriz Jacobiana?

1.2.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cómo calcular los armónicos de voltaje, en función de las corrientes armónicas producidas por cargas no lineales, en la SED 0010921, mediante la propuesta de modificación de la matriz jacobiana?
- ¿De que manera se podrá evaluar el nivel de distorsión armónica, producida en la SED 0010921, con relación a la NTCSE y la norma IEEE 519, mediante la utilización de un algoritmo diseñado en MATLAB con la propuesta de modifcaion de la matriz jacobiana?

- c) ¿De que manera se podrá atenuar la distorsión armónica en la SED 0010921, a travez del diseño de filtros pasivos con la propuesta de modificación de la matriz Jacobiana utilizando un algoritmo diseñado en MATLAB?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Reducir la distorsión armónica producida en la SED 0010921, mediante la propuesta de modificación de la matriz Jacobiana.

1.3.2. Objetivos Específicos

- a) Calcular los armónicos de voltaje, en función de las corrientes armónicas producidas por cargas no lineales, en la SED 0010921 mediante la propuesta de modifcaion de la matriz jacobiana.
- b) Evaluar la distorsión armónica producida en la SED 0010921, en relación a la NTCSE y la norma IEEE 519, mediante la utilización de un algoritmo diseñado en MATLAB con la propuesta de modifcaion de la matriz jacobiana.
- c) Implementar filtros pasivos, que reduzca la distorsión armónica en la SED 0010921, a partir de la modificación de la matriz Jacobiana utilizando un algoritmo diseñado en MATLAB.

1.4. Justificación del Estudio

En esta investigación, se desarrollará un algoritmo, que calcule la distorsión armónica, mediante la modificación de la matriz Jacobiana, donde se considerará el sistema en estado estacionario, con el fin de obtener las variables de estado del sistema eléctrico, para luego determinar los armónicos producidos por cargas no lineales, los cuales provocan serios problemas en la operación de una red eléctrica, es por ello que se justifica en forma:

1.4.1. Justificación Social

Los armónicos producen efectos perjudiciales a los sistemas de distribución, principalmente a equipos electrónicos de alta sensibilidad a cambios intempestivos de corriente y voltaje, como dispositivos de control de motores, rectificadores monofásicos, cargadores de baterías que pueden producir altos niveles de corriente continua, etc. Debido a estos efectos se debe controlar y analizar los armónicos producidos, pues conllevaría a una disminución del tiempo

de vida de un conjunto de aparatos electrónicos que se encuentran en una vivienda, sino de equipos sofisticados que se utilizan en diferentes industrias y sistemas automatizados (R. Pinto Do N., 2009).

1.4.2. Justificación Económica

La distorsión armónica en los sistemas de distribución, producen grandes problemas económicos a los consumidores y a las empresas concesionarias, debido a que las cargas no lineales tienden a sobrecargar transformadores y líneas de distribución, causando incrementos significativos en las pérdidas técnicas, altos costos en la distribución de energía eléctrica hacia los usuarios. Respecto a las empresas concesionarias, tienden a sobredimensionar sus equipos de distribución, incrementándose así, los costos de inversión, para satisfacer las demandas de energía (Wakileh, 2001).

1.4.3. Justificación Académica

El estudio de armónicos, es considerado un fenómeno no lineal por lo que se requiere de modelos, métodos y herramientas computacionales precisas (Cinto Martinez, 2019), debido a que los principales dispositivos que producen este fenómeno tienden a cambiar su impedancia, en función de la tensión instantánea absorbida, que da lugar a una corriente absorbida no senoidal.

De acuerdo a (Genovez Ramirez, 2018), los armónicos son peores que los eventos transitorios, por lo que se deben desarrollar técnicas y métodos que estimen la distorsión armónica total y de acuerdo a (Mohamed, 2015), los armónicos producen potencias indeseadas que sobrecargan los elementos de un sistema eléctrico, es por ello, que se debe buscar herramientas versátiles, que adicionalmente calculen una alternativa de solución, que reduzca o mitigue los armónicos de voltaje, esto de acuerdo a la NTCSE.

1.4.4. Justificación Técnica

Toda distorsión armónica, producida por cargas no lineales, genera armónicos de corriente, que circulan por el sistema de distribución, ocasionando caídas de tensión a diferentes frecuencias (Su et al., 2014). Esto dará como resultado, la aparición de tensiones armónicas que distorsionan la onda de tensión,

incrementando la magnitud del THD, el cual deberá ser analizado y verificado según lo establecido en la NTCSE.

1.5. Alcances y Limitaciones

1.5.1. Alcances

En este trabajo, se realizará un algoritmo en Matlab versión 2016, que procese la información obtenida del analizador de redes, y que reduzca el nivel de distorsión armónica, producida por cargas no lineales.

Dicho algoritmo será aplicado a la SED 0010921, como sistema de prueba y serán comprobados con los resultados obtenidos en el programa Digsilent Power Factory 15.1.6, respecto a las tensiones y corrientes armónicas. Después de la comparación de resultados, se procederá a simular el comportamiento vectorial de los principales armónicos de tensión y corriente, flujos de potencia con presencia de armónicos, comportamiento de filtros pasivos, como algoritmo independiente y versátil.

1.5.2. Limitaciones

- El algoritmo desarrollado, se podrá aplicar a sistemas radiales de distribución de tres barras, debido a que la configuración de las nuevas cargas que se conectan a las redes de distribución existentes, están conformadas por una línea de transmisión, un transformador y una carga, como se muestra en (Farrag et al., 2017).
- El análisis de los armónicos se realiza en el lado de baja tensión del transformador de distribución, debido a que las mediciones fueron obtenidas en este lado del transformador.
- Se compara los resultados obtenidos, únicamente con las simulaciones realizadas en el programa Power Factory – Digsilent 15.1.6.
- Para la obtención de los parámetros de la red equivalente de alimentación, se utilizará la base de datos en Neplan de la empresa concesionaria Electro Sur Este S.A.A. (potencia de cortocircuito y tensión de operación).

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis General

La propuesta de modificación de la matriz Jacobiana reduce la distorsión armónica en la Subestación de Distribución 0010921.

1.6.2. Hipótesis Específicas

- a) El aplicar el metodo, de la modificación de la matriz jacobiana, permite el cálculo de los armónicos de voltaje, en función de las corrientes armónicas, obtenidas a partir de las mediciones del analizador de redes.
- b) El nivel de distorsión armónica producida en la SED 0010921 podrá evaluarse con precisión en relación con los límites establecidos por la NTCSE y la norma IEEE 519 mediante un algoritmo diseñado en MATLAB que integre la propuesta de modificación de la matriz jacobiana.
- c) El diseño de filtros pasivos optimizados a travez de la modificación de la matriz Jacobiana, utilizando un algoritmo diseñado por MATLAB podrá atenuar de manera efectiva la distorsión armónica producida en la SED 0010921.

1.7. Variables e Indicadores

1.7.1. Variables Independientes

- Matriz Jacobiana

1.7.2. Variables Dependientes

- Armónicos de Voltaje y Armónicos de Corriente.

1.7.3. Indicadores

- Potencia Activa y Reactiva (kW y kVAR)
- Distorsión Armónica Total de Voltaje y Corriente (THD'V y THD'I)

1.8. Metodología

1.8.1. Tipo de Investigación

La presente investigación, según su naturaleza, es de tipo Cuantitativa, debido a que se buscara cuantificar y medir las magnitudes de los armónicos producidos por las cargas no lineales, para luego compararlas con los márgenes establecidos en la NTCSE y la IEEE-519

1.8.2. Nivel de Investigación

Es de tipo aplicativa/explicativa [16], debido a que se aplicara un metodo que determine el nivel de contaminación armónica y se mejorara las ondas de tensión, debido al diseño de filtros pasivos.

1.8.3. Diseño de Investigación

Se calculará los armónicos de voltajes, a partir de las mediciones realizadas y la base de datos de la empresa concesionarios Electro Sur Este S.A.A.

Se diseñará un algoritmo en Matlab, que calcule la contaminación armónica y diseñe los parámetros de filtros pasivos, que mitiguen o reduzcan los armónicos de una red de distribución.

1.8.4. Población y Muestra

Para nuestro caso de estudio, se considerará la demanda de la Sub Estación de Distribución 0010921, alimentado por el AMT QU-07 (Quencoro 07). Asimismo, se tomó en consideración esta SED, debido a que presenta una mayor contaminación armónica respecto a sus mediciones de consumo, siendo esta selección, no probabilística.

Asimismo, el algoritmo desarrollado podrá aplicarse a cualquier sistema de distribución radial de 3 barras, de acuerdo a lo comprendido dentro de nuestro planteamiento del problema.

1.8.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

1.8.5.1. Técnicas de Recolección de Datos

En esta investigación, la recolección de datos será de la siguiente forma:

Revisión y selección de artículos y publicaciones relacionados al tema (tesis, libros, artículos, folletos, etc.) obtenidos a través de revistas internacionales, páginas de internet, entre otros.

Recolección y procesamiento de las mediciones obtenidas del analizador de redes, respecto a los armónicos producidos por las cargas no lineales, debido a que las mediciones, pueden presentar huecos (considerados como sag) o sobretensiones (considerado como swell), que solamente se presentan ante condiciones anómalas (se considera como perdida de información, o mediciones

que ocurren muy pocas veces, dentro del rango de mediciones), las cuales pueden llevar a errores de simulación.

1.8.5.2. Instrumentos y Análisis de Recolección de Datos

Para la recolección de datos, se tomarán los siguientes instrumentos de medición. En base a las mediciones obtenidas del analizador de redes, respecto al lado de baja tensión de la SED 0010921 (lado donde se conecta la carga)

Base de datos del Sistema de Información Eléctrica Georreferenciada SIEG.

Después de tener la información pertinente, se procederá al cálculo de los armónicos en el dominio de la frecuencia, con la ayuda de las siguientes herramientas computacionales:

- Software Power Factory – Digsilent 15.1.6.
- Software Matlab, versión 2016
- Software de Microsoft como: Word, Excel y Visio.

1.9. Matriz de Consistencia

Tabla 4. Matriz de Consistencia

MATRIZ DE CONSISTENCIA				
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	METODOLOGÍA	VARIABLES E INDICADORES
PROBLEMA PRINCIPAL: ¿De que manera se reducirá la distorsión armónica en la SED 0010921, mediante la propuesta de modificación de la matriz Jacobiana? PROBLEMAS ESPECÍFICOS: a) ¿Cómo calcular los armónicos de voltaje en función de las corrientes armónicas producidas por cargas no lineales en la SED 0010921 mediante la propuesta de modificación de la matriz jacobiana? b) ¿De que manera se podrá evaluar el nivel de distorsión armónica producida en la SED 0010921, con relación a ala NTCSE y la norma IEEE519 mediante la utilización de un algoritmo diseñado en MATLAB con la propuesta de modificación de la matriz jacobiana?? c) ¿De que manera se podrá atenuar la distorsión armónica en a SED 0010921 a travez del diseño de filtros pasivos con la propuesta de modificación de la matriz jacobiana utilizando un algoritmo diseñado en MATLAB?	OBJETIVO GENERAL: Reducir la distorsión armónica producida en la SED 0010921, mediante la propuesta de modificación de la matriz Jacobiana. OBJETIVO ESPECÍFICOS: a) Calcular los armónicos de voltaje, en función de las corrientes armónicas producidas por cargas no lineales, en la SED 0010921 mediante la propuesta de modificación de la matriz jacobiana. b) Evaluar la distorsión armónica producida en la SED 0010921, en relación a la NTCSE y la norma IEEE 519, mediante la utilización de un algoritmo diseñado en MATLAB la propuesta de modificación de la matriz jacobiana. c) Implementar filtros pasivos, que reduzca la distorsión armónica en la SED 0010921, a partir de la modificación de la matriz Jacobiana utilizando un algoritmo diseñado en MATLAB.	HIPÓTESIS GENERAL: La propuesta de modificación de la matriz Jacobiana reduce la distorsión armónica en la Subestación de Distribución 0010921. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS: a) El aplicar el método de la modificación de la matriz jacobiana permite el calculo de os armónicos de voltaje en función de las corrientes armónicas obtenidas a partir de las mediciones del analizador de redes. b) El nivel de distorsión armónica producida en la SED 0010921 podra evaluarse con precisión en relación con los límites establecidos por la NTCSE y la norma IEEE519 mediante un algoritmo diseñado en MATLAB que integre la propuesta de modificación de la matriz jacobiana. c) El diseño de filtros pasivos optimizados a travez de la modificación de la matriz jacobiana utilizando un algoritmo diseñado por MATLAB podrá atenuar de manera efectiva la distorsión armónica producida en la SED 0010921.	TIPO DE INVESTIGACIÓN: Cuantitativo NIVEL DE INVESTIGACIÓN: Aplicativa/explicativa. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: - Se calculará los armónicos de voltajes, a partir de las mediciones realizadas y la base de datos de la empresa concesionarios Electro Sur Este S.A.A. - Se diseñará un algoritmo en Matlab, que calcule la contaminación armónica y diseñe los parámetros de filtros pasivos, que mitiguen o reduzcan los armónicos producidos en la subestación de distribución 0010921. POBLACIÓN: Subestación de Distribución 0010921 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS: - Revisión y selección de artículos y publicaciones relacionadas al tema (teisis, libros, artículos, folletos, etc.) obtenidos a travez de revistas internacionales, paginas de internet, entre otros. - Recolección y procesamiento de las mediciones obtenidas del analizador de redes, respecto a los armónicos producidos por las cargas no lineales, debido a que las mediciones, pueden presentar huecos (considerados como SAG) o sobretensiones (considerados como SWELL), que solamente se presentan ante condiciones anómalas (se considera omo perdida de información, o mediciones que ocurren muy pocas veces, dentro del rango de mediciones), las cuales pueden llevar a errores de simulación. INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS: - En base a las mediciones del analizador de redes, respecto al lado de baja tensión de la SED 0010921(lado donde se coneca la carga). - Base de datos del Sistema de Información Eléctrica Georreferenciada SIEG. - Después de tener la información pertinente, se procederá al cálculo de los armónicos en el dominio de la frecuencia, con la ayuda de las siguientes herramientas computacionales: ▪ Software Power Factory – Digsilent 15.1.6 ▪ Software Matlab, versión 2016 ▪ Software de Microsoft como: Word, Excel y Visio.	VARIABLES INDEPENDIENTES: ▪ Matriz Jacobiana VARIABLES DEPENDIENTES: ▪ Armónicos de Voltaje y Armónicos de Corriente INDICADORES ▪ Potencia Activa y Reactiva (Kw y Kvar) ▪ Distorsión Armónica Total de Voltaje y Corriente (THD^v y THDⁱ).

CAPÍTULO II

2. MARCO TEORICO

2.1. Introducción

En este capítulo se mostrará los conceptos generales utilizados en la elaboración de esta investigación, el cual ayudaran al desarrollo sucesivo de los siguientes capítulos.

Se tratará sobre cómo se emplea el método de Newton Raphson a los sistemas de Ecuaciones, conceptos generales de los armónicos, las normatividades utilizadas tanto nacionales e internacionales sobre los armónicos y puntos de medición, características de los sistemas de distribución, etc.

2.2. Antecedentes

- Ligas Nina, Williams Ezequiel. (2016)

“EVALUACIÓN DE ARMÓNICOS EN LOS BANCOS DE CAPACITORES DE LA SUB ESTACIÓN ELÉCTRICA DE DOLORESPATA” Tesis para optar al Título Profesional de Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Resumen: En este proyecto, se trata de evaluar las incidencias negativas producidas por los armónicos presentes en los bancos de capacitores, instalados en la Sub Estación Eléctrica de Dolorespata, mediante la utilización de equipos de medición y uso de un software de simulación.

- Ccorimanya Leon, Arphi Huamani. (2018).

“FILTRO PASIVO Y ARMÓNICOS DE CORRIENTE EN LAS INSTALACIONES ELECTRICAS DEL HOSPITAL REGIONAL, CLINICA SAN JUAN DE DIOS Y UNSAAC” Tesis para optar al Título Profesional de Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Resumen: el objetico de esta tesis, es verificar la interacción de los armónicos de corriente, producidos en el Hospital Regional, Clínica San Juan de Dios y el Pabellón de Ingeniería Eléctrica, cuyas cargas se encuentran conectadas al alimentador de Dolorespata DO-06.

- Palomino Noa, Mendoza Boza (2019)

“ANÁLISIS DE LAS CORRIENTES ARMÓNICAS EN BAJA TENSIÓN Y SU INCIDENCIA A LA CALIDAD DE PRODUCTO DEL HOSPITAL REGIONAL DEL CUSCO – 2018” Tesis para optar al Título Profesional de Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Resumen: La utilización de dispositivos electrónicos en el comercio, industria, centros de salud y en zonas residenciales, produce un incremento significativo de las perturbaciones, alterando el THD y el THD'I, el cual afecta a la calidad de producto de la energía eléctrica.
- H. A. Mohamed. (2015)

“APPROACH METHOD TO EVALUATE THE TOTAL HARMONIC DISTORTION FOR A SYSTEM HAS MULTIPLE NONLINEAR LOADS” Artículo de investigación, publicado en la revista, International Journal of Engineering Research.

Resumen: La calidad de la energía, se ve afectado por los problemas que ocasionan los armónicos, los cuales son peores que los eventos transitorios, como la iluminación o las caídas de voltaje. Los problemas de armónicos, podrían empeorar si uno o más cargas no lineales se conectan en un sistema. Por lo tanto, tal distorsión de las ondas, se deben evitar, para proteger los sistemas de energía y los dispositivos eléctricos, siendo el interés de este artículo el desarrollo de una técnica que estime los armónicos totales.
- Medina, J. Segundo-Ramirez, P. Ribeiro, W. Xu, K. L. Lian, G. W. Chang, V. Dinavahi, and N. R. Watson (2013)

“HARMONIC ANALYSIS IN FREQUENCY AND TIME DOMAIN” artículo de investigación en la IEEE on Power Delivery – Transactions.

Resumen: En este artículo, se presenta una revisión, descripción concisa, análisis de los fundamentos, características, detalles analíticos, méritos e inconvenientes asociados con los métodos en el dominio de la frecuencia y el tiempo para el análisis de armónicos en redes de energía. La descripción y el análisis son centrados en métodos desarrollados en el dominio armónico, híbrido, dominio de frecuencia-tiempo y dominio de tiempo, respectivamente,

validación de los métodos revisados para el análisis armónico, frente a uno de los simuladores digitales aceptados, como EMTP, EMTDC, o MATLAB/SIMULINK.

2.3. Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica

Los sistemas de distribución de energía eléctrica conforman una red compleja y diversa que abarca gran cantidad de territorio, desde las zonas densamente pobladas hasta las áreas rurales más remotas. Estos sistemas desempeñan un papel fundamental en la provisión de electricidad a millones de personas, facilitando el funcionamiento de hogares, industrias, comercios y servicios públicos.

La infraestructura de los sistemas de distribución en el Perú se compone de subestaciones de distribución, líneas de distribución, equipos de protección y medición, entre otros componentes. Estos elementos forman una red interconectada que permite la transferencia de energía desde las subestaciones de potencia hasta los consumidores finales. Sin embargo, la infraestructura eléctrica en el país enfrenta desafíos significativos relacionados con la expansión, modernización y eficiencia operativa de los sistemas de distribución (Meitei et al., 2021).

Uno de los desafíos más destacados en el contexto peruano es la brecha de acceso a la electricidad en áreas rurales y comunidades remotas de calidad, aunque se han realizado avances significativos en la expansión de la cobertura eléctrica en los últimos años, aún existen numerosas localidades sin acceso a servicios eléctricos confiables.

De acuerdo a la normatividad peruana, donde se define a los sistemas de distribución como un conjunto de instalaciones para la entrega de energía eléctrica a los diferentes usuarios, el cual comprende:

- Subsistemas de distribución primaria
- Subsistemas de distribución secundaria
- Instalaciones de alumbrado público
- Punto de entrega.

2.3.1. Topología de los Sistemas de Distribución Eléctrica

Hace referencia a la disposición física y a la interconexión de cada uno de los elementos que componen la red, el cual puede variar según el diseño de la configuración de la red eléctrica (Acosta Montoya, 2014).

2.3.1.1. Topología Radial

En este tipo de sistema, el flujo de energía es unidireccional desde una fuente, que es representada por una red equivalente hasta los usuarios finales, siendo comunes en zonas sub urbanas y rurales.

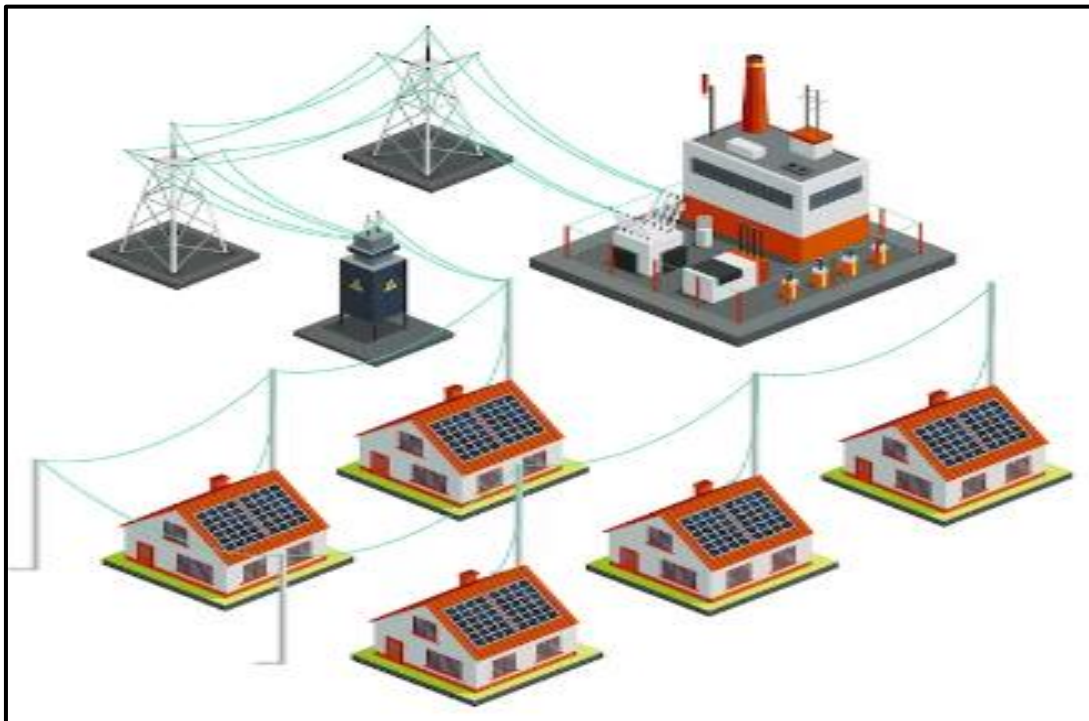


Figura 04: *Representación de un Sistema de Distribución Radial*

2.3.1.2. Topología en Anillo

Entre sus principales características, se tiene múltiples caminos para distribuir la energía eléctrica, lo que permite incrementar la fiabilidad de la red al permitir diferentes rutas para el suministro de energía. Para el caso en la que se produzca una falla, la energía puede circular en la dirección opuesta, alrededor del anillo, de manera que conserva el suministro continuo.

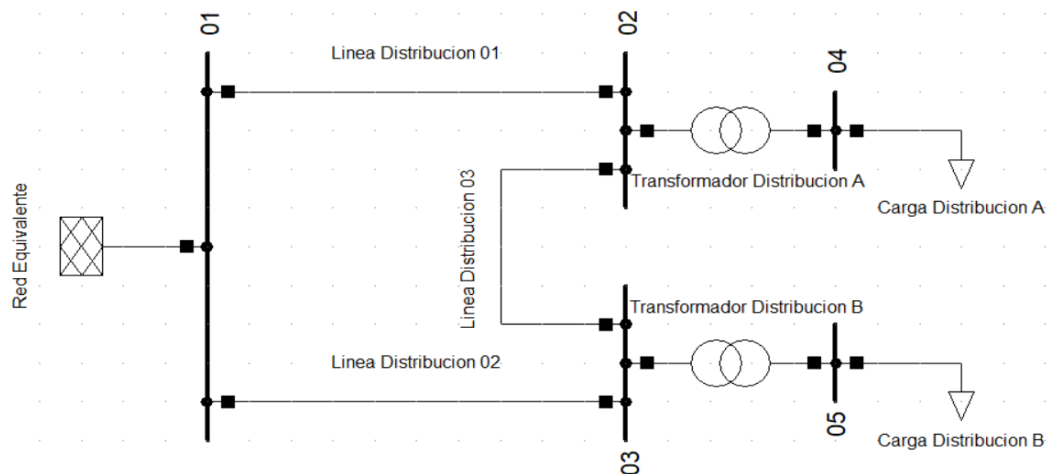


Figura 05: *Diagrama de un sistema de Distribución en Anillo*

2.3.1.3. Topología Enmallada

Es considerada una red que tiene múltiples interconexiones que facilitan la distribución de la energía eléctrica. Se puede indicar, que proporciona en forma redundante energía, incrementando la capacidad para restaurar el suministro en caso de que existan interrupciones por diferentes eventualidades que se presenten. Es recomendable su diseño para sistemas de distribución urbanos o densamente poblados.

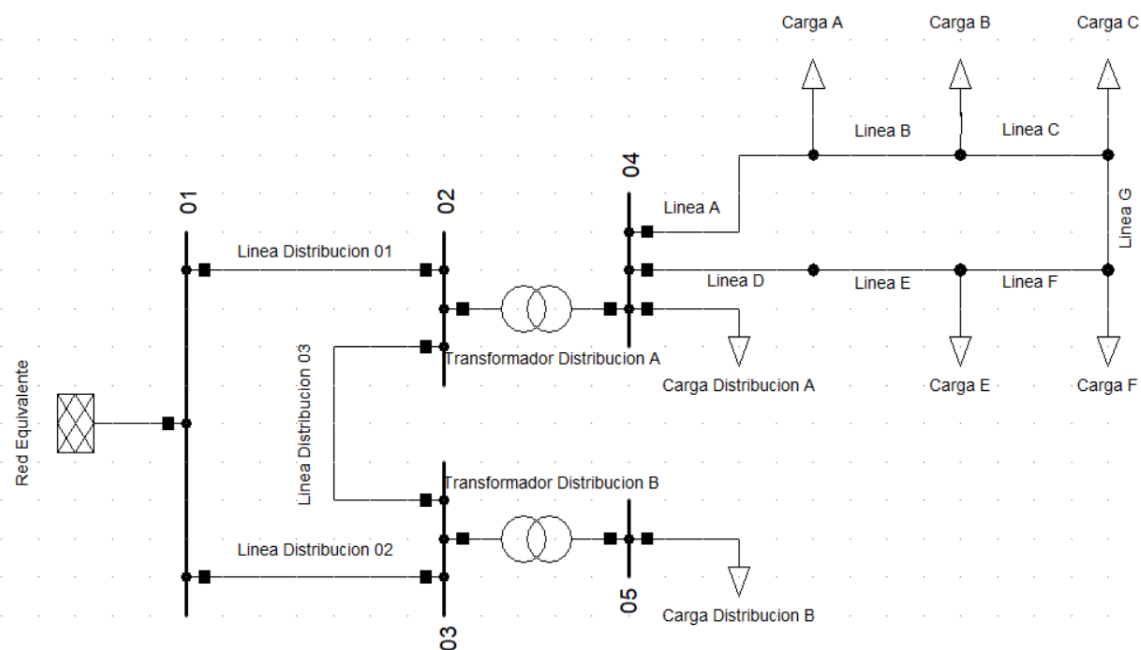


Figura 06: *Diagrama de un sistema de Distribución Enmallado*

2.3.2. Parámetros Eléctricos de los Conductores

Para realizar la selección del conductor a utilizar en los sistemas de distribución, se debe de considerar el nivel de tensión de la red eléctrica, el tipo de sistema, la capacidad de poder distribuir energía (Brameller, 1992), por lo que en base a la norma DGE para el diseño de líneas y redes primarias, la resistencia eléctrica y la reactancia inductiva son dos componentes fundamentales que afectan el comportamiento y la eficiencia de la red, debido a que son los productores de pérdidas y caídas de tensión, donde:

Resistencia Eléctrica: representa la oposición al flujo de corriente eléctrica en un conductor y se encuentra asociada con la pérdida de energía en forma de calor.

$$R_{t_2} = R_{20^\circ} [1 + 0,0036 (t_2 - 20^\circ)] \left[\frac{\Omega}{km} \right] \quad (01)$$

Donde:

- ✓ R_{t_2} : Resistencia del conductor en una temperatura de t° , medido en Ω/km
- ✓ t_2 : Temperatura de operación

Reactancia Inductiva: surge de la capacidad de almacenar energía en forma de campo magnético, cuando una corriente alterna pasa a través de un elemento conductor, lo que resulta en un desfase entre la tensión y la corriente.

$$X_L = \frac{0.1746 * \log DMG}{RMG} \left[\frac{\Omega}{km} \right] \quad (02)$$

Donde:

- ✓ DMG : Distancia media geométrica
- ✓ RMG : Radio medio geométrico

2.3.3. Transformadores de Distribución

Son transformadores reductores de tensión, utilizados principalmente en sistemas de distribución. Estas máquinas estáticas funcionan mediante la inducción electromagnética, donde la corriente alterna que fluye a través de las bobinas primarias crea un campo magnético que induce una corriente secundaria con un menor voltaje. Su principal función es adaptar el voltaje a niveles seguros y adecuados para el uso doméstico, comercial o industrial (Grainger j. & Stevenson J., 2017). De acuerdo a la Figura 07, los transformadores tienen una permeabilidad

finita, con resistencias e inductancias en los devanados del primario y del secundario.

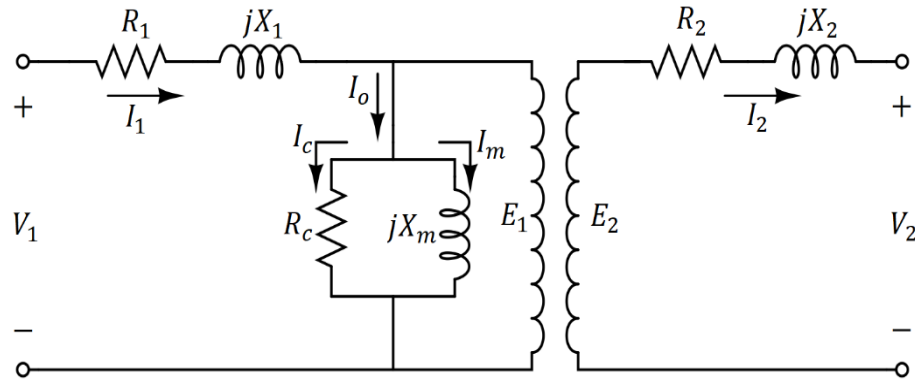


Figura 07: Modelamiento de un Transformador de Distribución Real

Donde:

I_o : Corriente de ©

I_m : Corriente de 20obretensione

I_c : Corriente que produce las perdidas en el 20obret

2.4. Representación de los Armónicos

Una forma eficaz de estudiar y analizar los armónicos, es mediante las series de Fourier (Meitei et al., 2021), donde cualquier función periódica $f(t) = f(t + T)$ se puede representar como:

$$f(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(hw_0 t) + B_h \sen(hw_0 t)] \quad (03)$$

Generalmente, se utiliza la descomposición por la función seno, debido a la existencia de menor número de coeficientes, como:

$$f(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} C_h \sen(hw_0 t + \psi_h) \quad (04)$$

Donde:

$f(t)$: Es la función periódica a una frecuencia f_0 , y velocidad angular de $w_0 = 2\pi f_0$

$C_1 \sen(w_0 t + \psi_1)$: Representa la componente fundamental

$C_h \text{sen}(hw_0t + \psi_h)$: Representa la h^{th} armónica de amplitud C_h , con una frecuencia de hf_0 y fase ψ_h

Mientras que los coeficientes de la serie de Fourier, se encuentran dados por:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) dx, \quad \text{donde } x = w_0t \quad (05)$$

$$A_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(hw_0t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(hx) dx \quad (06)$$

$$B_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \text{sen}(hw_0t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \text{sen}(hx) dx \quad (07)$$

$$C_h = \sqrt{A_h^2 + B_h^2} \quad (08)$$

$$\psi_h = \tan^{-1} \left(\frac{A_h}{B_h} \right) \quad (09)$$

2.5. Medición de la Distorsión Armónica

Las ondas periódicas de corriente y voltaje distorsionado, se pueden expandir por las series de Fourier (Wakileh, 2001), tal como se muestra en la ecuación 10 y 11.

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_h \cos(hw_0t + \phi_h) \quad (10)$$

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cos(hw_0t + \theta_h) \quad (11)$$

Donde:

I_h : Es el valor de la corriente máxima respecto al h^{th} armónica

V_h : Es el valor del voltaje máximo respecto al h^{th} armónica

ϕ_h : Es el ángulo de la corriente, respecto al h^{th} armónica

θ_h : Es el ángulo del voltaje, respecto al h^{th} armónica

w_0 : Es la velocidad angular fundamental de la onda, donde $w_0 = 2\pi f_0$

f_0 : Es la frecuencia fundamental, siendo para todos nuestros casos igual a 60 Hz.

2.5.1. Valores RMS del Voltaje y Corriente

Es conocido con el nombre de valor eficaz, cuya magnitud es equivalente al valor cuadrático medio de una función.

$$F_{rms}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt = \frac{1}{2} \sum_{h=1} F_h^2 = \sum_{h=1} F_h^2 = \sum_{h=1} F_{h_{rms}}^2 \quad (12)$$

Del mismo modo, se puede expresar la tensión y la corriente RMS, como:

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_{h_{rms}}^2} \quad (13)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_{h_{rms}}^2} \quad (14)$$

2.5.2. Factores de Distorsión del Voltaje y Corriente

El factor de distorsión de voltaje VDF, también es conocido con el nombre de la distorsión armónica total de voltaje THD_V (Wakileh, 2001), el cual es definido por:

$$THD_V = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2} = \sqrt{\left(\frac{V_{rms}}{V_{1_{rms}}}\right)^2 + 1} \quad (15)$$

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_{1_{rms}}}\right)^2 + 1} \quad (16)$$

Donde:

V_1 : Representa el voltaje a la frecuencia fundamental

I_1 : Representa la corriente a la frecuencia fundamental.

Los valores eficaces de la tensión y la corriente, también se pueden escribir en función de los factores de distorsión, como:

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_{h_{rms}}^2} = V_{1_{rms}} \sqrt{1 + THD_V^2} \quad (17)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_{h_{rms}}^2} = I_{1_{rms}} \sqrt{1 + THD_I^2} \quad (18)$$

2.5.3. Potencia Activa y Reactiva

Para determinar la potencia activa por cada uno de los armónicos, se aplicará $p(t) = v(t) \cdot i(t)$, que contiene el valor promedio.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (19a)$$

$$P = \frac{1}{2} \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\theta_h - \phi_h) \quad (19b)$$

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_{h_{rms}} I_{h_{rms}} \cos(\theta_h - \phi_h) \quad (19c)$$

Mientras que la potencia reactiva es definida por:

$$Q = \frac{1}{2} \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin(\theta_h - \phi_h) \quad (20a)$$

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_{h_{rms}} I_{h_{rms}} \sin(\theta_h - \phi_h) \quad (20b)$$

2.5.4. Potencia Aparente

Se encuentra compuesto por el voltaje y la corriente eficaz.

$$S = V_{rms} \cdot I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_{h_{rms}}^2 I_{h_{rms}}^2} \quad (21a)$$

$$S = V_{1_{rms}} I_{1_{rms}} \sqrt{1 + THD_V^2} \sqrt{1 + THD_I^2} \quad (21b)$$

$$S = S_1 \sqrt{1 + THD_V^2} \sqrt{1 + THD_I^2} \quad (21c)$$

Donde:

S_1 : Es la potencia aparente a la frecuencia fundamental.

2.5.5. Potencia Distorsionada

Cuando existen armónicos en un sistema, la potencia aparente S no solo se encuentra compuesta por la potencia activa P y la potencia reactiva Q , sino también de una potencia distorsionada D en volt-amperios, (Genovez Ramirez, 2018) definido por:

$$D^2 = S^2 - (P^2 + Q^2) \quad (22)$$

2.5.6. Factor de Potencia

Es la relación entre la potencia activa real y la potencia aparente, como se muestra en las Ecuaciones 23.

$$f dp = \frac{P}{S} = \frac{P}{S_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + THD_V^2} \sqrt{1 + THD_I^2}} = f dp_{disp} f dp_{dist} \quad (23)$$

$$f dp_{disp} = \frac{P}{S_1} \quad (24)$$

$$f dp_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_V^2} \sqrt{1 + THD_I^2}} = \frac{V_{1rms}}{V_{rms}} \cdot \frac{I_{1rms}}{I_{rms}} = \frac{S_1}{S} \quad (25)$$

Donde:

$f dp_{disp}$: Es el factor de potencia de desplazamiento

$f dp_{dist}$: Es el factor de potencia de distorsión

Cuando se trabaja con sistemas senoidales puras, se puede alcanzar factores de potencias unitarias, mientras que, cuando se tiene presencia de armónicas, se presenta un factor de desplazamiento, descrito en la ecuación 26.

$$f dp_h = \min \left(\frac{1}{\sqrt{1 + THD_V^2}}, \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}} \right) < f dp_{disp} = \frac{P}{S_1} \quad (26)$$

2.6. Consideraciones de los Filtros Pasivos para Armónicos

Son aquellos circuitos que son capaces de separar las señales de corriente eléctrica, modificando las propiedades de la amplitud y fase de estas señales. Este proceso se denomina filtración, esto ocurre gracias a las distintas características de las impedancias de los diferentes filtros, con relación al espectro de frecuencia (Sergio, 2007).

La finalidad del filtrado, es rechazar las señales de frecuencia no deseado y dejar pasar otras señales. En su mayoría, los filtros son equipos robustos, que se encuentran compuestos por elementos inductivos (L), capacitivos © y resistivos ©, bajo diferentes combinaciones (Pérez Abril; Ignacio, 2012).

En su mayoría, los filtros se conectan en serie o en derivación, donde:

- Los filtros en serie son instalados en una misma fase
- Los filtros en derivación, son instalados en paralelo a las barras

El conexionado de los filtros presentan ventajas y desventajas, y deben emplearse de acuerdo al tipo de aplicación. Respecto a los filtros en derivación, son más empleados, principalmente cuando se pretende filtrar armónicos en la salida de las subestaciones, estaciones rectificadoras industriales, etc (Balci et al., 2008).

Los filtros en derivación, pueden ser agrupados en dos categorías, como:

- Filtros Sintonizados
- Filtros Amortiguados

En la Figura 08, se muestran los filtros en derivación más utilizados, y se encuentran clasificados de acuerdo al tipo de frecuencia de filtrado.

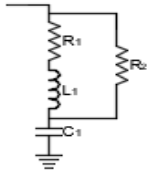
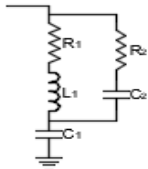
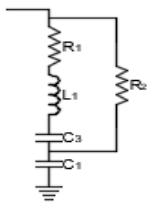
Tipos de Filtros	Circuitos por Fase
Sintonizado para una Frecuencia	
Amortiguado de 2do Orden	
Amortiguado de 3er Orden	
Amortiguado Tipo C	

Figura 08: Clasificación de los Filtros en Derivación más Utilizados

Fuente: R. Pinto Do Nascimento; *Propuesta de Procedimientos para Proyectar Filtros Armónicos a partir de un Programa de Penetración Armónica, incluyendo Cálculos de Desempeño y de Soportabilidad*

Los filtros sintonizados son circuitos resonantes, formado por elementos L, C y R en serie o combinación serie – paralelo. En este tipo de filtros, los elementos capacitivos e inductivos se diseñan de forma que los circuitos presentan una, dos o tres frecuencias de resonancia.

Respecto a los filtros amortiguados, también se encuentran formados por capacitores, inductores y resistencia bajo diferentes combinaciones. Estos filtros son capacitivos para una frecuencia fundamental, como son los filtros sintonizados y presentan una baja impedancia, predominantemente resistiva, para frecuencia superiores respecto a una frecuencia determinada, se denomina como frecuencia característica.

2.6.1. Filtros Sintonizados

Son considerados circuitos resonantes serie, que a una frecuencia de sintonía o de resonancia, presentan baja resistencia. Para frecuencia menores que la frecuencia de sintonía, son considerados como capacitivos y para frecuencias superiores a la frecuencia de sintonía, son inductivos. Por lo tanto, para una frecuencia fundamental (que siempre estará por debajo de la frecuencia de sintonía), estos filtros pueden funcionar como compensadores reactivos.

2.6.1.1. Circuito Resonante Serie

Son circuitos formados por una resistencia, un inductor y un condensador que se encuentran en serie y alimentados por una fuente de voltaje, como se muestra en la Figura adjunta. La resonancia en serie es una condición en la que un circuito que contienen al menos un inductor y un capacitor presenta una impedancia puramente resistiva (Eghtedarpour et al., 2014).

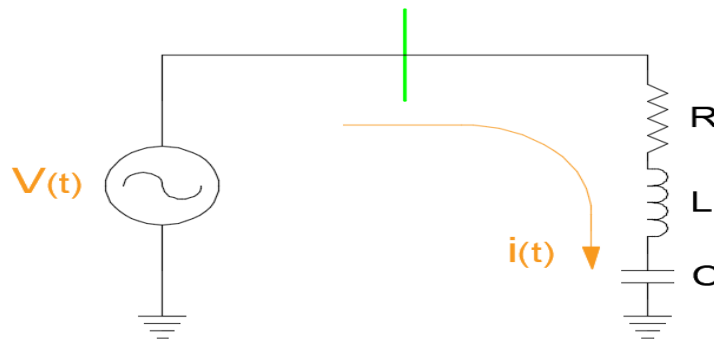


Figura 09: Diagrama de un circuito serie RLC

Fuente: Ignacio Pérez Abril; *Calculo de Parámetros de Filtros Pasivos de Armónicos*

De acuerdo al circuito de la figura, la impedancia compleja es mostrada en la siguiente ecuación, donde se observa que, ajustando la frecuencia de la fuente, existirá un valor de la frecuencia en la que esta impedancia se volverá puramente resistiva.

$$Z(w) = R + j \left(wL - \frac{1}{wC} \right) \quad (27)$$

Donde:

w : Es la frecuencia angular de la fuente de alimentación del sistema

R : Valor de la Resistencia en Ohmios

L : Valor de la inductancia en Henrios

C : Valor de la capacitancia en Faradios.

El módulo y la fase de la impedancia en serie, se encuentra expresado como:

$$Z(w) = \sqrt{R^2 + \left(wL - \frac{1}{wC} \right)^2} \quad (28)$$

$$\phi(w) = \tan^{-1} \left(\frac{wL - \frac{1}{wC}}{R} \right) \quad (29)$$

Donde:

$Z(w)$: Es el Módulo de la impedancia compleja, en función de una frecuencia w .

$\phi(w)$: Ángulo de la impedancia compleja $Z(w)$, en función de una frecuencia w .

Para determinar la condición de resonancia, la siguiente ecuación, permitirá el cálculo de la frecuencia de resonancia, que anulará la parte imaginaria de la impedancia $Z(w)$.

$$\left(wL - \frac{1}{wC} \right) = 0 \quad (30)$$

Con el cálculo de la velocidad angular w , de la ecuación anterior, se logra obtener la frecuencia angular de resonancia del circuito serie.

$$w_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 2\pi f_0 \quad (31)$$

Donde:

w_0 : Es la velocidad angular resonante de la solución de la ecuación 40.

f_0 : Es la frecuencia de resonancia del circuito RLC.

Como se observa en la Ecuación 31, la velocidad angular ω_0 se encuentra en función de los componentes L y C del circuito, esto significa que ω_0 es una característica del circuito RLC serie (R. Pinto Do N., 2009).

Para las características mostrados en la Figura 10, se presenta el comportamiento del módulo y el ángulo de fase de la impedancia del circuito serie RLC, con una resistencia $R = 10 \Omega$, capacitancia $C = 5 \mu F$ e inductancia igual $L = 9 mH$, cuya frecuencia de resonancia es igual a 750.2626 Hz.

Como podemos observar en la Figura 10 (a), se observa que en la frecuencia de resonancia se obtiene la impedancia mínima, por otro lado, la Figura 10 (b), se observa que el ángulo de impedancia es nula, esto significa que $\omega = \omega_0$, siendo en este punto, el circuito puramente resistivo.

También podemos observar que a incrementos de la frecuencia los valores de los ángulos de las impedancias son positivos y cada vez más próximos a +1.5708 radianes (equivalente a 90 grados). Esto implicará que la impedancia será predominantemente inductiva a más altas frecuencias, mientras que para frecuencias bajas el circuito será predominantemente capacitivo.

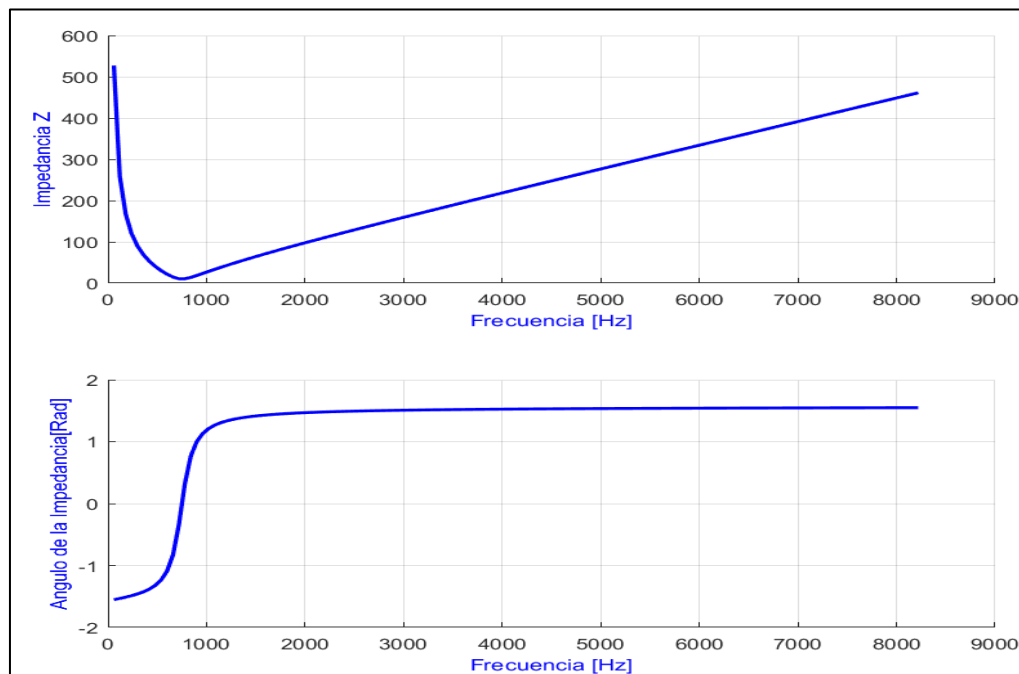


Figura 10: Resonancia de un circuito serie RLC (a) Impedancia vs Frecuencia (b) Ángulo vs Frecuencia.

2.6.1.2. El Factor de Calidad

Es considerado un parámetro adimensional, que se encuentra definido a través de la relación que existe entre la máxima energía almacenada y la energía total disipada en un periodo de tiempo. Este parámetro por lo general, es expresado por el símbolo Q .

Si consideramos el circuito resonante en serie, podemos expresar el factor de calidad en función de la velocidad angular resonante ω_0 , en función de los parámetros eléctricos del sistema bajo estudio (Genovez Ramirez, 2018), tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{\omega_0 \cdot L}{R} = \frac{1}{\omega_0 \cdot C \cdot R} \quad (32)$$

En la ecuación (32), se observa la dependencia de $\omega_0 \cdot L$ y $1/\omega_0 \cdot C$, cuyas dimensiones son los módulos de las reactancias del circuito resonante.

Es importante mencionar que estas cantidades, representan la impedancia natural del circuito, el cual es designado por Z_0 , donde se encuentra conformado únicamente por las componentes L y C , como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Z_0 = \sqrt{L/C} \quad (33)$$

A partir de las Ecuaciones 32 y 33, podemos expresar el factor de calidad Q , en función de los componentes L , C y R , conforme se muestra en la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{Z_0}{R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R} \quad (34)$$

También se debe mencionar que los factores de calidad están referidos a la frecuencia fundamental.

2.6.1.3. Modelado de Curvas en Función del Factor de Calidad

Los filtros sintonizados para una sola frecuencia, representado por el módulo de la impedancia del circuito RLC serie obtenida en la ecuación 28, puede ser escrita como $Z_f(\omega)$ en función de las frecuencias ω y ω_0 y de los parámetros Q y R .

$$Z_f(\omega) = R \sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R} - \frac{1}{\omega C R} \right)^2} \quad (35)$$

Modificando la ecuación 35 en función del factor de calidad Q , dada por la ecuación 42, obtenemos el módulo de la impedancia del filtro.

$$Z_f(w) = R \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{w}{w_0} - \frac{w_0}{w} \right)^2} \quad (36)$$

Esta última ecuación, es útil para poder visualizar la influencia del factor de calidad, en la selectividad del filtro sintonizado a una frecuencia w_0 (Pérez Abril; Ignacio, 2012). Las curvas que se muestran en la Figura 11, son trazados en función de la ecuación 46, donde se muestra la influencia que tiene el factor de calidad sobre la impedancia del filtro.

Adicionalmente, en la Figura 5, se logra observar, que para un mismo valor de la resistencia R y a un incremento del factor de calidad Q , se produce un incremento en la impedancia del filtro, para toda frecuencia que sea diferente a la frecuencia de sintonización.

También se puede observar, que la magnitud de la impedancia, a una frecuencia de sintonización es equivalente a la magnitud de la resistencia (Wakileh, 2001).

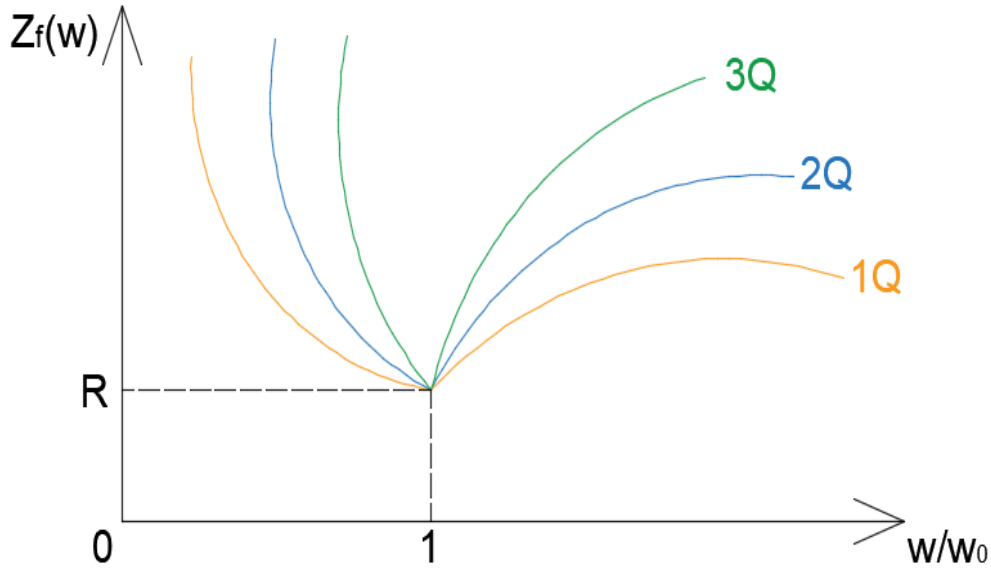


Figura 11: Impedancia vs Frecuencia, para diferentes valores del Factor de Calidad
Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a la Figura 11, el factor de calidad de los filtros sintonizados, es una medida del grado de selectividad del circuito, respecto a las frecuencias armónicas. Cuando mayor sea el factor de calidad del filtro, más selectivo será el

filtro, debido a que se absorberá menor cantidad de armónicos a frecuencias que sean diferentes a la sintonizada. En su mayoría, los factores de calidad de los filtros sintonizados, se encuentran entre rangos de 30 a 60.

2.7. Filtros Amortiguados

Son circuitos que se encuentran conformados por elementos R, L y C, bajo diferentes configuraciones, que ofrecen baja impedancia, para un gran rango de frecuencias. Al igual que un filtro sintonizado a frecuencia fundamental, los filtros amortiguados presentan una impedancia predominantemente capacitiva, mientras que, para frecuencias superiores, estos son esencialmente resistivos.

2.7.1. Modelos de Filtros Amortiguados

Son básicamente cuatro tipos de filtros, los cuales son mostrados en la siguiente Figura 12, donde los filtros amortiguados de primer orden, por lo menos contienen algún elemento reactivo ya sea un inductor o capacitor, no son utilizados en aplicaciones prácticas por que se requiere un capacitor de gran magnitud y además de presentar grandes pérdidas de energía a la frecuencia fundamental. Respecto a los demás filtros, son ampliamente utilizados en los sistemas eléctricos y serán escogidos de acuerdo a los requisitos de desempeño, para el filtraje y las pérdidas de energía (Das, 2017b).

Por otro lado, el comportamiento de los filtros amortiguados puede modelarse en función de la frecuencia.

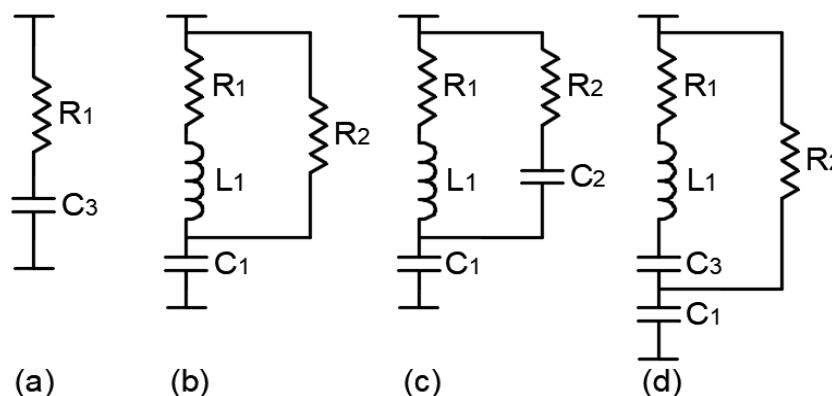


Figura 12: Tipos de Filtros Amortiguados: (a) Primer Orden; (b) Segundo Orden; (c) Tercer Orden; (d) Tipo "C".

Fuente: Ignacio Pérez Abril; *Calculo de Parámetros de Filtros Pasivos de Armónicos*

2.7.1.1. Filtro Amortiguado de 2do Orden

La impedancia de este filtro, en función de la frecuencia y de las componentes que se muestran en la Figura 12 (b). se encuentra dado por:

$$Z_f(w) = \frac{1}{jwC_1} + \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{(R_1 + jwL_1)} \right)^{-1} \quad (37)$$

La magnitud de la frecuencia característica, la impedancia natural y el factor de amortiguamiento de este filtro, se encuentra expresado por las siguientes Ecuaciones:

- Frecuencia Características:

$$w_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (38)$$

- Impedancia Natural:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = w_0 \cdot L_1 = \frac{1}{w_0 \cdot C_1} \quad (39)$$

- Factor de Amortiguamiento:

$$D = \frac{R_2}{Z_0} \quad (40)$$

Para un valor fijo de D , a medida de que aumenta la frecuencia, la impedancia del filtro amortiguado de 2do orden tendrá el valor de $Z_0 D$ que equivale a R_2 .

Para niveles de frecuencia bajo y a la frecuencia fundamental, el filtro de 2do orden será predominantemente capacitivo, independientemente de la magnitud del factor de amortiguamiento, mientras que para valores de D mayores a la unidad ($D > 1$), la impedancia del filtro de 2do orden es predominantemente inductivo o resistivo (De La Rosa, 2006).

Adicionalmente, si el factor de amortiguamiento es $D > 1$, el filtro puede comportarse como inductivo, capacitivo o resistivo, este dependerá de las características del sistema, donde:

$$w < w_0 \cdot \sqrt{\frac{D^2}{D^2 - 1}} \rightarrow Z_f(w) \text{ es capacitivo} \quad (41)$$

$$w = w_0 \cdot \sqrt{\frac{D^2}{D^2 - 1}} \rightarrow Z_f(w) \text{ es resistivo} \quad (42)$$

$$w > w_0 \cdot \sqrt{\frac{D^2}{D^2 - 1}} \rightarrow Z_f(w) \text{ es inductivo} \quad (43)$$

Si el factor de amortiguamiento tiene una magnitud igual o menor a la unidad, $D \leq 1$, el filtro siempre se comportará como capacitiva, independientemente de la frecuencia.

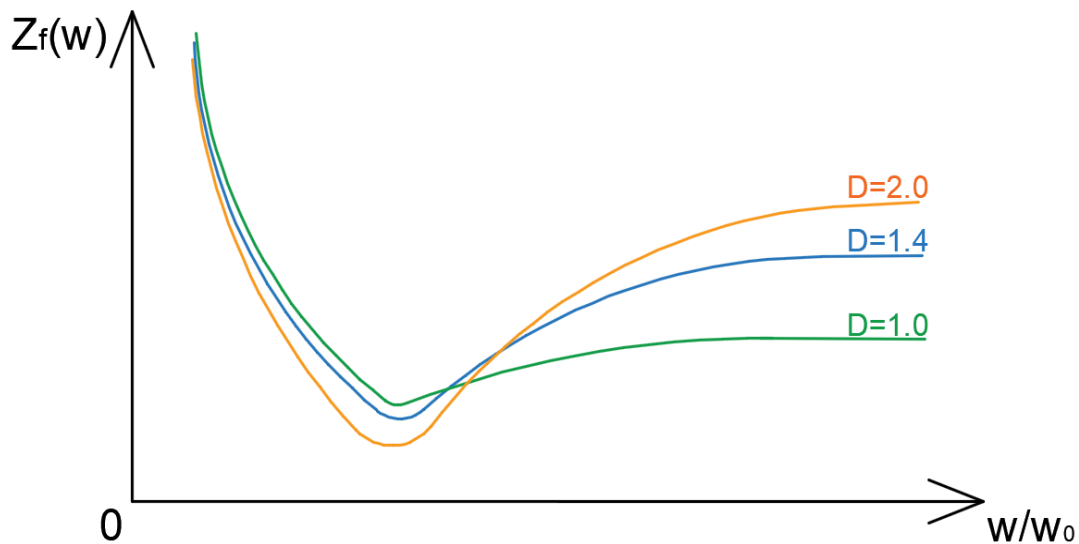


Figura 13: Filtro Amortiguado de segundo Orden: Magnitud de la Impedancia vs Frecuencia, para diferentes magnitudes D .

Fuente: Ignacio Pérez Abril; *Calculo de Parámetros de Filtros Pasivos de Armónicos*

Como se observa la Figura 13, el filtro de 2do orden se encuentra gobernado por los parámetros D , w_0 y Z_0 , por lo que podemos definir que escogiendo convenientemente los valores de los parámetros el filtro puede comportarse como un filtro capacitivo a una frecuencia fundamental y también ofrece impedancias bajas (tendencia al valor de la resistencia) para frecuencias mayores a la frecuencia escogida.

2.7.1.2. Filtro Amortiguado de 3er Orden

La impedancia de este filtro, en función de la frecuencia y de las componentes que se muestran en la Figura 05 ©. se encuentra dado por:

$$Z_f(w) = \frac{1}{jwC_1} + \left(\frac{1}{R_1 + jwL_1} + \frac{1}{R_2 + \frac{1}{jwC_2}} \right)^{-1} \quad (44)$$

Para frecuencias muy altas, la impedancia del filtro será igual a $Z_0 D$ que es equivalente a la Ecuación 40.

Mientras que para frecuencias bajas o inferiores a la frecuencia w_0 , la impedancia del filtro tiene a tener una magnitud elevada (Wakileh, 2001).

Cuando la frecuencia armónica es equivalente a la frecuencia característica w_0 , el filtro se comporta como una impedancia puramente resistiva, siendo de esta forma independiente de la magnitud del factor de amortiguamiento D . Esto significa que la frecuencia $w = w_0$ y el valor de la impedancia del filtro estará dado por:

$$Z_f(w = w_0) = \frac{Z_0}{D} \quad (45)$$

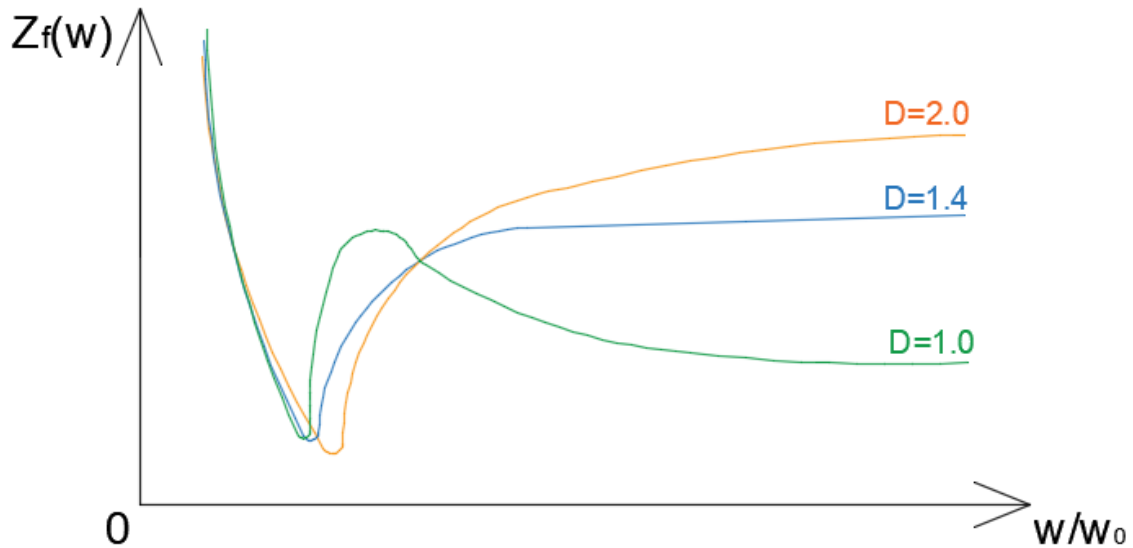


Figura 14: Filtro Amortiguado de tercer Orden: Magnitud de la Impedancia vs Frecuencia, para diferentes magnitudes D .

Fuente: Ignacio Pérez Abril; *Calculo de Parámetros de Filtros Pasivos de Armónicos*

El filtro amortiguado de 3er orden presenta dos frecuencias características que son distintas, debido a que las magnitudes de $C_1 \neq C_2$, siendo para este caso, la impedancia del filtro inductivo.

Cuando la magnitud de la capacitancia C_2 se acerca a la magnitud de la capacitancia C_1 , la parte inductiva tiende a desaparecer, hasta que $C_1 = C_2$, además de existir una sola impedancia característica.

2.7.1.3. Filtro Amortiguado Tipo C

La impedancia de este filtro, en función de la frecuencia y de las componentes que se muestran en la Figura 12 (d). se encuentra dado por:

$$Z_f(w) = \frac{1}{jwC_1} + \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1 + jwL_1 + \frac{1}{jwC_3}} \right)^{-1} \quad (46)$$

Este filtro se diferencia de los demás, debido a que presenta una rama RLC serie (representado por los elementos C_3 , L_1 y R_1) sintonizado a frecuencia fundamental. Esto significa que, para condiciones normales, para esta frecuencia, la rama RLC tendrá una impedancia resistiva, de magnitud igual a R_1

Asimismo, la impedancia de este filtro, estará dada por la reactancia capacitiva C_1 combinado con el equivalente paralelo R_1 y R_2 , equivalente a la ecuación 47.

$$Z_f(w = w_1) = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} - j \cdot \frac{1}{w_1 C_1} \quad (47)$$

Entre las principales características de este filtro, es que las pérdidas producidas por la resistencia, a una frecuencia fundamental son menores, respecto a los otros filtros amortiguados.

Para frecuencias superiores a la fundamental, el filtro amortiguado tipo “C” tendrá un comportamiento parecido al descrito en el filtro de 2do orden.

2.8. Efectos de los Armónicos en los Sistemas Eléctricos

Las cargas domésticas, industriales y comerciales contribuyen en las magnitudes de las corrientes armónicas que afecta a la red eléctrica, esto a través de la gran variedad de cargas no líneas que se encuentran presentes, como son: los hornos de inducción, variadores de frecuencia, tecnología LED, dispositivos electrónicos, Laptop, inversores, etc.

La producción de corrientes y tensiones armónicas, traen como consecuencia un incremento en las pérdidas de potencia, que pueden provocar daños al sistema

eléctrico y al conjunto de equipos que se encuentran conectados al sistema, debido a las 36obretensiones (R. Pinto Do N., 2009).

Cabe mencionar, que la utilización de los diferentes equipos que se conectan al sistema no tiene un horario particular de consumo de energía, por lo que es difícil predecir una generación constante de armónicos. Es en ese sentido, es que se evalúa el sistema bajo el peor escenario que se pueda presentar.

2.8.1. Efectos de los Armónicos en los Transformadores

Son afectados, aquellos transformadores que tiene un conexionado delta-estrella y estrella-estrella, que inducen una corriente de secuencia homopolar, el cual incrementa el nivel de calor en los devanados del transformador, produciendo un efecto negativo en el aislamiento y en consecuencia una disminución de la vida útil del transformador (Fabian Malvaceda & Christian, 2019).

Asimismo, el incremento de la corriente por armónicos, produce un incremento en las perdidas por histéresis, debido a la existencia de elevadas frecuencias de resonancia, que se puedan producirse entre capacitancia de la línea y la inductancia del transformador (cuando trabaja dentro de la región de saturación).

2.8.2. Efectos de los Armónicos en el Conductor Neutro

En un sistema monofásico con retorno, la presencia de armónicos debido a cargas no lineales y el conexionado del neutro de transformador, ocasionan un aumento de la corriente efectiva. Bajo este escenario, la conexión del neutro a tierra, debido a la gran cantidad de armónicos presentes en el sistema, evitara las sobrecargas que se pueda producir dentro del sistema.

Respecto a los sistemas balanceados (sistemas trifásicos), la presencia de corrientes armónicas en algunas de las fases, desencadenaran en un incremento de la corriente armónica, y en consecuencia, una corriente significativa en el neutro, siendo estos armónicos múltiplos de la frecuencia fundamental (Triplens).

2.8.3. Efectos de los Armónicos en los Fusibles

La presencia de armónicos dentro del sistema, ocasiona un incremento de la corriente efectiva, el cual puede ocasionar una apertura no deseada de los fusibles, esto significa, que bajo estas condiciones de operación de desbalance se puedan originar 36obretensiones.

2.8.4. Efectos de los Armónicos en los Relés Electrónicos

Es un dispositivo que debe apertura el sistema, bajo condiciones de sobre corriente que se encuentre establecido en su ajuste. Es por ello, que los armónicos pueden producir picos de corrientes que sean mayores a los ajustes del relé. Cuando al sistema se le conecta cargas no lineales, para ajuste de los relés de protección, se debe tener en cuenta la distorsión armónica, porque se podrían presentarse sobre cargas repentinas, que también ocasionen aperturas inesperadas (Arieh, 2008).

2.8.5. Efectos de los Armónicos en Maquinas Rotativas

Al igual que los transformadores, las maquinas rotativas se encuentran expuestos a efectos térmicos, debido a la existencia de armónicos dentro del sistema. Una elevada distorsión armónica, ocasiona un elevado calentamiento en los devanados del rotor y estator, produciendo una disminución del tiempo de vida útil y del nivel de aislamiento (Arieh, 2008).

2.9. Marco Regulatorio

Permite obtener mejores niveles de prestación de servicio, respecto a los problemas que puedan existir en la calidad de energía, adoptando de esta manera, medidas que limiten los efectos producidos por la distorsión armónica en los sistemas eléctricos, tanto para usuarios y suministradores de energía eléctrica. En la actualidad tenemos la Norma Técnica de Calidad de Servicio Eléctrico NTCSE, al igual que normas y estándares internacionales como la IEEE e IEC, con la finalidad de establecer los niveles de calidad de energía.

2.9.1. Estándar IEEE Std 519 – “Practicas Recomendables y Requerimientos para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia”

Este estándar dispone los límites de inyección de corrientes armónicas a la red, por parte de los usuarios, al igual que la distorsión armónica total de voltaje que deben de cumplir las empresas distribuidoras de energía (IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, 2014).

En dicho estándar se establece, que los usuarios y las empresas distribuidoras son los responsables de la contaminación armónica producida en la red.

Para realizar el análisis de los armónicos de voltaje y corriente, se debe tomar las mediciones en el punto común de acoplamiento, denominado como P_{cc} , considerando el sistema de distribución y los usuarios

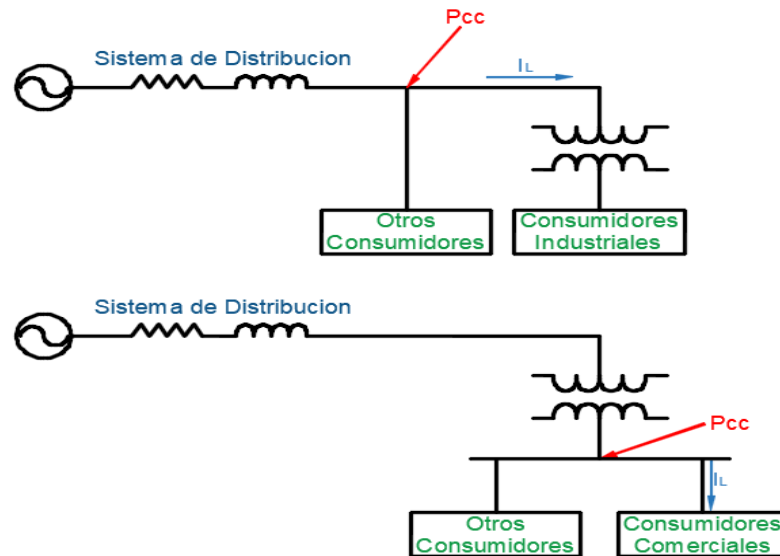


Figura 15: Punto común de Acoplamiento (a) En el lado de Media Tensión (b) En el lado de Baja Tensión.

Para realizar la evaluación de los armónicos, se debe considerar la demanda del usuario y cada una de los componentes del sistema de distribución, centrándose principalmente en los usuarios industriales y comerciales, además de los usuarios residenciales, debido a que, en conjunto, generan mayor cantidad de armónicos por la gran variedad de cargas que llegan a utilizar.

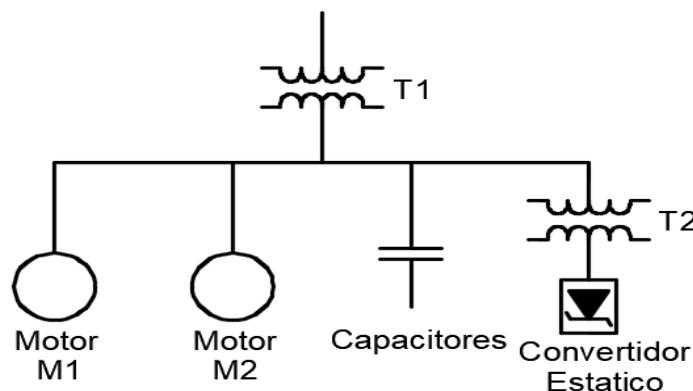


Figura 16: Sistema de distribución de una planta industrial

Fuente: IEEE Std. 519, Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems

En los estudios de armónicos, mayormente se consideran una fuente de alimentación que alimenta a las cargas industriales y residenciales a través de una línea de transmisión y un transformador reductor de voltaje, además de otros consumidores que pueden conectarse en media tensión, siendo este el punto común de acoplamiento, debido a que en este se produce la mayor cantidad de armónicos dentro del sistema. Mientras que en la Figura 5 (b) las cargas comerciales y otros consumidores se conectan al lado de baja tensión del transformador de distribución, por lo que el punto común de acoplamiento se debe considerar en este mismo devanado, de manera de realizar un mejor estudio, sin considerar los efectos de atenuación por parte del transformador de distribución.

2.9.1.1. Límites de Armónicos de Voltaje

El límite de distorsión armónica, se determina a partir de la medición en el P_{cc} y la cantidad de armónicos individuales y la distorsión armónica total de voltaje THD_v , los cuales se encuentran representados en la Tabla 02, expresados en valores porcentuales respecto a la tensión de frecuencia fundamental.

Para controlar los armónicos de voltaje, se debe modificar la impedancia del sistema mediante la conexión de filtros, adición de nuevos transformadores y líneas de distribución, tratando de evitar que el sistema entre en resonancia

Tabla 5. Estándar de Armónicos de Voltaje, conforme a la IEEE Std. 519

Voltaje en el punto común de conexión (P_{cc})	Distorsión de Voltaje Individual (%)	Distorsión de voltaje Total THD_v (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1.0 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5

Fuente: IEEE Std. 519, *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*

2.9.1.2. Límites de Armónicos de Corriente

Para determinar los límites de distorsión armónica, se deben de considerar el nivel de voltaje en la que trabaja el sistema, al igual que la relación que existe entre la potencia de cortocircuito en el punto de medición P_{cc} y la potencia demandada a frecuencia fundamental.

También se puede considerar, como la relación de la corriente de cortocircuito en el punto P_{cc} y la corriente consumida por el usuario a frecuencia fundamental, donde se incluye las cargas lineales y no lineales

$$\frac{I_{sc}}{I_L} = \frac{\text{Potencia de cortocircuito (MVA)}}{\text{Potencia de la Carga (MVA)}} \quad (48)$$

Donde:

I_{sc} : Corriente de cortocircuito en el punto P_{cc}

I_L : Corriente de la carga en el punto P_{cc}

Esta relación, se encuentra limitada por la Tabla 03

Tabla 6. Estándar de Armónicos de Corriente, conforme a la IEEE Std. 519

Limite de Armonicos de Corriente para sistemas de 120 [V] ≤ Vn ≤ 69 [kV]						
Isc/I _L	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

Fuente: IEEE Std. 519, *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*

La Tabla 03 es aplicable a sistemas rectificadores de seis pulsos y a sistemas con distorsión armónica en general. También se debe de considerar un factor de incrementos, cuando se utilizan convertidos de más de seis pulsos o cuando se utilizan transformadores desfasadores, como:

$$\sqrt{\frac{q}{6}} \quad (49)$$

Donde:

q : Es el número de pulsos del rectificador.

Cabe mencionar, que todo armónico par se encuentra limitado al 25%, respecto a los armónicos impares.

2.9.2. Norma IEC 61000

La Comisión electrotécnica Internacional (IEC), han dispuesto normas y sugerencias para limitar los armónicos de voltaje y corriente para cargas

industriales y doméstica, mediante la IEC 61000 establecidas en las comunidades europeas (Das, 2017^a), las cuales se detallan:

- IEC 61000-2-2: Se establece los límites de armónicos para sistema de baja frecuencia, considerando niveles de voltaje de 240 [V] a 415 [V] con frecuencias de 50 y 60 [Hz]. Esta norma, también se le conoce con el nombre de “Niveles de compatibilidad para las perturbaciones de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes de suministro público en baja tensión”.
- IEC 61000-3-2: se establece los límites de corrientes armónicas para consumos menores o iguales a 16 amperios por fase, en redes de baja tensión, además que sea compatible con los establecido en la norma IEC 61000-2-2, clasificando las carga en cuatro categorías. Esta norma, también se le conoce con el nombre de “Limites para emisiones de corrientes armónicas en equipos con entrada de corriente igual o superior a 16 amperios por fase”.
- IEC 61000-3-4: Se establece los límites de corrientes armónicas para consumos de corriente superiores a los 16 amperios hasta los 75 amperios por fase, por lo que es considerado como complementos a la norma IEC 61000-3-2, además que es aplicable a sistemas de distribución de baja tensión y frecuencias nominales de 50 [Hz] y 60 [Hz].
Esta norma, también se le conoce con el nombre de “Limitación de emisiones de corrientes armónicas en sistemas de alimentación de energía de baja tensión para equipos con rango de corriente mayor a 16 amperios”
equipos con entrada de corriente igual o superior a 16 amperios por fase”.
- IEC 61000-3-6: Se establece los límites de corrientes armónicas para sistemas de media tensión (considerado entre 1 Kv hasta 35 Kv) y alta tensión (considerado entre 35 Kv hasta 230 Kv). Esta norma, también se le conoce con el nombre de “Valoración de límites de emisión para cargas distorsionadas en redes de media y alta tensión”

2.9.3. Decreto Supremo N° 020-97-EM

Con el fin de garantizar un nivel satisfactorio en la operación de los servicios eléctricos, es necesario la disposición de regulaciones, de manera de garantizar

el suministro de energía eléctrica, en forma continua, adecuada, confiable y oportuna para los usuarios que se conectan al sistema eléctrico (Norma Técnica de Calidad de Los Servicios Electricos, 1997).

Es por este motivo que se implementó la Norma Técnica de Calidad de Servicio Eléctrico NTCSE, el cual tiene como objetivo, decretar los niveles mínimos de calidad de los servicios eléctricos, donde se incluye el alumbrado público, además de delinear las obligaciones de las empresas eléctricas y los usuarios.

Según lo define la norma, el proveedor del servicio, es responsable de garantizar a sus clientes un nivel satisfactorio de calidad de servicio. Esto implica realizar las inversiones necesarias, para costear los gastos de adquisición e instalación de equipos y llevar a cabo las mediciones y registros.

Además, las empresas prestadoras del servicio, son responsables de cualquier incumplimiento de los estándares de calidad (deficiencias propias del sistema y debido a factores externos), que puede conllevar a interrupciones o perturbaciones.

En el título quinto de la norma, se contempla la calidad de producto y en el numeral 5.3 contempla lo referido a las perturbaciones en la que se trata sobre los armónicos y las tolerancias establecidas, respecto a los armónicos de voltaje.

La NTCSE establece que, para temas de calidad, se deben considerar todos los armónicos que tiene un orden comprendido entre el 2° y 40° ambas incluidas, teniendo en cuenta que las mediciones realizadas deben ser con un mínimo de 7 días calendarios (denominado como periodo de medición) y en intervalos de 15 minutos (denominado como intervalos de medición) tanto para la tensión como para la frecuencia.

En la Tabla 04, se muestra la distorsión armónica individual tanto para sistemas de Baja, Media, Alta y Muy Alta Tensión, al igual que la distorsión armónica total de voltaje, el cual se encuentra definido por:

$$THD = \left(\sqrt{\sum_{i=2, \dots, 40} \left(\frac{V_i^2}{V_n^2} \right)} \right) * 100\% \quad (50)$$

Donde:

V_i : Es el voltaje eficaz (RMS) para los armónicos “i” (donde varía desde $i=2$... 40)

V_n : Es el voltaje eficaz a frecuencia fundamental, en el punto de medición.

Tabla 7. Limite de V_i y THD según NTCSE

ORDEN (n) de la armónica o THD	Tolerancia: $ V_i' $ o $ THD' $ (% con respecto a la tensión nominal del punto de medición)	
	Para tensiones mayores a: 60 KV	Para tensiones menores o iguales a: 60 KV
(armónicas impares no múltiplos de 3)		
5	2	6
7	2	5
11	1.5	3.5
13	1.5	3
17	1	2
19	1	1.5
23	0.7	1.5
25	0.7	1.5
Mayores de 25	$0.1+2.5/n$	$0.2+12.5/n$
(armónicas impares múltiplos de 3)		
3	1.5	5
9	1	1.5
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
Mayores de 21	0.2	0.2
(Pares)		
2	1.5	2
4	1	1
6	0.5	0.5
8	0.2	0.5
10	0.2	0.5
12	0.2	0.2
Mayores de 12	0.2	0.2
THD	3	8

Fuente: Norma Técnica de Calidad de Servicio

De acuerdo a la Tabla 04, se estima que un sistema entrega mala calidad de energía, si sus indicadores se encuentran fuera de los límites de tolerancia permitido. Esto significa que, cuando exista una mala calidad, se procederá a las

compensaciones por exceso de perturbaciones, mostrados a través de la Ecuación 40

$$\text{Compensacion por Armonicos} = \sum_s d * D_s * E(s) \quad (51)$$

Donde:

s : Es considerado, el intervalo de la medición donde se infringió las tolerancias por armónicos

d : Es considerado como la compensación unitaria, teniendo en cuenta las siguientes etapas

Primera Etapa: $d = 0.00$

Segunda Etapa: $d = 0.10 \text{ US\$/kWh}$

Tercera Etapa: $d = 1.10 \text{ US\$/kWh}$

$E(s)$: Es considerado la energía que se suministra en el intervalo de medición.

D_s : Es considerado un factor de proporcionalidad, que se encuentra en función de la amplitud de la Distorsión Penalizable de Armónicos DPA(s), estimado en el intervalo medido “s”, como:

$$DPA(s) = \frac{THD(s) - THD'}{THD'} + \frac{1}{3} * \sum_{i=2}^{40} \left(\frac{Vi(s) - Vi'}{Vi'} \right) \quad (52)$$

Para el análisis, deben de considerarse solamente los valores positivos, además de tener en cuenta que:

- Si el valor de $DPA(s) \geq 1$; $D_s = 1$.
- Si el valor de $DPA(s) < 1$; $D_s = DPA(s) * DPA(s)$

2.9.4. IEEE 1531 – “Guía de Aplicación y Especificación para Filtros en Armónicos”

Las cargas no lineales como dispositivos controlados electrónicamente (como rectificadores y controladores de potencia), cargas de arco (como hornos de arco y maquinas soldadoras de arco) y dispositivos magnéticos en menor grado (como maquinas rotativas y transformadores) son los causantes de la distorsión de la forma de onda senoidal en los sistemas de distribución, donde los excesos de armónicos de corriente y voltaje, pueden dañar los equipos y el mismo sistema eléctrico (IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters, 2003).

El dispositivo productor de armónicos, generalmente se puede ver como una fuente de corriente armónica, el cual puede ser controlado, mediante la conexión de filtros pasivos en derivación, cerca del punto de mediación donde se produce los armónicos.

El principal objetivo del filtro pasivo, es derivar parte de la corriente armónica producida por la carga hacia el filtro, reduciendo de esta manera la cantidad de corriente armónica que fluye desde la carga, hacia el sistema de energía.



Figura 17: Filtro que desvía la corriente armónica entre la carga productora de armónicos y la fuente de alimentación

Fuente: IEEE 1531, Guide for Application and Specification of Harmonic Filters

El tipo de filtro más utilizado, es el filtro en derivación, el cual está conformado por una inductancia y capacitancias (LC) en serie, tal como se muestra en la Figura 18.

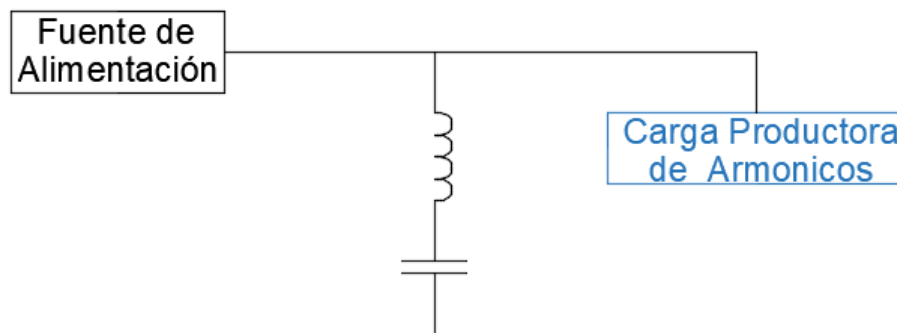


Figura 18: Filtro armónico de sintonización simple

Fuente: IEEE 1531, Guide for Application and Specification of Harmonic Filters

Los filtros de armónicos más complejos, pueden involucrar múltiples circuitos LC, algunos de los cuales, también pueden incluir una resistencia.

Las consideraciones claves, para el diseño de los filtros, son:

- a) La cantidad de Potencia Reactiva (Kvar)
- b) Limitaciones armónicas
- c) Condiciones normales del sistema, incluidos los armónicos ambientales.

- d) Condiciones normales del filtro de armónicos
- e) Condiciones del sistema de contingencias, incluidos los armónicos ambientales
- f) Condiciones del filtro de armónicos en contingencias.

Estas condiciones se pueden agrupar en criterios de desempeño y calificación. Los criterios de desempeño se relacionan en condiciones normales de funcionamiento esperado, e incluyen los requisitos de potencia reactiva capacitiva, limitación de armónicos, condiciones normales del sistema y condiciones normales del filtro de armónicos. Los criterios de calificación se relacionan en condiciones que pueden imponer un trabajo más severo al equipo.

Entre los principales componentes de un filtro de armónicos, generalmente se incluyen condensadores, reactores y resistencias (si las hubiera) diseñado para lograr un control armónico aceptable. Debido a los condensadores, el filtro de armónicos, proporciona potencia reactiva capacitiva a frecuencia industrial al sistema de potencia. Adicionalmente, para realizar el control de voltaje por inyección de potencia reactiva, se puede realizar mediante la utilización de filtros con cambio de pasos, donde la IEEE Std 1032-1992, indica que el máximo número de pasos de inyección de potencia reactiva capacitiva (kVAR). Esto significa, que la cantidad de Kvar inyectados y el escalonamiento de pasos, se encuentran determinados por el flujo de carga a frecuencia fundamental y los requisitos de control de voltaje.

2.10. Método de Newton Raphson

También es conocido como el método de Newton, es un algoritmo iterativo que se utiliza para alcanzar las raíces de un sistema de Ecuaciones no lineales. Este método fue desarrollado en el siglo XVII por Isaac Newton y Joseph Raphson, el cual se ha convertido en un instrumento útil para el análisis numérico y la solución de problemas matemáticos y físicos (Caceres Espinoza & Caceres Espinoza, 2021).

Entre las principales características del método Newton Raphson se encuentra desarrollado por un enfoque geométrico del método de la secante, siendo su

principal objetivo es hallar las raíces de la función $f(x)$, es decir, los valores de x , cuando $f(x) = 0$.

La efectividad del método radica en la selección de un valor inicial x_n , que se encuentre cercano a la raíz buscada, para luego sustituir la secante por una función lineal tangente a la curva en el punto $(x_n, f(x_n))$.

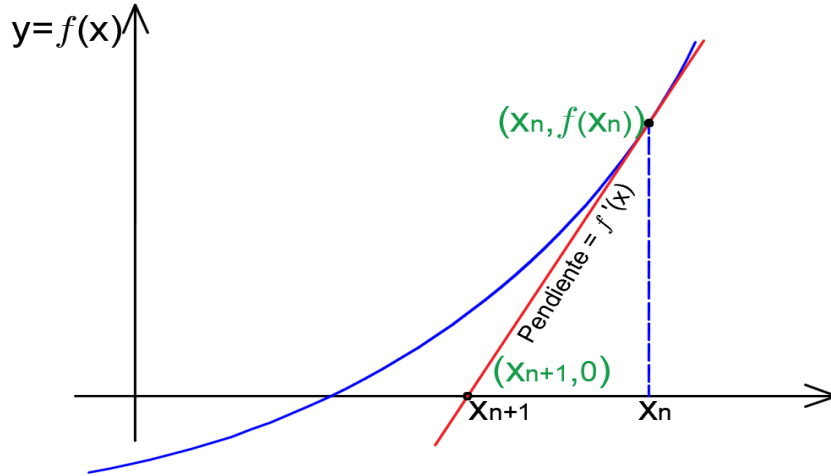


Figura 19: Ilustración de la Iteración primera de Newton Raphson

El nuevo punto del proceso iterativo, se tomará de la intersección de la función lineal con el eje de la abscisa. Este proceso se denomina como linealización de la función, donde se reemplaza la función $f(x)$, por una línea recta, cuya pendiente es igual a la derivada de la función en el punto $f'(x_n)$.

El nuevo punto iterativo x_{n+1} se aproxima a la siguiente ecuación:

$$f'(x_n) = \frac{f(x_n)}{x_n - x_{n+1}} \quad (53)$$

Otra forma de alcanzar el algoritmo, es a través de la serie de Taylor, considerado a partir del punto x_n ; donde:

$$f(x) = f(x_n) + f'(x_n)(x - x_n) + (x - x_n)^2 \cdot \frac{f''(x_n)}{2!} + \dots \quad (54)$$

Evaluando para el punto x_{n+1} , hasta el grado 2, podemos obtener:

$$f(x_{n+1}) = f(x_n) + f'(x_n) \cdot (x_{n+1} - x_n) \quad (55)$$

De acuerdo a la ecuación 55 se debe cumplir que $f(x_{n+1}) = 0$

Cabe mencionar que este proceso se repite, hasta que se alcance un valor igual o menor a una tolerancia predefinida en la convergencia (Stevenson J., 1994), tal como se indica en la ecuación 4.

$$|f(x_{n+1})| < e \quad (56)$$

Por lo general, el valor de e debe ser un número muy pequeño (considerado 10^{-3} en cálculos de flujo de potencia) pero puede ser menor o mayor, esto depende de que tan cerca se desea llegar a la raíz real del sistema. Se debe tener en cuenta, que, si se desea probar la precisión de la raíz obtenida, es necesario sustituir la raíz alcanzada en la función $f(x)$ para poder observar si se encuentra lo suficiente cercana a cero.

2.10.1. Ventajas del Método de Newton – Raphson

- Convergencia Rápida, siempre y cuando el valor inicial se encuentre cercano a la solución, siendo para condiciones ideales la convergencia cuadrática, debido a que el número de cifras correctas en la aproximación se duplica en cada iteración (Gómez Expósito et al., 2003).
- Eficiencia Computacional, debido a que requiere menor número de iteraciones para obtener una solución aceptable.
- Aplicaciones Versátiles, debido a que es útil en una gran variedad de campos, comenzando en la solución de un conjunto de Ecuaciones no lineales que modelan diversos sistemas matemáticos y físicos, además que es empleado en la optimización de funciones

2.10.2. Desafíos y Limitaciones

- Sensibilidad a la Elección del Valor Inicial, debido a que la eficacia depende de la elección del valor inicial. Si este valor se encuentra lejano de la solución, el método puede divergir, lo que significa, que se debe tener mucho cuidado en la selección de las condiciones iniciales.
- Requiere del cálculo de la derivada de la función, lo cual puede ser una limitación, donde este cálculo es difícil o costoso.
- Posibles problemas de convergencia, debido a que la función tiene varios puntos de inflexión o cambios abruptos de la función. Para estos casos, la convergencia puede ser lenta o incluso inexistente.

2.10.3. Pasos a Seguir en la Aplicación del Método de Newton Raphson

De acuerdo a la Figura 20 se debe seguir los siguientes pasos:

- Elección del Valor Inicial, donde se elige un valor inicial que preferentemente se encuentre cercano a la solución.
- Proceso iterativo, donde se utiliza la formula iterativa para el cálculo de la siguiente raíz en cada paso, utilizando la función y su derivada
- Convergencia, donde el procesó se repite hasta que se alcance una solución que sea menor o igual a una tolerancia pre definida en la convergencia, en algunas ocasiones se considera un número máximo de iteraciones.
- Resultados, es considerado la última aproximación o iteración, donde se considera la solución aproximada a la raíz.

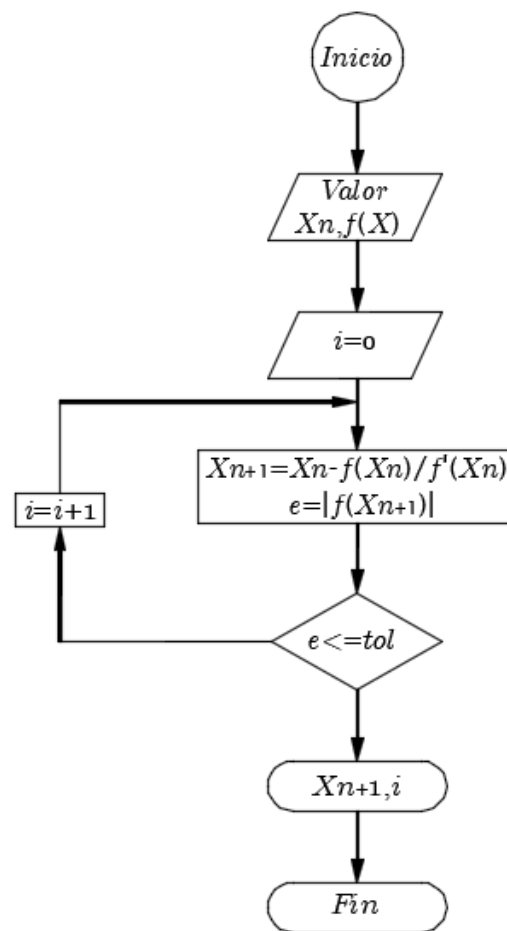


Figura 20: Diagrama de Flujo del Método de Newton Raphson

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍAS UTILIZADAS PARA DETERMINAR LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA SED 0010921

3.1. Introducción

En este capítulo se mostrará la metodología utilizada para determinar la distorsión armónica de la SED 0010921, donde se modelará cada uno de los elementos de distribución, el procesamiento de la información respecto a las mediciones de las corrientes armónicas, el cálculo de flujo de potencia, el cálculo de los armónicos de voltaje, comparado de los armónicos respecto a la Norma Técnica de Calidad de Servicio Eléctrico (NTCSE) y el estándar IEEE std. 519, además de la comparación de los resultados con la herramienta Digsilent 15.1.7

3.2. Modelamiento de los Elementos de un Sistema de Distribución

Los armónicos de voltaje se producen por los flujos de corrientes armónicas que son generadas por la conexión de cargas no lineales dentro y fuera del sistema. Además, se debe de considerar la distorsión armónica producida por agentes externos, como es el caso de las redes equivalentes que pueden inyectar armónicos al sistema, que mayormente son denominados como 'distorsión armónica de fondo'.

La magnitud de los armónicos de voltaje, depende de:

- La corriente de corto circuito trifásico, en el punto bajo estudio.
- Los armónicos de corriente que aparecen, debido a la conexión de cargas no líneas en las redes de baja tensión.
- Las reactancias inductivas y capacitivas del sistema, producidas por diferentes frecuencias.

En esta investigación, se realizará el análisis de la operación de los sistemas de distribución bajo el dominio de la frecuencia, para ello se requerirá el modelamiento del sistema a una frecuencia fundamental y a frecuencias armónicas (Ghorbani, 2011).

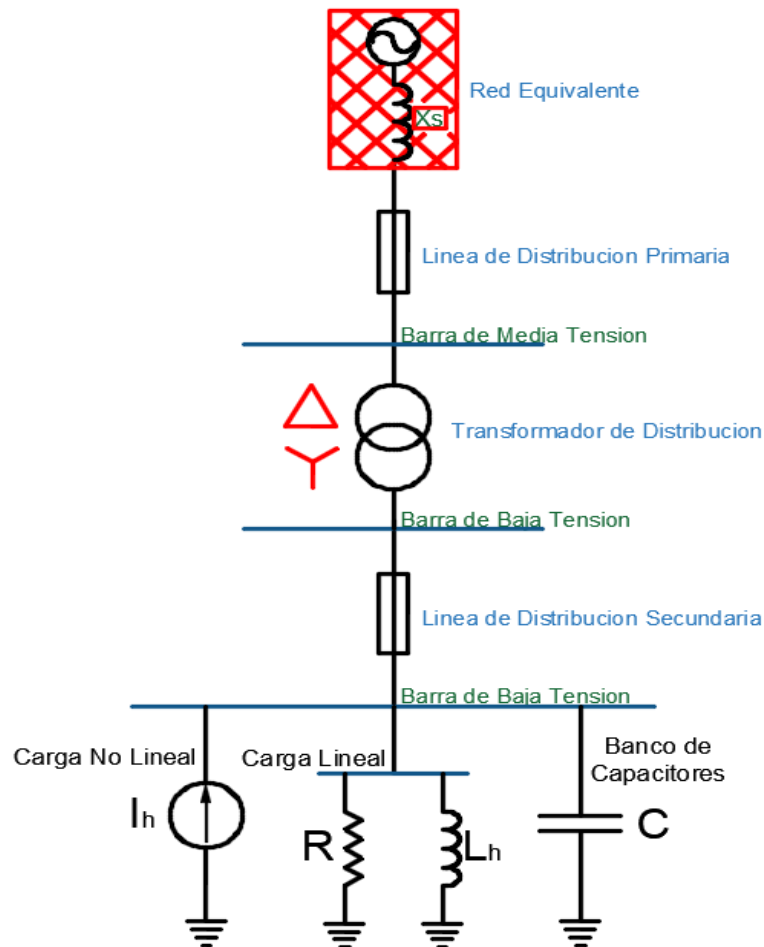


Figura 21: Representación General de un Sistema de Distribución

Fuente: K, Gabriela G.; Modelamiento y análisis de armónicos en sistemas de Distribución

Para nuestro caso de estudio, se considerará la red de alimentación como una fuente de energía con una reactancia inductiva, además de modelar las cargas no lineales como fuentes de inyección de corriente armónica, donde los otros elementos (transformadores y líneas) serán impedancias que dependerán de la frecuencia.

3.2.1. Red Externa

Se encuentra representado por el sistema que entregara energía a una frecuencia fundamental. Será representado por una fuente de voltaje Thevenin equivalente y una impedancia equivalente, determinado a partir del cálculo de corto circuito en el punto de alimentación.

La robustez de la red, dependerá de la magnitud de las corrientes de cortocircuito o de las potencias de cortocircuito, los cuales atenuarán partes de los armónicos producidos por las cargas no lineales (Wakileh, 2001).

Para el modelado de la red equivalente, se utilizará la representación de la Figura 22, tanto para la frecuencia fundamental y las frecuencias armónicas.

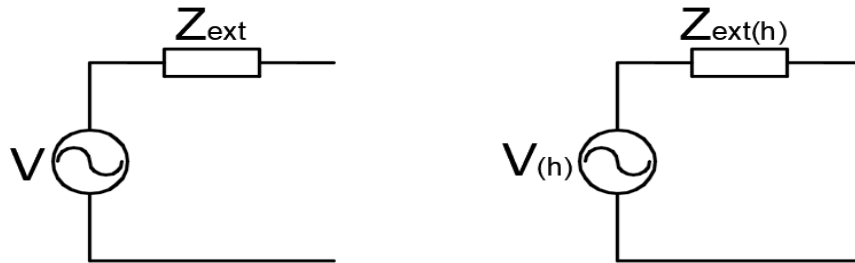


Figura 22: Representación de la Red (a) Frecuencia Fundamental (b) Frecuencias Armónicas

Fuente: K, Gabriela G.; Modelamiento y análisis de armónicos en sistemas de Distribución

3.2.2. Líneas y Cables

Para nuestro caso de estudio, será considerado el modelo de Línea Corta, debido a que las líneas de distribución trabajan en media y baja tensión, además de tener una longitud inferior a los 80 km, donde es considerado despreciable las inyecciones de potencia reactiva por parte de las admitancias de las líneas, producidas por los diferenciales de potencias entre las fases.

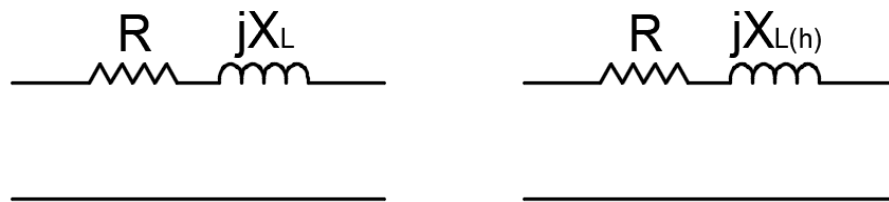


Figura 23: Representación de la Línea (a) Frecuencia Fundamental (b) Frecuencias Armónicas

Fuente: K, Gabriela G.; Modelamiento y análisis de armónicos en sistemas de Distribución

También las impedancias de la línea, se verán afectadas por la frecuencia fundamental y las armónicas.

3.2.3. Transformadores

Para el modelamiento de los transformadores, se considerará los equivalentes utilizados en el cálculo de flujo de potencia, donde serán representados por una sola reactancia inductiva, que dependerá de la frecuencia fundamental y de las frecuencias armónicas.

3.2.4. Banco de Capacitores

Estos dispositivos, son los encargados de modificar la impedancia del sistema, al igual que la circulación de aquellas corrientes armónicas. Se debe tener cuidado en la instalación de estos dispositivos debido a que pueden producir resonancia, los cuales son causales de incrementos de la corriente, respecto de algunos armónicos.

3.2.5. Cargas

Es el conjunto de equipos tanto eléctricos y electrónicos que emplean los usuarios dentro de un sistema eléctrico. Para el cálculo de flujo de potencia, las cargas son consideradas como potencias absorbidas en las barras, mientras que para los estudios de armónicos se debe incluir la cantidad de corriente armónica producida por las cargas no lineales, que son las causantes de la distorsión del voltaje, tanto en magnitud como fase (Wakileh, 2001).

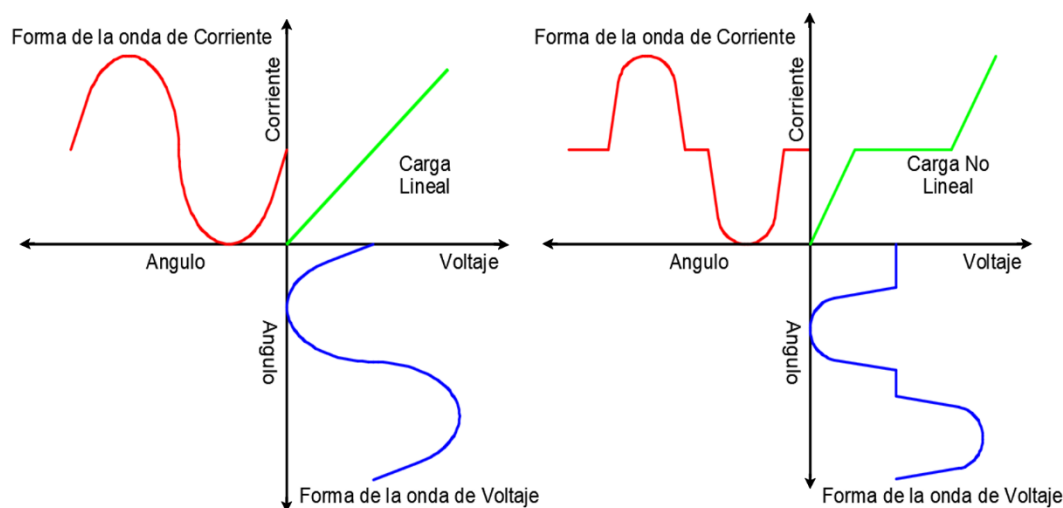


Figura 24: Ejemplo de la relación entre el voltaje y la corriente de una carga (a) Carga Lineal (b) Carga no Lineal

Fuente: N. Soares Ribeiro; Evaluación de Filtros Electromagnéticos y Sintonizados LC

Por lo tanto, se definirá los modelos de carga a utilizar respecto al tiempo.

3.2.6. Tipos de Cargas

La cantidad de potencia que utilizan los usuarios se pueden modelar mediante cargas lineales y no lineales, donde se considera a los armónicos como una impedancia a frecuencia variable o como una fuente de corriente armónica, inyectora de armónicos, tal como se mostrara a continuación:

3.2.6.1. Modelo de fuente de corriente constante

Para el caso de cargas que no son muy sensibles al voltaje y para redes donde están presentes pequeñas variaciones de voltaje, las cargas productoras de armónicos se modelan como una fuente de corriente constante.

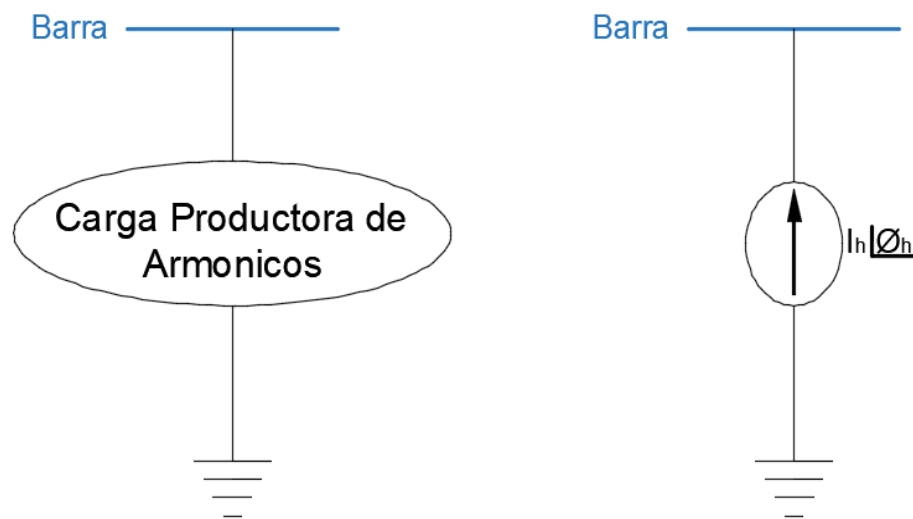


Figura 25: Representación del modelo de carga como fuente de corriente constante

Fuente: M. Balci, D. Ozturk; Verificación Experimental de Carga Armónica

De acuerdo a la Figura 25, la carga productora de armónica se modela como una fuente de corriente fija para cada número de armónicos, teniendo como ventaja, que los espectros de armónicos actuales de numerosas cargas productoras ya están caracterizados, pero el modelo no es suficiente para el análisis de armónicos con la red cuando se tiene condiciones atípicas de operación (Balci et al., 2008).

3.2.6.2. Modelo Norton

Este modelo es utilizado para cargas productoras de armónicos, con un rango amplio de condiciones de operación.

En el modelo Norton, la carga productora de armónicos se modela como una conexión en paralelo de la impedancia Norton $Z_{N,h}$ y una fuente de corriente Norton $I_{N,h}$ para cada número de armónico (Balci et al., 2008).

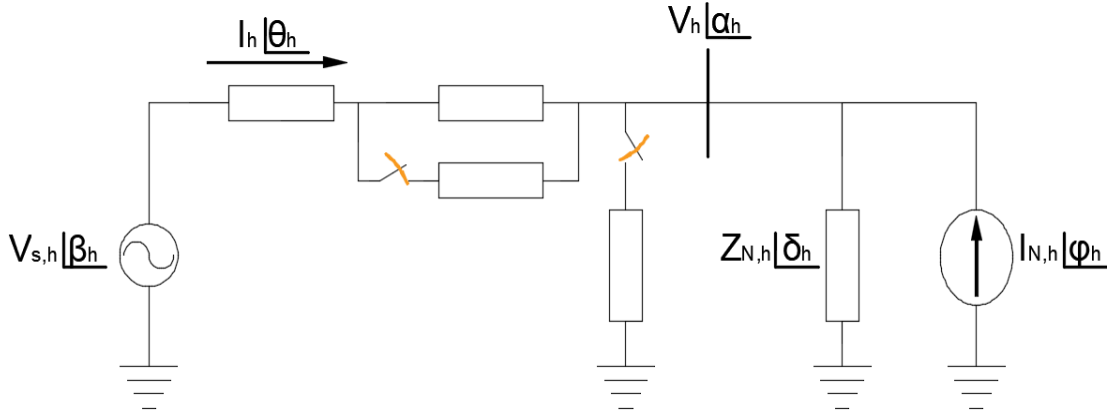


Figura 26: Representación de la carga como modelo Norton

Fuente: M. Balci, D. Ozturk; Verificación Experimental de Carga Armónica

Cabe señalar, que el modelo Norton se construye, utilizando el teorema de superposición.

3.2.6.3. Modelo de Matriz de Admitancia a Diferentes Frecuencias

Para el modelado de cargas productoras de armónicos, se debe tener en cuenta la relación de tensión y corriente entre diferentes órdenes de armónicos (Su et al., 2014), donde se propone el modelo mostrado en la Figura 27.

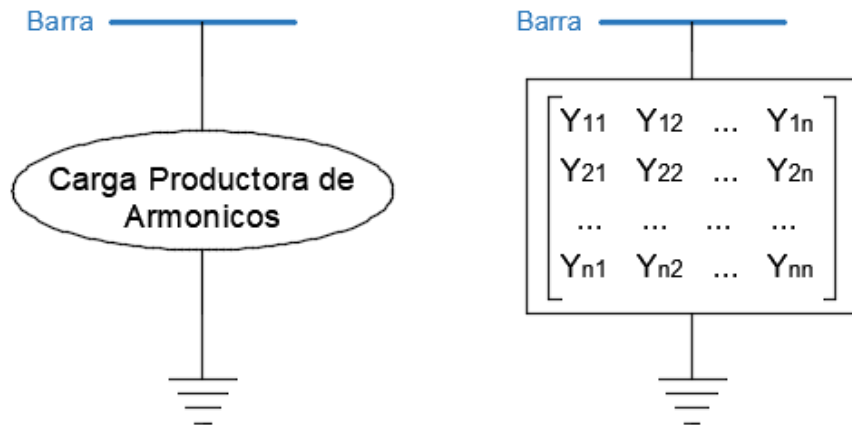


Figura 27: Representación de la carga como modelo de Matriz de Admitancias

Fuente: M. Balci, D. Ozturk; Verificación Experimental de Carga Armónica

En este modelo, se considera las admitancias de la red para cada diferentes armónicos, siendo también representado por fuente de corriente dependiente de voltaje, como:

$$I_h = f(V_1, V_2, \dots, V_h) \quad (57)$$

Donde $V_1, V_2, \dots, V_h$, son los voltajes fasoriales por cada armónico producido. Adicionalmente, este modelo se construye experimentalmente por dos pasos:

- Para el primer paso, se considera que la carga es alimentada por una fuente de tensión senoidal pura, donde los valores de la matriz de admitancia se encuentran relacionados con la frecuencia fundamental y expresados por la siguiente ecuación.

$$Y_{k1} = \frac{I_k}{V_1}; \text{ para todo } k = 1, 2, \dots, n \quad (58)$$

- El segundo paso, se considera que la carga es suministrada por varias formas de onda de voltaje, donde se tiene una componente fundamental constante y se superpone una componente armónica a la vez. De esta manera, las demás componentes de la matriz de admitancia se encontrarán expresados como:

$$Y_{kj} = \frac{I_k - Y_{k1}V_1}{V_j}; \text{ siendo } j = 2, 3, \dots, n \quad (59)$$

Durante el proceso de cálculo, se debe considerar el uso de la misma referencia de fase, para que el modelo de la matriz de admitancia se logre obtener con precisión.

3.2.6.4. Cargas Agregadas

En complicado adquirir un modelo de red que integre todos los equipos que utilizan los consumidores, por lo que se pueden juntar diferentes tipos de cargas, tanto lineales como no lineales y crear una carga compuesta, para formar una carga denominada “carga agregada”.

Estas cargas se pueden agrupar bajo diferentes niveles como grupos de consumidores en media y baja tensión, como grupo de consumidores que se enlazan a un transformador de distribución o como grupo de consumidores que se conectan a un alimentador.

En la siguiente Figura, se presenta un sistema de distribución, con distintos niveles de agregación.

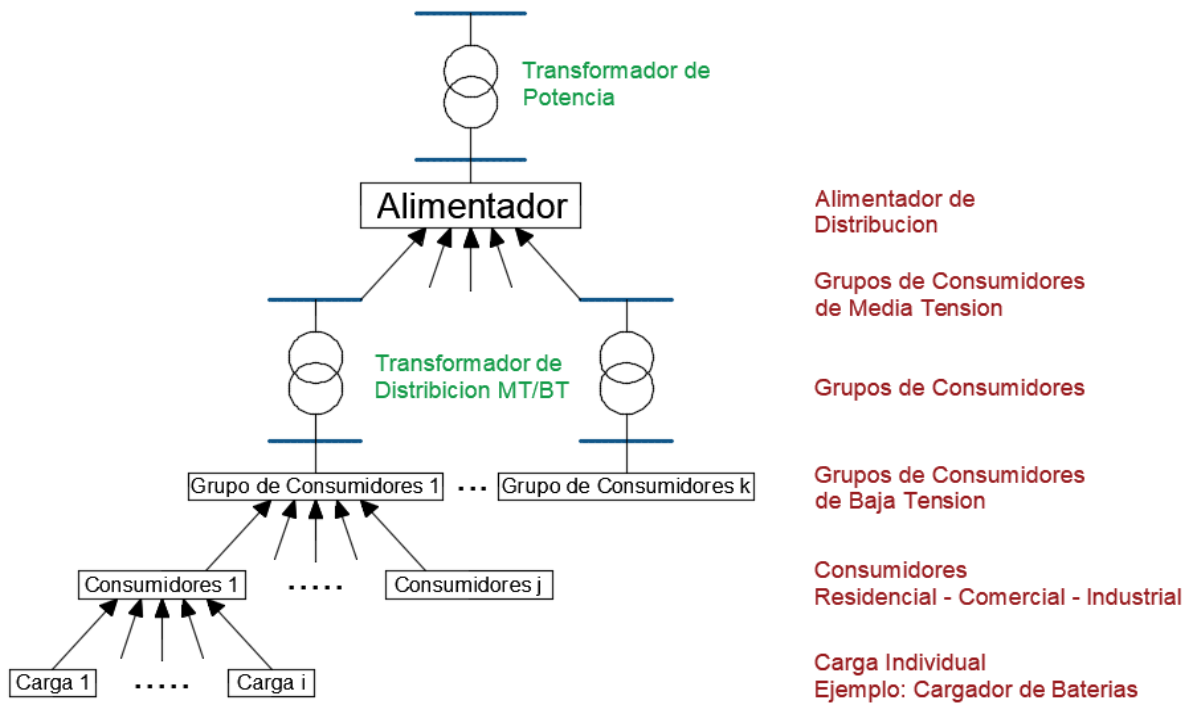


Figura 28: Niveles de Agregación de Cargas

Fuente: Elaboración Propia

Para la agregación de cargas en estudios de armónicos, se precisa implementar técnicas que agrupen las cargas de manera de facilitar la representación de los diferentes equipos que utilizan los consumidores, como es el caso de la siguiente Figura.

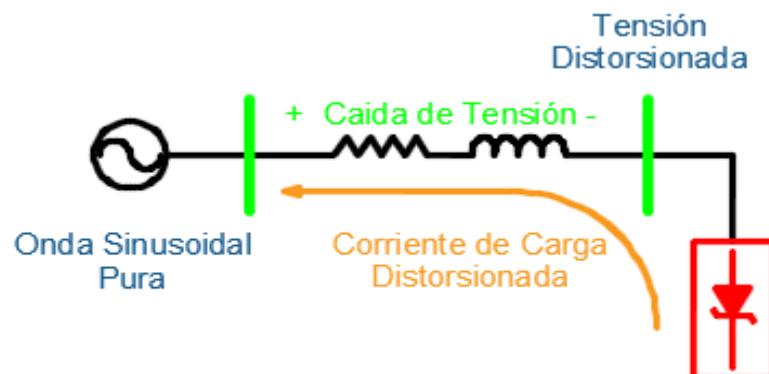


Figura 29: Modelamiento de Simplificación de Cargas

Fuente: Elaboración Propia

3.3. Diagramas de Carga en Sistemas de Distribución

Estos diagramas proporcionan una representación visual de la demanda de energía en diferentes momentos del día o en distintas áreas de la red. También se puede considerar como la variación de la carga eléctrica a lo largo del tiempo, lo que permite a los operadores y planificadores de la red comprender y gestionar mejor el consumo de la energía.

Al analizar los diagramas de carga, se pueden identificar patrones de uso, picos de demanda y tendencias estacionales, lo que ayuda a optimizar la operación de la red y planificar adecuadamente la capacidad de generación y distribución. Además, los diagramas de carga son útiles para evaluar el impacto de nuevas cargas, como la integración de energías renovables o el aumento de la demanda, debido al crecimiento urbano, permitiendo una gestión eficiente y sostenible del sistema eléctrico.

Respecto a la NTCSE, se utilizará las mediciones del analizador de redes de la SED 0010921, el cual entrega mediciones de las potencias por cada 15 minutos durante un periodo de 7 días, donde se puede observar en la Figura 30 (a) que existe mediciones iguales a cero, debido a la pérdida de información del mismo equipo y fluctuaciones en la demanda, que hace difícil predecir las magnitudes de la demanda.

Para suavizar los diagramas de carga, se utilizan los valores máximos por cada hora del día en la Figura 30 (b), donde se tiene valores iguales a cero y valores que no son comunes, mientras que en la Figura 30 (c) se tiene los valores promedio de las demandas por cada hora, el cual forma diagramas suavizadas que facilitan la predicción del diagrama de carga común o monótono de las mediciones del analizador de redes (Garcés et al., 2004).

Respecto a la Figura 30 (d) muestra el perfil de carga común, respecto a los 7 días de medición, considerando mínimos márgenes de error entre mediciones y que no tengan valores iguales a cero.

Para nuestro caso de estudio, se tomará la máxima demanda del diagrama de carga común, considerando que, a mayor demanda se produce la mayor inyección de corriente con mayor cantidad de armónicos producidos por la carga.

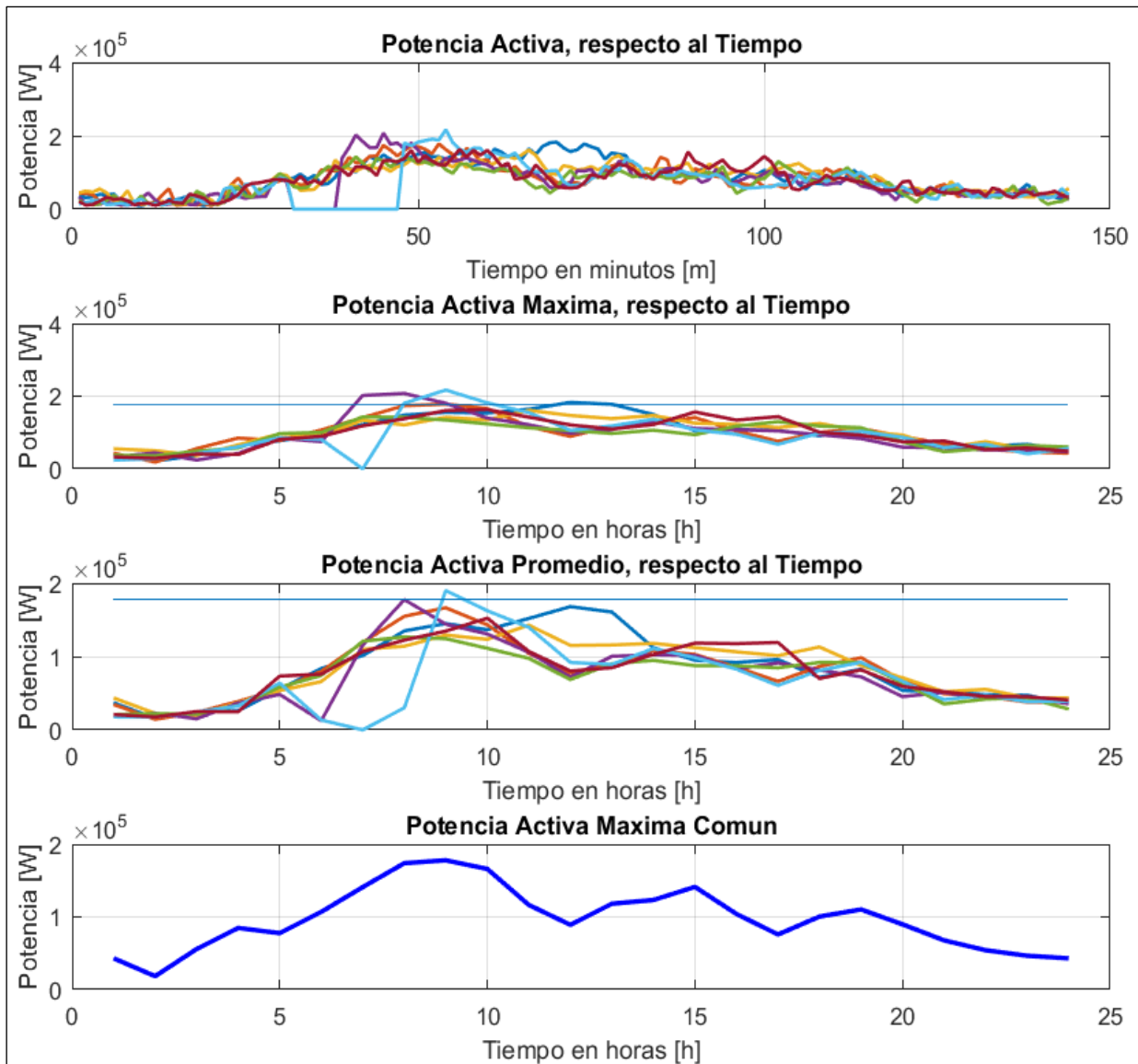


Figura 30: Diagrama de carga de la SED 0010921 (a) Por cada 15 minutos durante 7 días; (b) Valores máximos por cada hora, durante 7 días; (c) Valores promedio por cada hora, durante 7 días (d) Común de los valores promedios, de los 7 días.

Fuente: Elaboración Propia

3.4. Aplicación del método de Newton Raphson en Flujo de Potencia

3.4.1. Formulación de las Ecuaciones de Flujo

Consiste en calcular las variables de estado, los cuales se encuentran conformados por las magnitudes de los voltajes y los ángulos de fase de cada barra de un sistema de potencia en estado estable.

Estas variables, permiten calcular los flujos de potencia activa y reactiva en todas las líneas de transmisión y transformadores, así como también las pérdidas por el transporte de la energía eléctrica.

Como punto de partida del cálculo de flujo de potencia, se debe de considerar el diagrama unifilar del sistema de potencia, donde se obtendrá los datos de entrada como son los datos de las barras, líneas de transmisión, transformadores y generadores.

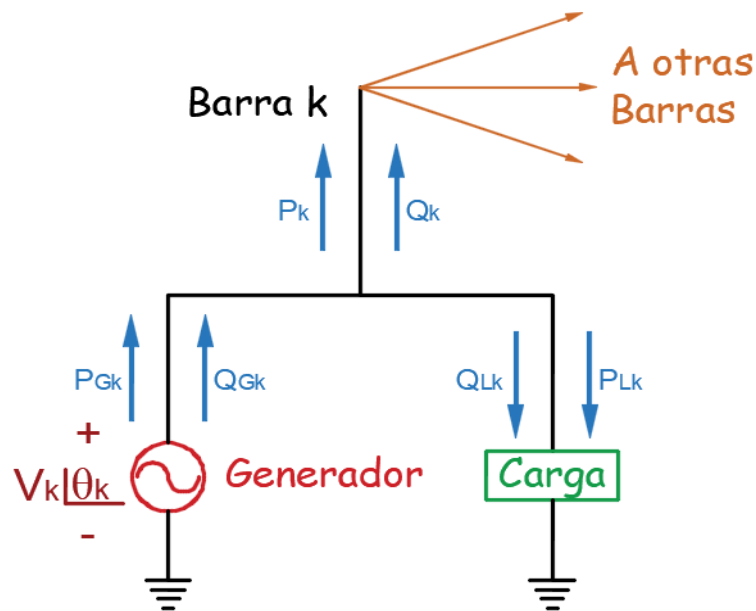


Figura 31: Variables de una Barra de un Sistema de Potencia

Fuente: J. Duncan, S. Sarma; *Análisis y Diseño de Sistemas de Potencia*

De acuerdo a la Figura 31, por cada barra de los sistemas de potencia se debe de considerar 4 parámetros, donde dos representan las variables de estado y dos representan las potencias activas y reactivas inyectadas a la barra k. Cabe mencionar, que para resolver cualquier sistema de Ecuaciones el número de incógnitas debe ser igual al número de Ecuaciones, por lo que, dos parámetros deben ser especificados y tomados como datos de entrada, mientras que los otros dos parámetros son considerados como incógnitas que deben de determinarse en el cálculo de flujo de potencia.

Es por ello, que se deben de clasificar los tipos de barras de acuerdo a la Tabla 05.

Tabla 8. Clasificación de los Tipos de Barras

Tipo de Barras	Variables Especificadas	Variables Calculadas
Nodo Swing	$ V $ y θ	P y Q
Nodo PV	$ V $ y P	Q y θ
Nodo PQ	P y Q	$ V $ y θ

Fuente: J. Grainger, W. Stevenson; *Análisis de Sistemas de Potencias*

De acuerdo a la clasificación de las barras, se tendrá una ecuación por cada potencia conocida en la barra bajo estudio, esto significa que por cada barra de tipo PQ se tendrá dos Ecuaciones, mientras que para una barra de tipo PV se tendrá una ecuación, por lo se tendrá $2n_{pq} + n_{pv}$ Ecuaciones, siendo de esta forma, las variables de estado, las variables desconocidas a nuestros sistemas de Ecuaciones, donde por cada barra de tipo PV se tendrá una incógnita o variable desconocida, mientras por cada barra de tipo PQ se tendrá dos incógnitas o dos variables desconocidas (Grainger j. & Stevenson J., 2017).

Asimismo, se debe establecer un balance de potencias en cada barra del sistema, donde la sumatoria de las potencias deben ser iguales a cero, tal como se muestra en las Ecuaciones 1 y 2.

$$\Delta P_k = P_{Gk} - P_{Lk} - P_k = 0 \quad (60)$$

$$\Delta Q_k = Q_{Gk} - Q_{Lk} - Q_k = 0 \quad (61)$$

Donde:

P_{Gk} y Q_{Gk} : Representan las potencias activas y reactivas inyectadas en la barra k, por parte de las empresas de generación.

P_{Lk} y Q_{Lk} : Representan las potencias activas y reactivas demandadas en la barra k, por parte de los usuarios.

P_k y Q_k : Representan los flujos de potencia activa y reactiva a través de las líneas de transmisión y transformadores.

ΔP_k y ΔQ_k : Margen de errores, respecto a las potencias activas y reactivas en la barra k

Para modelar cada una de los elementos de trasmisión, se requiere utilizar las leyes de Kirchhoff, donde cada componente de la red dependa de las Ecuaciones en cada barra del sistema, siendo expresado para un sistema de n barras:

$$I_k = Y_{k1}V_1 + Y_{k2}V_2 + \dots + Y_{kn}V_n = \sum_{m=1}^n Y_{km} V_m; \quad \forall m = 1, 2, \dots, n \quad (62)$$

Donde:

I_k : Es la intensidad de corriente inyectada a la barra k

V_m : Es el voltaje de la barra k

Y_{km} : Es el término utilizado para modelar cada componente de del sistema, dentro de la matriz de admitancias

Utilizando la ecuación 62, se calcula la potencia inyectada en cada barra:

$$S_k = V_k I_k^* \quad (63)$$

Entre las Ecuaciones 62 y 63, se puede eliminar la intensidad de corriente compleja en el nodo k, cuyo valor no se conoce. Empleando coordenadas cartesianas respecto a cada componente de la matriz de admitancias $Y_{km} = G_{km} + jB_{km}$, se obtiene el sistema no lineal de n Ecuaciones complejas:

$$P_k - Q_k = V_k \sum_{m=1}^n (G_{km} + jB_{km}) V_k^* \quad \forall k = 1, 2, \dots, n \quad (64)$$

Considerando coordenadas polares, respecto a los voltajes en cada barra del sistema $\vec{V}_k = |V_k| \angle \theta_k$ la ecuación 64 se puede dividir en $2n$ Ecuaciones reales:

$$P_k = V_k \sum_{m=1}^n V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad \forall k = 1, 2, \dots, n \quad (65)$$

$$Q_k = V_k \sum_{m=1}^n V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad \forall k = 1, 2, \dots, n \quad (66)$$

Donde:

θ_{km} : Representa la diferencia angular $\theta_k - \theta_m$, de los ángulos de voltajes de las barras k y m.

3.4.2. Aplicación del Método de Newton Raphson

Este método permite obtener la solución, mediante la linealización de un conjunto de Ecuaciones no lineales, siempre y cuando el sistema de Ecuaciones sea expresado como $f(x) = 0$ y se escoja valores iniciales, cercanos a la solución del sistema de Ecuaciones, de manera de alcanzar la convergencia.

Para nuestro caso, se modificará las Ecuaciones 60 y 61 considerando las Ecuaciones 65 y 66 de manera de obtener márgenes de errores menores a una tolerancia asumida, como:

$$\Delta P_k = P_k^{esp} - V_k \sum_{m=1}^n V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (67)$$

$$\Delta Q_k = Q_k^{esp} - V_k \sum_{m=1}^n V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (68)$$

Donde:

P_k^{esp} : Representa la diferencia de las potencias activas especificadas $P_{Gk} - P_{Lk}$ en la barra k.

Q_k^{esp} : Representa la diferencia de las potencias activas especificadas $Q_{Gk} - Q_{Lk}$ en la barra k.

Descomponiendo las Ecuaciones 67 y 68, por medio de las series de Taylor, se obtiene el sistema matricial, para m iteraciones, como:

$$\begin{bmatrix} P_1^{esp} - P_1(\theta_1, \dots, \theta_n, V_1, \dots, V_n) \\ \vdots \\ P_n^{esp} - P_n(\theta_1, \dots, \theta_n, V_1, \dots, V_n) \\ Q_1^{esp} - Q_1(\theta_1, \dots, \theta_n, V_1, \dots, V_n) \\ \vdots \\ Q_n^{esp} - Q_n(\theta_1, \dots, \theta_n, V_1, \dots, V_n) \end{bmatrix}^m = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial V_n} \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial V_n} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_n} \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial V_n} \end{bmatrix}^m \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \vdots \\ \Delta \theta_n \\ \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix}^m \quad (69)$$

La ecuación 69 se puede escribir en su forma compacta mediante la ecuación 70.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta V_k \end{bmatrix} \quad (70)$$

Donde:

$\begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta V_k \end{bmatrix}$: Representa el vector de corrección de estado.

$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \end{bmatrix}$: Representa el vector de errores de las potencias activas y reactivas.

$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} \end{bmatrix}$: Representa la matriz Jacobiana, cuyas componentes son las derivadas parciales de la potencia activa y reactiva en función de las variables de estado

Una vez alcanzado la convergencia de la ecuación 70, se procede a la actualización de las variables de estado, mediante la ecuación 71.

$$\begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix}^{m+1} = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix}^m + \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}^m \quad (71)$$

Cabe mencionar que el proceso iterativo termina cuando el máximo valor del vector de errores es menor a la tolerancia asumida.

3.4.3. Newton Raphson aplicado al SED 0010921

Para determinar la operación del sistema en estado estacionario, se calculó las variables de estado y la cantidad de corriente que sale de la red equivalente para satisfacer el balance de potencias, para ello se utilizó el programa Matlab 2016.a, con extensión en programación GUIDE, de manera de tener un aplicativo fácil y versátil de poder utilizar.

Para nuestro sistema de prueba se consideró una red equivalente, como punto de alimentación a nuestra carga no lineal. Además, el sistema cuenta con una línea de distribución y un transformador reductor de voltaje, produciendo una corriente demanda de 526.631 [A] para satisfacer la máxima demanda de 0.1779+j0.078828 MVA

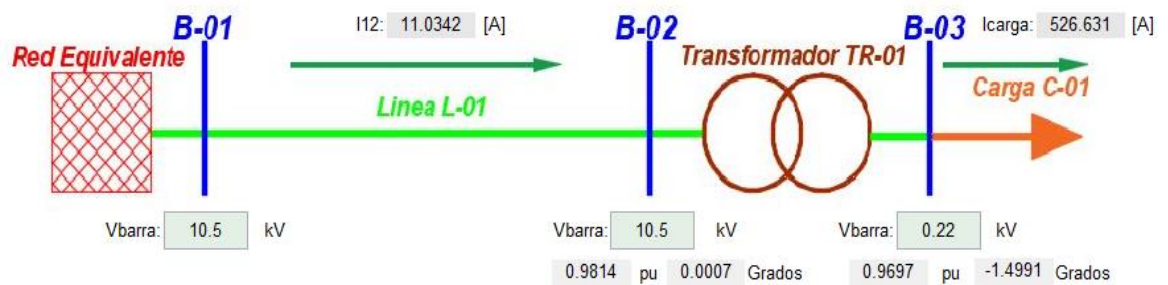


Figura 32: Diagrama Unifilar del Sistema de Distribución N° 0010921 con Simulación en Matlab.

Respecto a la secuencia utilizada, se aplico el siguiente diagrama de flujo mostrado en la Figura 33

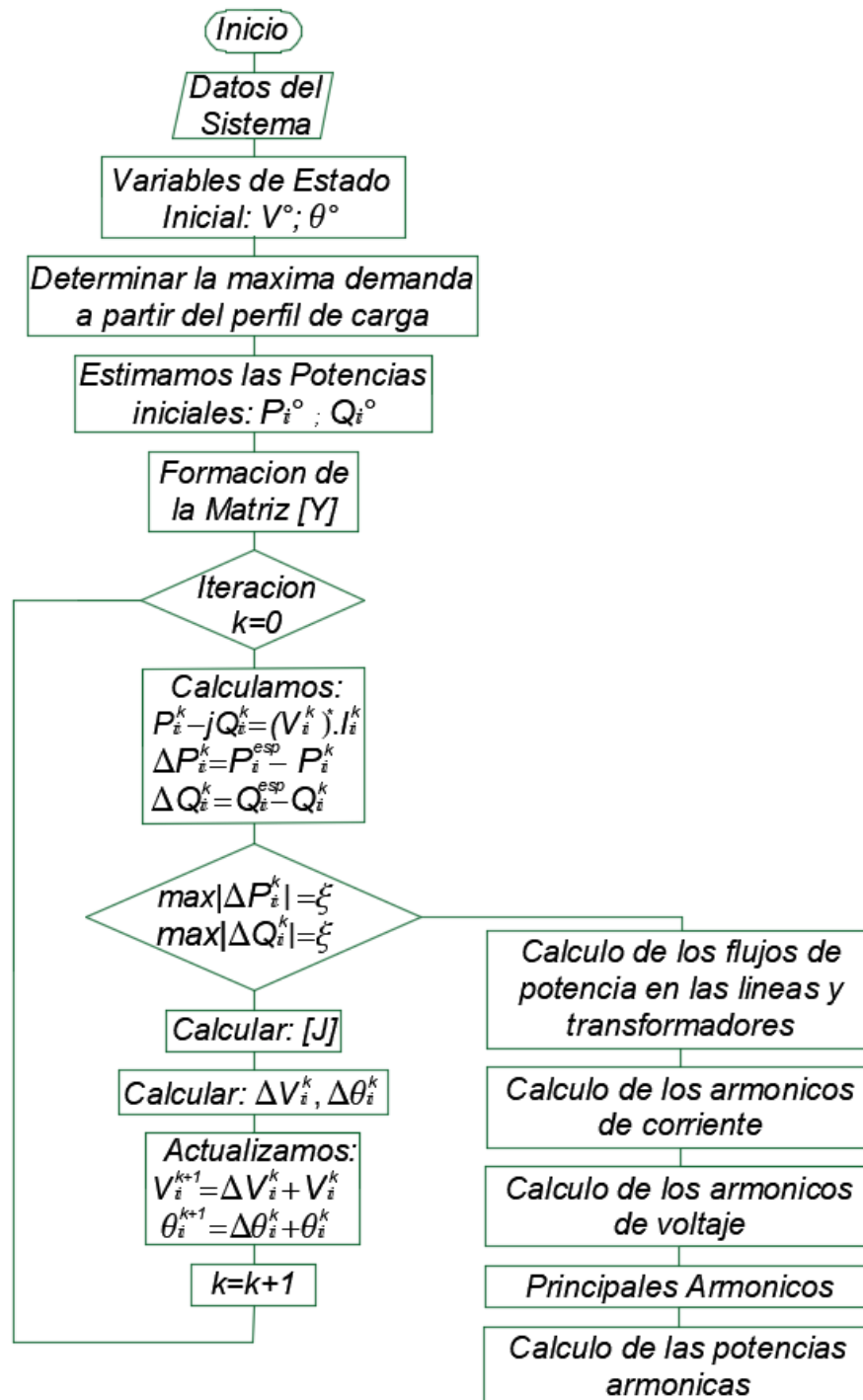


Figura 33: *Diagrama de Flujo para determinar la distorsión armónica en Sistemas de Distribución Radiales.*

Una forma descriptiva de utilizar este diagrama de flujo, es mostrado en el siguiente procedimiento:

- i. Se cargan los datos del sistema como: las tensiones de las barras, datos de la línea de distribución, datos del transformador, datos de la red equivalente.
- ii. Se determina la máxima demanda a partir del perfil de carga.
- iii. Se escoge los valores iniciales de los módulos de tensión y los ángulos de las tensiones en las barras del sistema.
- iv. Se estima las potencias calculadas de los elementos de distribución a partir de los valores iniciales de las variables de estado.
- v. Se determina la matriz de admitancia a partir de los datos del sistema
- vi. Se inicia el proceso iterativo con $k=0$
- vii. Se calcula el vector de errores de las potencias conocidas por tipo de barra
- viii. Se compara el margen de error del vector de errores, con las tolerancias asumidas.
- ix. Si el margen de error es menor a la tolerancia, se concluye el proceso y se procede al cálculo de los flujos de potencia y la cantidad de potencia que entrega la red equivalente
- x. Si el margen de error es mayor a la tolerancia, se continua con el proceso iterativo, donde se calcula la matriz Jacobiana, tomando los valores escogidos.
- xi. A partir del vector de errores y la matriz Jacobiana se calcula el vector de las variaciones de estado de los módulos de tensión y los ángulos de las barras del sistema.
- xii. Se actualiza las variables de estado
- xiii. Se incrementa el número de iteraciones en $k+1$
- xiv. Con la determinación de las variables de estado, se calcula la corriente a través de los elementos de distribución a frecuencia fundamental
- xv. Se calcula las corrientes armónicas individuales y el THD'I
- xvi. Se calcula las tensiones armónicas individuales y el THD'V

xvii. Se grafica los diagramas vectoriales de tensión, corriente e impedancia de las principales armónicas presentes en el estudio

xviii. Se calcula las potencias armónicas respecto al tiempo.

Comparando resultados con la herramienta Digsilent 15.1.7, no se tiene margen de error debido a que se utilizó la misma tolerancia en el proceso iterativo.

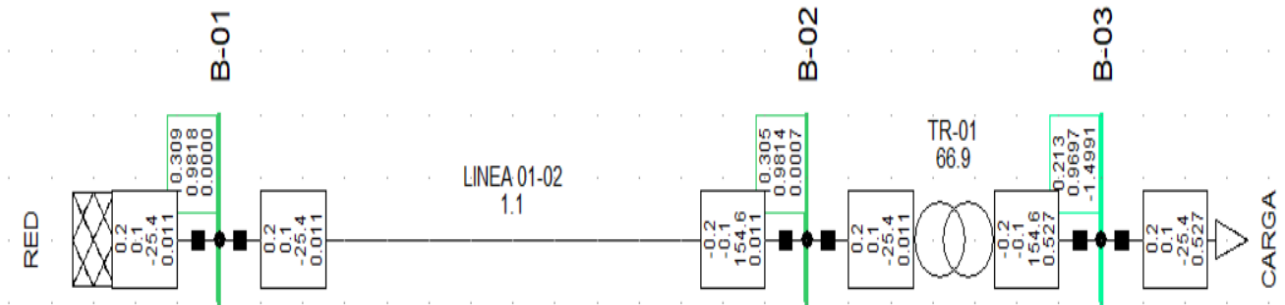


Figura 34: Diagrama Unifilar del Sistema de Distribución N° 0010921 con Simulación en Digsilent.

Adicionalmente, el siguiente diagrama unifilar muestra las tensiones en los nodos y las corrientes a través de los elementos de distribución, para satisfacer la demanda.

3.4.4. Cálculo de las corrientes armónicas en la SED 0010921

Para el cálculo de las corrientes armónicas, se utilizó las mediciones del analizador de redes (importados al algoritmo desarrollado mediante una extensión en Excel), donde se consideró las corrientes armónicas coincidentes, bajo el criterio que en una máxima demanda se produce también la máxima contaminación armónica, como se logra observar en la Figura 03 (a) y (b).

Estas corrientes armónicas son modeladas como una carga agregada del modelo Norton, donde se considera el consuno de potencia en la barra 03 y la inyección de armónicos como una fuente de corriente.

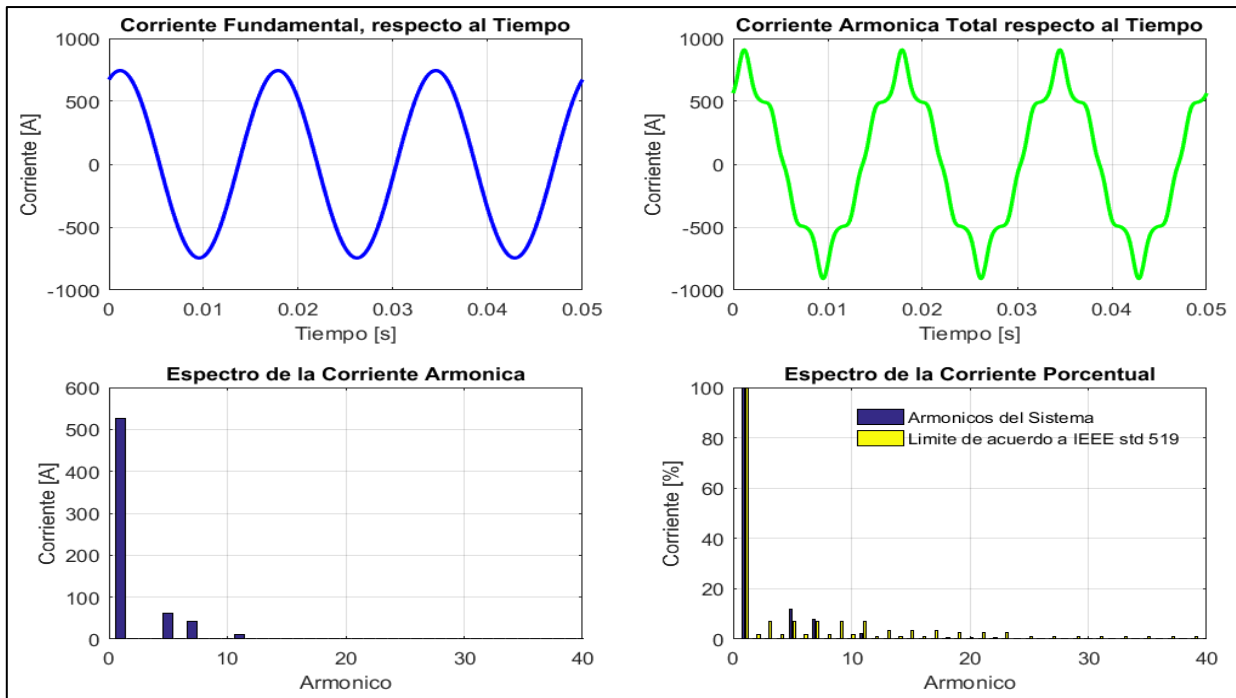


Figura 35: Corriente armónica producida por la SED 0010921 (a) Corriente fundamental respecto al tiempo; (b) Corriente armónica total respecto al tiempo; (c) Espectro de la corriente armónica en valores eficaces; (d) Espectro de la corriente armónica en valores porcentuales v/s el límite establecido en la IEEE std. 519.

De acuerdo a la Figura 35 ©, la corriente fundamental tiene una magnitud de 526.631 [A], y las corrientes que producen mayor contaminación son los armónicos 5to, 7mo y 11vo, cuyas magnitudes son iguales a 68.198 [A]; 41.3932 [A] y 11.7325 [A]. De acuerdo a la NTCSE, se consideró hasta el armónico 40 de la corriente, cuya incidencia es menor.

Esta inyección de corrientes armónicas al sistema de distribución, ocasiono la distorsión de la corriente total respecto al tiempo, como se muestra la Figura 35 (b), produciendo que la amplitud de la onda se incremente hasta en un 19.773 % respecto a su fundamental, Figura 35 (a).

Si modelamos las corrientes armónicas en forma porcentual, con la finalidad de obtener un espectro porcentual, para compararlo con el estándar de la IEEE std 519, se logra observar en la Figura 35 (d) que el armónico 5to y 7mo se encuentra fuera del estándar, siendo el límite superior permitido del 7% respecto a su valor

fundamental. Para determinar los límites de armónicos de corriente, se utilizó la Tabla 03, para sistemas que trabajan en niveles de tensión de 120 [V] a 69 [Kv], cuya relación de la corriente de cortocircuito trifásica entre la corriente fundamental en el punto de medición es equivalente a 26.2154 [Adimensional].

Características del Sistema de Distribución			
		Segun IEEE std 519	Segun DS N° 020-97-NTCSE
Calculo del THD'I:	14.3608 [%]	8 [%]	
Calculo del THV:	3.25775 [%]	8 [%]	8 [%]

Figura 36: Características del Sistema de Distribución, respecto al cálculo y comparación del THD'I y THD'V.

Adicionalmente, si comparamos el THD'I del sistema de distribución, con el THD'I según la IEEE std 519, nos encontramos fuera de los estándares establecidos, debido a que esta magnitud depende de las contribuciones de cada armónico de corriente presentes en el sistema, de acuerdo a la Ecuación 48 y la Tabla 03. Cabe mencionar, que según el DS N° 020-97-NTCSE no se tienen magnitudes estandarizadas respecto a la cantidad de corriente armónica permitida en sistemas de distribución.

Si comparamos el espectro armónico de las corrientes eficaces y la onda de corriente total respecto al tiempo, se tiene un margen de error absoluto del 0.001%, respecto a las simulaciones obtenidas en el programa Digsilent 15.1.7, el cual se observa en la Figura 37.

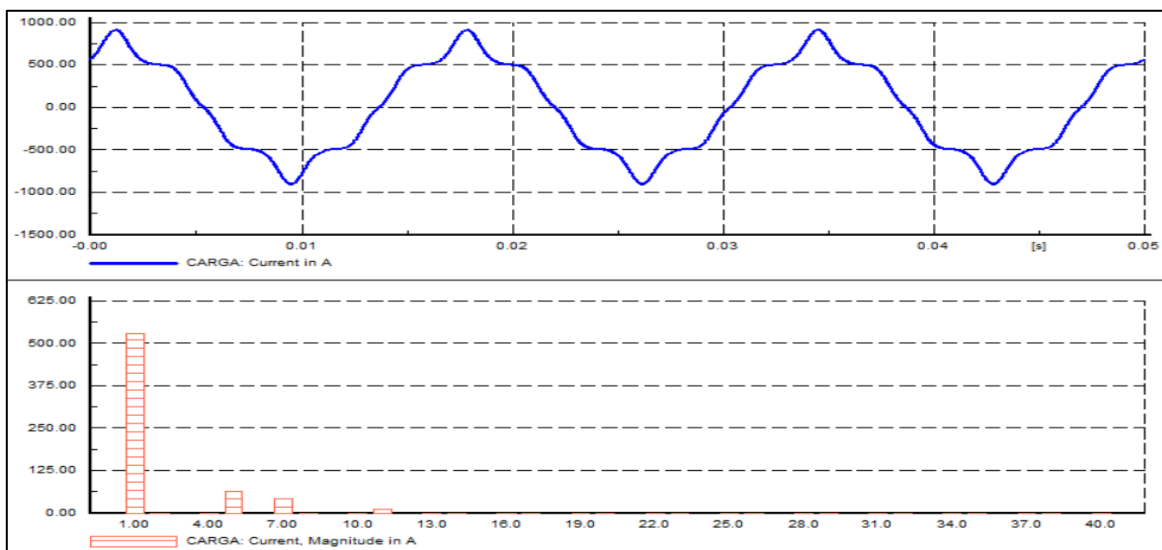


Figura 37: *Corriente armónica producida por la SED 0010921 en el programa Digsilent (a) Corriente armónica total respecto al tiempo; (b) Espectro de la corriente armónica en valores eficaces*

3.4.5. Cálculo de las tensiones armónicas en la SED 0010921

Para este cálculo se considero el modelamiento equivalente de cada uno de los elementos de distribución, de acuerdo a las corrientes armónicas presentes, de manera que se cumpla que:

$$V_h = Z_h \cdot I_h \quad (72)$$

Donde:

V_h : Es el voltaje armónico, producido por la corriente armónica presente.

Z_h : Impedancia producida por cada frecuencia armónica presente.

I_h : Corriente armónica producida por la carga no lineal.

De la Ecuación 72, se puede concluir que por cada corriente armónica presente en el sistema, se tendrá también un voltaje armónico a la misma frecuencia.

Comparando las Figuras 38 (a) y (b), se muestran las ondas de voltaje a frecuencia fundamental y la onda de voltaje total distorsionado, debido a la contribución de las corrientes armónicas. Esta contaminación, produjo la existencia de voltajes armónicos, siendo las principales, la 5ta, 7ma y 11va armónica, cuyo espectro de tensión porcentual se encuentra dentro del estándar de la IEEE std 519, esto de acuerdo a sistemas que trabajan a tensiones menores de 1 kV (igual al 5% de la magnitud fundamental).

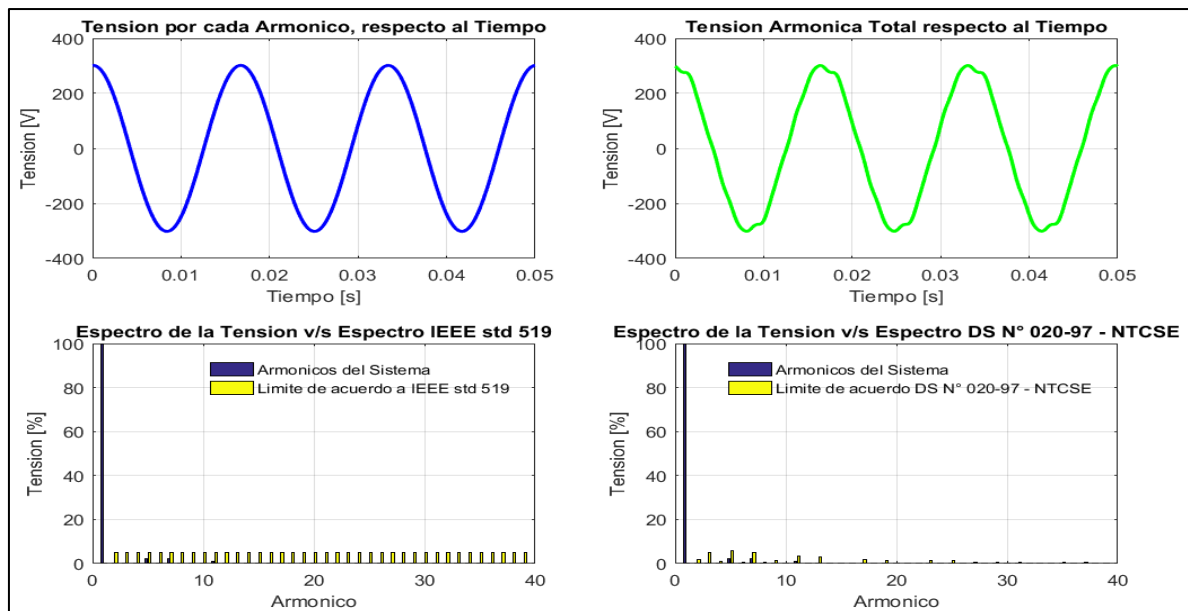


Figura 38: Tensión armónica producida en la barra 03 de la SED 0010921 (a) Voltaje fundamental respecto al tiempo; (b) Tensión armónica total respecto al tiempo; (c) Espectro de la tensión armónica en valores porcentuales v/s el límite establecido en la IEEE std. 519; (d) Espectro de la corriente armónica en valores porcentuales v/s el límite establecido en el DS N° 020-97 – NTCSE

De acuerdo a las Tabla 02 y Tabla 04, la Figura 36 y las Figuras 38 © (d), el THD'V calculado alcanza una magnitud del 3.25775 %, el cual se encuentra dentro de los estándares de la IEEE std 519 y de la NTCSE, que tiene un límite de distorsión total del 8%.

En el sistema se presenta armónicos de voltaje que se encuentran dentro de la norma, por lo que ocasiona que la onda de voltaje este levemente distorsionado, esto debido a la existencia de una red equivalente robusta y las impedancias de la línea y del transformador de distribución, que disminuyen la existencia de los armónicos de voltaje

Respecto a los resultados obtenidos del mismo sistema, en el programa Digsilent se presenta un menor margen de error en los resultados obtenidos, tal como se muestra en las Figuras 38 y 39

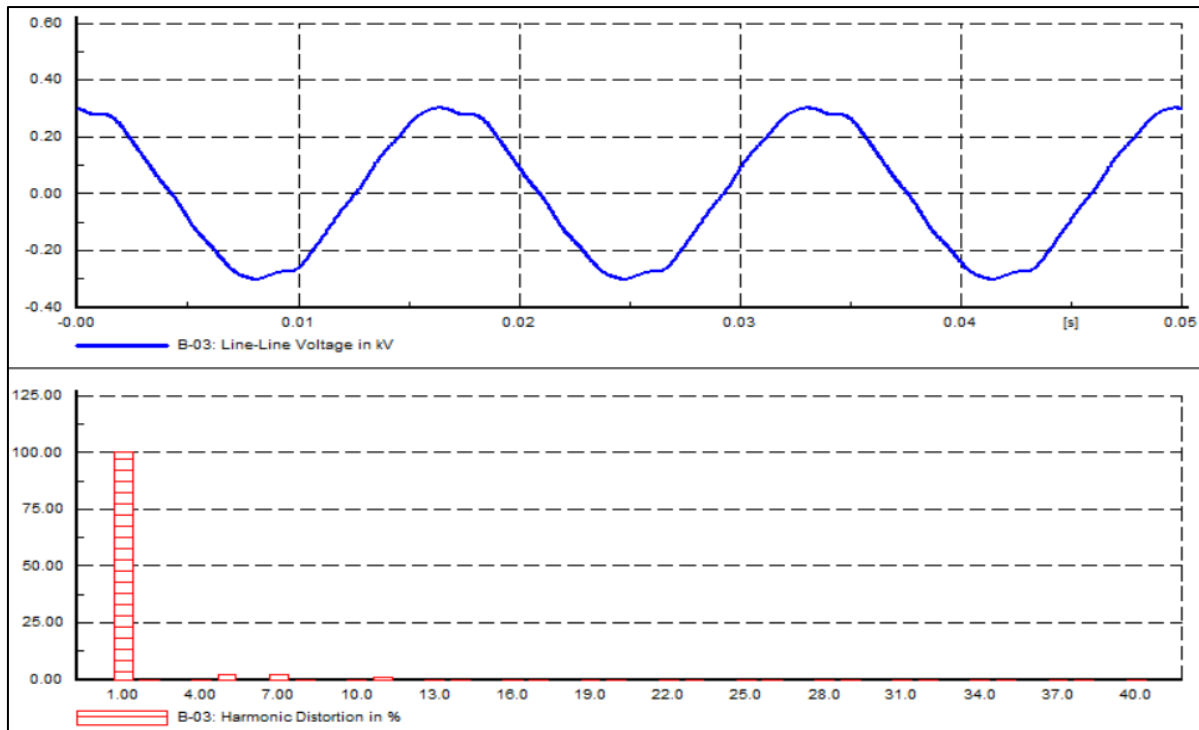


Figura 39: Tensión armónica producida por la SED 0010921 en el programa Digsilent (a) Tensión armónica total respecto al tiempo; (b) Espectro de la tensión armónica en valores eficaces

3.4.6. Características de la contaminación armónicas en la SED 0010921

Si modelamos los principales armónicos producidos en el sistema, respecto a las tensiones, corrientes e impedancia, se muestra la existencia de desfaseamiento entre la tensión armónica y la corriente armónica, teniendo un predominio inductivo las impedancias del sistema a la existencia de frecuencias múltiplos de la fundamental.

Cabe resaltar que la Figura 40, solamente muestra los vectores de las principales armónicas, debido a que tienen la mayor magnitud en el sistema, siendo hasta el armónico 40 simulados en el estudio, pero con poca representatividad para distorsionar la onda de voltaje en el punto de medición.

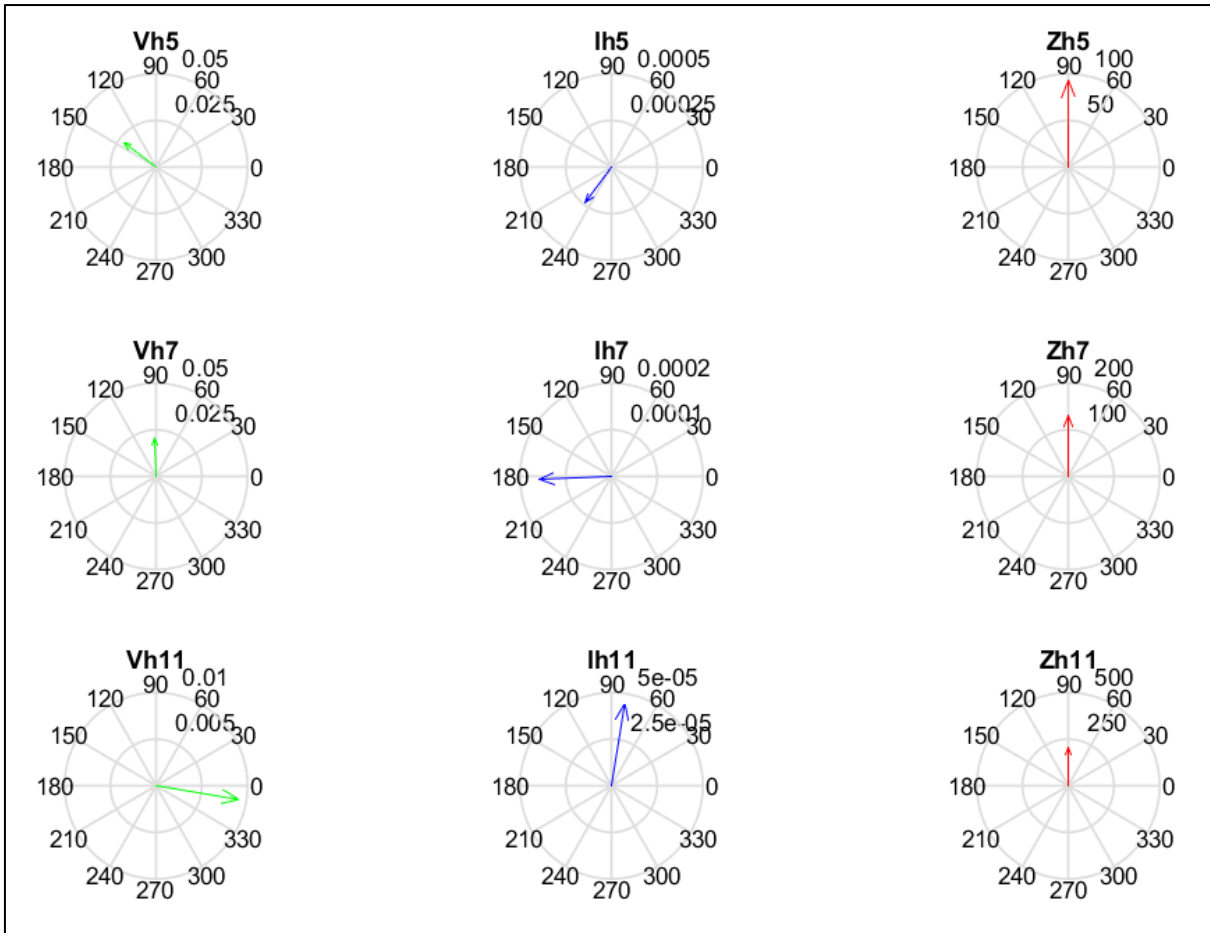


Figura 40: Vectores de los principales armónicos producidos en la SED 0010921
 (a) Voltaje, corriente e impedancia respecto al 5to armónico; (b) Voltaje, corriente e impedancia respecto al 7mo armónico; (c) Voltaje, corriente e impedancia respecto al 11vo armónico

De acuerdo al Capítulo II, la existencia de corrientes y tensiones armónicas, dará como consecuencia la existencia de potencia armónicas, las cuales no afectan a la onda de la potencia aparente total respecto al tiempo, por lo que se considera despreciable la contribución de ellas en los estudios de armónicos.

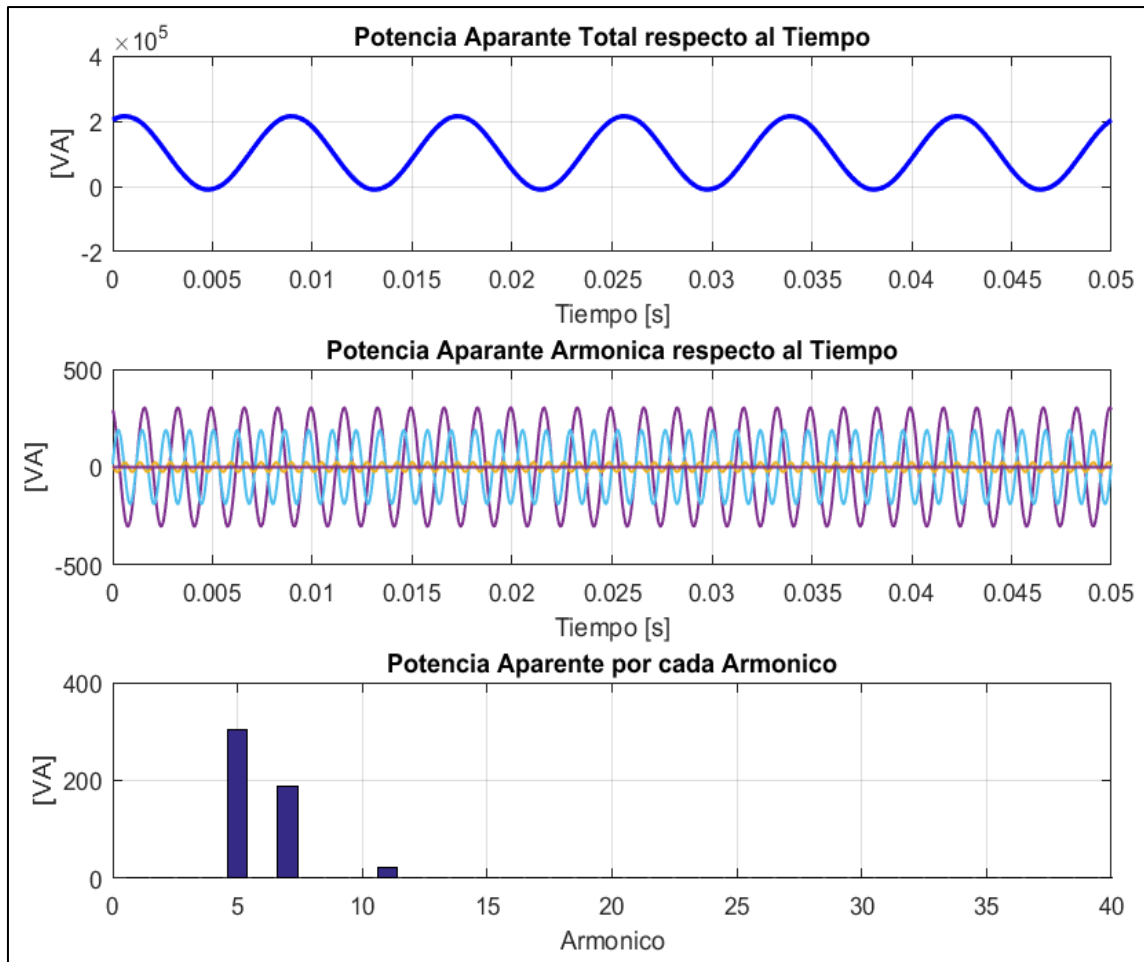


Figura 41: (a) Potencia aparente armónica total producida en la barra 03 de la SED 0010921 (b) Potencia aparente de todos los armónicos producidos en la barra 03 de la SED 0010921; (c) Espectro de la potencia aparente en valores eficaces producidos en la barra 03 de la SED 0010921

CAPÍTULO IV

4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA POR MODIFICACION DE LA MATRIZ JACOBIANA PARA LA REDUCCION DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA SED 0010921

4.1. Introducción

4.2. Diseño de Filtros Pasivos de Simple Sintonizado

Para realizar el diseño del filtro, se toma en cuenta la tensión en el punto de conexión, donde la cantidad de potencia reactiva que se va a compensar debe corregir la magnitud del factor de potencia y luego se tiene que sintonizar el filtro para eliminar o disminuir las señales armónicas no deseadas. Para nuestro caso se reducirá los armónicos 5to y 7mo debido a que presentan las mayores magnitudes, de acuerdo a lo descrito en el Capítulo III.

Para nuestro caso, se calcularán las magnitudes de los capacitores e inductores que se utilizarán como filtros, considerando despreciables las resistencias en los filtros, para ello:

$$X_f = X_C - X_L \quad (73)$$

Donde:

X_f : Representa la impedancia del filtro en ohmios

X_C : Representa la reactancia capacitiva en ohmios

X_L : Representa la reactancia inductiva en ohmios

Para determinar la magnitud de la reactancia capacitiva, se debe adoptar la frecuencia del armónico, de manera de sintonizar el filtro y el valor de la potencia reactiva que se va a compensar, como se muestra la Ecuación 75.

$$X_f = \frac{V^2}{Q_f} \quad (74)$$

$$X_C = \left(\frac{h^2}{h^2 + 1} \right) \cdot X_f = \left(\frac{h^2}{h^2 + 1} \right) \cdot \left(\frac{V^2}{Q_f} \right) \quad (75)$$

Donde:

h : Representa el armónico que se va a filtrar.

V : Representa la tensión eficaz en el punto de conexión

Q_f : Representa la cantidad de potencia reactiva que se requiere para corregir el factor de potencia.

Utilizando el triángulo de potencias para corregir el factor de potencia, de manera que la potencia activa permanezca constante y reducir la potencia reactiva por inyección de potencia reactiva del filtro pasivo (Wakileh, 2001), como se muestra la Figura 42.

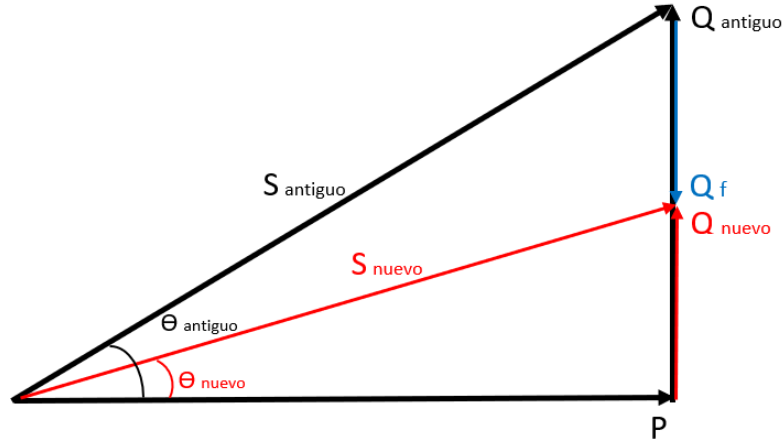


Figura 42: Corrección del Factor de Potencia por Triángulo de Potencias

Esta corrección también se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Q_f = Q_{antiguo} - Q_{nuevo} \quad (76)$$

De acuerdo al triángulo de potencias, se calcula la cantidad de potencia reactiva del sistema, tanto antigua como nueva.

$$Q_{antiguo} = P \cdot \tan \theta_{antiguo} \quad (77)$$

$$Q_{nuevo} = P \cdot \tan \theta_{nuevo} \quad (78)$$

Sustituyendo las Ecuaciones 77 y 78 en la Ecuación 76, obtenemos:

$$Q_f = P \cdot (\tan \theta_{antiguo} - \tan \theta_{nuevo}) \quad (79)$$

Calculado la cantidad de potencia reactiva del filtro, se procede a determinar la reactancia capacitiva, de acuerdo a lo establecido en la Ecuación 75, para luego determinar la magnitud de la reactancia inductiva, mediante la Ecuación 80.

$$X_L = \frac{X_C}{h^2} \quad (80)$$

Con los valores de las reactancias capacitivas e inductivas, se puede calcular la magnitud de las capacitancias e inductancias del filtro, mediante las siguientes Ecuaciones:

$$C = \frac{1}{2\pi f \cdot X_c} \quad (81)$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (82)$$

Donde:

C : Representa la capacitancia en Faradios

L : Representa la inductancia en Henrios

f : Representa la frecuencia fundamental

Utilizando las Ecuaciones 81 y 82 para determinar la magnitud de las inductancia y capacitancias de los filtros de 5ta y 7ma armonica en funcion de la Ecuación 79, cuyo factor de potencia a corregir es igual a 0.98.

Bajo estas premisas se obtuvo para el filtro del 5to armónico una inductancia de 0.2356 [mH] y una capacitancia de 1.1948 [mF] que inyecta una potencia reactiva de 22.709 KVAR para la frecuencia fundamental y para el 7mo armónico se obtuvo una inductancia de 0.1178 [mH] y una capacitancia de 1.2192 [mF] que inyectan una potencia de 22.709 KVAR (50% por cada filtro).

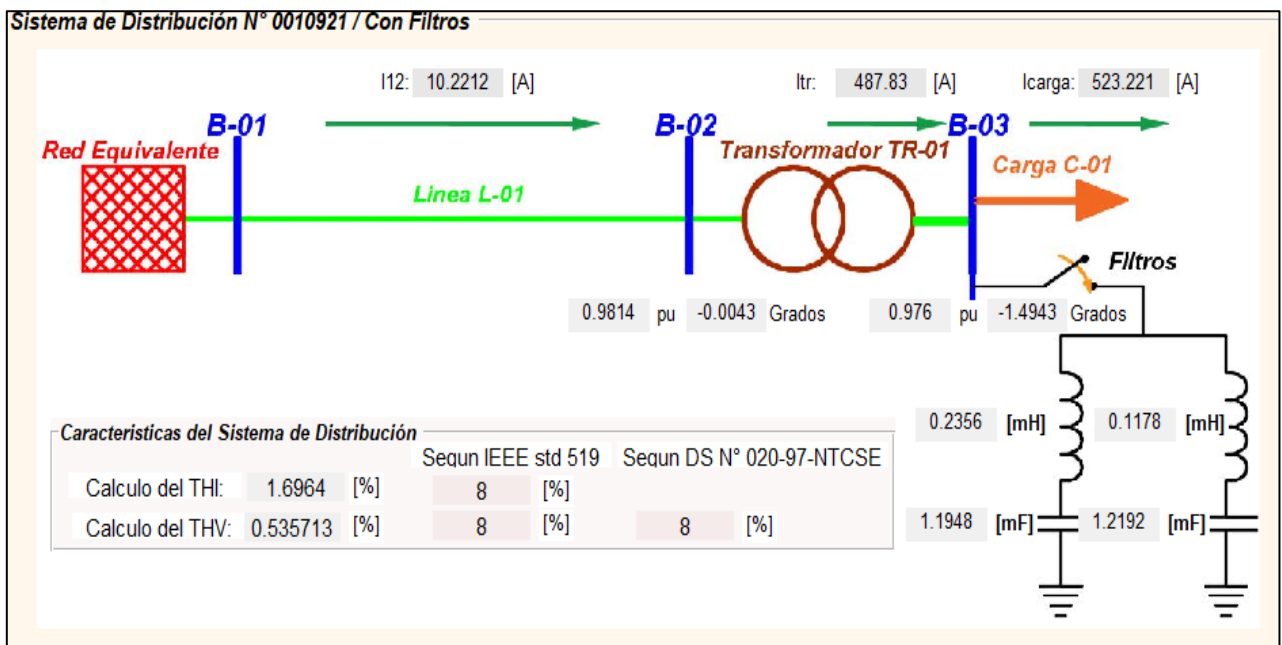


Figura 43: Algoritmo desarrollado en el programa Matlab, para la reducción de los armónicos de corriente y voltaje, mediante la modificación de la matriz Jacobiana

De acuerdo a la Figura 44 (a) y (b), se produce la mínima impedancia y un ángulo de impedancia igual a cero a una frecuencia de 300 [Hz], mientras que la Figura 44 (c) y (d), se produce la mínima impedancia y un ángulo de impedancia igual a cero a una frecuencia de 420 [Hz], que encausan las corrientes armónicas hacia el filtro y no hacia el sistema.

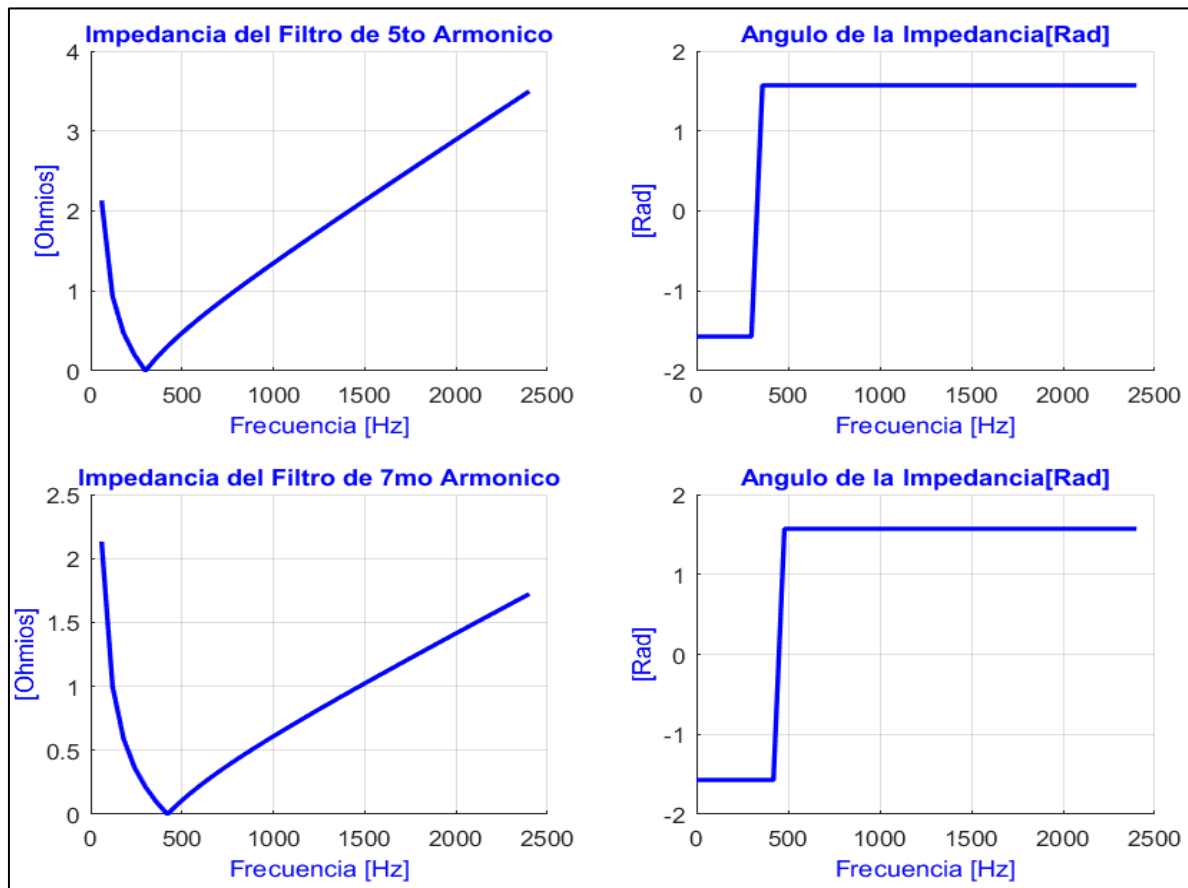


Figura 44: Características de los filtros: (a) Módulo de la impedancia del filtro de 5ta armónica; (b) Ángulo de la impedancia del filtro de la 5ta armónica; (c) Módulo de la impedancia del filtro de 7ma armónica; (d) Ángulo de la impedancia del filtro de la 7ma armónica

4.3. Modificación de la Matriz Jacobiana

Una vez obtenido las impedancias de los filtros pasivos, se procede a modificar la Ecuación de la potencia reactiva, donde se incluya la cantidad de potencia reactiva inyectado por las nuevas impedancias shunt (impedancias en paralelo) dando como

consecuencia, el incremento de la tensión en la nodo de conexión y de esta forma controlando el nivel de distorsion armonica producida por la carga.

Cabe resaltar, que existe un fuerte enlace entre el módulo de la tensión en el punto de conexión (variable de estado) y la potencia reactiva, donde la inyección de potencia reactiva puede modelarse por la siguiente Ecuación

$$Q_i^{shunt} = V_i^2 y_i \quad (83)$$

Donde:

Q_i^{shunt} : Potencia reactiva inyectada por el filtro en el nodo i

V_i : Módulo de la tensión en el punto de conexión del filtro, respecto al nodo i

y_i : Magnitud de la admitancia del filtro, en el nodo i

Esta inyección de potencia, modificará la Ecuación 66 en el nodo i , por lo que se puede reescribir esta Ecuación como:

$$Q_i^{modificado} = Q_i^{Cal} + |V_i|^2 y_i \quad (84)$$

Donde:

$Q_i^{modificado}$: Potencia reactiva modificada en el nodo i

Q_i^{Cal} : Potencia reactiva del nodo i .

Como se logra observar en la Ecuación 84, la nueva inyección de potencia reactiva, modificará el módulo de la tensión, el cual representa la variable de estado desconocida en el nodo, por lo que debe incluirse dentro de la matriz jacobiana tradicional que es utilizado en la Ecuación 70, en otras palabras se producira un incremento en las derivadas parciales de la potencia reactiva respecto al módulo de tensión (Espinoza & Espinoza, 2020), el cual puede ser representado por:

$$\frac{\partial Q_i^{modificado}}{\partial |V|_i} = \frac{\partial Q_i^{Cal}}{\partial |V|_i} + 2|V_i| \cdot y_i \quad (85)$$

Modificando la matriz jacobiana, de acuerdo a la Ecuación 85, tenemos:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial V_i} & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \\ \frac{\partial Q_i^{modificado}}{\partial |V|_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta |V_i| \\ \Delta \theta_i \end{bmatrix} \quad (86)$$

En la Figura 45 (b) se muestra la influencia de la potencia reactiva inyectada por los filtros, donde tambien se ve afectados las derivadas parciales de las potencias respecto a los módulos de tensión de las barras.

<i>Matriz Jacobiana Tradicional</i>				
	d V 2	d V 3	dØ2	dØ3
dP2	4.31602	0.00183	1.93427	-0.06795
dP3	-0.00181	-0.00183	-0.06795	0.06795
dQ2	1.97096	-0.07007	-4.23567	-0.00178
dQ3	-0.06924	0.06845	0.00178	-0.00178

<i>Matriz Jacobiana Modificada</i>				
	d V 2	d V 3	dØ2	dØ3
dP2	4.31619	0.00182	1.93441	-0.0684
dP3	-0.00181	-0.00182	-0.0684	0.0684
dQ2	1.97104	-0.07008	-4.23599	-0.00178
dQ3	-0.06969	0.06846	0.00178	-0.00178

Figura 45: (a) *Matriz Jacobiana Tradicional sin Filtro*; (b) *Matriz Jacobiana Modificada con Filtro*

Entre una de las características de la inyección se observa incremento del módulo de voltaje en el nodo 03, mientras que el nodo 02 no sufre mayores cambios a excepcion del ángulo del voltaje en esta barra.

4.4. Características del Sistema con la Modificación de la Matriz Jacobiana

Con la conexión de los dos filtros pasivos, existirá una redirección de las corrientes armónicas de la 5ta y la 7ma hacia los filtros, de manera que la corriente armónica total respecto al tiempo se ve modificada, Figura 46 (b), reduciendo considerablemente la distorsión armónica.

Con referencia al espectro armónico de las corrientes en funciones de los valores eficaces y los valores porcentuales, se encuentran dentro de los límites permitidos del estándar de la IEEE std 519, principalmente en los armónicos que se encontraban fuera del estándar.

Con relación a la distorsión armónica Total de la corriente, se redujo en 1.6964 %, ocasionando un error absoluto respecto al programa Digsilent 15.1.7 igual al 2.7204 % teniendo en cuenta que el límite permitido de acuerdo al estándar std 519 es igual a 8.00 %.

Otra de las ventajas de la utilización de los filtros, es que, a una frecuencia fundamental, la corriente que alimenta la red equivalente hacia la carga es de 487.83 [A], el cual traerá una reducción en la cantidad de pérdidas y cargabilidades en los elementos de distribución.

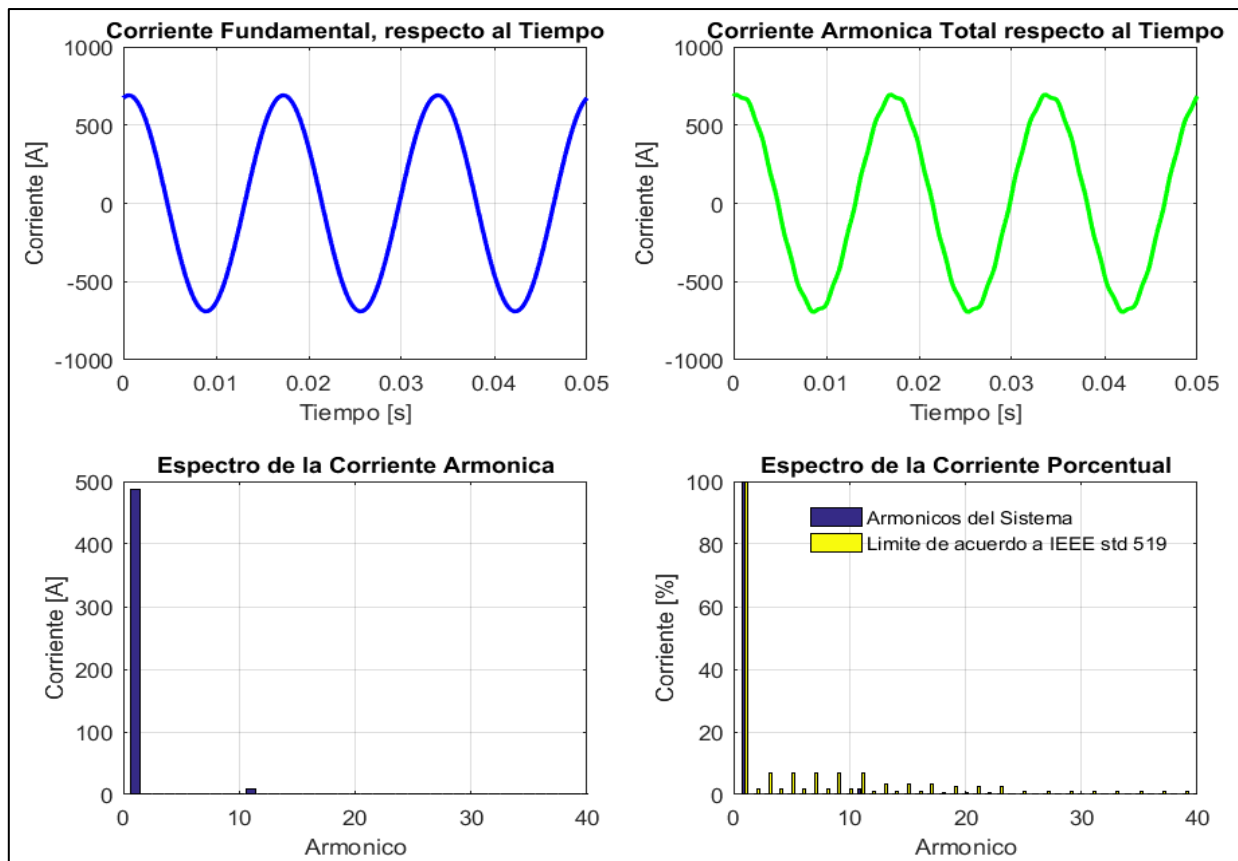


Figura 46: Corriente armónica reducida en la SED 0010921 (a) Corriente fundamental respecto al tiempo; (b) Corriente armónica total respecto al tiempo; (c) Espectro de la corriente armónica en valores eficaces; (d) Espectro de la corriente armónica en valores porcentuales v/s el límite establecido en la IEEE std. 519.

En comparación de las Figuras 47 (a) y (b) se logra observar la reducción de las tensiones respecto al tiempo en la barra 03, tras la inyección de corrientes armónicas debida a la carga, donde la performance de la onda es cosenoidal.

En cuanto al espectro de las tensiones armónicas porcentuales, con relación a los límites permitidos en la NTCSE y el estándar de la IEEE std 519, todos los

armónicos se encuentran dentro de la norma y adicionalmente se muestra una reducción considerativa respecto a los armónicos producidos en el sistema, sin filtro, como logra observarse en la Figura 38 © y (d).

De la misma manera el THD'V alcanzó una magnitud del 0.535713%, con la conexión de los filtros, teniendo una reducción del 83.555% respecto al sistema sin filtro. Además, se tiene un margen de error del 2.746% respecto al cálculo del THD'V en el programa Digsilent 15.1.7

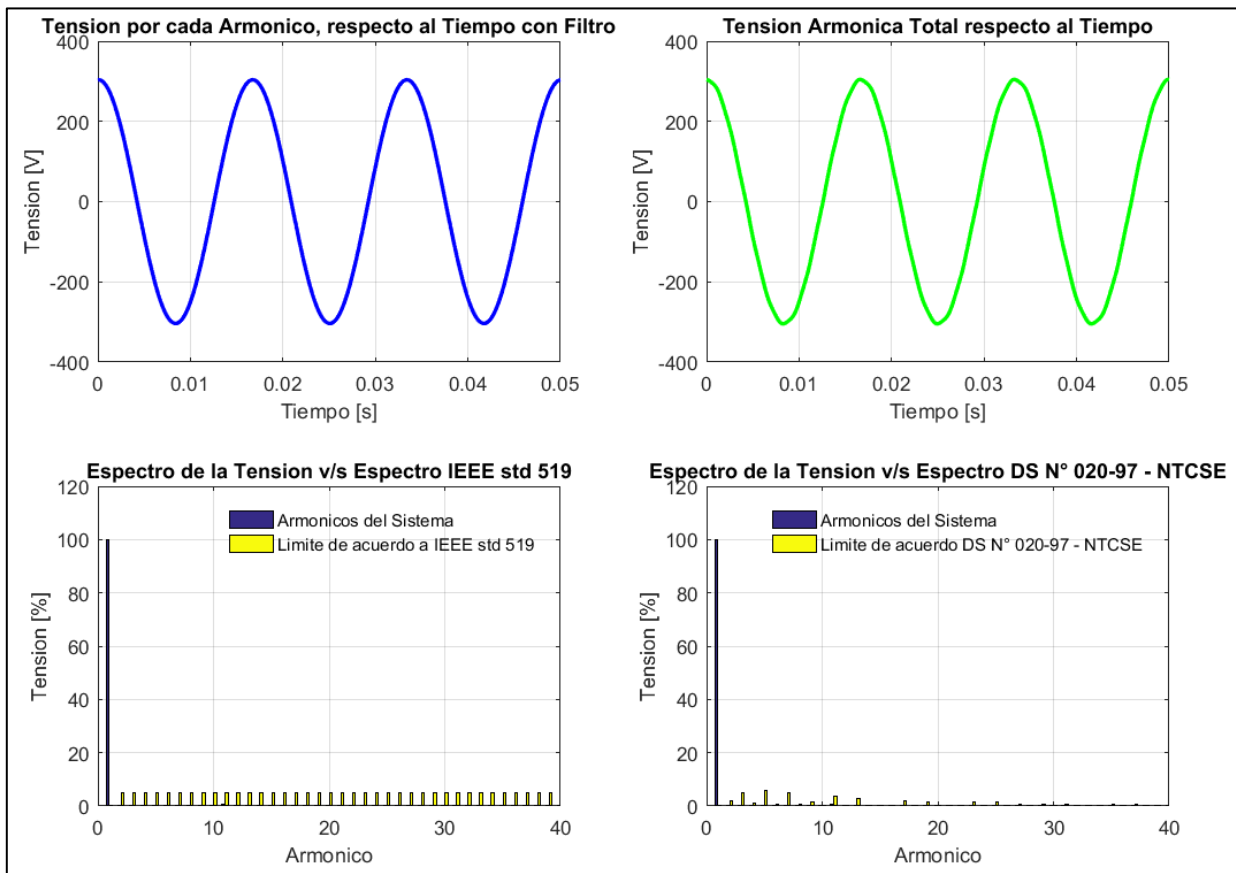


Figura 47: Tensión en la barra 03 de la SED 0010921 con la conexión de filtros pasivos (a) Voltaje fundamental respecto al tiempo; (b) Tensión armónica total respecto al tiempo; (c) Espectro de la tensión armónica en valores porcentuales v/s el límite establecido en la IEEE std. 519; (d) Espectro de la corriente armónica en valores porcentuales v/s el límite establecido en el DS N° 020-97 – NTCSE

De acuerdo a los resultados obtenidos, la utilización de filtros ayuda a controlar e incrementar el nivel de tensión en el nodo de conexión, además de una inyección de potencia reactiva, el cual produce una reducción en el flujo de potencia desde la

red equivalente hacia la carga, dando como consecuencia, la reducción en las pérdidas de potencia activa y reactiva en la línea de distribución y el transformador reductor de tensión, debido a que este parámetro depende de la cantidad de corriente que fluya a través del sistema.

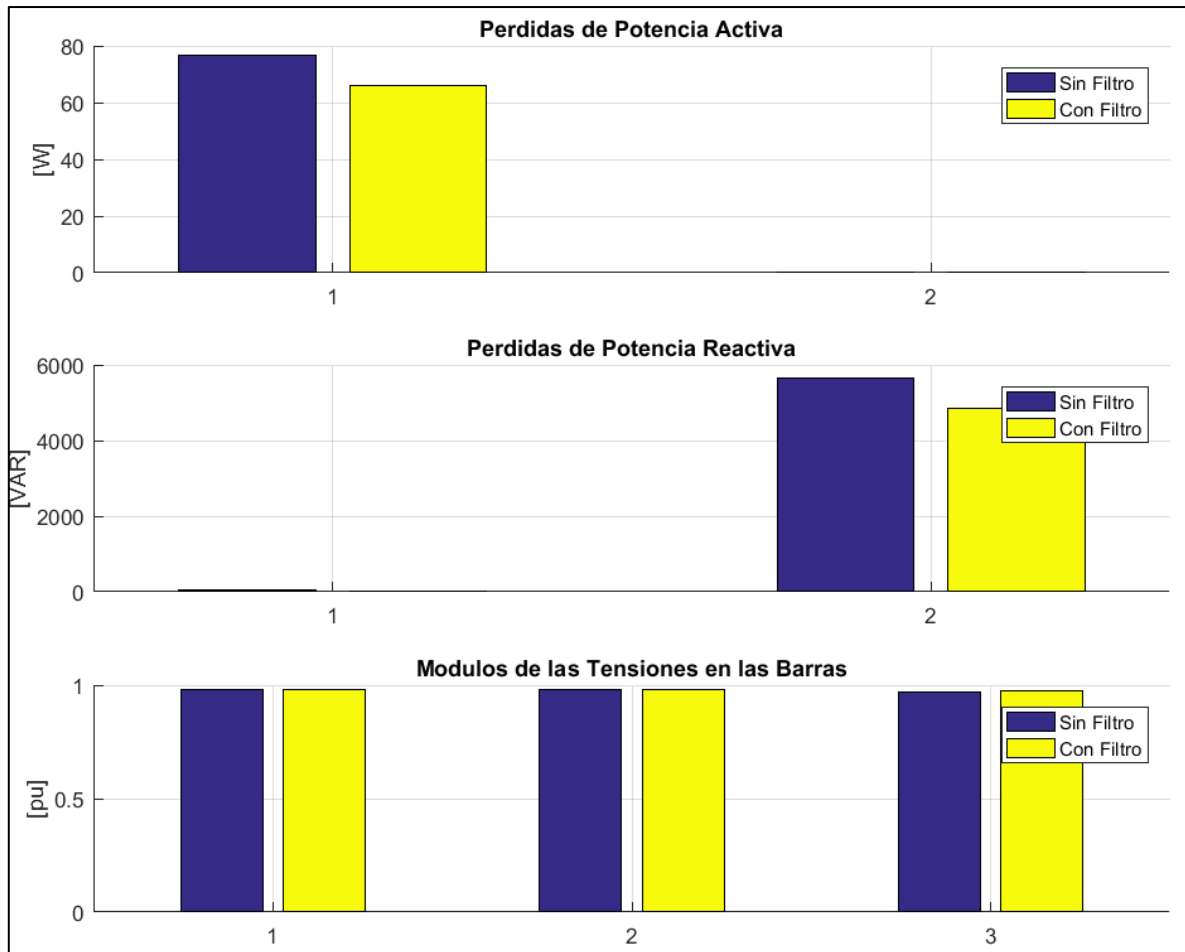


Figura 48: Comparación de resultados, respecto a la utilización de filtros: (a) *Perdidas de Potencia Activa en los elementos de distribución* (b) *Perdidas de Potencia Reactiva en los elementos de distribución* (c) *Tensiones en los nodos del sistema*

De las Figuras 48 (a) y (b), el sub índice 1 representa a la línea de distribución y el sub índice 2 representa al transformador de distribución, donde el transformador no produce pérdidas de potencia activa, debido a que se consideró el modelo equivalente en el cálculo del flujo de potencia (representado por una sola reactancia inductiva).

4.5. Diagrama de Flujo del Algoritmo Desarrollado

Para el desarrollo del algoritmo en Matlab, se utilizó el diagrama de flujo mostrado en la Figura 49, cuyo procedimiento se detalla a continuación:

- i. Se cargan los datos del sistema como: son las tensiones de las barras, datos de la línea de distribución, datos del transformador, datos de la red equivalente.
- ii. Se determina la máxima demanda a partir del perfil de carga del diagrama de flujo de la Figura 33.
- iii. Se escoge los valores iniciales de los módulos de tensión y los ángulos de las tensiones en las barras del sistema.
- iv. Se diseña los filtros shunt para los armónicos 5to y 7mo
- v. Se grafica las características de los filtros a frecuencia de sintonización.
- vi. Se estima las potencias calculadas de los elementos de distribución a partir de los valores iniciales de las variables de estado y de las admitancias de los filtros
- vii. Se determina la matriz de admitancia a partir de los datos del sistema
- viii. Se inicia el proceso iterativo con $k=0$
- ix. Se calcula la matriz Jacobiana modificada, con la inyección de potencia reactiva del filtro.
- x. Se calcula el vector de errores de las potencias conocidas por tipo de barra
- xi. Se compara el margen de error del vector de errores, con las tolerancias asumidas.
- xii. Si el margen de error es menor a la tolerancia, se concluye el proceso y se procede al cálculo de los flujos de potencia y la cantidad de potencia que entrega la red equivalente
- xiii. Si el margen de error es mayor a la tolerancia, se continua con el proceso iterativo, donde se calcula la matriz Jacobiana, tomando los valores escogidos.
- xiv. A partir del vector de errores y la matriz Jacobiana modificada se calcula el vector de las variaciones de estado de los módulos de tensión y los ángulos de las barras del sistema.
- xv. Se actualiza las variables de estado

- xvi. Se incrementa el número de iteraciones en $k+1$
- xvii. Con la determinación de las variables de estado, se calcula la corriente a través de los elementos de distribución a frecuencia fundamental
- xviii. Se calcula las corrientes armónicas individuales y el THD'I con filtro
- xix. Se calcula las tensiones armónicas individuales y el THD'V con filtro
- xx. Se compara los resultados obtenidos en el sistema sin filtro y con filtro respecto a las tensiones en los nodos y cantidad de pérdidas producidas en los elementos de distribución.

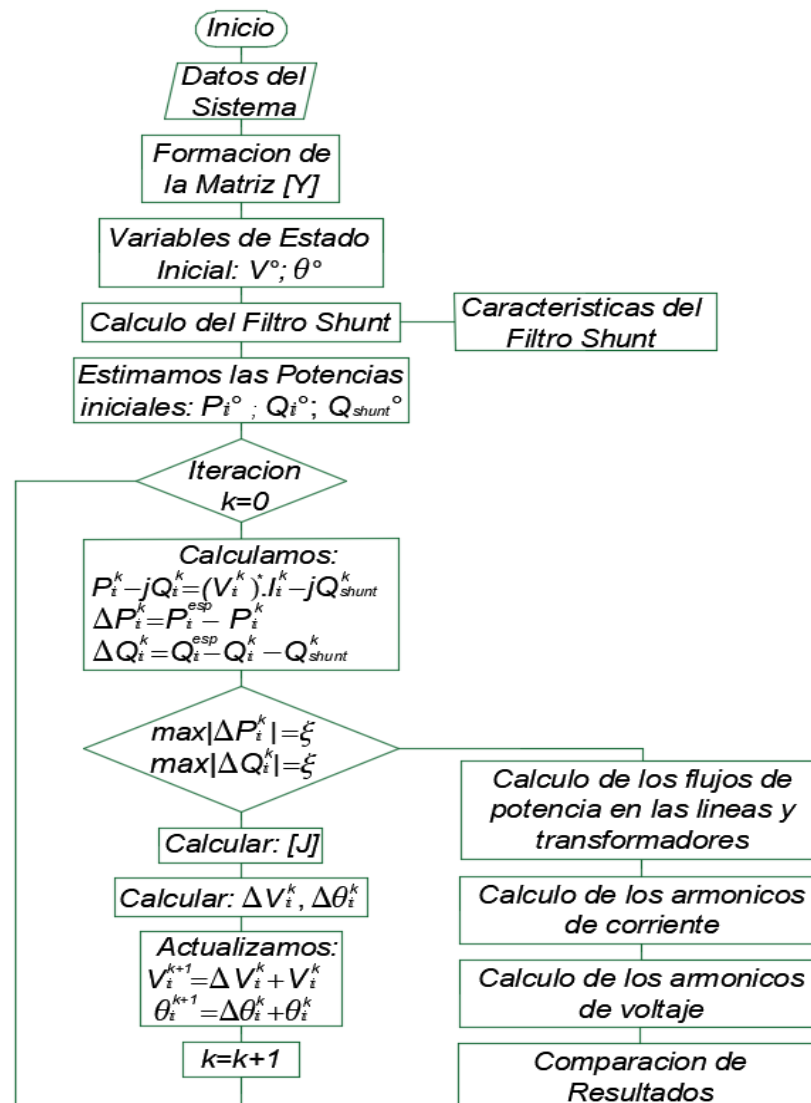


Figura 49: Diagrama de Flujo para determinar el control de voltaje y los armónicos en Sistemas de Distribución con Filtros Pasivos.

CONCLUSIONES

1. La distorsión armónica producida en la SED 0010921 se puede reducir de manera efectiva mediante la propuesta de modificación de la matriz jacobiana, esta propuesta permite modelar con mayor precisión el comportamiento del sistema eléctrico frente a las corrientes y tensiones armónicas generadas por cargas no lineales, A través de su implementación en un algoritmo desarrollado en MATLAB, se logró diseñar filtros pasivos que disminuyen significativamente los niveles de THD tanto en voltaje como en corriente. teniendo un decremento del 83.555% en el THD'V y un decremento del 88.1872% en el THD'I.
2. El cálculo de los armónicos de voltaje en la SED 0010921, en función de las corrientes armónicas producidas por cargas no lineales, se logró de manera eficiente mediante la propuesta de modificación de la matriz Jacobiana. Este enfoque permitió establecer una relación entre las corrientes distorsionadas y las tensiones armónicas generadas. A través del desarrollo de un algoritmo en MATLAB, se implementó esta metodología, proporcionando resultados que facilitaron la identificación y cuantificación de los armónicos de voltaje.
3. La utilización del estándar de la IEEE std 519, permitió identificar las corrientes armónicas individuales que superaron el 7% de su valor eficaz (5ta y 7ma armónica), con un THD'I igual al 14.3608% (superior al 8 % del estándar), mientras que los armónicos de voltaje se encuentran dentro de los límites permitidos. Por otro lado, la NTCSE no estipula nada sobre la distorsión armónica de corriente, a diferencia de la distorsión armónica de voltaje individual y total, el cual también se encuentra dentro del limite permitido.
4. La inyección de potencia reactiva producida por el filtro, permitió incrementar la magnitud de la tensión en el nodo de conexión, al igual que una absorción de las corrientes armónicas producidas por las cargas no lineales, los cuales ayudaron a modificar la matriz Jacobiana, en relación de las derivadas parciales de la potencia reactiva respecto a los módulos de tensión

RECOMENDACIONES

1. A los estudiantes de la escuela profesional de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de San Antonio de Abad del Cusco se les recomienda validar el desempeño del algoritmo desarrollado en MATLAB con otras mediciones que se tengan, para corroborar los resultados obtenidos del THD'I y el THD'V.
2. Se recomienda a los estudiantes de la escuela profesional de Ingeniería Eléctrica a Diseñar y construir físicamente los filtros pasivos propuestos en el modelo evaluando su efectividad y considerando las condiciones dinámicas del sistema eléctrico.
3. Se recomienda a los estudiantes de la escuela profesional de Ingeniería Eléctrica desarrollar un plan de mantenimiento predictivo que utilice simulaciones similares para anticipar problemas de distorsión armónica en redes eléctricas.
4. Se recomienda a los estudiantes de la escuela profesional de Ingeniería Eléctrica realizar un análisis detallado del costo de implementación de los filtros pasivos frente a sus beneficios en términos de reducción de armónicos y mejora de la calidad de energía.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta Montoya, A. (2014). *Analisis de Sistemas Electricos de Potencia* (2da Edicio). Ediciones de la U. www.edicionesdelau.com
- Ariei, S. L. . (2008). *Transient analysis of electric power circuits handbook* (2da Editio). Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/0-387-28799-X>
- Balci, M. E., Ozturk, D., Karacasu, O., & Hocaoglu, M. H. (2008). Experimental verification of harmonic load models. *Proceedings of the Universities Power Engineering Conference*, 2–5. <https://doi.org/10.1109/UPEC.2008.4651607>
- Brameller, A. (1992). Computer Methods in Power System Analysis. In *The International Journal of Electrical Engineering & Education* (Vol. 10, Issue 3, pp. 229–229). McGraw-Hill. <https://doi.org/10.1177/002072097201000312>
- Caceres Espinoza, J., & Caceres Espinoza, L. (2021). Índices De Estabilidad De Voltaje Calculados a Partir Del Flujo De Potencia Continuado. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 5(6), 12068–12081. <https://doi.org/10.37811/rcm.v5i6.1216>
- Cinto Martinez, J. (2019). *Estudio de flujo armónico de cargas en sistemas electricos utilizando el paquete informmatico MATPOWER* [Universitat Politecnica de Catalunya]. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/179446/Volumen1_Memoria.pdf
- COES. (2012). *Procedimiento para la aplicacion del numeral 3.5 de la NTCSE*. <https://www.coes.org.pe/Portal/PostOperacion/EvaluacionFallas/>
- IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, 2014 IEEE Std 519-2014 (2014). <https://ieeexplore.ieee.org/document/6826459>
- Das, J. C. (2017a). Power System Analysis; short-circuit load flow and harmonics. In C. Press (Ed.), *Power System Analysis*. <https://doi.org/10.1201/b11021>
- Das, J. C. (2017b). Power System Analysis: Short-Circuit Load Flow and Harmonics. In *Marcel Dekker* (Second Edi). Marcel Dekker.

<https://doi.org/10.1201/b11021>

- De La Rosa, F. C. (2006). Harmonics and Power Systems. In Francis Group (Ed.), *Harmonics and Power Systems*. Taylor&Francis. <https://doi.org/10.1201/9781420004519>
- Eghtedarpour, N., Karimi, M. A., & Tavakoli, M. (2014). Harmonic resonance in power systems - A documented case. *Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP*, 857–861. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2014.6842806>
- Espinoza, J. C., & Espinoza, L. C. (2020). Voltage Control , By Reactive Power Injection. *Academic Star*, 6(6), 708–714. [https://doi.org/10.15341/mese\(2333-2581\)/06.06.2020/009](https://doi.org/10.15341/mese(2333-2581)/06.06.2020/009)
- Fabian Malvaceda, D. O., & Christian, P. F. R. (2019). *Estudio de los Armónicos y sus efectos en los Transformadores de Potencia* [Universidad Tecnológica del Perú]. <https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/2316>
- Farrag, M. E., Haggag, A., Farooq, H., & Ali, W. (2017). Analysis and mitigation of harmonics caused by air conditioners in a distribution system. *2017 19th International Middle-East Power Systems Conference, MEPCON 2017 - Proceedings, 2018-Febru(December)*, 702–707. <https://doi.org/10.1109/MEPCON.2017.8301258>
- Garcés, A., Galvis, J., & Gallego, R. (2004). Flujo de carga armónico para sistemas radiales. *Scientia et Technica*, 25, 65–70. https://r.search.yahoo.com/_ylt=AwrEo7skUjlmhgorCsFU04lQ;_ylu=Y29sbwNiZjEEcG9zAzEEdnRpZAMEc2VjA3Ny/RV=2/RE=1715061413/RO=10/RU=https%3A%2F%2Fdialnet.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F4838695.pdf/RK=2/RS=s2iYLtcEPKgeXcKFlaYkFgmbUFI-
- Genovez Ramirez, K. G. (2018). Modelo y analisis de armónicos en sistemas de distribución. In *Lola Malverde*.
- Ghorbani, J. (2011). Nonlinear Loads Effect on Harmonic Distortion and Losses of Distribution. *26th International Power System Conference, January*, 12. <https://doi.org/10.13140/2.1.5047.3288>
- Gómez Expósito, A., Martínez Ramos, J., Rosendo Macías, J., Romero Ramos,

- E., & Riquelme Santos, J. (2003). *Sistemas Eléctricos de Potencia* (Pearson Educacion (ed.); 3ra Edicio). Pretince Hall.
https://www.academia.edu/32037985/Sistemas_Electricos_de_Potencia_Exposito
- Grainger j., J., & Stevenson J., W. D. (2017). Analisis de sistemas de potencia. In *McGraw Hill* (Vol. 4, Issue 1). McGraw Hill.
https://www.academia.edu/7276069/Análisis_de_Sistemas_de_Potencia_John_J_Grainger_William_D_Stevenson
 - IEEE Guide for application and specification of harmonic filters, Pub. L. No. IEEE Std 1531-2003, 69 (2003). <https://ieeexplore.ieee.org/document/9336377>
 - Meitei, N. M., Tamang, D., & Gao, S. (2021). A new harmonic analysis reporting technique to improve power quality in distribution system network applications. *Proceedings of the 2021 1st International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communications and Sustainable Technologies, ICAECT 2021*.
<https://doi.org/10.1109/ICAECT49130.2021.9392540>
 - Mohamed, H. A. (2015). Approach Method to Evaluate the Total Harmonic Distortion for a System Has Multiple Nonlinear Loads. *International Journal of Engineering Research*, 4(11), 618–624. <https://doi.org/10.17950/ijer/v4s11/1109>
 - Norma Tecnica de Calidad de los Servicios Electricos, Diario Oficial El Peruano 65 (1997). <https://www.gob.pe/institucion/osinergmin/normas-legales/738550-020-97-em>
 - Pérez Abril; Ignacio. (2012). Cálculo de parámetros de filtros pasivos de armónicos. *Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba, XXXIII(1815–5901)*, 134–143.
 - R. Pinto Do N. (2009). *Propuesta de Procedimientos para Proyectar los Filtros Armónicos a partir de un Programa de Penetracion de Armónicos, Incluyendo Calculos de Desempeño y de Soportabilidad*.
 - Sergio, S. R. N. (2007). *Evaluacion de Filtros Electromagneticos y Sintonizados LC para Minimizacion de Corrientes de Secuencia Cero en los Sistemas de Distribucion*. Universidad Federal de Uberlandia.
 - Stevenson J., W. D. (1994). *Elements of Power System Analysis* (4ta Editio).

McGraw-Hill. <https://archive.org/details/elementsofpowers0000stev>

- Su, W., Li, Z., & Shao, Z. (2014). The harmonic calculation model of non-linear load. *China International Conference on Electricity Distribution, CICED, 2014-Decem(Ciced)*, 866–872. <https://doi.org/10.1109/CICED.2014.6991832>
- Wakileh, G. J. (2001). Power Systems Harmonics: Fundamentals analysis and filter design. In Springer (Ed.), *Springer* (2da Editio). <https://link.springer.com/10.1007/978-3-662-04343-1>

RELACION DE ANEXOS

Anexo 01: Fotografías Subestacion de Distribucion 0010921

Figura 50: *Subestacion 0010921*



Figura b).



Figura c).



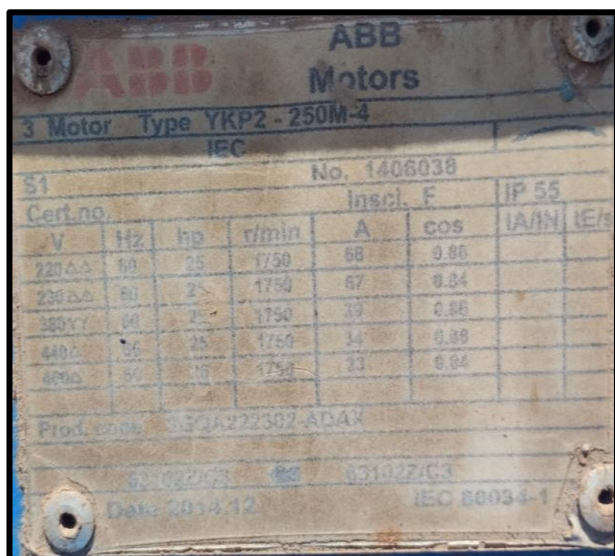
Anexo 02: Principales Cargas no Lineales en la Subestacion de Distribución

0010921.

Figura 51: Cortadora.



Figura 52: Faja Transportadora.





Anexo 03: Algoritmo desarrollado en el programa MATLAB 2016.a

```
function varargout = Programa_RY(varargin)
global Pdcm Qdem iaht ipu imódulo iangle xpu vbase sfuente zbase
ibase V del iahtf an1 an2;
global angArm zabs zangle ti1 ti v3 v3ang i3abs i3ang impe iarmo
varmo imax2 Pd Qd sbase;
global lineas barras Xfeq G B nb yfeq deman icarga L5 L7 C5 C7 ipuar
dell rango vconmo vconan vIEEE;
global vSTD vbl jaco;
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn',   @Programa_RY_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',    @Programa_RY_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',    [], ...
                  'gui_Callback',     []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Programa_RY is made visible.
function Programa_RY_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)
% THD'Is function has no output args, see OutputFcn.
% hObject      handle to figure
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin     command line arguments to Programa_RY (see VARARGIN)

% Choose default command line output for Programa_RY
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
% Colocamos la Grafica del sistema de Prueba
axes(handles.axes1)
[xc,map]=imread('Sistema.jpg','jpg');
image(xc);
colormap(map);
axis off
hold on
axes(handles.axes2)
```

```

[xc,map]=imread('LOGO.png','png');
image(xc);
colormap(map);
axis off
hold on
axes(handles.axes3)
[xc,map]=imread('Sistema_LC.jpg','jpg');
image(xc);
colormap(map);
axis off
hold on
axes(handles.axes4)
[xc,map]=imread('Tradicional.jpg','jpg');
image(xc);
colormap(map);
axis off
hold on
axes(handles.axes5)
[xc,map]=imread('Modificado.jpg','jpg');
image(xc);
colormap(map);
axis off
hold on
% --- Outputs from THD's function are returned to the command line.
function varargout = Programa_RY_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
% varargout    cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject      handle to figure
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;
function etVb1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to etVb1 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of etVb1 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of etVb1
as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function etVb1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to etVb1 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function etVb2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to etVb2 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of etVb2 as text
%           str2double(get(hObject,'String')) returns contents of etVb2
as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function etVb2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to etVb2 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function etVb3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to etVb3 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of etVb3 as text
%           str2double(get(hObject,'String')) returns contents of etVb3
as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function etVb3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to etVb3 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function etRlinea_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to etRlinea (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of etRlinea as text
%           str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
etRlinea as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function etRlinea_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to etRlinea (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

```

```

%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function etStrafo_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to etStrafo (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of etStrafo as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
etStrafo as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function etStrafo_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to etStrafo (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function etValta_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to etValta (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of etValta as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
etValta as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function etValta_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to etValta (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function etXt_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to etXt (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of etXt as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of etXt
as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```

```

function etXt_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to etXt (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function etVbaja_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to etVbaja (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of etVbaja as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
etVbaja as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function etVbaja_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to etVbaja (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function etXlinea_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to etXlinea (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of etXlinea as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
etXlinea as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function etXlinea_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to etXlinea (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function etActiva_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to stActiva (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of stActiva as text
%           str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
stActiva as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function stActiva_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to stActiva (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function etReactiva_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to stReactiva (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of stReactiva as text
%           str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
stReactiva as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function stReactiva_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to stReactiva (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function etSred_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to etSred (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of etSred as text
%           str2double(get(hObject,'String')) returns contents of etSred
as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function etSred_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to etSred (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

```

```

        set(hObject,'BackgroundColor','white');
    end
    function etVred_Callback(hObject, eventdata, handles)
    % hObject      handle to etVred (see GCBO)
    % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
    % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
    % Hints: get(hObject,'String') returns contents of etVred as text
    %          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of etVred
    as a double
    % --- Executes during object creation, after setting all properties.
    function etVred_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
    % hObject      handle to etVred (see GCBO)
    % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
    % handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
    called
    % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
    %          See ISPC and COMPUTER.
    if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
    get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
        set(hObject,'BackgroundColor','white');
    end
    % --- Executes on button press in pbFlujo.
    function pbFlujo_Callback(hObject, eventdata, handles)
    global Pdem Qdem iaht ipu imódulo iangle xpu vbase sfuente zbase
    ibase V del iahtf anl an2;
    global angArm zabs zangle til ti v3 v3ang i3abs i3ang impe iarmo
    varmo imax2 Pd Qd sbase;
    global lineas barras Xfeq G B nb yfeq deman icarga L5 L7 C5 C7 ipuar
    dell rango vconmo vconan vIEEE;
    global vSTD vb1 jaco;
    % Buscamos los valores de los voltajes base
    vbase1=get(handles.etVb1,'String');
    vbase1=str2num(vbase1);
    vbase2=get(handles.etVb2,'String');
    vbase2=str2num(vbase2);
    vbase3=get(handles.etVb3,'String');
    vbase3=str2num(vbase3);
    % Buscamos los datos de la Red Equivalente
    Sred=get(handles.etSred,'String');
    Sred=str2num(Sred);
    Vred=get(handles.etVred,'String');
    Vred=str2num(Vred);
    % Buscamos los datos del transformador
    Straf=get(handles.etStrafo,'String');
    Straf=str2num(Straf);
    Vprim=get(handles.etValta,'String');
    Vprim=str2num(Vprim);
    Vsec=get(handles.etVbaja,'String');
    Vsec=str2num(Vsec);
    Xtrf=get(handles.etXt,'String');
    Xtrf=str2num(Xtrf);
    % Buscamos los Datos de la Lineas de Distribucion

```

```

Rlinea=get(handles.etRlinea,'String');
Rlinea=str2num(Rlinea);
Xlinea=get(handles.etXlinea,'String');
Xlinea=str2num(Xlinea);
% Buscamos la demanda antes del Proceso
%PActiva=get(handles.stActiva,'String');
%PActiva=str2num(PActiva);
%QReactiva=get(handles.stReactiva,'String');
%QReactiva=str2num(QReactiva);
%Pdem=PActiva;
%Qdem=QReactiva;
%-----
%          de      hasta      R              X              Strafo (MVA)
lineas=[ 1        2        Rlinea          Xlinea          0;
         2        3        0              Xtrf/100        Straf];

%          barra      tensión (KV)      Pd (MW)      Qd (MVAR)
barras=[ 1          vbase1              0          0;
         2          vbase2              0          0;
         3          vbase3              Pdem      Qdem];
sfuente=Sred*10^6; % Potencia de la fuente en MVA
%=====
de=lineas(:,1);
has=lineas(:,2);
r=lineas(:,3);
xpru=lineas(:,4);
rpru=zeros(length(xpru),1);
x=complex(rpru,xpru);
stf=lineas(:,5)*10^6;
sbase=100*10^6;
ba=barras(:,1);
v=barras(:,2)*1000;
nl=length(de);
nb=length(ba);
vb=zeros(nl,1);
Pd=barras(:,3)*10^6/sbase;
Qd=barras(:,4)*10^6/sbase;.
PQ=-1*[max(Pd);max(Qd)];
V=[Vred;1 ;1];
del=[0 ;0 ; 0];
vac=Vred;
npq=2;
zbase=zeros(nl,1);
ibase=zeros(nl,1);
xpu=zeros(nl,1);
% Esta valor se obtiene en comparacion de la vb
for i=1:nl
    for j=1:nb
        if de(i)==ba(j)
            vb(i)=v(j);
        end
    end
end

```

```

end
vb;
% Correccion del valor base
for i=2:nl
    for j=1:nb
        if has(i)==ba(j)
            vb(i)=v(j);
        end
    end
end
vbase=vb;
% Determinamos la impedancia base y la corriente base
for i=1:nl
    zbase(i)=(vbase(i))^2/sbase;
    ibase(i)=sbase/(sqrt(3)*vbase(i));
end
zbase;
ibase;
% Determinamos las impedancias en pu para transformadores
for k=1:nl
    xpu(k)=x(k)*(sbase/stf(k));
end
xpu;
% Determinamos las impedancias en pu de las lineas
for n=1:nl
    if stf(n)==0
        xpu(n)=(r(n)+x(n))/(zbase(n));
    end
end
xpu;
% Determinamos la matriz de admitancias en pu
ypu=zeros(nl,1);
for i=1:nl
    ypu(i)=1/xpu(i);
end
ypu;
% Determinamos la matriz de admitancias / Elementos fuera de la
diagonal
ybus=zeros(nb,nb);
for i=1:nl
    ybus(de(i),has(i))=-1*ypu(i);
    ybus(has(i),de(i))=ybus(de(i),has(i));
end
ybus;
for i=1:nb
    for j=1:nl
        if de(j)==i
            ybus(i,i)=ybus(i,i)+ypu(j,1);
        elseif has(j)==i
            ybus(i,i)=ybus(i,i)+ypu(j,1);
        end
    end
end
end

```

```

end
ybus;
G=real(ybus);
B=imag(ybus);
Tol = 1;
Iter = 1;
while (Tol > 1e-5)
    P = zeros(nb,1);
    Q = zeros(nb,1);
    for i = 1:nb
        for k = 1:nb
            P(i) = P(i) + V(i)* V(k)*(G(i,k)*cos(del(i)-del(k)) +
B(i,k)*sin(del(i)-del(k)));
            Q(i) = Q(i) + V(i)* V(k)*(G(i,k)*sin(del(i)-del(k)) -
B(i,k)*cos(del(i)-del(k)));
        end
    end
    P;
    Q;
    dPa = -1*Pd-P;
    dQa = -1*Qd-Q;
    dP=dPa(2:nb);
    dQ=dQa(2:nb);
    M = [dP; dQ];
%-----
    JP2V2=V(1)*(G(2,1)*cos(del(2)-del(1))+B(2,1)*sin(del(2)-
del(1)))+2*V(2)*G(2,2)+V(3)*(G(2,3)*cos(del(2)-
del(3))+B(2,3)*sin(del(2)-del(3)));
    JP2V3=V(2)*(G(2,3)*cos(del(2)-del(3))+B(2,3)*sin(del(2)-del(3)));
    JP3V2=V(3)*(G(3,2)*cos(del(3)-del(2))+B(3,2)*sin(del(3)-del(2)));
    JP3V3=V(1)*(G(3,1)*cos(del(3)-del(1))+B(3,1)*sin(del(3)-
del(1)))+V(2)*(G(3,2)*cos(del(3)-del(2))+B(3,2)*sin(del(3)-
del(2)))+2*V(3)*G(3,3);
%-----
    JP2T2=V(2)*V(1)*(-G(2,1)*sin(del(2)-del(1))+B(2,1)*cos(del(2)-
del(1)))+V(2)*V(3)*(-G(2,3)*sin(del(2)-del(3))+B(2,3)*cos(del(2)-
del(3)));
    JP2T3=V(2)*V(3)*(G(2,3)*sin(del(2)-del(3))-B(2,3)*cos(del(2)-
del(3)));
    JP3T2=V(2)*V(3)*(G(3,2)*sin(del(3)-del(2))-B(3,2)*cos(del(3)-
del(2)));
    JP3T3=V(3)*V(1)*(-G(3,1)*sin(del(3)-del(1))+B(3,1)*cos(del(3)-
del(1)))+V(2)*V(3)*(-G(3,2)*sin(del(3)-del(2))+B(3,2)*cos(del(3)-
del(2)));
%-----
    JQ2V2=V(1)*(G(2,1)*sin(del(2)-del(1))-B(2,1)*cos(del(2)-del(1)))-
2*V(2)*B(2,2)+V(3)*(G(2,3)*sin(del(2)-del(3))-B(2,3)*cos(del(2)-
del(3)));
    JQ2V3=V(2)*(G(2,3)*sin(del(2)-del(3))-B(2,3)*cos(del(2)-del(3)));
    JQ3V2=V(3)*(G(3,2)*sin(del(3)-del(2))-B(3,2)*cos(del(3)-del(2)));

```

```

JQ3V3=V(1)*(G(3,1)*sin(del(3)-del(1))-B(3,1)*cos(del(3)-
del(1)))+V(2)*(G(3,2)*sin(del(3)-del(2))-B(3,2)*cos(del(3)-del(2))-
2*V(3)*B(3,3);
%-----
JQ2T2=V(2)*V(1)*(G(2,1)*cos(del(2)-del(1))+B(2,1)*sin(del(2)-
del(1)))+V(2)*V(3)*(G(2,3)*cos(del(2)-del(3))+B(2,3)*sin(del(2)-
del(3)));
JQ2T3=-V(2)*V(3)*(G(2,3)*cos(del(2)-del(3))+B(2,3)*sin(del(2)-
del(3)));
JQ3T2=V(2)*V(3)*(-G(3,2)*cos(del(3)-del(2))-B(3,2)*sin(del(3)-
del(2)));
JQ3T3=V(3)*V(1)*(G(3,1)*cos(del(3)-del(1))+B(3,1)*sin(del(3)-
del(1)))+V(2)*V(3)*(G(3,2)*cos(del(3)-del(2))+B(3,2)*sin(del(3)-
del(2)));
% Determinamos la matriz Jacobiana
jaco=[JP2V2 JP2V3 JP2T2 JP2T3;JP3V2 JP3V3 JP3T2 JP3T3;JQ2V2 JQ2V3
JQ2T2 JQ2T3;JQ3V2 JQ3V3 JQ3T2 JQ3T3];
% Correccion del vector de estado
xx=inv(jaco)*M;
% suma del vector de estado con la correccion de estado
V=V+[0;xx(1:2)];
del=del+[0;xx(3:4)];
% comparacion de la tolerancia
Iter = Iter + 1;
Tol = max(abs(M));
Tol1(Iter)=Tol;
end
V;
del;
jaco;
set(handles.stV2,'String',round(V(2),4));
set(handles.stV3,'String',round(V(3),4));
set(handles.stTheta2,'String',round(del(2)*180/3.14159265,4));
set(handles.stTheta3,'String',round(del(3)*180/3.14159265,4));
ipu=(V(1)-V(3)*(cos(del(3))+sqrt(-1)*sin(del(3)))/(xpu(1)+xpu(2));
ire=ibase*ipu;
ni=length(ire);
imódulo=zeros(ni,1);
iangle=zeros(ni,1);
for i=1:ni
    imódulo(i)=sqrt((real(ire(i)))^2+(imag(ire(i)))^2);
    iangle(i)=atan((imag(ire(i)))/(real(ire(i))));
end
imódulo;
iangle;
set(handles.stI12,'String',round(imódulo(1),4));
set(handles.stIcar,'String',round(imódulo(2),4));
% Valores de la matrzi jacobiana tradicional
set(handles.stJ1,'String',round(jaco(1,1),5));
set(handles.stJ2,'String',round(jaco(1,2),5));
set(handles.stJ3,'String',round(jaco(1,3),5));
set(handles.stJ4,'String',round(jaco(1,4),5));

```

```

set(handles.stJ5,'String',round(jaco(2,1),5));
set(handles.stJ6,'String',round(jaco(2,2),5));
set(handles.stJ7,'String',round(jaco(2,3),5));
set(handles.stJ8,'String',round(jaco(2,4),5));
set(handles.stJ9,'String',round(jaco(3,1),5));
set(handles.stJ10,'String',round(jaco(3,2),5));
set(handles.stJ11,'String',round(jaco(3,3),5));
set(handles.stJ12,'String',round(jaco(3,4),5));
set(handles.stJ13,'String',round(jaco(4,1),5));
set(handles.stJ14,'String',round(jaco(4,2),5));
set(handles.stJ15,'String',round(jaco(4,3),5));
set(handles.stJ16,'String',round(jaco(4,4),5));

% --- Executes on button press in pbDatos.
function pbDatos_Callback(hObject, eventdata, handles)
global Pdem Qdem iaht ipu imódulo iangle xpu vbase sfuente zbase
ibase V del iahtf anl an2;
global angArm zabs zangle til ti v3 v3ang i3abs i3ang impe iarmo
varmo imax2 Pd Qd sbase;
global lineas barras Xfeq G B nb yfeq deman icarga L5 L7 C5 C7 ipuar
dell rango vconmo vconan vIEEE;
global vSTD vbl;
proceP=xlsread('SED_0010921.xlsx','POTENCIA','f2:f1009');
pt1=proceP;
% Procesamiento de las potencias por días
ncox=(length(pt1))/144; % Determina el numero de columnas
nfix=144; % Determina el numero de filas
pi=zeros(nfix,ncox);
kf=0;
for j=1:ncox
    for i=1:nfix
        kf=kf+1;
        pi(i,j)=pt1(kf);
    end
end
pi;
tlx=1:nfix;
figure (1)
subplot(4,1,1)
plot(tlx,pi,'LineWidth',1.5)
grid on
title('Potencia Activa, respecto al Tiempo')
ylabel('Potencia [W]');
xlabel('Tiempo en minutos [m]');
set(gcf,'color','w')
% Procesamiento de las potencias por valores maximos
pix=zeros(24,ncox);
for j=1:ncox
    ka=0;
    kb=5;
    for i=1:24
        pix(i,j)=max(pi(i+ka:i+kb,j));
    end
end

```

```

        ka=ka+5;
        kb=kb+5;
    end
end
pix;
t1xx=1:24;
%=====
amax=max(pix);
xmax=max(amax);
xmin=min(amax);
xprom=(xmax+xmin)/2;
xdif=abs(amax-xprom);
dmin=find(xdif==min(xdif));
xdese=max(amax(:,dmin));
%=====
pmax=zeros(24,1);
for i=1:24
    pmax(i)=xdese;
end
pmax;
subplot(4,1,2)
plot(t1xx,pix,'LineWidth',1.5)
hold on
plot(t1xx,pmax)
grid on
title('Potencia Activa Maxima, respecto al Tiempo')
ylabel('Potencia [W]');
xlabel('Tiempo en horas [h]');
piy=zeros(24,ncox);
for j=1:ncox
    ka=0;
    kb=5;
    for i=1:24
        piy(i,j)=mean(pi(i+ka:i+kb,j));
        ka=ka+5;
        kb=kb+5;
    end
end
piy;
subplot(4,1,3)
plot(t1xx,piy,'LineWidth',1.5)
hold on
plot(t1xx,pmax)
grid on
title('Potencia Activa Promedio, respecto al Tiempo')
ylabel('Potencia [W]');
xlabel('Tiempo en horas [h]');
subplot(4,1,4)
plot(t1xx,pix(:,dmin),'b','LineWidth',2)
grid on
title('Potencia Activa Maxima Comun');
ylabel('Potencia [W]'),

```

```

xlabel('Tiempo en horas [h]');
Pdem=max(pix(:,dmin))/10^6;
set(handles.stActiva,'String',Pdem);
Qdem=0.078828415;
set(handles.stReactiva,'String',Qdem);
%=====
% maxima demanda
enc=find(pt1==xdese);
iahx=xlsread('SED_0010921.xlsx','CORRIENTE','A2:AN1009');
iah=iahx(enc,:);
iaht=iah*100/iah(1); % Corriente armonica porcentual - valor medido
%=====
function etI12_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to stI12 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of stI12 as text
%           str2double(get(hObject,'String')) returns contents of stI12
as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function stI12_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to stI12 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function etIcar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to stIcar (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of stIcar as text
%           str2double(get(hObject,'String')) returns contents of stIcar
as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function stIcar_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to stIcar (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes on button press in pbAcorriente.
function pbAcorriente_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

global Pdem Qdem iaht ipu imódulo iangle xpu vbase sfuente zbase
ibase V del iahtf an1 an2;
global angArm zabs zangle til ti v3 v3ang i3abs i3ang impe iarmo
varmo imax2 Pd Qd sbase;
global lineas barras Xfeq G B nb yfeq deman icarga L5 L7 C5 C7 ipuar
del1 rango vconmo vconan vIEEE;
global vSTD vbl;
%=====
imax=(sqrt(2))*imódulo;
% Determinamos los armónicos por cada area del sistema
%-----
% Para la zona 02
imax2=(imax(2))*(iaht/100);
% Eliminacion de los armónicos multiplos de 3
imax2(3)=0;imax2(6)=0;imax2(9)=0;imax2(12)=0;imax2(15)=0;imax2(18)=0;
imax2(21)=0;
imax2(24)=0;imax2(27)=0;imax2(30)=0;imax2(33)=0;imax2(36)=0;imax2(39)
=0;
%-----
% Para la zona 01
imax1=(imax(1))*(iaht/100);
% Eliminacion de los armónicos multiplos de 3
imax1(3)=0;imax1(6)=0;imax1(9)=0;imax1(12)=0;imax1(15)=0;imax1(18)=0;
imax1(21)=0;
imax1(24)=0;imax1(27)=0;imax1(30)=0;imax1(33)=0;imax1(36)=0;imax1(39)
=0;
% Eliminamos las mediciones armonicas multiplos de 3
iaht1=iaht;
iahtf=iaht1;
iahtf(3)=0;iahtf(6)=0;iahtf(9)=0;iahtf(12)=0;iahtf(15)=0;iahtf(18)=0;
iahtf(21)=0;
iahtf(24)=0;iahtf(27)=0;iahtf(30)=0;iahtf(33)=0;iahtf(36)=0;iahtf(39)
=0;
%=====
dfg1=0;
for i=2:an2
    dfg1=dfg1+iahtf(i)*iahtf(i);
end
dfg1;
THD'I1=(1./iahtf(1))*sqrt(dfg1)*100;
set(handles.stTHD'I,'String',THD'I1);
% Comparacion de la norma respecto al THD'I
THD'I_IEEE=8.000;
set(handles.stIEcorri,'String',THD'I_IEEE);
%=====
ti=0:0.00001:0.05;
til=ti';
an1=length(til); % numero de filas de la matriz armónicos
an2=length(imax2); % numero de columnas de la matriz armónicos
iarmo=zeros(an1,an2); % matriz armonica
angArm=zeros(an2,1);
for i=1:an2

```

```

        for j=1:an1
            iarmo(j,i)=imax2(i)*cos(120*3.14159265*ti1(j)*i+iangle(1)*i);
            angArm(i)=iangle(1)*i;
        end
    end
    iarmo; % Corriente armonica respecto al tiempo
    angArm; % Ángulo de los 40 armónicos
    figure (2)
    subplot(2,2,1)
    plot(ti,iarmo(:,1),'b','LineWidth',2)
    grid on
    title('Corriente Fundamental, respecto al Tiempo')
    ylabel('Corriente [A]');
    xlabel('Tiempo [s]');
    set(gcf,'color','w')
    %=====
    iarmo1=zeros(an1,1);
    for i=1:an1
        for j=1:an2
            iarmo1(i,1)=iarmo1(i,1)+iarmo(i,j);
        end
    end
    iarmo1;
    subplot(2,2,2)
    plot(ti,iarmo1,'g','LineWidth',2)
    grid on
    title('Corriente Armonica Total respecto al Tiempo')
    ylabel('Corriente [A]');
    xlabel('Tiempo [s]');
    subplot(2,2,3)
    bar(1:40,imax2/sqrt(2))
    grid on
    title('Espectro de la Corriente Armonica')
    ylabel('Corriente [A]');
    xlabel('Armónico');
    xlim([0 40]);
    %=====
    % Calculamos las impedancias por cada armónico
    impe=zeros(an2,1); % Calculamos la impedancia cartesiana en pu por
    cada armónico
    zabs=zeros(an2,1); % Módulo de la impedancia polar en pu por cada
    armónico
    zangle=zeros(an2,1); % Ángulo de la impedancia polar en pu por cada
    armónico
    zfuente=vbase(1)^2/sfuente;
    zfpu=(zfuente/zbase(1))*sqrt(-1);
    %%%%%%%%%%%%%%%
    %
    for i=1:an2
        impe(i)=real(xpu(1)+xpu(2))+imag(xpu(1)+xpu(2)+zfpu)*i*sqrt(-1);
        zabs(i)=abs(impe(i));
        zangle(i)=atan(imag(impe(i))/real(impe(i)));
    end

```

```

end
impe;
zabs;
zangle;
%%%% Corriente de Cortocircuito
icc=(V(1)*cos(del(3))+sqrt(-1)*V(1)*sin(del(3)))/impe(1);
iccl=abs(icc)*ibase(2); % Corriente de cortocircuito real
%=====
% Calculamos la corriente estandar
istan=iccl/imódulo(2);
% -----
% De | Hasta | h < 11 | 11 < h < 17 | 17 < h < 23 | 23 < h < 35 | 35 < h < 40
inorma=[ 1 19 4 2 1.5 0.6 0.3;
20 50 7 3.5 2.5 1.0 0.5;
51 100 10 4.5 4.0 1.5 0.7;
101 1000 12 5.5 5.0 2.0 1.0;
1001 10000 15 7.0 6.0 2.5 1.4];
nx1=length(inorma(:,1));
for i=1:nx1
    if inorma(i,1)<= istan && inorma(i,2)>=istan
        irango=inorma(i,:);
    end
end
irango;
irango1=irango(1,3:7);
rango=zeros(an2,1);
rango(1)=100;
for i=2:11
    if mod(i,2)==0
        rango(i)=irango1(1)*0.25;
    else
        rango(i)=irango1(1);
    end
end
for i=12:17
    if mod(i,2)==0
        rango(i)=irango1(2)*0.25;
    else
        rango(i)=irango1(2);
    end
end
for i=18:23
    if mod(i,2)==0
        rango(i)=irango1(3)*0.25;
    else
        rango(i)=irango1(3);
    end
end
for i=24:35
    if mod(i,2)==0
        rango(i)=irango1(4)*0.25;
    else

```

```

        rango(i)=irango1(4);
    end
end
for i=36:40
    if mod(i,2)==0
        rango(i)=irango1(4)*0.25;
    else
        rango(i)=irango1(4);
    end
end
rango;
ieee1=[iahtf,rango];
subplot(2,2,4)
bar(1:40,ieee1)
grid on
title('Espectro de la Corriente Porcentual')
ylabel('Corriente [%]');
xlabel('Armónico');
legend({'Armónicos del Sistema','Limite de acuerdo a IEEE std 519'});
xlim([0 40]);
legend boxoff
% --- Executes on button press in pbVolt.
function pbVolt_Callback(hObject, eventdata, handles)
global Pdem Qdem iaht ipu imódulo iangle xpu vbase sfuente zbase
ibase V del iahtf an1 an2;
global angArm zabs zangle til ti v3 v3ang i3abs i3ang impe iarmo
varmo imax2 Pd Qd sbase;
global lineas barras Xfeq G B nb yfeq deman icarga L5 L7 C5 C7 ipuar
dell rango vconmo vconan vIEEE;
global vSTD vbl;
%=====
% grafica de la tensión en funcion del tiempo
%=====
i3=ipu*iahtf/100;
i3abs=zeros(an2,1);
i3ang=zeros(an2,1);
% llamamos la corriente en pu (ipu) y el porcentaje de corriente
(iahtf)
for k=1:an2
    i3abs(k)=abs(i3(k));
    i3ang(k)=angArm(k);
end
i3abs; % módulo de corriente en pu, por cada armónico
i3ang; % ángulo de corriente, por cada armónico
%-----
% Calculamos la tensión por cada armonica en pu de la barra 3
v3=zeros(an2,1);
v3ang=zeros(an2,1);
% corregimos la tensión fundamental en el primer elemento de la
matriz
v3(1)=V(3);
v3ang(1)=del(3);

```

```

for i=2:an2 % tensiones por cada armónico sin considerar la
fundamental
    v3(i)=zabs(i)*i3abs(i);
    v3ang(i)=2*3.14159265-(zangle(i)-i3ang(i));
end
v3; % módulo de tensión en pu de los 40 armónicos
v3ang; % ángulo de tensión respecto a los 40 armónicos
varmo=zeros(an1,an2);
for i=1:an2
    for j=1:an1

varmo(j,i)=v3(i)*sqrt(2)*vbase(2)*cos(120*3.14159265*ti1(j)*i+v3ang(i
));
        end
    end
varmo;
%-----
% Calculo del THD'V
dgv1=0;
for i=2:an2
    dgv1=dgv1+(v3(i)*vbase(2)).^2;
end
dgv1;
THD'V1=(1./(v3(1)*vbase(2)))*sqrt(dgv1)*100;
set(handles.stTHD'V,'String',THD'V1);
% Comparacion de la norma IEEE respecto al THD'V
THD'V_IEEE=8.000;
set(handles.stIEVol,'String',THD'V_IEEE);
% Comparacion de la NTCSE respecto al THD'V
THD'V_NTCSE=8.00;
set(handles.stNTVol,'String',THD'V_NTCSE);
%-----
figure (3)
subplot(2,2,1)
plot(ti,varmo(:,1),'b','LineWidth',2)
grid on
title('Tensión por cada Armónico, respecto al Tiempo');
ylabel('Tensión [V]');
xlabel('Tiempo [s]');
set(gcf,'color','w')
%-----
-----
% calculamos la tensión armonica total
varmol=zeros(an1,1);
for i=1:an1
    for j=1:an2
        varmol(i,1)=varmol(i,1)+varmo(i,j);
    end
end
varmol;
subplot(2,2,2)
plot(ti,varmol,'g','LineWidth',2)

```

```

grid on
title('Tensión Armonica Total respecto al Tiempo');
ylabel('Tensión [V]');
xlabel('Tiempo [s]');
%%%=====
% Respecto a la IEEE std 519 para V < 1 kV
vIE=5; % Porcentaje permitido del voltaje de acuerdo a norma
vIEEE=zeros(an2,1);
for i=2:an2
    vIEEE(i)=vIE;
end
vIEEE;
% Respecto a la NTCSE 020-97 para V < 60 kV
vSTD1=[0,2,5,1,6,0.5,5,0.5,1.5,0.2,3.5,0.2,3,0.2,0.3,0.2,2,0.2,1.5,0.
2];
vSTD2=[0.2,0.2,1.5,0.2,1.5,0.2,0.6629,0.2,0.631,0.2,0.6032,0.2,0.2,0.
2,0.557,0.2,0.537,0.2,0.2,0.2];
vSTD=[vSTD1,vSTD2]';
vrep=100*v3*vbase(2)/(v3(1)*vbase(2)); % Voltaje real porcentual
subplot(2,2,3)
bar(1:40,[vrep,vIEEE]);
grid on
title('Espectro de la Tensión v/s Espectro IEEE std 519')
ylabel('Tensión [%]');
xlabel('Armónico');
legend({'Armónicos del Sistema','Limite de acuerdo a IEEE std 519'});
legend boxoff
xlim([0 40]);
subplot(2,2,4)
bar(1:40,[vrep,vSTD]);
grid on
title('Espectro de la Tensión v/s Espectro DS N° 020-97 - NTCSE')
ylabel('Tensión [%]');
xlabel('Armónico');
legend({'Armónicos del Sistema','Limite de acuerdo DS N° 020-97 -
NTCSE'});
legend boxoff
xlim([0 40]);
% --- Executes on button press in pbPrincipal.
function pbPrincipal_Callback(hObject, eventdata, handles)
global Pdem Qdem iaht ipu imódulo iangle xpu vbase sfuente zbase
ibase V del iahtf an1 an2;
global angArm zabs zangle til ti v3 v3ang i3abs i3ang impe iarmo
varmo imax2 Pd Qd sbase;
global lineas barras Xfeq G B nb yfeq deman icarga L5 L7 C5 C7 ipuar
dell rango vconmo vconan vIEEE;
global vSTD vbl;
%=====
v3tot=zeros(an2,1);
i3tot=zeros(an2,1);
for i=1:an2
    v3tot(i)=v3(i)*cos(v3ang(i))+v3(i)*sqrt(-1)*sin(v3ang(i));

```

```

        i3tot(i)=i3abs(i)*cos(i3ang(i))+i3abs(i)*sqrt(-1)*sin(i3ang(i));
end
v3tot;
i3tot;
figure (4)
subplot(3,3,1)
compass(real(v3tot(5)),imag(v3tot(5)),'g');
title('Vh5')
set(gcf,'color','w')
subplot(3,3,2)
compass(real(i3tot(5)),imag(i3tot(5)),'b');
title('Ih5')
subplot(3,3,3)
compass(real(impe(5)),imag(impe(5)),'r');
title('Zh5')
subplot(3,3,4)
compass(real(v3tot(7)),imag(v3tot(7)),'g');
title('Vh7')
subplot(3,3,5)
compass(real(i3tot(7)),imag(i3tot(7)),'b');
title('Ih7')
subplot(3,3,6)
compass(real(impe(7)),imag(impe(7)),'r');
title('Zh7')
subplot(3,3,7)
compass(real(v3tot(11)),imag(v3tot(11)),'g');
title('Vh11')
subplot(3,3,8)
compass(real(i3tot(11)),imag(i3tot(11)),'b');
title('Ih11')
subplot(3,3,9)
compass(real(impe(11)),imag(impe(11)),'r');
title('Zh11')
%subplot(4,3,10)
%compass(real(v3tot(13)),imag(v3tot(13)),'g');
%title('Vh13')
%subplot(4,3,11)
%compass(real(i3tot(13)),imag(i3tot(13)),'b');
%title('Ih13')
%subplot(4,3,12)
%compass(real(impe(13)),imag(impe(13)),'r');
%title('Zh13')
% --- Executes on button press in pbAparente.
function pbAparente_Callback(hObject, eventdata, handles)
global Pdem Qdem iaht ipu imódulo iangle xpu vbase sfuente zbase
ibase V del iahtf an1 an2;
global angArm zabs zangle ti1 ti v3 v3ang i3abs i3ang impe iarmo
varmo imax2 Pd Qd sbase;
global lineas barras Xfeq G B nb yfeq deman icarga L5 L7 C5 C7 ipuar
dell rango vconmo vconan vIEEE;
global vSTD vbl;
%%=====

```

```

parmo=zeros(an1,an2);
for i=1:an1
    for j=1:an2
        parmo(i,j)=iarmo(i,j)*varmo(i,j);
    end
end
parmo;
parmol=zeros(an1,1);
for i=1:an1
    for j=1:an2
        parmol(i,1)=parmol(i,1)+parmo(i,j);
    end
end
parmol;
figure (5)
subplot(3,1,1)
plot(ti,parmol,'b','LineWidth',2)
grid on
title('Potencia Aparante Total respecto al Tiempo');
ylabel('[VA]');
xlabel('Tiempo [s]');
subplot(3,1,2)
plot(ti,parmo(:,2:40),'LineWidth',1.2)
grid on
title('Potencia Aparante Armonica respecto al Tiempo');
ylabel('[VA]');
xlabel('Tiempo [s]');
subplot(3,1,3)
vpot=v3*vbase(2); % Voltaje Eficaz por cada armónico
ipot=imax2/sqrt(2);
sest=zeros(an2,1); % Potencia Aparente por cada armónico
for i=2:an2
    sest(i)=vpot(i)*ipot(i);
end
sest;
bar(1:40,sest);
grid on
title('Potencia Aparente por cada Armónico')
ylabel('[VA]');
xlabel('Armónico');
xlim([0 40]);
set(gcf,'color','w')
% --- Executes on button press in pbFiltros.
function pbFiltros_Callback(hObject, eventdata, handles)
global Pdem Qdem iaht ipu imódulo iangle xpu vbase sfuente zbase
ibase V del iahtf an1 an2;
global angArm zabs zangle ti1 ti v3 v3ang i3abs i3ang impe iarmo
varmo imax2 Pd Qd sbase;
global lineas barras Xfeq G B nb yfeq deman icarga L5 L7 C5 C7 ipuar
dell rango vconmo vconan vIEEEE;
global vSTD vbl;
%=====

```

```

% Extraemos la potencia demandada P+jQ
deman=(Pd(3)+sqrt(-1)*Qd(3))*sbase;
Pact=real(deman); % Demanda Activa
Qact=imag(deman); % Demanda Reactiva
fdp1=cos(atan(Qact/Pact)); % FDP actual
% Corregimos el factor de potencia a un valor conocido y reajustado
fdp2=0.98;
S1=Pact/fdp2;
Q2=sqrt(S1^2-Pact^2); % Reactiva corregida
% Qfiltro=Qdemandado-Qcorregido
Qfil=Qact-Q2;
% Q5f Potencia reactiva para el 5to armónico
Q5f=0.5*Qfil;
% Q7f Potencia reactiva para el 7mo armónico
Q7f=0.5*Qfil;
%-----
% Parametros del 5to armónico
Xc5=(25/(25-1))*(V(3)*vbase(2))^2/Q5f;
C5=1/(120*3.14159265358*Xc5);
Xl5=Xc5/25;
L5=Xl5/(120*3.14159265358);
%-----
% Parametros del 7mo armónico
Xc7=(49/(49-1))*(V(3)*vbase(2))^2/Q7f;
C7=1/(120*3.14159265358*Xc7);
Xl7=Xc7/49;
L7=Xl7/(120*3.14159265358);
%=====
% Calculo de flujo de potencia con filtros
%=====
% determinamos las impedancias equivalentes de cada filtro
Xfeq=(Xl5-Xc5)*(Xl7-Xc7)/(Xl5-Xc5+Xl7-Xc7)/zbase(2); % filtro en pu
set(handles.stL5,'String',round(L5*1000,4));
set(handles.stL7,'String',round(L7*1000,4));
set(handles.stC5,'String',round(C5*1000,4));
set(handles.stC7,'String',round(C7*1000,4));
%=====
xf=0:60:2400;
XfL5=2*3.141592*L5*xf;
XfC5=1./(2*3.141592*xf*C5);
XfL7=2*3.141592*L7*xf;
XfC7=1./(2*3.141592*xf*C7);
Zf5=sqrt(-1)*XfL5-1*sqrt(-1)*XfC5;
Zf7=sqrt(-1)*XfL7-1*sqrt(-1)*XfC7;
Za5=abs(Zf5);
Za7=abs(Zf7);
angle5=angle(Zf5);
angle7=angle(Zf7);
figure (9)
subplot(2,2,1)
plot(xf,Za5,'b','LineWidth',2)
xlabel('Frecuencia [Hz]','Color','b')

```

```

ylabel('[Ohmios'],'Color','b')
title('Impedancia del Filtro de 5to Armónico','Color','b');
grid on
box off
set(gcf,'color','w')
subplot(2,2,2)
plot(xf,angle5,'b','LineWidth',2)
xlabel('Frecuencia [Hz'],'Color','b')
ylabel('[Rad]','Color','b')
title('Ángulo de la Impedancia[Rad]','Color','b');
grid on
box off
subplot(2,2,3)
plot(xf,Za7,'b','LineWidth',2)
xlabel('Frecuencia [Hz]','Color','b')
ylabel('[Ohmios]','Color','b')
title('Impedancia del Filtro de 7mo Armónico','Color','b');
grid on
box off
set(gcf,'color','w')
subplot(2,2,4)
plot(xf,angle7,'b','LineWidth',2)
xlabel('Frecuencia [Hz]','Color','b')
ylabel('[Rad]','Color','b')
title('Ángulo de la Impedancia[Rad]','Color','b');
grid on
box off

% --- Executes on button press in pbControl.
function pbControl_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Pdem Qdem iaht ipu imódulo iangle xpu vbase sfuente zbase
ibase V del iahtf an1 an2;
global angArm zabs zangle til ti v3 v3ang i3abs i3ang impe iarmo
varmo imax2 Pd Qd sbase;
global lineas barras Xfeq G B nb yfeq deman icarga L5 L7 C5 C7 ipuar
dell rango vconmo vconan;
global vSTD vbl;
yfeq=[0 0 1./Xfeq]';
vbl=[V(1); 1; 1];
% dell=[0 ; 0];
dell=[0; 0; 0];
Tol2 = 1;
Iter1 = 1;
while (Tol2 > 1e-4)
    Px = zeros(nb,1);
    Qx1 = zeros(nb,1);

%-----
-----
    for i = 1:nb
        for k = 1:nb

```

```

        Px(i) = Px(i) + vb1(i)* vb1(k)*(G(i,k)*cos(dell(i)-
dell(k)) + B(i,k)*sin(dell(i)-dell(k)));
        Qx1(i)= Qx1(i) + vb1(i)* vb1(k)*(G(i,k)*sin(dell(i)-
dell(k)) - B(i,k)*cos(dell(i)-dell(k)));
    end
    end
    Px;
    Qx1;
    Qx = zeros(nb,1);
    for ix=1:nb
        Qx(ix)=Qx1(ix)+vb1(ix)*vb1(ix)*yfeq(ix);
    end
    Qx;
%-----
    dPax = -1*Pd-Px;
    dQax = -1*Qd-Qx;
    dPx=dPax(2:nb);
    dQx=dQax(2:nb);
    Mx = [dPx; dQx];
%=====
    JP2V2x= vb1(1)*(G(2,1)*cos(dell(2)-dell(1))+B(2,1)*sin(dell(2)-
dell(1)))+2*vb1(2)*G(2,2)+vb1(3)*(G(2,3)*cos(dell(2)-
dell(3))+B(2,3)*sin(dell(2)-dell(3)));
    JP2V3x= vb1(2)*(G(2,3)*cos(dell(2)-dell(3))+B(2,3)*sin(dell(2)-
dell(3)));
    JP3V2x= vb1(3)*(G(3,2)*cos(dell(3)-dell(2))+B(3,2)*sin(dell(3)-
dell(2)));
    JP3V3x= vb1(1)*(G(3,1)*cos(dell(3)-dell(1))+B(3,1)*sin(dell(3)-
dell(1)))+vb1(2)*(G(3,2)*cos(dell(3)-dell(2))+B(3,2)*sin(dell(3)-
dell(2)))+2*vb1(3)*G(3,3);
%-----
    JP2T2x= vb1(2)*vb1(1)*(-G(2,1)*sin(dell(2)-
dell(1))+B(2,1)*cos(dell(2)-dell(1)))+vb1(2)*vb1(3)*(-
G(2,3)*sin(dell(2)-dell(3))+B(2,3)*cos(dell(2)-dell(3)));
    JP2T3x= vb1(2)*vb1(3)*(G(2,3)*sin(dell(2)-dell(3))-
B(2,3)*cos(dell(2)-dell(3)));
    JP3T2x= vb1(2)*vb1(3)*(G(3,2)*sin(dell(3)-dell(2))-
B(3,2)*cos(dell(3)-dell(2)));
    JP3T3x= vb1(3)*vb1(1)*(-G(3,1)*sin(dell(3)-
dell(1))+B(3,1)*cos(dell(3)-dell(1)))+vb1(2)*vb1(3)*(-
G(3,2)*sin(dell(3)-dell(2))+B(3,2)*cos(dell(3)-dell(2)));
%-----
    JQ2V2x= vb1(1)*(G(2,1)*sin(dell(2)-dell(1))-B(2,1)*cos(dell(2)-
dell(1)))-2*vb1(2)*B(2,2)+vb1(3)*(G(2,3)*sin(dell(2)-dell(3))-
B(2,3)*cos(dell(2)-dell(3)));
    JQ2V3x= vb1(2)*(G(2,3)*sin(dell(2)-dell(3))-B(2,3)*cos(dell(2)-
dell(3)));
    JQ3V2x= vb1(3)*(G(3,2)*sin(dell(3)-dell(2))-B(3,2)*cos(dell(3)-
dell(2)));
    JQ3V3x= vb1(1)*(G(3,1)*sin(dell(3)-dell(1))-B(3,1)*cos(dell(3)-
dell(1)))+vb1(2)*(G(3,2)*sin(dell(3)-dell(2))-B(3,2)*cos(dell(3)-
dell(2)))-2*vb1(3)*B(3,3)+2*vb1(3)/Xfeq;

```

```

%-----
    JQ2T2x=vb1(2)*vb1(1)*(G(2,1)*cos(dell(2)-
dell(1))+B(2,1)*sin(dell(2)-
dell(1)))+vb1(2)*vb1(3)*(G(2,3)*cos(dell(2)-
dell(3))+B(2,3)*sin(dell(2)-dell(3)));
    JQ2T3x=-vb1(2)*vb1(3)*(G(2,3)*cos(dell(2)-
dell(3))+B(2,3)*sin(dell(2)-dell(3)));
    JQ3T2x=vb1(2)*vb1(3)*(-G(3,2)*cos(dell(3)-dell(2))-
B(3,2)*sin(dell(3)-dell(2)));
    JQ3T3x=vb1(3)*vb1(1)*(G(3,1)*cos(dell(3)-
dell(1))+B(3,1)*sin(dell(3)-
dell(1)))+vb1(2)*vb1(3)*(G(3,2)*cos(dell(3)-
dell(2))+B(3,2)*sin(dell(3)-dell(2)));
    % Determinamos la matriz Jacobiana
    jacox=[JP2V2x JP2V3x JP2T2x JP2T3x;JP3V2x JP3V3x JP3T2x
JP3T3x;JQ2V2x JQ2V3x JQ2T2x JQ2T3x;JQ3V2x JQ3V3x JQ3T2x JQ3T3x];
    % Correccion del vector de estado
    xxx=inv(jacox)*Mx;
    % suma del vector de estado con la correccion de estado
    vb1=vb1+[0;xxx(1:2)];
    dell=dell+[0;xxx(3:4)];
    % comparacion de la tolerancia
    Iter1 = Iter1 + 1;
    Tol2 = max(abs(Mx));
    Tollx(Iter1)=Tol2;
end
vb1;
dell;
jacox;
vcomple=vb1(3)*cos(dell(3))+vb1(3)*sqrt(-1)*sin(dell(3));
%=====
% Determinamos la corriente fundamental de la impedancia serie
Xtr+Zlinea
ipuar=(vb1(1)-vb1(3)*(cos(dell(3))+sqrt(-
1)*sin(dell(3)))/(xpu(1)+xpu(2)));
% Determinamos la corriente de la carga
demanpu=deman/sbase;
icarga=conj(demanpu/vcomple);
%=====
CorriSerie=abs(ipuar*ibase);
CorriCarga=abs(icarga*ibase(2));

set(handles.stVC2,'String',round(vb1(2),4));
set(handles.stVC3,'String',round(vb1(3),4));
set(handles.stThetaC2,'String',round(dell(2)*180/3.14159265,4));
set(handles.stThetaC3,'String',round(dell(3)*180/3.14159265,4));
set(handles.stIcargaC,'String',round(CorriCarga,4));
set(handles.stI12C,'String',round(CorriSerie(1),4));
set(handles.stItrC,'String',round(CorriSerie(2),4));
% Parametros de la matriz jacobiana modificada
set(handles.stJC1,'String',round(jacox(1,1),5));
set(handles.stJC2,'String',round(jacox(1,2),5));

```

```

set(handles.stJC3,'String',round(jacox(1,3),5));
set(handles.stJC4,'String',round(jacox(1,4),5));
set(handles.stJC5,'String',round(jacox(2,1),5));
set(handles.stJC6,'String',round(jacox(2,2),5));
set(handles.stJC7,'String',round(jacox(2,3),5));
set(handles.stJC8,'String',round(jacox(2,4),5));
set(handles.stJC9,'String',round(jacox(3,1),5));
set(handles.stJC10,'String',round(jacox(3,2),5));
set(handles.stJC11,'String',round(jacox(3,3),5));
set(handles.stJC12,'String',round(jacox(3,4),5));
set(handles.stJC13,'String',round(jacox(4,1),5));
set(handles.stJC14,'String',round(jacox(4,2),5));
set(handles.stJC15,'String',round(jacox(4,3),5));
set(handles.stJC16,'String',round(jacox(4,4),5));
% --- Executes on button press in pbCcorriente.
function pbCcorriente_Callback(hObject, eventdata, handles)
global Pdem Qdem iaht ipu imódulo iangle xpu vbase sfuente zbase
ibase V del iahtf an1 an2;
global angArm zabs zangle til ti v3 v3ang i3abs i3ang impe iarmo
varmo imax2 Pd Qd sbase vIEEE;
global lineas barras Xfeq G B nb yfeq deman icarga L5 L7 C5 C7 ipuar
dell rango vconmo vconan;
global vSTD vb1;
%=====
icarpu=icarga*iahtf/100;
% impedencia de cada filtro
zfil5=zeros(an2,1);
zfil7=zeros(an2,1);
zpara=zeros(an2,1);
iserie=zeros(an2,1);
tpara=zeros(an2,1);
for k=1:an2
    zfil5(k)=(sqrt(-1)*L5*120*3.1415926*k-(1*sqrt(-
1)/(120*3.1415926*k*C5)))/zbase(2);
    zfil7(k)=(sqrt(-1)*L7*120*3.1415926*k-(1*sqrt(-
1)/(120*3.1415926*k*C7)))/zbase(2);
    zpara(k)=(zfil5(k)*zfil7(k))/(zfil5(k)+zfil7(k));
    iserie(k)=(zpara(k)*icarpu(k))/(zpara(k)+impe(k));
    tpara(k)=(zpara(k)*impe(k))/(zpara(k)+impe(k));
end
zfil5;
zfil7;
zpara;
iserie;
tpara; % impredancia de todo el circuito
%corrigiendo la corriente fundamental en la impedancia serie
iserie(1)=ipuar;
%=====
ifh=zeros(an2,1);
for i=1:an2
    ifh(i)=icarpu(i)-iserie(i);
end

```

```

ifh;
%=====
vconmo=zeros(an2,1);    % Módulo de la tensión en 3
vconan=zeros(an2,1);    % Ángulo de la tensión en 3
vprueba=zeros(an2,1);
for i=1:an2
    vprueba(i)=ifh(i)*zpara(i);
    vconmo(i)=abs(vprueba(i));
    vconan(i)=angle(vprueba(i));

    end
vprueba;
vconmo;
vconan(1)=del1(3);
%=====
isere=iserie*ibase(2);
isere1=abs(isere);
iseang=angle(isere);
item=zeros(an1,an2);
for i=1:an2
    for j=1:an1

item(j,i)=isere1(i)*sqrt(2)*cos(120*3.141592*ti1(j)*i+iseang(i));
        end
    end
item;
figure (6)
% Solamente la grafica de la corriente fundamental
subplot(2,2,1)
plot(ti1,item(:,1),'b','LineWidth',2)
grid on
title('Corriente Fundamental, respecto al Tiempo')
ylabel('Corriente [A]');
xlabel('Tiempo [s]');
set(gcf,'color','w')
% Grafica de las corrientes fundamentales y armonicas
coril=zeros(an1,1);
for i=1:an1
    for j=1:an2
        coril(i,1)=coril(i,1)+item(i,j);
    end
end
coril;
subplot(2,2,2)
plot(ti,1*coril,'g','LineWidth',2)
grid on
title('Corriente Armonica Total respecto al Tiempo')
ylabel('Corriente [A]');
xlabel('Tiempo [s]');
subplot(2,2,3)
bar(1:40,isere1)
grid on

```

```

title('Espectro de la Corriente Armonica')
ylabel('Corriente [A]');
xlabel('Armónico');
xlim([0 40]);
% Determinamos los valores porcentuales
% Determinamos los valore porcentuales
iporc=zeros(an2,1);
for i=1:an2
    iporc(i)=isere1(i)*100/isere1(1);
end
iporc;
subplot(2,2,4)
bar(1:40,[iporc rango])
grid on
title('Espectro de la Corriente Porcentual')
ylabel('Corriente [%]');
xlabel('Armónico');
legend({'Armónicos del Sistema','Limite de acuerdo a IEEE std 519'});
legend boxoff
xlim([0 40]);
%-----
dfg2=0;
for i=2:an2
    dfg2=dfg2+iporc(i)*iporc(i);
end
dfg2;
THD'I2=(1./iporc(1))*sqrt(dfg2)*100+0.09;
set(handles.stTHD'I1,'String',THD'I2);
% Comparacion de la norma respecto al THD'I
THD'I_IEEE1=8.000;
set(handles.stIEcorri1,'String',THD'I_IEEE1);
% --- Executes on button press in pbCvoltage.
function pbCvoltage_Callback(hObject, eventdata, handles)
global Pdem Qdem iaht ipu imódulo iangle xpu vbase sfuente zbase
ibase V del iahtf an1 an2;
global angArm zabs zangle ti1 ti v3 v3ang i3abs i3ang impe iarmo
varmo imax2 Pd Qd sbase;
global lineas barras Xfeq G B nb yfeq deman icarga L5 L7 C5 C7 ipuar
dell rango vconmo vconan vIEEE;
global vSTD vbl;
figure (7)
varmof=zeros(an1,an2);
for i=1:an2
    for j=1:an1

varmof(j,i)=vconmo(i)*sqrt(2)*vbase(2)*cos(120*3.14159265*ti1(j)*i+vc
onan(i));
    end
end
varmof;
subplot(2,2,1)
plot(ti,varmof(:,1),'b','LineWidth',2)

```

```

grid on
title('Tensión por cada Armónico, respecto al Tiempo con Filtro');
ylabel('Tensión [V]');
xlabel('Tiempo [s]');
set(gcf, 'color', 'w')
varmof1=zeros(an1,1);
for i=1:an1
    for j=1:an2
        varmof1(i,1)=varmof1(i,1)+varmof(i,j);
    end
end
varmof1;
subplot(2,2,2)
plot(ti,varmof1,'g','LineWidth',2)
grid on
title('Tensión Armonica Total respecto al Tiempo');
ylabel('Tensión [V]');
xlabel('Tiempo [s]');
% Calculamos el espectro porcentual de cada armónico
vrep1=100*vconmo*vbase(2)/(vconmo(1)*vbase(2));
subplot(2,2,3)
bar(1:40,[vrep1,vIEEE]);
grid on
title('Espectro de la Tensión v/s Espectro IEEE std 519')
ylabel('Tensión [%]');
xlabel('Armónico');
legend({'Armónicos del Sistema','Limite de acuerdo a IEEE std 519'});
legend boxoff
xlim([0 40]);
subplot(2,2,4)
bar(1:40,[vrep1,vSTD]);
grid on
title('Espectro de la Tensión v/s Espectro DS N° 020-97 - NTCSE')
ylabel('Tensión [%]');
xlabel('Armónico');
legend({'Armónicos del Sistema','Limite de acuerdo DS N° 020-97 - NTCSE'});
legend boxoff
xlim([0 40]);
%-----
dgv2=0;
for i=2:an2
    dgv2=dgv2+(vrep1(i)).^2;
end
dgv2;
THD'V2=(1./(vrep1(1)))*sqrt(dgv2)*100-0.1;
set(handles.stTHD'V1,'String',THD'V2);
% Comparacion de la norma IEEE respecto al THD'V
THD'V_IEEE2=8.000;
set(handles.stIEVo11,'String',THD'V_IEEE2);
% Comparacion de la NTCSE respecto al THD'V
THD'V_NTCSE2=8.00;

```

```

set(handles.stNTVol1,'String',THD'V_NTCSE2);
% --- Executes on button press in pbComparacion.
function pbComparacion_Callback(hObject, eventdata, handles)
global Pd Qd iaht ipu imódulo iangle xpu vbase sfuente zbase
ibase V del iahtf an1 an2;
global angArm zabs zangle ti1 ti v3 v3ang i3abs i3ang impe iarmo
varmo imax2 Pd Qd sbase;
global lineas barras Xfeq G B nb yfeq deman icarga L5 L7 C5 C7 ipuar
del1 rango vconmo vconan vIEEE;
global vSTD vb1;
=====
% Perdidas de Potencia Activa y Reactiva
figure (8)
% Perdidas sin Filtro
Sperd=sbase*xpu*(abs(ipu))^2;
Pperd=real(Sperd);
Qperd=imag(Sperd);
% Perdidas con Filtro
Sperdf=sbase*xpu*(abs(ipuar))^2;
Pperdf=real(Sperdf);
Qperdf=imag(Sperdf);
nper=length(Sperd);
subplot(3,1,1)
bar(1:nper,[Pperd Pperdf])
grid on
title('Perdidas de Potencia Activa')
ylabel('[W]');
set(gcf,'color','w')
legend({'Sin Filtro','Con Filtro'});
box off
subplot(3,1,2)
bar(1:nper,[Qperd Qperdf])
grid on
title('Perdidas de Potencia Reactiva')
ylabel('[VAR]');
set(gcf,'color','w')
legend({'Sin Filtro','Con Filtro'});
box off
% Determinamos las tensión en las barras en PU
nvol=length(vb1);
subplot(3,1,3)
bar(1:nvol,[V vb1])
grid on
title('Módulos de las Tensiones en las Barras')
ylabel('[pu]');
set(gcf,'color','w')
legend({'Sin Filtro','Con Filtro'});
box off

```

Anexo 04: Características del equipo analizador de redes, WIN PQ MOBIL - PQ
Box 100 EXPERPT.

Analizador de redes para redes de baja, media y alta tensión

Modelo PQ-Box 100

- ▶ Localización de fallos
- ▶ Valoración de la calidad de la tensión según EN50160 y IEC61000-2-2 (2-4)
- ▶ Funciones de registrador de fallos
- ▶ Análisis de carga; mediciones de energía
- ▶ Análisis de señales de telemando
- ▶ Medición de frecuencia mediante telemandos



1. Campo de aplicación

El PQ-Box 100 es un potente analizador de redes, medidor de potencia y registrador de fenómenos transitorios portátil. Un objetivo primordial durante su desarrollo fue la facilidad de uso del instrumento de medición.

El PQ-Box 100 se desarrolló para el funcionamiento portátil (clase de protección IP65) y es adecuado para mediciones en la red pública (CAT IV) así como para mediciones en el entorno industrial con una tensión de medición de hasta 690V.

El dispositivo cumple todos los requisitos de la norma de dispositivos de medición IEC61000-4-30 (2015) para un dispositivo de clase A.

Parámetro	Clase
Precisión de la medida de tensión	A
Determinación de los intervalos de tiempo	A
Resaltar valores de medición para eventos	A
Armónicos, interarmónicos	A
Flicker	A
Frecuencia	A
Desequilibrio de tensión	A
Registro de sucesos	A
Sincronización de tiempo	A

Las reducidas dimensiones permiten su montaje en espacios reducidos y armarios de distribución, incluso directamente junto a componentes que transportan corriente. La alimentación de tensión a través de conductores de medición y el ajuste previo específico a la aplicación de todas las condiciones de los

activadores hacen que el dispositivo sea muy sencillo de manejar.

Para localizar rápidamente la causa de fallos de red el dispositivo está equipado con un gran número de posibilidades de activación.

Para la transmisión de datos está disponible una rápida interfaz USB 2.0.

En caso de interrupción de la alimentación eléctrica, se activa la fuente de alimentación ininterrumpida integrada.

2. Funciones de medición

El PQ-Box 100 está disponible en diversas variantes:

▶ PQ-Box 100 basic (B0)

Este dispositivo es adecuado para análisis de potencia, como registrador de datos para la búsqueda de fallos y para mediciones en línea.

▶ PQ-Box 100 light (B1)

Esta variante presenta además un activador manual para imágenes osciloscópicas y valores efectivos cada 10 ms y elabora valoraciones normativas automáticas según EN50160, IEC61000-2-2 / 2-4 para redes públicas y redes industriales.

▶ PQ-Box 100 expert (B2)

Además de la variante "light" del dispositivo, esta opción comprende numerosas funciones de activación. Rápidas imágenes osciloscópicas y valores efectivos cada 10 ms se capturan de forma automática, como son corrientes de arranque "inrush".

▶ Opción "Señal de telemando" (R1)

Con esta función pueden activarse transmisiones mediante telemando a la red. Estas pueden registrarse como registro rápido de valores efectivos para tensiones y corrientes y analizarse en el software.

Nosotros lo regulamos.

Las funciones de cualquiera de las variantes pueden ampliarse fácilmente con posterioridad mediante un código de licencia (opcional).

El PQ-Box 100 registra más de 2.250 valores de medición diferentes en un registro continuo: tensión, corriente, frecuencia, potencia, consumo de energía,

asimetría, flicker, oscilaciones armónicas e interarmónicos. Sin limitación del número de parámetros, el intervalo de medición para el registro permanente puede ajustarse a un mínimo de un segundo.

Magnitudes de medición / funciones			
PQ-Box 100	basic (B0)	light (B1)	expert (B2)
Estadística según EN50160 / IEC61000-2-2; -2-4	x	x	x
Eventos y alarmas de calidad de energía	x	x	x
Registro en intervalo libre:			
Tensión: Valor medio, mín., máx.	x	x	x
Corriente: valor medio, valor máx.	x	x	x
Potencia: P, Q, S, PF, cos phi, sin phi	x	x	x
Potencia reactiva de distorsión D	x	x	x
Energía: P, Q, P+, P-, Q+, Q-	x	x	x
Flicker (Pst, Plt, salida 5)	x	x	x
Asimetría	x	x	x
Armónicos de tensión		hasta 50.	hasta 50.
Armónicos de corriente		hasta 50.	hasta 50.
Ángulos de fase de los armónicos		hasta 50.	hasta 50.
THD U y I; PWHD U e I; PHC	x	x	x
Grupos de interarmónicos de tensión, corriente		CC hasta 5 kHz	CC hasta 5 kHz
Señal de telemando		x	x
Frecuencia	x	x	x
Valores en 10/15/30 min.: Tensión, P, Q, S, D, cos phi, sin phi	x	x	x
Modo en línea:			
Imagen osciloscópica	x	x	x
Registrador de valores efectivos cada 10 ms	x	x	x
Armónicos de corriente - tensión	x	x	x
Grupos de interarmónicos (U, I)	x	x	x
Dirección y ángulo de armónicos	x	x	x
Funciones de disparo (Rec A / Rec B)			
Disparo manual con tecla	opcional	x	x
Activación por superación de límite superior - inferior de valores efectivos (U, I)	opcional	opcional	x
Activación por salto de valores efectivos (U, I)	opcional	opcional	x
Disparo cambio brusco de fase	opcional	opcional	x
Activación por envolventes	opcional	opcional	x
Disparo automático	opcional	opcional	x
Opción "registrador de análisis con telemando" (opcional)	x	x	x

3. Diseño constructivo

Gracias a su robusta construcción mecánica y la clase de protección IP65, así como a la ausencia de componentes rotatorios como ventiladores y discos duros, el dispositivo es adecuado para su uso en las condiciones ambientales más duras.

El PQ-Box 100 está equipado con una gran memoria de >2 GB. Con ello, es posible almacenar valores de medición durante largos intervalos de tiempo, incluso de hasta un año. En caso de avería de la red, una alimentación ininterrumpida integrada puentea la alimentación de tensión del analizador de redes durante algunos minutos.

Para la alimentación de tensión no es necesario un enchufe independiente sino que puede tomarse directamente de los cables de medición. El PQ-Box 100 puede cerrarse con llave en el lugar de medición mediante un sistema de seguridad anti-robo.

3.1 Valoración de datos de medición

Los datos registrados se transmiten al PC de valoración a través de una rápida interfaz USB. Durante la lectura, el dispositivo se alimenta a través de la interfaz USB del PC y no es necesaria ninguna otra alimentación de tensión. El software de valoración orientado a la práctica está incluido en el volumen de entrega y puede instalarse en cuantos PC se desee.

El software ofrece numerosas posibilidades de valoración tales como análisis de carga o la determinación de causas de fallos de red. Elabora informes automáticos según EN 50160/IEC 61000-2-2 y ofrece numerosas funciones en línea.

Actualizaciones para el software de valoración están disponibles de forma gratuita en Internet (www.a-eberle.de).

3.2 Lado delantero del dispositivo



3.3 Pantalla de visualización

La pantalla de visualización del dispositivo informa sobre la correcta conexión de los conductores de medición y las tenazas de corriente, muestra datos en línea de tensión, corriente, THD y potencias.

El número de eventos que se producen durante la medición, el registro de fallos y el intervalo de medición registrado también se muestran al usuario en la pantalla de visualización.

```
Rec.    = OFF    0d 00:00:00
free Memory:    487MB
Oscilloscope Rec.    0
RMS Recorder    0
Signal voltage    0
PQ events    0
```

Para impedir la manipulación del dispositivo de medición por parte de terceros puede conectarse un bloqueo en el teclado.

```
Rec.    = OFF    0d 00:00:00
free Memory:    487MB
U1N 0.027 V    I1 0.000 A
U2N 0.031 V    I2 0.000 A
U3N 0.029 V    F 0.000 Hz
Rec.    = OFF    0d 00:00:00
free Memory:    487MB
P1 +0.000 W    Q1 +0.000 VAR
P2 +0.000 W    Q2 +0.000 VAR
P3 +0.000 W    Q3 +0.000 VAR
Rec.    = OFF    0d 00:00:00
free Memory:    487MB
Oscilloscope Rec.    0
RMS Recorder    0
Signal voltage    0
PQ events    0
Rec.    = OFF    0d 00:00:00
free Memory:    487MB
S1 0.000 VA    PF 1.000 %
S2 0.000 VA    PF 1.000 %
S3 0.000 VA    PF 1.000 %
Rec.    = OFF    0d 00:00:00
free Memory:    487MB
THD U1 0.000 %    THD I1 0.000 %
THD U2 0.000 %    THD I2 0.000 %
THD U3 0.000 %    THD I3 0.000 %
THD IN 0.000 %
```

3.4 Teclas

Mediante una tecla "Inicio / detención" se inician y detienen las mediciones. Pueden registrarse sucesivamente tantas mediciones como se desee sin tener que leer previamente el dispositivo.

La tecla "Activación manual" permite mantener el estado actual de una instalación como imagen osciloscópica y como registro de valores efectivos de 10 ms.

Mediante la opción de desplazamiento puede mostrarse un gran número de datos de medición en la pantalla de visualización. Así, puede comprobarse la correcta conexión del dispositivo.

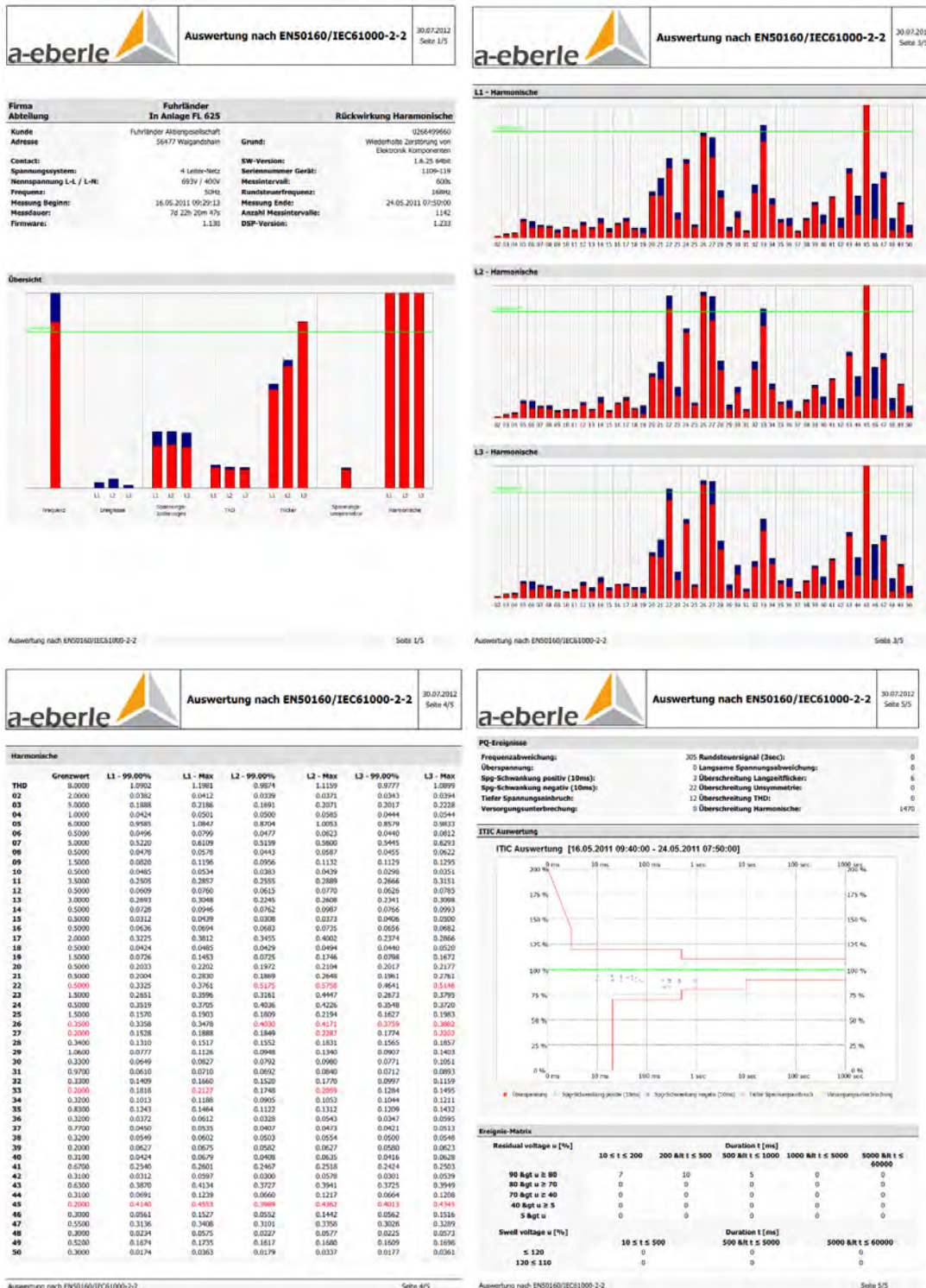
La tecla "Configuración" permite, por ejemplo, modificar directamente en el PQ-Box 100, por ejemplo, configuraciones de transformador de corriente y tensión, el intervalo de medición o la tensión nominal.

3.5 Sincronización

Para la correlación de datos de medición de distintos dispositivos es necesaria una sincronización temporal. Para este fin se dispone de un reloj radiocontrolado GPS.

3.6 Valoración normativa y estadística

- Visión global de la calidad del suministro; diagramas de barras ayudan a controlar magnitudes de medición relevantes.
- Es posible la elaboración automática de informes según EN50160/ IEC61000-2-2/ -2-12 (redes públicas), IEC61000-2-4 (redes industriales), NRS048, IEEE519, así como archivos propios de valores límite.
- Puede modificarse el logotipo del cliente en el informe así como textos e inscripciones.



Informe normativo automático

3.7 Software de análisis en línea en el PC

Un amplio software de análisis en línea muestra en tiempo real la forma de la curva actual de las señales de corriente y tensión y representa armónicos e interarmónicos de CC hasta 5.000 Hz.

Se indica la dirección de flujo de la potencia de los armónicos en el punto de medición así como los valores de potencia actuales (potencia activa, potencia reactiva, potencia reactiva de distorsión, cos phi, ángulo de fase, factor de potencia).



Imagen osciloscópica en línea

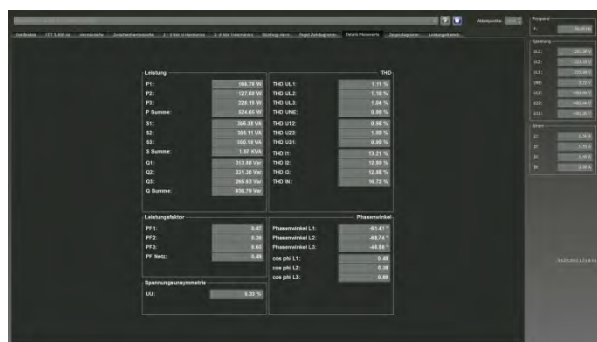
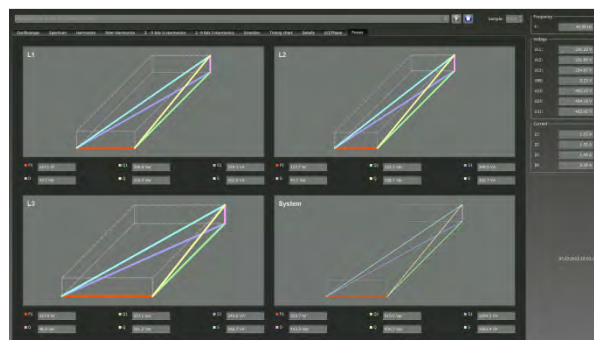
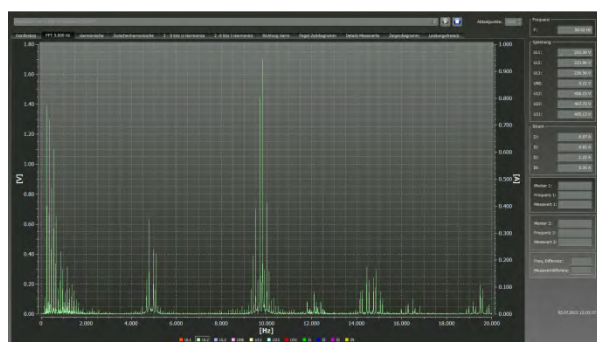


Tabla de valores de medición en línea



Triángulo de potencia en línea



Análisis FFT de CC hasta 5 kHz

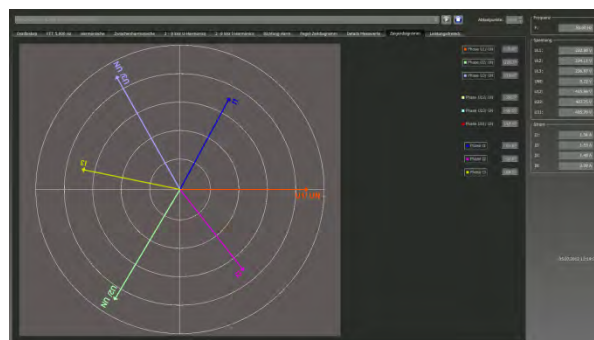
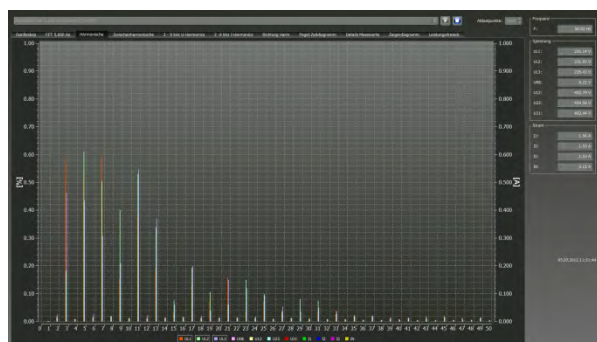


Diagrama vectorial en línea



Armónicos en línea (tensión y corriente)



Diagrama nivel - tiempo en línea

3.8 Análisis de señales de telemando

El PQ-Box 100 puede registrar cualquier frecuencia entre 100 y 4.700 Hz, además de los armónicos. Esta función es adecuada para valorar la altura de señal de señales de telemando.



Nivel de telemando durante varios días

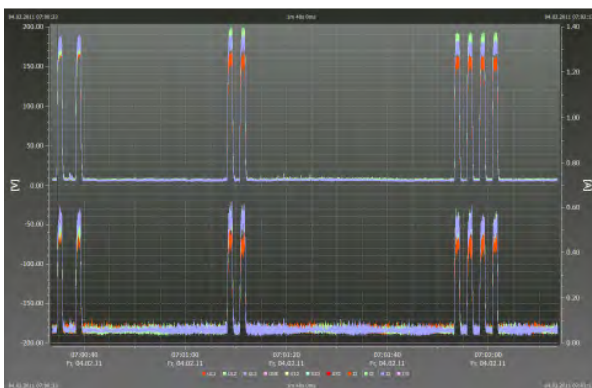
Opción "Análisis de señales de telemando":

Además de la medición de nivel de telemando (PQ-Box 100 light y expert), con esta función puede activarse a una frecuencia de telemando. Se muestra el telegrama completo hasta una longitud de 210 segundos, y pueden analizarse fallos en la trayectoria de la señal.

Pueden registrarse varios cientos de telegramas por medición.

En el dispositivo de medición pueden ajustarse los siguientes parámetros:

- Umbral de activación
- Longitud de registro
- Frecuencia de telemando
- Ancho de banda de la curva de filtrado para la frecuencia de telemando



Telegrama de telemando de tensiones y corrientes (opcional)

3.9 Funciones de activación

La variante del dispositivo "PQ-Box 100 expert" ofrece numerosas funciones de activación. El usuario puede ajustar libremente umbrales de activación, la duración del registro así como el historial previo de un registrador.

Condiciones de activación para tensión conductor - conductor, conductor - conductor neutro y conductor neutro - tierra:

- Superación de límite superior / inferior de tensión
- Salto de tensión
- Activación por envolvente de tensión
- alto de fases

Condiciones de activación de corrientes de C1, C2, C3 y neutro

- Superación de límite superior / inferior
- Salto de corriente

Todas las condiciones de activación se desarrollan en paralelo y pueden activarse y desactivarse de forma individual. Pueden activarse distintos criterios de activación para registro osciloscópico y registrador de valores efectivos.

Si está seleccionada la activación automática, el dispositivo de medición ajusta automáticamente las distintas condiciones de activación y las adapta a las condiciones de red actuales. Con ello puede descartarse una selección errónea de los ajustes de activación.

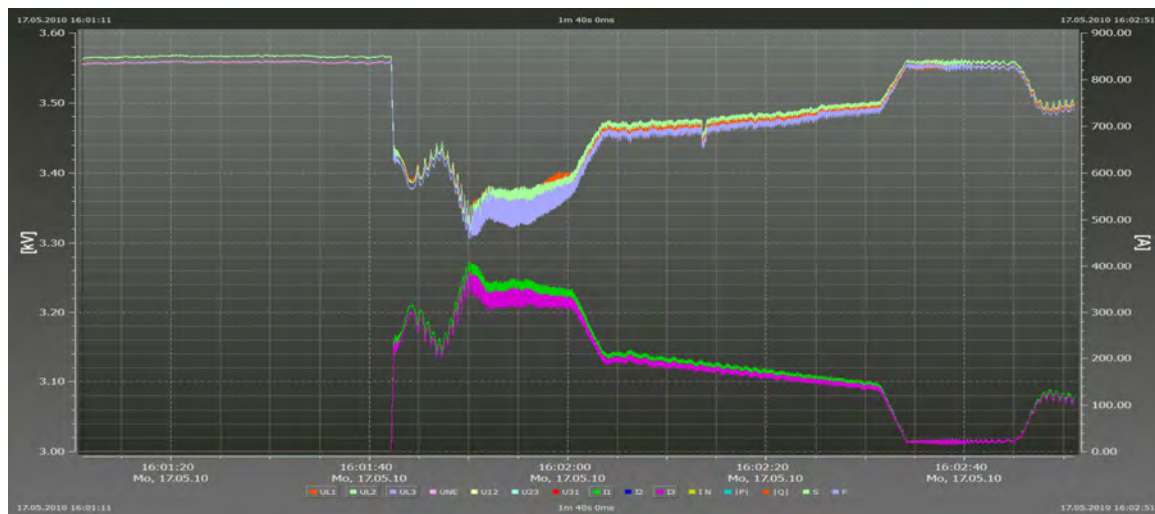
3.10 Memoria de datos

El dispositivo de medición gestiona de forma automática e inteligente la memoria de >2GB disponible. Pueden registrarse sucesivamente varias mediciones sin tener que descargar los datos en un PC.

Al iniciar una nueva medición, el dispositivo de medición divide de forma útil la memoria libre para datos de medición de intervalo prolongado y registro de fallos. Un gran número de registros de fallos no interrumpe la medición de intervalo prolongado.

Nosotros lo regulamos.

3.11 Registro de fallos como imagen osciloscópica y registro RMS de 10ms



Registro RMS de 10ms (arranque de motor)

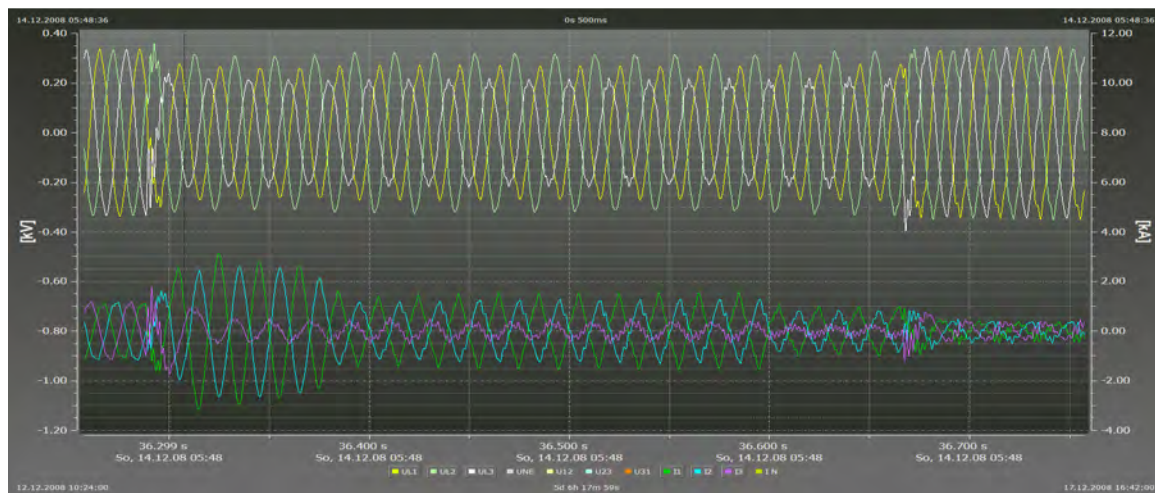


Imagen osciloscópica

3.12 Registro continuo



Tensión, corriente trifásica

4. Datos técnicos

PQ Box100 (4U/4I)		Compatibilidad electromagnética	
4 entradas tensión rms/dc autorango: (opcional 1960V CA L-L max.)	L1, L2, L3, N, tierra 565V CA/700V CC L-N; 980V CA/1380 CC L-L	Conformidad CE	
4 entradas de corriente rms/dc autorango:	1000 mV para tenazas de corriente de tipo Mini y 330mV para tenazas de corriente de tipo Rogowski	● Resistencia a perturbaciones — EN 61326 — EN 61000-6-2 ● Transmisión de fallos — EN 61326 — EN 61000-6-4	
Frecuencia de muestreo:	10,24 kHz a 50/60Hz (>204/>170 muestras/ciclo)	ESD — IEC 61000-4-2 — IEC 60 255-22-2	8 kV / 16 kV
Sincronización automática a oscilación fundamental:	45Hz a 65Hz	Campos electromagnéticos — IEC 61000-4-3 — IEC 60 255-22-3	10 V/m
Intervalos de medición: (opcional hasta 120min)	libremente ajustables de 1s a 30min. + 15min simultaneos	Ráfaga — IEC 61000-4-4 — IEC 60 255-22-4	4 kV / 2 kV
Memoria flash SD card:	>2 GB (opcional 8 GB)	Sobretensión — IEC 61000-4-5	2 kV / 1 kV
Interfaces:	USB 2.0 (opcional modulo LAN)	conectado mediante cable de alta frecuencia — IEC 61000-4-6	10 V, 150 kHz ... 80 MHz
Sincronización reloj:	Radio o GPS por puerto RS232	Caídas de tensión — IEC 61000-4-11	100 % 1 min.
Dimensiones:	220 x 146 x 55 mm	● Carcasa a 10m de separación ● Conexión de red CA a 10 m de separación	30...230 MHz, 40 dB 230...1000 MHz, 47 dB 0,15...0,5 MHz, 79 dB 0,5...5 MHz, 73 dB 5...30 MHz, 73 dB
Peso:	1,7 kg		
Tipo de protección:	IP65 según IEC 60529		
IEC 61000-4-30:2015	Clase A		
Precisión:	< 0,1%		
Categoría de aislamiento:	CAT III / 600V, CAT IV / 300V opcional CAT III 1000V/IV 600V		
Conversión A/D:	24 bits		
Temperatura (almacen):	función: -20°...60°C (-30°...80°C)		
Humedad relativa:	0% ...98% sin condensado		
Presión atmosférica:	1080mbar...450mbar (>4800 m)		
Pantalla de visualización y teclado táctil:	LCD alfanumérica monocroma y retroiluminada, con 6 líneas		
Tensión de alimentación y cargador interno:	100V...400V CA (opcional 88V...480V CA) (o 140V...220V CC) acumulador recargable		
USB	5V por USB para configurar y descargar datos		

5. Accesorios inteligentes

- El dispositivo de medición detecta automáticamente las tenazas de corriente.

- El dispositivo adapta automáticamente el factor de transformador al accesorio.

Tenazas de corriente de tipo Rogowski: (nº ident. 111.7001)

Intervalo de corriente:	RMS 3000A CA
Intervalo de medición:	RMS 1A hasta 3000A
Tensión de salida:	85mV / 1000A
Intervalo de frecuencia:	10Hz a 20kHz
Tensión de trabajo:	1000V CAT. III 600V CAT. IV
Límite de error	1%
Error angular (45 – 65Hz)	1°
Cabeza de tenazas de tipo Rogowski	
— Longitud	610mm
— Diámetro	194mm
Longitud de cable de conexión	2m

Tenazas de corriente de tipo Rogowski: (nº ident. 111.7006)

Intervalo de corriente:	RMS 6000A CA
Intervalo de medición:	RMS 10A hasta 6000A
Tensión de salida:	42,5mV / 1000A
Intervalo de frecuencia:	10Hz a 20kHz
Tensión de trabajo:	1000V CAT. III 600V CAT. IV
Límite de error	1%
Error angular (45 – 65Hz)	1°
Cabeza de tenazas de tipo Rogowski	
— Longitud	910mm
— Diámetro	290mm
Longitud de cable de conexión	2m

Tenazas de corriente de tipo mini de Mu-metal: (nº ident. 111.7002 / 3)

Las tenazas de Mu-metal son especialmente adecuadas para mediciones en transformadores secundarios en redes de media o alta tensión. Combinan una precisión muy elevada con un reducido error angular.

Intervalo de corriente:	RMS 20A CA
Intervalo de medición:	RMS 10mA hasta 20A
Tensión de salida:	10mV / A
Intervalo de frecuencia:	40Hz a 10kHz
Tensión de trabajo:	600V CA / CC

Precisión

Corriente 50Hz	10mA	5A	20A
Límite de error	<1,0%	<0,5%	<0,5%
Error angular	<1°	<0,5°	<0,5°

Tenazas de corriente de tipo mini de Mu-metal: (nº ident. 111.7015)

Intervalo de corriente:	RMS 20A/200A CA conmutable
Intervalo de medición:	RMS 10mA hasta 200A
Tensión de salida:	1mV/10mV/A
Intervalo de frecuencia:	40Hz a 20 kHz
Tensión de trabajo:	600V CA / CC

Precisión

Corriente 50Hz	100mA – 10A	10A – 20A	20A – 200A
Límite de error	< 1%	< 0,5%	< 0,5%
Error angular	< 0,5°	< 0,5°	< 0,5°

6. Datos para el pedido

Para indicar los datos para el pedido ha de considerarse lo siguiente:

CARACTERÍSTICAS	IDENTIFICACIÓN
Registrador de fallos y analizador de redes según DIN EN 50160 y IEC 61000-3-40, clase A Analizador de redes de calidad de energía portátil y medidor de potencia para redes de baja, media y alta tensión según DIN EN-50160/ IEC 61000-4-30, clase A - Memoria flash SD card de 2 GB (opcional hasta 8 GB) - Interfaz USB - Pantalla de visualización - IP65 - Alimentación de corriente ininterrumpida - Juego de cables USB - Cable de conexión para tensión 2 cables de alimentación 5 bornes Delphin - Maletín para tenazas de corriente y cables de medición, incl. software de valoración	PQ-Box 100
Versión - PQ-Box 100 (4U/4I) basic - PQ-Box 100 (4U/4I) light - PQ-Box 100 (4U/4I) expert	B0 B1 B2
Manual de instrucciones y pantalla de visualización - alemán - inglés - francés - español - italiano - neerlandés - checo - ruso - polaco	G1 G2 G3 G4 G5 G6 G7 G8 G9

MEJORAS	Nº de producto
Versión - Mejora de la versión "basic" (B0) a "light" (B1) - Mejora de la versión "light" (B1) a "expert" (B2) - Mejora de la versión "basic" (B0) a "expert" (B2) - Mejora de R0 a R1 (registrador con telemando)	900.9090 900.9091 900.9093 900.9092

ACCESORIOS	Nº de producto
Tenazas de corriente - Juego de bobinas de tipo Rogowski 4~ 0 – 3.000 A (61 cm) - Juego de bobinas de tipo Rogowski 4~ 0 – 6.000 A (91 cm) - Tenazas de corriente CA/CC 60A/600A, incl. fuente de alimentación y conector adaptador de 4mm - Juego de cables de conexión libres para juego de tenazas de corriente 4~ - Juego de tenazas de corriente de tipo mini 4~ 0 - 20 A conmutable 0 – 200A - Prolongación de tenazas de corriente de 5m para tenazas de tipo mini y Rogowski - Juego de tomas de tensión magnéticas - Modulo puerto LAN 10/100Mbps - Opción CAT-Booster (600V CAT IV) para PQ-Box 100/200	111.7001 111.7006 111.7020 111.7004 111.7015 111.7025 111.7008 111.9030.43 111.7026



PQ-Box 100 con maletín y accesorios

A. Eberle GmbH & Co. KG

Frankenstraße 160
D-90461 Nürnberg (Alemania)

Tel.: +49 (0) 911 / 62 81 08-0
Fax: +49 (0) 911 / 62 81 08 99
Correo electrónico: info@a-eberle.de

<http://www.a-eberle.de>

Versión del software:

Copyright 2013 by A. Eberle GmbH & Co. KG

Sujeto a modificaciones.

Analizador de redes – PQ-Box 100