



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Modelado y simulación de cargas no
lineales para estudios de propagación de
armónicos en sistemas de distribución.**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Mendieta Mejía Luis Alejandro

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Vicente Torres García



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

Agradecimientos.

"Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que han contribuido a la realización de esta tesis. En primer lugar, agradezco a mi familia por su amor incondicional y apoyo constante a lo largo de mi carrera académica. Sin ellos, no habría sido posible completar esta investigación.

También quiero agradecer a mi asesor, Doctor Vicente Torres García por su guía y orientación durante el proceso de investigación, además de brindar mediciones para el modelado de las cargas no lineales. Su enseñanza y apoyo han sido invaluable para mí.

De igual forma agradezco al Doctor Mario Roberto Arrieta Paternina, por su colaboración y apoyo durante el proceso de desarrollo del análisis de la transformada de Taylor-Fourier. Sus comentarios y sugerencias han sido de gran ayuda para la conclusión exitosa de este proyecto.

Agradezco al programa PAPIIT con el número de programa IA105022 por su financiamiento y apoyo durante este proyecto. Así como también al Doctor Vicente Torres García por ser intermediario entre el programa de beca y el proyecto de tesis.

Estoy agradecido por todo el apoyo y ayuda que he recibido durante el desarrollo de esta tesis. Espero que este trabajo pueda ser de utilidad y aporte al conocimiento en el campo del análisis de calidad de la energía".

Tabla de contenido

Agradecimientos.....	1
Índice de figuras.....	4
Índice de tablas.....	6
Resumen.....	7
Abstrac.....	8
Capítulo 1. Introducción.....	9
1.1. Antecedentes.....	9
1.2. Planteamiento del problema.....	10
1.3. Justificación.....	10
1.4. Hipótesis.....	10
1.5. Objetivos.....	11
1.5.1. Objetivo general.....	11
1.5.2. Objetivo específico.....	11
1.6. Estado del arte.....	11
1.7. Organización.....	14
Capítulo 2. Calidad de la energía.....	15
2.1. Conceptos generales de Calidad de la energía.....	15
2.2. Clasificación de los fenómenos de Calidad de la energía.....	15
2.2.1. Transitorios.....	18
2.2.2. Variaciones de corta duración.....	18
2.2.3. Variación de voltaje de larga duración.....	19
2.2.4. Voltaje desbalanceado.....	20
2.2.5. Distorsión de forma de onda.....	20
2.2.6. Fluctuaciones de voltaje.....	22
2.2.7. Variaciones de frecuencia.....	22
2.3. Problemas relacionados con componentes armónicos.....	22
2.4. Distorsión Total de la forma de onda de voltaje y corriente.....	24
2.5. Cargas no lineales.....	28
Capítulo 3. Transformada Discreta de Taylor Fourier.....	30
3.1. Análisis de Fourier.....	30
3.2. La transformada discreta de Fourier.....	31

3.3. Series de Taylor.....	31
3.4. Algoritmo Taylor-Fourier	32
Capítulo 4. Caracterización de cargas no lineales	38
4.1. Transformadores.....	38
4.2. Máquinas rotatorias	39
4.3. Lámparas fluorescentes.....	40
4.4. Horno eléctrico.....	41
4.5. Variadores de velocidad ajustables	42
4.6. Energización de un banco de capacitores	43
4.7. Convertidores de potencia trifásicos	44
4.8 Mediciones reales de una carga no lineal.....	45
Capítulo 5. Simulaciones y Casos de Estudio.....	47
5.1. Parametrización y simulación de un circuito de distribución de 23 kV	47
5.2. Parámetros del circuito eléctrico y condiciones iniciales.....	49
5.3. Análisis de los eventos utilizando la transformada Taylor-Fourier	50
5.3. Energización de banco de capacitores	51
5.4. Arranque de motor de inducción	52
5.5. Energización de transformador	54
5.6. Carga no lineal estación del metro.....	55
5.7. Resultados de simulación del sistema de 23 kV en ATPDraw y procesamiento con la transformada de Taylor-Fourier	57
Capítulo 6. Conclusiones y Trabajo a futuro	61
Referencias.....	63
7. Anexo.....	66
6.1. Interfaz gráfica en Matlab	66
6.2. Código principal Matlab	73

Índice de figuras

Figura 1 Onda senoidal distorsionada.....	25
Figura 2. Carga lineal.....	28
Figura 3. Carga no lineal.....	29
Figura 4. Proceso de ventaneo.....	32
Figura 5. Subespacio de Fourier y Taylor-Fourier.....	33
Figura 6. k-ésimo término de la aproximación polinomial de Taylor.....	33
Figura 7. Obtención coeficientes de Taylor-Fourier.....	37
Figura 8. Corriente de magnetización de un transformador. THD=76.1%.....	38
Figura 9. a) Corriente de un refrigerador 120 V. THD=6.3% b) Corriente de un aire acondicionado domestico 240 V. THD=10.5%.....	40
Figura 10. Corriente de lámpara fluorescente con balastro magnético. THD=18.5%.....	41
Figura 11. Corriente de horno eléctrico.....	41
Figura 12. Corriente de variador de velocidad ajustable.....	42
Figura 13. Corriente de la energización de un banco de capacitores.....	43
Figura 14. Corriente de un variador da velocidad ajustable.....	44
Figura 15. Corriente de PWM-type ASD.....	44
Figura 16. Corriente medida en una estación del metro.....	45
Figura 17. Voltaje medido en estación del metro THD=6.4%.....	46
Figura 18. Componentes armónicos del voltaje medido en la estación del metro.....	46
Figura 19. Diagrama unifilar del sistema de distribución 23 kV.....	48
Figura 20. a) Voltaje obtenido en la simulación del sistema. b) Corriente obtenido de la simulación del sistema.....	49
Figura 21. Corrientes resultantes al energizar un banco de capacitores.....	51

Figura 22. a) Reconstrucción de la forma de onda a partir de sus monocomponentes. b) Componentes armónicos que componen a la corriente aparecidos durante la energización de un banco de capacitores.	52
Figura 23. Arranque de un motor de inducción.....	53
Figura 24. Componentes armónicos durante el arranque de un motor.	54
Figura 25. Corrientes al energizar un transformador.	55
Figura 26. Componentes armónicos durante la energización de un transformador.	55
Figura 27. Corrientes resultantes ATPDraw al conectar la estación del metro.....	56
Figura 28. Componentes armónicos de la carga no lineal.	57
Figura 29. Comportamiento armónico utilizando Taylor-Fourier.	59
Figura 30. Identificación de cargas no lineales en el sistema simulado.	60
Figura A. 1. Interfaz gráfica utilizando Matlab.....	66
Figura A. 2. Reconstrucción de la corriente con la Transformada digital de Taylor-Fourier.	67
Figura A. 3. Descomposición de corriente en sus principales en sus componentes.	68
Figura A. 4. Descomposición de la corriente, mostrando que los armónicos que alcanzaron una amplitud mayor a 20 y sin mostrar la fundamental.....	68
Figura A. 5. Gráfica de barras la última magnitud obtenida por la TDTF.	69
Figura A. 6. THD del sistema durante todo el tiempo.	69
Figura A. 7. Gráfica la distorsión armónica individual durante el tiempo.	70
Figura A. 8. Banco de filtros digitales de Taylor-Fourier con su frecuencia normalizada. ..	70
Figura A. 9. Recopilación de graficas obtenidas con el método de la transformada digital de Taylor-Fourier.....	71
Figura A. 10. Archivo obtenido en formato “.txt”.	72

Índice de tablas

Tabla I. Categorías y características de los fenómenos electromagnéticos del sistema de potencia.	17
Tabla II Límites de distorsión armónica de voltaje en porcentaje nominal de la frecuencia fundamental.	26
Tabla III. Límites de distorsión armónica en la corriente en % de IL	27
Tabla IV. Corrientes armónicas de un horno de arco en 2 etapas del ciclo de fusión.	42
Tabla V. Eventos de simulación en el sistema de distribución	48

Resumen

Recientemente, se ha observado una serie de cambios en los sistemas eléctricos de potencia, tanto en transmisión como en distribución. La introducción de nuevas tecnologías de electrónica de potencia ha dado lugar a problemas relacionados con la calidad de la energía. En este trabajo de tesis se presenta un análisis de las cargas no lineales y su impacto en los sistemas de distribución.

El sistema de distribución analizado corresponde a un sistema típico de 23 kV en donde se muestra la operación típica de diversos equipos, como son la energización de transformadores y arranque de motores, además de la conexión de una estación del metro de la ciudad de México. La identificación de las señales se lleva a cabo a través de la transformada digital de Taylor-Fourier, la cual permite calcular los armónicos e identificar las cargas no lineales. Como resultado, se ha desarrollado una herramienta en Matlab que permite analizar señales de voltaje y corriente, las procesa y permite los armónicos presentes. Los resultados obtenidos demuestran la capacidad de identificar la fuente de armónicos en el sistema evaluado.

Abstrac

Recently, a series of changes have been observed in power electrical systems, both in transmission and distribution. The introduction of new power electronics technologies has led to issues related to power quality. This thesis presents an analysis of nonlinear loads and their impact on distribution systems.

The analyzed distribution system corresponds to a typical 23 kV system, where the typical operation of various equipment is examined, including transformer energization, motor starting, and the connection of a subway station in Mexico City. Signal identification is performed using the Taylor-Fourier digital transform, which allows for harmonic calculation and identification of nonlinear loads. As a result, a Matlab tool has been developed to analyze voltage and current signals, process them, and identify the present harmonics. The obtained results demonstrate the capability to identify the source of harmonics in the evaluated system.

Capítulo 1. Introducción.

1.1. Antecedentes

Es conocido que las redes eléctricas de distribución aéreas y subterráneas alimentan prácticamente a todos los hogares, centros comerciales, industria y zonas rurales en cualquier país. Sin esta energía, los niveles de progreso social y económico que hoy se tiene no existirían. Uno de los aspectos más importantes para las compañías de suministro eléctrico es el suministrar insumos y bienes energéticos requeridos para el desarrollo productivo y social del país de forma eficiente y sustentable con seguridad y confiabilidad.

El término calidad de la energía es difícil de definir, cada una de ellas se interpreta de mayor o menor manera a una misma perturbación en el sistema, por lo tanto, el término calidad de la energía varía dependiendo del marco de referencia, el productor o el usuario final [1].

Por ejemplo, la CFE (Comisión Federal de Electricidad), define la calidad de la energía como características eléctricas de un punto determinado del sistema eléctrico, evaluadas con respecto a un conjunto de parámetros y sus valores de referencia, relacionados a la compatibilidad electromagnética entre el suministrador y los clientes de CFE [2].

Por otra parte, el instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos o por sus siglas en inglés IEEE (*The Institute of Electrical and Electronics Engineers*) en la recomendación IEEE 1159-1995, explica que el término se refiere a una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente eléctricas, en un tiempo dado y en una ubicación en el sistema de potencia [3].

Por último, el International Electrotechnical Committee (IEC), en las normas IEC 61000, no mencionan directamente el concepto de calidad de la energía, sin embargo, enlistan los fenómenos eléctricos que desvían a los sistemas de transmisión y distribución de sus parámetros ideales.

Por lo tanto, la calidad de la energía se puede entender como un conjunto de características de la energía eléctrica que es suministrada por el sistema de potencia que permite satisfacer de las necesidades del usuario final, sin presentarse cualquier tipo de perturbación en el voltaje, la corriente o la frecuencia que pueden resultar en fallas o mal funcionamiento.

1.2. Planteamiento del problema

Debido al diseño de los sistemas eléctricos de potencia y las máquinas eléctricas que lo conforman, como son los transformadores, motores, etc. La presencia de componentes armónicos ha sido inevitable, en el pasado el estudio de los armónicos en los sistemas de distribución no se le daba importancia y se limitaban a la magnitud y la duración de los armónicos. Sin embargo, en las últimas décadas han aumentado el uso de variadores de velocidad, hornos de arco eléctrico, reguladores de voltaje, televisores, computadoras, lámparas fluorescentes, teléfonos celulares, celdas fotovoltaicas, etc. en los sectores comerciales, residenciales e industriales, ha llevado a que los sistemas eléctricos de distribución estén operando al límite de sus capacidades, incrementando considerablemente la demanda de energía eléctrica, provocando distorsiones en las formas de onda del voltaje y corriente, deteriora el rendimiento de los equipos y dispositivos conectados en los sistemas de distribución.

1.3. Justificación

La presencia de armónicos puede llevar a condiciones de operación no deseadas como límites térmicos, en conductores y máquinas y en el peor de los casos a condiciones de resonancia. En este sentido las componentes armónicas en los sistemas de distribución han despertado el interés del estudio armónico y la calidad de la energía. Para mantener en límites aceptables la distorsión armónica total (THD) y preservar la calidad de la energía, se han elaborado normas y estándares tanto como para las compañías eléctricas como para los consumidores. Por lo que el análisis de los armónicos es primordial para determinar el funcionamiento de estos equipos y poder mitigar los armónicos.

1.4. Hipótesis

Las cargas no lineales producen armónicos aleatorios y sus parámetros tienen naturaleza probabilística, en muchos de los modelos de cargas no lineales se basan en los parámetros medidos que después son representados por una fuente de corriente o voltaje y al final se determina la distorsión armónica total como índice para identificar los efectos en el sistema.

La transformada de Fourier se utiliza para el cálculo de los componentes armónicos de voltaje y corriente para la correcta evaluación del fenómeno a analizar, a pesar de que ha sido efectiva, actualmente existe una nueva técnica que parte de la estimación utilizando un sistema embebido, cuya fundamentación matemática se

centra en el subespacio generado por la transformada de Fourier y su relación por polinomios interpolantes de Taylor. Esta técnica es conocida como la transformada digital de Taylor-Fourier y se basa en el concepto de fasor dinámico, lo que permite obtener resultados en estado estable como en estado transitorio.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

- Identificar las fuentes de armónicos en un sistema de distribución utilizando la técnica de Taylor-Fourier.

1.5.2. Objetivo específico

- Análisis de las Formas de onda de voltaje y corriente de cargas no lineales utilizando la Transformada de Fourier.
- Implementación de un sistema de distribución con carga no lineal en ATPDraw.
- Análisis del sistema de distribución ante varios eventos en presencia de carga no lineal en ATPDraw.
- Identificación de la fuente de armónicos con la técnica Taylor-Fourier.
- Análisis de cargas no lineales de mediciones.

1.6. Estado del arte

Debido a las nuevas tecnologías que son más sensibles a los fenómenos y con base a lo visto en la sección anterior, no es difícil imaginar que el estudio de la calidad de la energía en los sistemas eléctricos de potencia ha ganado relevancia en los últimos años. A continuación, se muestran algunos trabajos de investigación sobre análisis de los armónicos.

En primera instancia tenemos los primeros trabajos enfocados en introducir el análisis y modelado de armónicos:

En [4], J. K. Phipps presenta en su artículo que funciona como introducción al concepto de los armónicos, definiciones básicas sobre el cálculo de armónicos, efectos de la distorsión armónica y una lista de fuentes comunes de armónicos.

En [5], la IEEE presenta una forma de hacer un modelado de fuente de armónicos (cargas no lineales como fuentes de voltaje o corriente) y elementos que conforman la red eléctrica (transformadores, líneas aéreas y maquinas rotatorias).

Con el tiempo, creció el interés por el análisis de la distorsión armónica, por lo que el interés de crear más modelos de las cargas no lineales y los efectos que estos provocan en los sistemas eléctricos de distribución, industriales o domésticos. Así como utilizar nuevas técnicas para el análisis.

En [6], R. Abu-Hashim proporciona los datos completos obtenidos de tres sistemas de prueba de armónicos (Sistema de transmisión balanceado con 14 buses, Sistema de distribución de servicio público con 13 buses y sistema de distribución industrial balanceado de 13 buses), por lo que pueden ser utilizados como referencia para desarrollar nuevos métodos de análisis de armónicos o evaluar la efectividad del software para el análisis armónico.

En [7], J. Desmet concluyen que la disipación de los cables es mayor a la esperada. El conductor neutro alcanza condiciones de sobre carga cuando se presentan cargas no lineales o asimétricas, afectando a los sistemas de distribución ocasionada por la relación directa entre la temperatura y la disipación de potencia

En [8], J. A. Pomilio con base a las mediciones y simulaciones de cargas no lineales domésticas (refrigerador y TV), realizadas en su laboratorio, confirman que las cargas no lineales domésticas y comerciales se comportan esencialmente como fuentes de tensión armónica.

En [9], W. Abbas presenta un análisis sobre el efecto de introducir cargas no lineales con variadores de frecuencia en un sistema industrial a varios niveles de voltaje (220 kv, 11 kv y 0.42 kv) y concluyendo que cuando las cargas no lineales se concentran en los niveles bajos la magnitud de la distorsión armónica es máxima.

En [10], C. Venkatesh desarrolla modelos de simulación para cargas no lineales (computadora personal, lampara fluorescente y variador de velocidad), basadas en formas de onda de voltaje y corriente obtenida en el laboratorio.

En [11], R. D. Patidar concluye que las fuentes de tensión armónica son mucho más peligrosas para el sistema que las de corriente debido a que estas no son atenuadas por la impedancia del sistema. Además, que el uso de filtros pasivos funciona con las fuentes de corriente armónica pero no es tan eficaz para las fuentes de tensión armónica.

En [12], M. J. H. Rawa concluye que los convertidores forward y convertidor flyback pueden ser modelados como cargas RL siempre y cuando no se esté llevando a cabo alguna técnica de corrección de factor de potencia.

En [13], W. C. Carreño implementa una carga no lineal en un software de interfaz gráfica de desarrollo propio, que permite analizar sistemas lineales y no lineales en

el dominio del tiempo, sistemas lineales en el dominio de la frecuencia y sistemas mixtos utilizando un método híbrido.

En [14], T. A. Abdul-Hemeed investiga los efectos de los armónicos producidos por las cargas no lineales en los sistemas eléctricos de distribución, usando técnicas de simulación en Matlab/Simulink donde se observó que el sistema era inestable con oscilaciones no periódicas y que la distorsión armónica total (THD) de la corriente era del 112,04 % como máximo.

En [15], L. I. Kovernikova concluyen que los armónicos al ser aleatorios y sus parámetros tienen naturaleza probabilística, las cargas no lineales pueden ser modeladas utilizando el tercer y quinto armónico de los parámetros medidos.

En [16], se presenta un banco de filtros en la transformada discreta de Fourier o DFT por sus siglas del inglés Discrete Fourier Transform, para la medición de armónicos.

En [17], Fusheng Zhang propone una mejora a la transformada rápida de Fourier mediante la interpolación de cosenos.

En [18], Qiu Tang Yaonan Wang se propone un método de medición de armónicos basado en la interpolación de ventanas mediante el algoritmo de la transformada rápida de Fourier e implementa un equipo virtual de medición de armónicos en LabVIEW, con el que consigue observar la fundamental y 12 de sus armónicos subsecuentes.

En [19], Palacios Elizarraga su tesis se enfoca en la creación de un modelo de carga no lineal para el software PSCAD el cual contiene datos del contenido armónico de diferentes cargas no lineales reales.

En [20], Wenxuan Yao en su artículo presentan un estudio de método basado en la transformada rápida de Fourier, donde la señal armónica es procesada por un banco de filtros utilizando el operador Teager-Kaiser para la detección de tiempos de inestabilidad.

A partir de la literatura investigada se puede concluir que a los avances realizados se enfocan en el efecto de cargas no lineales en el sistema y como representarla a partir de modelos provenientes de mediciones.

Ese sentido este trabajo de tesis, se propone un modelado de cargas no lineales utilizando mediciones, reales o simuladas en el hardware *ATPdraw* y con los parámetros obtenidos se propone la detección de este tipo de cargas en un sistema de distribución real utilizando técnicas de procesamiento digital de señales como es la transformada digital de Taylor-Fourier.

1.7. Organización

Capítulo 1.- En este capítulo se da una introducción, se plantea el problema, se da una justificación, hipótesis, se definen los objetivos y se describe el estado el arte.

Capítulo 2.- En este capítulo se aborda sobre el concepto de calidad de la energía, normatividad y términos utilizados.

Capítulo 3.- El capítulo se enfoca en el método de la transformada de Taylor-Fourier, desde su conceptualización y el desarrollo matemático que lo componen.

Capítulo 4.- En este capítulo se investiga las diversas cargas no lineales que existen en los sistemas de distribución y los modelos utilizados.

Capítulo 5.- En este capítulo presentan las características de un sistema de distribución real en 23 kV el cual es simulado en ATPDraw. También se hace énfasis en el modelado de cargas no lineales y los resultados obtenidos utilizados la transformada de Taylor-Fourier. Se llevan acabo simulaciones en un sistema típico de 23 kV y posteriormente se hace procesamiento de las señales a través de transformada digital de Taylor-Fourier.

Capítulo 6.- En este capítulo se muestran las conclusiones del trabajo donde se trata de resumir los hallazgos del trabajo, así como el trabajo a futuro.

Capítulo 2. Calidad de la energía.

2.1. Conceptos generales de Calidad de la energía

El Instituto de Investigación Eléctrica o EPRI (por sus siglas en inglés *Electric Power Research Institute*), define a la calidad de la energía como “Cualquier problema de potencia manifestado en la desviación de la tensión, de la corriente frecuencia, de sus valores ideales que ocasione fallas o mala operación del equipo de un usuario” [21]. Lo anterior puede ser complementado con la definición que da la IEEE, que define a la calidad de la energía como una amplia cantidad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan al voltaje como a la corriente, en un tiempo dado y una locación dada en el sistema de potencia [22]. Al combinar ambas definiciones y algunos conceptos básicos se obtiene una comprensión más completa de la calidad de la energía.

2.2. Clasificación de los fenómenos de Calidad de la energía

Los principales fenómenos causantes de perturbaciones electromagnéticas son clasificadas por la IEC, en los siguientes grupos [22]:

- **Fenómenos causados por baja frecuencia**
 - Armónicos, interarmónicos.
 - Sistemas de señales.
 - Fluctuaciones de voltaje (*flicker*).
 - Dips e interrupciones de voltaje.
 - Voltaje desbalanceado.
 - Variaciones de frecuencia.
 - Inducción de voltajes de baja frecuencia.
 - Componente de DC en redes de CA.
- **Fenómenos radiados de baja frecuencia.**
 - Campos magnéticos.
 - Campos eléctricos.
- **Fenómenos causados por baja frecuencia.**
 - Ondas continuas inducidas de voltaje o corriente.
 - Estados transitorio unidireccional.
 - Estados transitorios oscilatorios.
- **Fenómenos radiados de alta frecuencia.**

- Campos magnéticos
- Campos eléctricos
- Campos electromagnéticos
- Ondas continuas
- Transitorios
- **Fenómenos de descarga electrostática**
- **Pulsos electromagnéticos nucleares**

Los fenómenos mencionados anteriormente pueden ser descritos apropiadamente con sus atributos. Para fenómenos de estado estacionario se utiliza su amplitud, frecuencia, espectro, modulación, fuente de impedancia, notch Depth y notch area. Para fenómenos de estado no estacionario, tasa de incremento, amplitud, espectros, frecuencia, tasa de ocurrencia, fuente de impedancia y energía potencial. Todo esto nos proporciona información sobre características físicas de la energía eléctrica como contenido espectral, duración y magnitud cuando sea apropiada para cada categoría de fenómenos electromagnéticos [22].

Debido a que existen diferentes formas de resolver los problemas de la calidad de la energía, según la variación particular, se desarrollaron las diferentes categorías de fenómenos electromagnéticos, como se muestra en la Tabla I, gracias a esto se puede clasificar los resultados de las mediciones y describir los fenómenos electromagnéticos que pueden causar problemas en la calidad de la energía. Las subclases mostradas proporcionan una descripción más detallada para cada una de las categorías de variaciones de la calidad de la energía. Las soluciones disponibles se discuten dependiendo de la categoría [1].

Tabla I. Categorías y características de los fenómenos electromagnéticos del sistema de potencia [1].

Categorías	Contenido espectral típico	Duración típica	Magnitud de voltaje típica
1 Transitorios			
1.1 impulsos			
1.1.1 Nanosegundos	5 ns de elevación	<50 ns	
1.1.2 Microsegundos	1 μ s de elevación	50 ns – 1 ms	
1.1.3 Milisegundos	0.1 ms de elevación	> 1 ms	
1.2 Oscilatorios			
1.2.1 Baja frecuencia	<5kHz	0.3 – 50 ms	0 – 4 p.u.
1.2.2 Media frecuencia	5 – 500 kHz	20 μ s	0 – 8 p.u.
1.2.3 Alta frecuencia	0.5 – 5 MHz	5 μ s	0 – 4 p.u.
2 Variaciones de corta duración.			
2.1 Instantáneas			
2.1.1 Sag		0.5 – 30 ciclos	0.1 – 0.9 p.u.
2.1.2 Swell		0.5 – 30 ciclos	1.1 – 1.8 p.u.
2.2 Momentáneas			
2.2.1 interrupción		0.5 ciclos – 3 s	< 0.1 p.u.
2.2.2 Sag		30 ciclos – 3 s	1.1 – 0.9 p.u.
2.2.3 Swell		30 ciclos – 3 s	1.1 – 1.4 p.u.
2.3 Temporal			
2.3.1 Interrupción		3 s – 1 min	<0.1 p.u.
2.3.2 Sag		3 s – 1 min	0.1-0.9 p.u.
2.3.3 Swell		3s – 1 min	1.1 – 1.2 p. u.
3 Variaciones de larga duración			
3.1 Interrupción sostenida		> 1 min	0.0 p.u.
3.2 Bajo voltajes		> 1 min	0.8 – 0.9 p.u.
3.3 Sobre voltajes		> 1 min	1.1 – 1.2 p.u.
4 Desbalance en voltaje		Estado estable	0.5 – 2 %
5 Distorsión de forma de onda			
5.1 Componente de directa		Estado estable	0 – 0.1 %
5.2 Contenido armónico	0 – 100th H	Estado estable	0– 20 %
5.3 Interarmónicos	0 – 6 kHz	Estado estable	0 – 2 %
5.4 Muesca en el voltaje		Estado estable	
5.5 Ruido	Banda amplia	Estado estable	0– 1 %
6 Fluctuaciones de voltaje	<25 Hz	Intermitente	0.1 - 7 %
7 Variaciones en la frecuencia		<10 s	

2.2.1. Transitorios

El termino transitorio puede definirse como “*un fenómeno o una magnitud que varía entre dos regímenes permanentes consecutivos durante un intervalo de tiempo relativamente corto comparado con la escala de tiempo considerada*” [23]. Por lo que una perturbación transitoria es una desviación de corta duración, normalmente inferior a un ciclo de la frecuencia fundamental. La IEEE 1159-1995 menciona que los transitorios se pueden clasificar en dos categorías, transitorios impulsivos y transitorios oscilatorios.

2.2.1.1. Transitorios impulsivos

Los transitorios de impulso son un cambio inesperado que pueden elevar la tensión o los niveles de corriente en dirección positiva o negativa. Los eventos de este tipo pueden clasificarse más detenidamente por la velocidad a la que ocurren como se muestra en la Tabla I [23].

2.2.1.2. Transitorios Oscilatorios

Los transitorios oscilatorios son un cambio inesperado en la condición de estado estable del voltaje o la corriente que tiene valores de polaridad positivos y negativo de la señal. A diferencia de un transitorio impulsivo, el transitorio oscilatorio consiste en una tensión o corriente cuyo valor instantáneo cambia de polaridad rápidamente. Como se muestra en la Tabla I se clasifican como alta, media o baja frecuencia [23].

2.2.2. Variaciones de corta duración

Las variaciones de voltaje de corta duración son causadas por condiciones de falla, la energización de grandes cargas que requieren altas corrientes de arranque o conexiones intermitentes de alimentación. Dependiendo de la ubicación de la falla y las condiciones del sistema, la falla puede causar caídas de voltaje (*sag*), aumento de voltaje (*swell*) o una pérdida completa de voltaje (interrupción). La condición de falla puede presentarse de manera remota o cercana desde el punto de interés. Dependiendo de la duración mostrada en la Tabla I, cualquier tipo de variación puede ser designada como instantánea, momentánea o temporal [22].

2.2.2.1. Interrupción.

Se produce una interrupción cuando la tensión de alimentación o la corriente de la carga disminuye al menos un 0.1 p.u. durante un periodo no mayor a 1 minuto. Por lo que las interrupciones se miden por duración ya que la magnitud del voltaje es siempre menos al 10 por ciento del nominal. La duración de una interrupción debido a una falla en el sistema eléctrico está determinada por el tiempo que tardan los dispositivos de protección en actuar por lo que la caída de voltaje ocurre cuando se presenta la falla y el dispositivo de protección empieza a operar [22].

2.2.2.2. Sag

El termino *Sag* es usado como un sinónimo del término *Dip* que es empleado en la IEC. Un *Sag* es una disminución entre el 0.1 p.u. a 0.9 p.u. en las ondas RMS del voltaje o la corriente, es decir es una reducción de voltaje corriente, respecto al valor nominal del sistema. La duración de un *Sag* varía entre los 0.5 ciclos y un minuto [22].

2.2.2.3. Swell

El termino *Swell* es la contra parte del *Sag*. Por lo que un *Swell* es el incremento del valor RMS en las ondas entre 1.1 p.u. a 1.8 p.u. al igual que los *Sag* su duración varía entre 0.5 ciclos y un minuto [1].

2.2.3. Variación de voltaje de larga duración

Las variaciones de larga duración abarcan las desviaciones RMS en las frecuencias de potencia durante más de un 1 minuto. La ANSI C84.1 especifica las tolerancias de voltaje de estado estable esperadas en un sistema de potencia.

Las variaciones de larga duración pueden ser sobre voltaje (overvoltage) o bajo voltaje (undervoltage). Estos suelen ser causadas por variaciones de carga en el sistema y operaciones de maniobra en el sistema [22].

2.2.3.1. Sobre voltaje (Overvoltage)

Un “*overvoltage*” o sobre voltaje es un incremento en el voltaje de CA RMS superior al 110% a la frecuencia eléctrica por una duración mayor a un 1 minuto. Se

presentan cuando el sistema es muy débil para la regulación deseada de voltaje o los controles de voltaje son inadecuados como ejemplos que los causan esta la desconexión de una carga grande, la energización un banco de capacitores o el ajuste incorrecto de los tap's sobre los transformadores [22].

2.2.3.2. Bajos voltajes (Undervoltage)

Un bajo voltaje o “*undervoltage*” es un incremento en el voltaje de CA RMS menor al 90% a la frecuencia eléctrica por una duración mayor a un 1 minuto.

Los bajos voltajes son el resultado de los eventos contrarios que causan los sobre voltajes por lo que agregar una carga o retirar un banco de capacitores causará un bajo voltaje hasta que el equipo de regulación del sistema pueda regresar el voltaje a un valor nominal. Por otra parte, el arranque de motores puede causar bajo voltajes [22].

2.2.3.3. Interrupción sostenida

Cuando el voltaje suministrado es cero por un periodo mayor a 1 minutos se considera una variación de voltaje de larga duración de interrupción sostenida, si la interrupción dura más de un minuto esta suele ser permanente y requiere intervención humana para reparar el sistema [22].

2.2.4. Voltaje desbalanceado

El voltaje desbalanceado es definido como la relación entre del voltaje de secuencia negativa y el voltaje de secuencia positiva.

El desbalance puede ser estimado como la desviación máxima del promedio del voltaje o corrientes trifásicas, dividida entre el promedio de las tensiones o corrientes trifásicas expresado en porcentaje [1].

$$\text{Voltaje desbalanceado} = 100 \times \frac{\text{desviación máxima del promedio del voltaje}}{\text{voltaje promedio}}$$

2.2.5. Distorsión de forma de onda

La distorsión de forma de onda es una modificación en el estado estacionario de una onda senoidal ideal que tiene una frecuencia de 50 o 60 Hz, y se puede identificar por los componentes espectrales de la variación [21].

2.2.5.1. Offset de CD

La presencia de un voltaje o corriente de CD en un sistema de alimentación de CA se denomina Offset de CD. Esto ocurre como resultado de un disturbio geomagnético o asimetría de los convertidores de electrónica de potencia [22].

2.2.5.2. Armónicas

Los armónicos son voltaje o corriente senoidales que mantiene frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia del sistema de suministro. Las formas de onda periódicamente distorsionadas se pueden descomponer en una suma de la frecuencia fundamental y las armónicas. La distorsión armónica se origina por las características no lineales de los dispositivos y cargas sobre la red eléctrica [22].

2.2.5.3. Interarmónicos

Los interarmónicos son los voltajes y las corrientes que tienen componentes de frecuencia que no son enteros múltiplos de la frecuencia fundamental que suele ser de 60 Hz. Aparecen como frecuencias discretas o como un espectro de banda amplia [22].

2.2.5.4. Muesca en el voltaje (Notch)

La muesca de voltaje es un disturbio periódico de voltaje causado por la operación normal de los dispositivos eléctricos de potencia cuando la corriente de conmutada de una fase a otra. Debido a que la muesca suele presentarse de manera continua, se puede caracterizar a través del espectro armónico del voltaje afectado, pero es tratado como un caso especial [22].

2.2.5.5. Ruido

Son señales eléctricas no deseadas con contenido espectral de banda ancha menor de 200 kHz sobrepuestas a la corriente o voltaje del sistema de potencia en conductores de fase o conductores neutro. En general, el ruido consiste en cualquier distorsión no deseada de señales de energía que no se puede clasificar como transitorios o armónicos. Puede ser causado por dispositivos eléctricos de potencia, circuitos de control o cargas con rectificadores de estado sólido [22].

2.2.6. Fluctuaciones de voltaje

Son variaciones sistemáticas de la envolvente de tensión o una serie de cambios de voltaje aleatorios, cuya magnitud no excede los rangos especificados por la ANSI C84.1 de 0.9 p.u. a 1.1 p.u. [22].

Las cargas que tienen variación continua y rápida en la magnitud de la corriente de carga pueden causar las variaciones de voltaje se conoce como *flicker*. La fluctuación de voltaje es un fenómeno electromagnético, mientras que el *flicker* es un resultado no deseado de la fluctuación del voltaje. Sin embargo, los dos términos suelen estar muy asociados a la hora de elaborar normas, por lo que se suele utilizar el flicker para describir las fluctuaciones de voltaje [22].

2.2.7. Variaciones de frecuencia

Las variaciones de la frecuencia se definen como la desviación de la frecuencia fundamental del sistema eléctrico de su valor nominal.

La frecuencia eléctrica está relacionada directamente con la velocidad rotacional de los generadores eléctricos que suministran energía a la red. Se pueden presentar ligeras variaciones en la frecuencia debido principalmente al balance dinámico entre los cambios de generación y carga. El tamaño de la variación en la frecuencia y su duración depende de las características de la carga y la respuesta del sistema de control de generación a los cambios en la carga [1].

2.3. Problemas relacionados con componentes armónicos

El alto contenido armónico en un sistema implica un deterioro de las ondas senoidales de voltaje y de la corriente, afectado directamente a la calidad de la energía eléctrica, lo que provoca problemas como:

- Fallas en los bancos de capacitores debido a las rupturas dieléctricas o sobre cargas de potencia activa.
- Aumento de las pérdidas de potencia activa.
- Interferencias con sistemas de control y sistemas de onda portadora que ocasionan operaciones en falso de los mecanismos que trabajan a control remoto tales como protecciones, control de carga y metrología.
- Pérdidas excesivas y sobre calentamiento de máquinas síncronas y asíncronas.

- Sobrevoltajes debido a la resonancia de los voltajes o corrientes en la red.
- Ruptura dieléctrica de cables aislados resultado de los sobrevoltajes de la red.
- Errores en las mediciones.
- Diminución en la vida útil de los equipos.

Cabe resaltar que todos los efectos dependen de la fuente que genera los armónicos, la localización de dicha fuente y de la facilidad que presenta la red para la propagación de los armónicos.

Debido a los problemas ocasionados por el alto contenido armónico, se han elaborado normas que estandarizan el control para obtener un mínimo de calidad en el suministro de energía eléctrica, que limitan los niveles de distorsión en la onda de voltaje.

La IEEE 519-2014 llamada “Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas eléctricos de Potencia” en el que se puede encontrar [24]:

- Definición de conceptos relacionados a los armónicos.
- Límites de distorsión individual, total de corriente y voltaje en el punto de interconexión.
- Establece los criterios necesarios para controlar los armónicos en el sistema de energía eléctrica, indicando las medidas a tomar para mantener la distorsión armónica del voltaje dentro de los límites aceptables en el punto de interconexión.
- Las especificaciones que requieren los equipos de medición de armónicos cumplan con las especificaciones establecidas en la normativa IEC61000-4-7 y en la IEC 6100-430. Estas normas establecen que los instrumentos de medición de armónicos que emplean la transformada discreta de Fourier deben tener una capacidad de medición de 12 ciclos para sistemas de 60 Hz y de 10 ciclos para sistemas de 50 Hz. Esto significa que el ancho de banda de estos instrumentos debe ser lo suficientemente amplio como para medir y analizar la distorsión armónica en los sistemas eléctricos para medir y analizar la distorsión armónica en los sistemas eléctricos de acuerdo con estas normas.

Por otra parte, la IEC establece una serie de normas IEC 61000, en el que podemos encontrar

- El estándar IEC 61000-2-1, "Compatibilidad electromagnética (CEM) - Parte 2-1: Ambientes - Descripción de la estructura y contenido de la información

relacionada con la inmunidad a los fenómenos de distribución en sistemas eléctricos de energía baja tensión y redes". El cual define los fenómenos de distribución que ocurren dentro de la red eléctrica.

- Los estantes IEC 61000-2-2 IEC 61000-2-1: "Compatibilidad electromagnética (CEM) - Parte 2-1: Ambientes - Descripción de la estructura y contenido de la información relacionada con la inmunidad a los fenómenos de distribución en sistemas eléctricos de energía baja tensión y redes". y la IEC 61000-3-2 "Compatibilidad electromagnética (CEM) - Parte 3-2: Límites - Límites para la emisión de corrientes armónicas en sistemas de alimentación de baja tensión y redes para equipos con una corriente de entrada menor o igual a 16 A por fase". Que establece los límites de corrientes armónicas que pueden ser inyectada a la red de distribución; para entradas de corrientes menores o iguales a 16 [A], y proporciona compatibilidad para diferentes tipos de consumidores de energía.
- El estándar IEC 61000-3-5 "Compatibilidad electromagnética (CEM) - Parte 3-5: Límites - Límites para la emisión de distorsión armónica en sistemas de alimentación de baja tensión y redes". Indica que los armónicos producidos por pequeños consumidores con una carga limitada no necesitan un análisis detallado, y pueden utilizar una técnica basada en factores de ponderación. Estos factores de ponderación están definidos en norma, y se utilizan para calcular el valor total que representa la calidad de distorsión armónica en el sistema.
- El estándar IEC 61000-4-71, "Compatibilidad electromagnética (CEM) - Parte 4-71: Técnicas de ensayo e instrumentación - Medición de armónicos e interarmónicos en redes de suministro de energía eléctrica y sistemas conectados a ellas", proporciona información para el control de armónicos e interarmónicos en la red eléctrica.

En México existe la especificación L0000-45 denominada "*Perturbaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente del suministro de energía*" donde se establecen los límites permisibles de las perturbaciones en las formas de onda de la tensión y corriente en el suministro de la red eléctrica [25].

2.4. Distorsión Total de la forma de onda de voltaje y corriente

Las corrientes generadas por cargas no lineales no solamente causan calentamiento adicional en los componentes de un sistema de distribución, sino que también causan distorsiones en el voltaje debido a que estas corrientes fluyen por las impedancias de los equipos.

Los armónicos son ondas sinusoidales de tensión y corriente cuya frecuencia es el múltiplo entero de la fundamental en los sistemas eléctricos de potencia (la frecuencia fundamental suele ser de 50 o 60 Hz) [1], que representan la distorsión de la forma de onda causada por las cargas no lineales y que se pueden extraídos a través de la Transformada rápida de Fourier o por los filtros propuestos a través de la transformada digital Taylor-Fourier, como se muestra en la Figura 1.

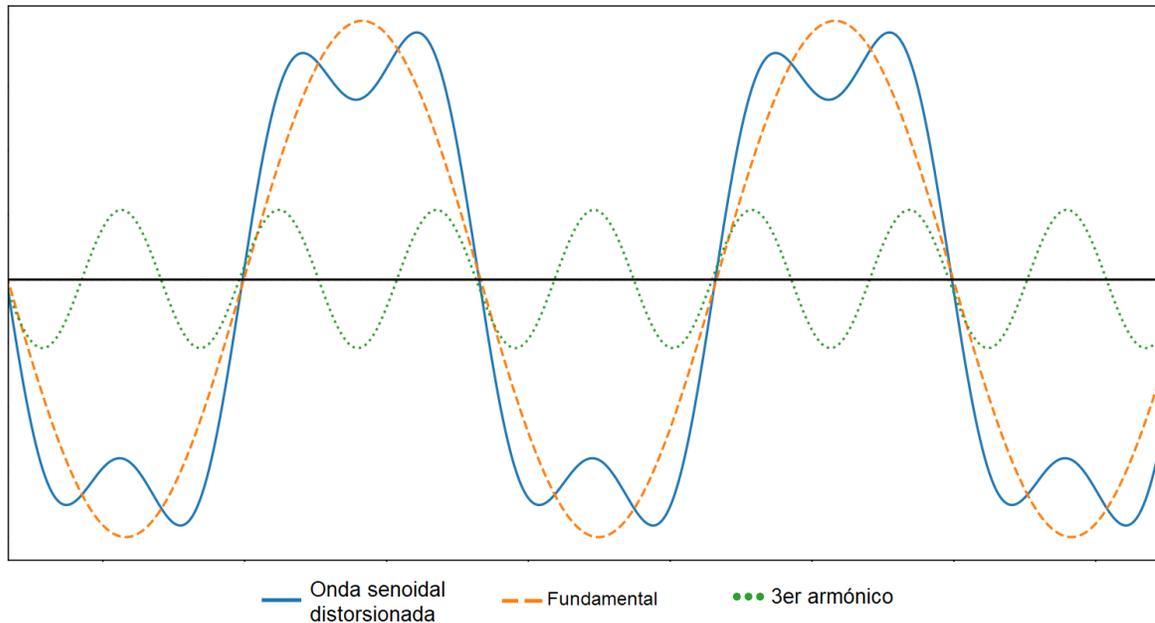


Figura 1 Onda senoidal distorsionada.

Existen conceptos fuertemente ligados a los armónicos, que son utilizados para definir de mejor manera los parámetros.

Contenido armónico: es el contenido total de los armónicos encontrados en el sistema, excluyendo la frecuencia fundamental y está dado por la expresión (1):

$$\text{Contenido armónico} = \sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} V_{nRMS}^2} \quad (1)$$

Donde n es el orden del armónico y V_{nRMS}^2 el espectro de amplitud de los componentes armónicos de orden n , el cual es un conjunto de valores de amplitud dado en RMS y fases de cada uno de los armónicos de voltaje o corriente.

El suministrador al ser el mayor responsable de mantener la calidad de la energía eléctrica debe tener en cuenta las recomendaciones dadas por las normas aplicables como la IEEE 519-2014 en la que podemos encontrar los límites de distorsión armónica los cuales aplican para cada una de las componentes armónicas de orden n . y es la relación del valor *RMS* del componente armónico con el valor *RMS* de la componente fundamental, suele darse porcentualmente. En la Tabla II se muestran los límites indicados para el rango de armónicos de voltaje establecidos en el estándar IEEE 519-2014 [3].

Tabla II. Límites de distorsión armónica de voltaje en porcentaje nominal de la frecuencia fundamental [24].

Voltaje del bus en el puerto de acoplamiento común	IHD [%]	TDHv [%]
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	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 – 2.0

Distorsión armónica individual o *IHD* por sus siglas en ingles *Individual Harmonic Distortion*, es la relación del espectro del armónico con respecto a la fundamental, se da en forma porcentual y su expresión están dada en la expresión (2) [1]:

$$\% IHD = \frac{V_{n_{RMS}}}{V_{RMS}} \times 100 \quad (2)$$

Los armónicos se describen mediante el armónico completo, espectros con magnitud y ángulo de fase de cada componente armónico, sin embargo, es común tomar una sola cantidad, la distorsión total armónica total o *THD* por sus siglas en ingles *Total Harmonic Distortion* es una media del valor efectivo de la distorsión armónica. Suele utilizarse como indicador de la calidad de la energía [1].

Para la distorsión armónica total de voltaje se tiene la expresión (3):

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} V_{nRMS}^2}}{V_{RMS}} \times 100 \quad (3)$$

Para la distorsión armónica total de la corriente se tiene la expresión (4):

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} I_{nRMS}^2}}{I_{RMS}} \times 100 \quad (4)$$

Donde n representa el orden del armónico, V_{RMS} e I_{RMS} son los espectros de amplitud de voltaje y corriente respectivamente de la componente fundamental y V_{nRMS} e I_{nRMS}^2 son la amplitud de voltaje y corriente de los componentes armónicos.

Al igual que los voltajes armónicos, las corrientes armónicas de un usuario son medidas en el punto de acoplamiento común (PCC) y los límites de distorsión armónica en la corriente dependen de la carga del usuario en relación con la capacidad de corto circuito del sistema. Estos límites de igual manera son establecidos en el estándar IEEE 519-2014 y mostrados en la Tabla III [3].

Tabla III. Límites de distorsión armónica en la corriente en % de I_L .

Máxima distorsión armónica en la corriente en por ciento de I_L						
$\frac{I_{SC}}{I_L}$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$V_n \leq 69 \text{ kV}$						
<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
$69 \text{ kV} \leq V_n \leq 161$						
<20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20 < 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50 < 100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100 < 1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	12.0	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0
$V_n > 161 \text{ kV}$						
<25	1.0	0.5	0.38	0.15	0.1	1.5
20 < 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

-Donde I_{SC} es la corriente de corto circuito en el puerto de acoplamiento común.

I_L es la corriente máxima de demanda (componente de frecuencia fundamental) en el puerto de acoplamiento común, puede ser calculada como el promedio de la demanda máxima mensuales durante todo el año.

2.5. Cargas no lineales

Cuando hablamos de una carga lineal, nos referimos a aquella en la cual la corriente que fluye por la carga es proporcional al voltaje aplicado y sigue una forma de onda senoidal. Es decir, la relación entre el voltaje y la corriente es constante y lineal. Esto ocurre en algunos dispositivos eléctricos, como resistencias, inductancias y capacitores, cuando se alimentan con una señal senoidal. También puede ocurrir en cargas más complejas que contienen combinaciones de estos dispositivos, como se muestra en la Figura 2, en la cual la forma de onda de corriente que fluye a través de una carga lineal cuando se aplica un voltaje senoidal. Esta forma de onda es también senoidal y está en fase con el voltaje aplicado, lo que significa que alcanza su valor máximo y mínimo en los mismos momentos que el voltaje.

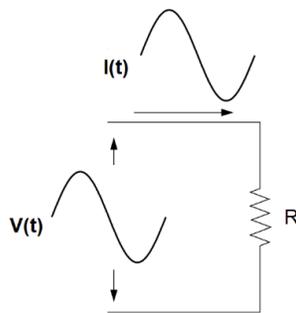


Figura 2. Carga lineal

En contraste, una carga no lineal cuando se le aplica un voltaje senoidal, la corriente que fluye no es proporcional al voltaje aplicado. En la Figura 3 se puede ver que la corriente resultante está distorsionada, a pesar de que la tensión aplicada es perfectamente senoidal. Además, al aumentar el voltaje aplicado, la corriente puede duplicarse o tomar una forma de onda diferente. Estas distorsiones armónicas son una importante fuente de problemas en los sistemas de eléctricos de potencia.

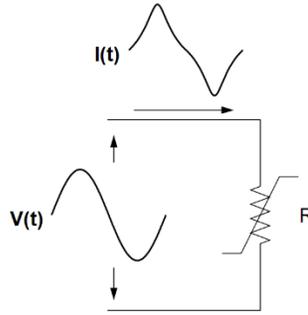


Figura 3. Carga no lineal.

Es importante recordar que cualquier forma de onda periódica y distorsionada puede descomponerse en una suma de ondas senoidales, cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de la señal distorsionada. Esta descomposición en componentes armónicas permite identificar y analizar los efectos de las distorsiones en la señal eléctrica, lo que es esencial para el diseño y mantenimiento de sistemas de energía eléctrica confiables y eficientes.

Capítulo 3.

Transformada Discreta de Taylor Fourier

3.1. Análisis de Fourier

El análisis de Fourier es una herramienta poderosa utilizada para obtener información frecuencial de una onda una vez conocido su comportamiento temporal y viceversa. La teoría de Fourier asegura que cualquier función periódica se puede descomponer en suma de funciones senoidales, cuya frecuencia es múltiplo de la función periódica, o en otras palabras se puede descomponer en una serie de armónicas infinita [26], como se muestra en la expresión (5):

$$s(t) \approx \frac{a_0}{2} + \sum_{n \geq 1} a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + (t) \approx \frac{a_0}{2} + \sum_{n \geq 1} b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \quad (5)$$

Donde: $s(t)$ es una función periódica, n es el orden del armónico, T es el periodo fundamental, y los coeficientes a_0 , a_n , y b_n son calculados mediante las expresiones (6), (7),(8):

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^T s(t) dt \quad (6)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad (7)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad (8)$$

Las expresiones anteriores implican que la señal senoidal ha sido descompuesta en componentes espectrales, tanto en magnitud como en ángulo de fase. El espectro es una característica del única de la señal que nos permite obtener información para definirla completamente [27]. En resumen, el análisis de Fourier en es el proceso matemático de llevar una señal en el dominio del tiempo, al dominio de la frecuencia.

3.2. La transformada discreta de Fourier

La transformada discreta de Fourier (DFT), surge de la necesidad de poder analizar señales que toman valores infinitos en un intervalo de tiempo y frecuencia, en una computadora que solo puede tratar con señales discretas, ósea con un numero finito de valores.

Por lo que la DFT es utilizada en señales digitales, donde se tiene una señal continua de entrada en el dominio del tiempo es muestreada con una frecuencia de muestreo (F_s) constante dando una señal discreta de esta se obtiene toda la información espectral de la frecuencia que al componen. Por lo que la transformada será una representación en el dominio de la frecuencia que contenga la misma información.

Para que será posible el cálculo de la DFT de N puntos de muestreados de una señal se deben cumplir las siguientes condiciones.

Que $X[n] = 0$ para:

$$n < 0$$

$$n > N - 1$$

Si se cumplen las condiciones anteriores se define la DFT como:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (9)$$

Donde N es el número de muestras y $k= 0, 1, \dots, N-1$ es el orden del armónico [27].

3.3. Series de Taylor

Desde su descubrimiento, la fórmula de Taylor ha proporcionado un método para solucionar distintos problemas del análisis matemático. Consiste en la aproximación de una función a partir de una serie de potencias infinitas.

Sea f una función n veces derivable en un punto a . La función polinómica $T_n(f, a)$ definida para todo $x \in \mathbb{R}$ por la expresión mostrada (10), se le llama polinomio de Taylor de orden n de f en a [26].

$$P_n(x) = f(a) + \sum_{k=1}^n \frac{f^k(a)}{k!} (x - a)^k \quad (10)$$

3.4. Algoritmo Taylor-Fourier

La transformada de digital de Taylor-Fourier (DTFT) es método basado en el análisis en tiempo y frecuencia de señales, el cual permite hacer una descomposición de la señal en sus componentes. El análisis es llevado a cabo por un ventaneo de una señal muestreada, actualizándose cada vez que se obtiene un nuevo dato, este proceso permite proveer nuevas estimaciones para el fasor dinámico y obtener resultados continuamente. También es posible obtener la tercera derivada del fasor de voltaje, de manera que cuando existan variaciones de amplitud y fase estas son capturadas. En la Figura 4 se puede apreciar que con cada muestra se va a obtener una nueva ventana de datos y con esta una estimación fasorial, dicho proceso es conocido como ventana deslizante [28].

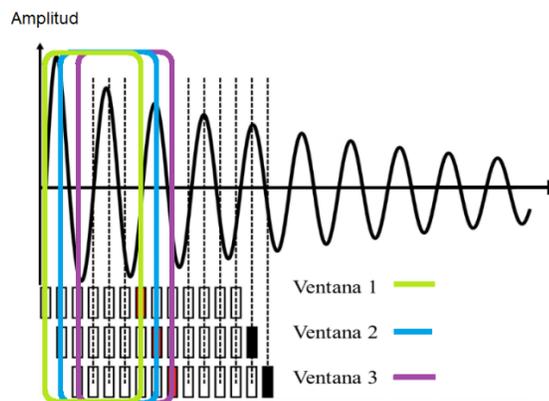


Figura 4. Proceso de ventaneo.

La DTFT tiene como primera idea fundamental ser una expansión del subespacio de Fourier que incorpora términos de orden mayor obtenidos a través del polinomio de Taylor. El subespacio de Taylor-Fourier se extiende por medio del uso de vectores provenientes de la matriz de Fourier como moduladores armónicos de los términos del polinomio de Taylor desde $k > 1$ hasta el k -ésimo término. Como se muestra en la Figura 5.

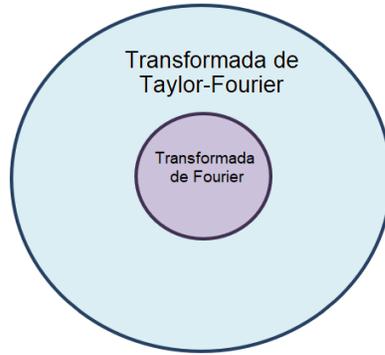


Figura 5. Subespacio de Fourier y Taylor-Fourier.

La función $p(t)$ que se define como una función compleja que describe el fasor dinámico, puede ser aproximada por el k -ésimo término del polinomio de Taylor.

$$p(t) = a(t)e^{j\phi} \quad (11)$$

Al incluir un polinomio de Taylor de tercer orden se tiene una aproximación que incluye términos lineales, cuadráticos y cúbicos que proporcionan una aproximación muy precisa del fasor dinámico como se muestra en (12):

$$P_k(t) = p(t_0) + \dot{p}(t_0)(t - t_0) + \frac{\ddot{p}(t_0)}{2!} + \dots + \frac{p^{(k)}(t_0)}{k!}(t - t_0) \quad (12)$$

$$t_0 - \frac{T}{2} \leq t \leq t_0 + \frac{T}{2}$$

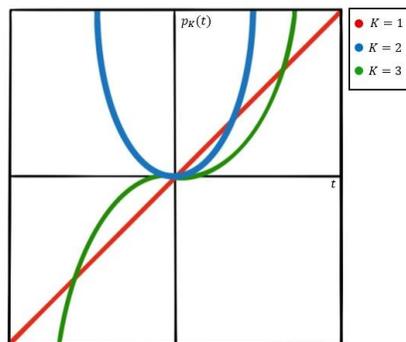


Figura 6. k -ésimo término de la aproximación polinomial de Taylor.

La ventana de observación cambia dependiendo del término de Taylor tomando más o menos ciclos.

La estructura del subespacio de Fourier corresponde a la transformada discreta de Fourier. Las señales en el subespacio de Fourier que consisten en h armónicos y N muestras se representan como una combinación lineal (13):

$$\hat{S}_{CN} = \frac{1}{N} W_N \hat{\xi}_N \quad (13)$$

Donde W_N es la matriz de Fourier con factores de fases armónicos ω_N^h en cada vector donde h son los armónicos $h=0, \dots, N-1$ y N el número de muestras.

$$W_N = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \omega_N & \omega_N^2 & \dots & \omega_N^{N-1} \\ 1 & \omega_N^2 & \omega_N^4 & \dots & \omega_N^{2(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \omega_N^{(N-1)} & \omega_N^{2(N-1)} & \dots & \omega_N^{(N-1)^2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Con $\omega_N = e^{j\frac{2\pi}{N}}$ y en el vector $\hat{\xi}_N$ es el que contiene los estimados de los coeficientes de Fourier calculados de la DFT de la señal s .

Por otro lado, (15) es la ecuación de síntesis de la TDFT como una combinación lineal en el subespacio de Taylor-Fourier.

$$\hat{S}_{CN} = B_{CN} \hat{\xi}_{CN} \quad (15)$$

Donde B_{CN} es la matriz de Taylor-Fourier y $\hat{\xi}_{CN}$ es un vector con los coeficientes de Taylor-Fourier como se muestra en (16) y (17).

$$B_{CN} = \frac{1}{N} \left[I_{CN} \begin{bmatrix} W_N \\ W_N \\ \vdots \\ W_N \end{bmatrix} T_{CN} \begin{bmatrix} W_N \\ W_N \\ \vdots \\ W_N \end{bmatrix} \dots \frac{1}{K!} T_{CN}^K \begin{bmatrix} W_N \\ W_N \\ \vdots \\ W_N \end{bmatrix} \right] \quad (16)$$

$$\hat{\xi}_{CN} = \begin{bmatrix} \hat{\xi}_{CN} \\ \hat{\xi}_{CN} \\ \vdots \\ \hat{\xi}_{CN}^{(k)} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Donde $C=k+1$ es el mínimo números de ciclos requeridos para evitar un sistema de ecuaciones indeterminado, k es el número de términos del polinomio de Taylor incluidos en el número de ciclos. Por lo que para que la matriz B_{CN} sea cuadrada, se requiere que se cumpla $L \times L$, donde $L = CN$. E I_{CN} es una matriz identidad de $L \times L$ y las matrices T_{CN}^K se definen como matrices de dimensión $L \times L$ que tienen en sus diagonales la secuencia de tiempo (18).

$$t = \frac{[-L_h \quad -L_h + 1 \quad \dots \quad L_h]^T}{NFS} \quad (18)$$

Donde

$$L_h = \frac{L - 1}{2} \quad (19)$$

De este modo, \hat{S}_N es la combinación lineal de las primeras $k + 1$ derivadas correspondientes a cada término de Taylor para el conjunto de armónicos. Entonces la matriz B_{CN} puede ser reescrita como (20).

$$B_{CN} = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} 1 & T_1 & \dots & T_1^k \\ 1 & T_2 & \dots & T_2^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & T_C & \dots & T_C^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_N & 0 & \dots & 0 \\ 0 & W_N & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & W_N \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$B_{CN} = \frac{1}{N} Y_{CN} \Omega_{CN} \quad (21)$$

Donde: Ω_{CN} es una matriz que determina las frecuencias armónicas, T_i^k y Y_{CN} son una submatriz diagonal de $N \times N$ que incluyen el k –ésimo término del polinomio de Taylor en la i –ésima ventana de un ciclo. La ecuación (21), permite apreciar las contribuciones de Taylor y Fourier, representados por nuevos operadores. Y_{CN} que

incluye los términos de Taylor y el segundo Ω_{CN} determina las frecuencias armónicas. Los vectores de la matriz de Fourier son moduladores armónicos de los términos de Taylor en Y_{CN} para cada derivada dada en los coeficientes de Taylor-Fourier $\hat{\xi}_{CN}$ en su frecuencia armónica correspondiente.

El algoritmo de filtrado es obtenido por medio de solución de mínimos cuadrados y mostrados en (22).

$$\hat{\xi}_{CN} = [B_{CN}^H B_{CN}]^{-1} B_{CN}^H s_{CN} = B_{CN}^\dagger s_{CN} \quad (22)$$

Donde la matriz B_{CN} esta dada por (19) y B_{CN}^H es la matriz Hermitiana de B_{CN} . Y su matriz pseudoinversa es mostrada en (23).

$$B_{CN}^\dagger = \Omega^H [\Upsilon^H \Upsilon]^{-1} \Upsilon^H = \Omega^H \Upsilon^\dagger \quad (23)$$

Debido a que Υ^\dagger es real el cálculo es mucho más sencillo y como característica particular de la matriz cuadrada (24),

$$\Upsilon^\dagger = \Upsilon^{-1} \quad (24)$$

El análisis armónico se realizan las estimaciones de los coeficientes de Taylor-Fourier que permiten la reconstrucción de la señal, se opera una señal $s(t)$ es operada por la pseudoinversa, en cuyas filas se encuentra el banco de filtros (FIR) de Taylor-Fourier, dando como resultado las amplitudes. O expresado matemáticamente en (25).

$$\begin{aligned} \widehat{a}_1(t_0) &= |\widehat{\xi}_1| \\ \widehat{a}_2(t_0) &= |\widehat{\xi}_2| \\ &\vdots \\ \widehat{a}_n(t_0) &= |\widehat{\xi}_n| \end{aligned} \quad (25)$$

Donde $\widehat{a}_1(t_0), \widehat{a}_2(t_0), \dots, \widehat{a}_n(t_0)$ son las amplitudes de las monocomponentes obtenidas para los armónicos en un tiempo t_0 y $|\widehat{\xi}_1|, |\widehat{\xi}_2|, \dots, |\widehat{\xi}_n|$ son los coeficientes de Taylor-Fourier, resultado de la ecuación (20), [29] [30].

Para realizar el análisis armónico utilizando la DTFT, se diseña un banco de filtros FIR. Dicho banco tiene como objetivo obtener los coeficientes de Taylor-Fourier de una señal, para el diseño se considera la cantidad de armónicos que se desea analizar, debido a que se considera una fila de la pseudoinversa de la matriz Taylor-Fourier por cada armónico como se muestra en la siguiente imagen:

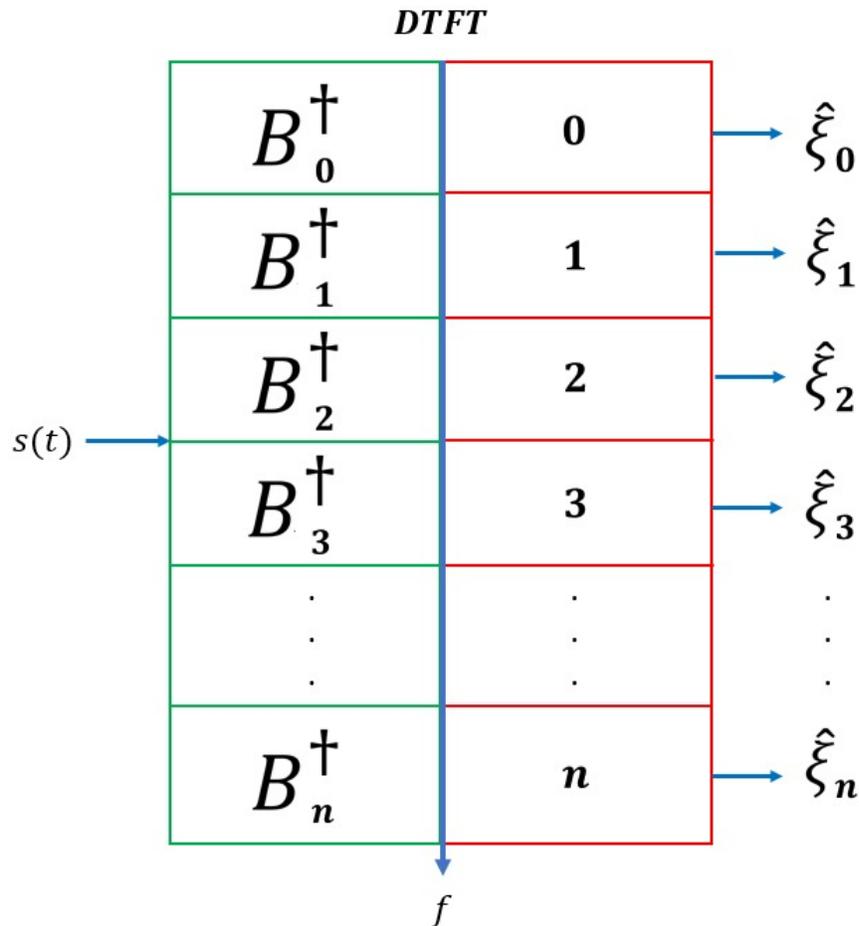


Figura 7. Obtención coeficientes de Taylor-Fourier

Por último, se utilizan las amplitudes de las monocomponentes obtenidas en (22), las cuales son producto del análisis en (25). Las amplitudes $\hat{a}_1(t_0), \hat{a}_2(t_0), \dots, \hat{a}_n(t_0)$ corresponden al valor RMS de la armónica.

Capítulo 4. Caracterización de cargas no lineales

Los armónicos son producidos por cargas no lineales o dispositivos con forma de ondas diferentes a la senoidal, las formas de onda de la corriente o voltaje de las cargas no lineales varían con la forma de onda aplicada, por lo general la distorsión de corriente de una carga no lineal disminuye a medida que la distorsión de voltaje aumenta. Por lo que, la mayoría de las cargas no lineales tienen una distorsión de corriente más alta cuando el voltaje es casi senoidal y el sistema de alimentación es de baja impedancia.

En la mayoría de los casos las cargas no lineales se tratan como inyecciones de corriente armónica, el espectro de la corriente armónica de una carga no lineal, generalmente se asume que está fijo en el sistema durante la simulación y el ángulo de la corriente fundamental, siempre está atrasado, ajustándolo para producir el factor de potencia deseado. Los ángulos de fase de los armónicos se ajustan para preservar la apariencia de la forma de onda [31].

En general cualquier carga no lineal conectada al sistema eléctrico causa una distorsión armónica. A continuación, se muestran algunas fuentes de armónicos más comunes en los sistemas eléctricos de potencia.

4.1. Transformadores

Un transformador actúa como carga no lineal cuando entra en una condición de saturación del núcleo, esto sucede cuando el transformador opera por encima de la potencia nominal o por encima del voltaje nominal. Y mostrará una corriente de magnetización similar a la mostrada en la Figura 8.

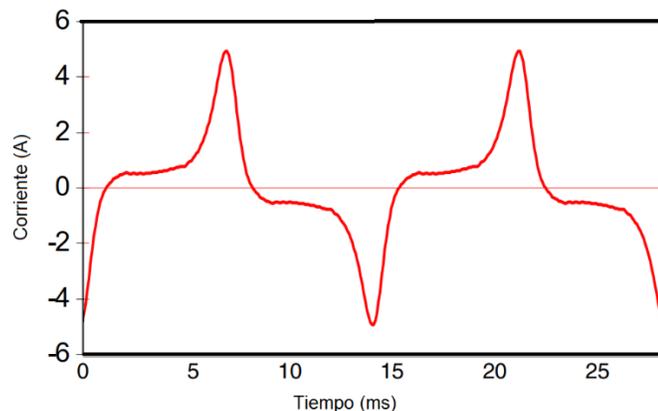


Figura 8. Corriente de magnetización de un transformador. THD=76.1%

Cuando se considera el efecto de histéresis, la corriente de magnetización no es simétrica con respecto al valor máximo. La distorsión contiene una variedad de armónicos múltiplos impares de 3 (3, 9, 15, etc.), pero principalmente debido al tercer armónico. Esta componente espectral se puede limitar dentro del transformador usando una conexión en delta en el transformador, lo que ayudará a mantener una forma de onda senoidal a la tensión de alimentación. La distorsión del efecto se hará más dominante con el aumento de la carga.

Por otra parte, cuando un transformador es energizado, se observa una corriente de Inrush, esta puede causar una caída momentánea en el voltaje si la impedancia de la red es considerablemente alta y ocasionar el disparo de los relés de sobrecorriente.

Los factores que controlan la duración y magnitud de la corriente inrush son diversos, pero entre los más significativos se encuentra; el tamaño de los transformadores y el tamaño del sistema de potencia.

4.2. Máquinas rotatorias

El efecto debido al arranque de los motores en los sistemas eléctricos de distribución suele estar relacionado con el valor elevado de la corriente de arranque del motor y la caída de voltaje en el sistema que esta conlleva, independientemente de los equipos conectados al sistema.

Las pequeñas asimetrías en las ranuras del estator o del rotor de las máquinas, así como las ligeras irregularidades en los devanados, puede desarrollar corrientes armónicas. Estos armónicos inducen una fuerza electromotriz (fem), en los devanados del estator a una frecuencia igual a la relación de velocidad entre la longitud de la onda. El resultado de esta fuerza electromotriz produce armónicos que están en función de la velocidad. También las corrientes armónicas se pueden crear a través de la saturación del núcleo magnético, similar a los transformadores debido a que ambos operan con densidades de flujo máximo, sin embargo, estas corrientes armónicas suelen ser más pequeñas que los desarrollados por variadores de frecuencia.

Existen diversos tipos de motores con ello diversas formas con las que inyectan corriente armónica, la mayoría de ellos tienen TDH en el rango del 10% dominado por el tercer armónico. La forma de ondas de corriente mostradas en la Figura 9, donde la Figura 9 a) pertenece a un refrigerador y la Figura 9b) pertenece a un aire acondicionado doméstico.

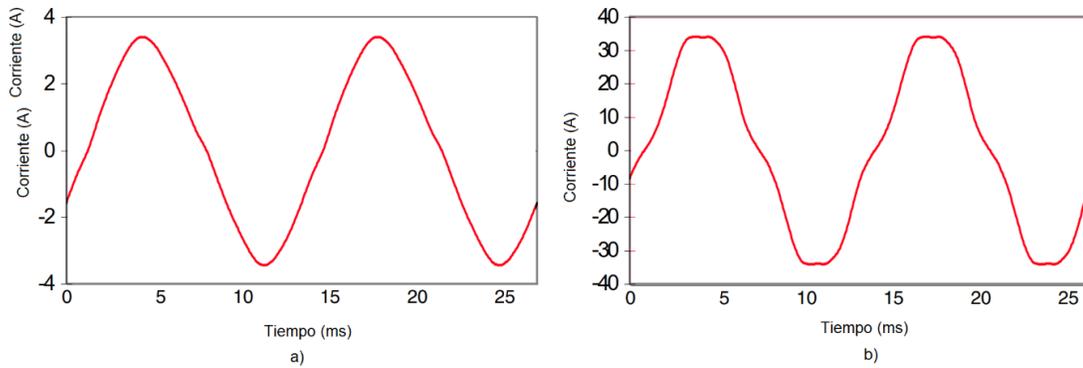


Figura 9. a) Corriente de un refrigerador 120 V. THD=6.3% b) Corriente de un aire acondicionado domestico 240 V. THD=10.5%

Es importante tener en cuenta que a medida que los motores crecen en tamaño también crecen el efecto que tienen sobre en los sistemas de potencia, es especialmente notorio cuando se lleva a cabo un arranque a voltaje nominal, el cual producirá un decremento transitorio de voltaje que a su vez puede reducir el torque de salida del motor, afectando directamente las cargas locales y posiblemente a las cargas alejadas del punto de arranque del motor [32].

4.3. Lámparas fluorescentes

Los tubos fluorescentes son cargas no lineales en funcionamiento y dan lugar a corrientes armónicas de alta magnitud. En forma resumida cuando las lámparas fluorescentes están en funcionamiento, los inductores de núcleo magnético dentro de los balastos de arranque funcionan para limitar la corriente al tubo. Asimismo, utilizan un condensador que aumenta la eficacia del balastro aumentando su factor de potencia. Los balastos electrónicos funcionan a una frecuencia más alta, lo que permite el uso de reactores y condensadores más pequeños. El uso de frecuencias más altas les permite crear más energía luminosa con la misma energía eléctrica. En la Figura 10 se muestra una forma de onda típica.

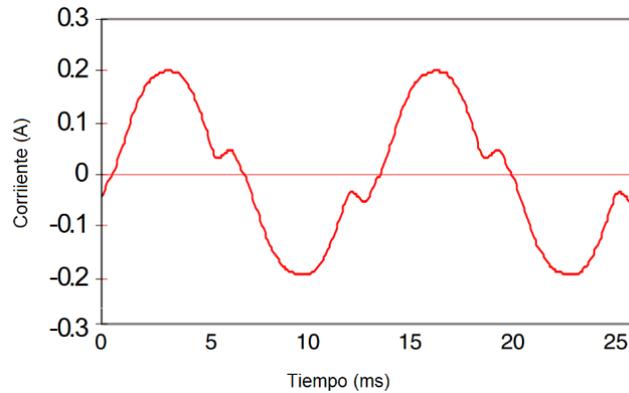


Figura 10. Corriente de lámpara fluorescente con balastro magnético. THD=18.5%.

Los armónicos de corriente de fase dominantes de la iluminación fluorescente son el tercera, quinta y séptima si se utilizan balastros magnéticos y el quinto con balastros electrónicos.

4.4. Horno eléctrico

El proceso de fusión en hornos eléctricos industriales puede producir distorsión armónica. Los armónicos se desarrollan a partir de una combinación del retardo en el proceso de la ignición del arco eléctrico junto a su característica altamente no lineal de la impedancia del arco eléctrico. Además, los cambios de voltaje causado por las variaciones aleatorias a la hora del crecimiento del arco generan cambios en la frecuencia que a su vez provocando armónicos e interarmónicos en la segunda y séptima que van disminuyendo su amplitud con forme aumenta su orden. En la Figura 11 se muestra la corriente armónica de un horno eléctrico.

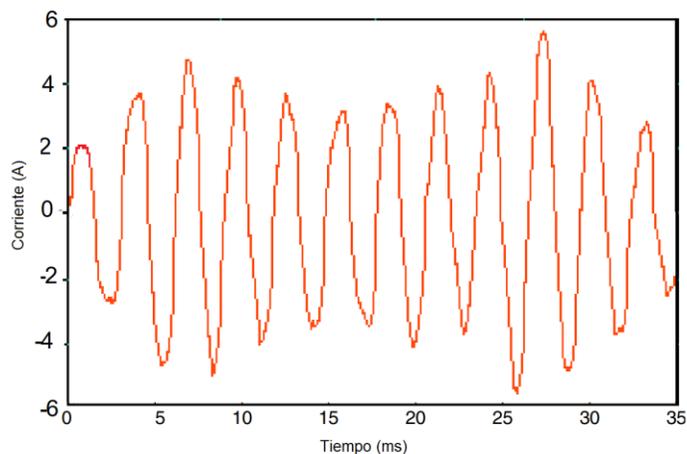


Figura 11. Corriente de horno eléctrico.

En la Tabla IV se muestra un horno eléctrico durante el proceso de refinado, el arco es más estable, aunque todavía existen algunas modulaciones de su longitud por las ondulaciones que se presentan en la superficie del metal fundido.

Tabla IV. Corrientes armónicas de un horno de arco en 2 etapas del ciclo de fusión.

Condición del horno	% de la fundamental				
	Orden armónico				
	2	3	4	5	7
Fisión inicial	7.7	5.8	2.5	4.2	3.1
Refinado	0	2	0	2.1	0

4.5, Variadores de velocidad ajustables

El variador de velocidad ajustable o ASD por sus siglas en ingles Adjustable-Speed drives, es usado comúnmente para para cargas comerciales como motores de elevadores, en bombas o ventiladores en sistemas de climatización. Los ASD consta de un convertidor de eléctrico, que convierte el voltaje y la frecuencia ac en voltaje y frecuencia variables. El voltaje y la frecuencia variables permiten que el ASD pueda controlar la velocidad del motor para que cumplir los requisitos de la aplicación.

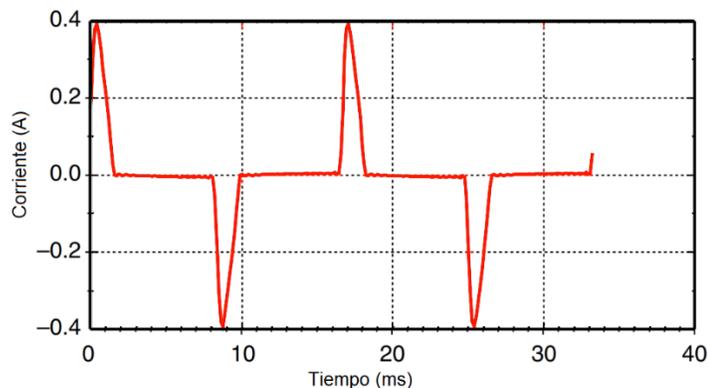


Figura 12. Corriente de variador de velocidad ajustable.

4.6. Energización de un banco de capacitores

Operaciones típicas de maniobra en sistemas de distribución es la utilización de bancos para compensación de potencia reactiva, en ese sentido, durante la operación de apertura o cierre de bancos de capacitores pueden ocurrir oscilaciones de corriente y voltaje, que si no son controladas pueden ocasionar daños el equipo del sistema. Cuando se opera un interruptor para energizar una capacitancia, la corriente resultante es conocida como corriente inrush, dentro de sus características es que es de corta duración y está expresada por el valor pico más alto en el transitorio que suelen ser de corta duración.

Por otra parte, se pueden producir sobrevoltajes debido a la maniobra de cierre y usualmente son de alto amortiguamiento. La amplitud y la duración de los sobrevoltajes de maniobran dependen de la configuración del sistema, parámetros y del equipo eléctrico utilizado, dando como resultado formas de ondas diferentes desde oscilatorias, periódicas o aperiódicas; por lo que es muy difícil generalizar la forma de onda y su duración. Por lo que el sobrevoltaje por maniobra de cierre depende de donde se encuentre la onda del voltaje del sistema en el instante en que se realice el cierre de interruptor y pueden tomar la forma de onda que se observa en la Figura 13.

Por último, es importante destacar que los bancos de capacitores no generan voltajes armónicos, pero debido a que la impedancia de un capacitor es inversamente proporcional a la frecuencia, el banco de capacitores tendera a tener una impedancia más baja a frecuencias superiores a la fundamental. Por lo que el banco de capacitores ofrece un camino de baja impedancia en donde las corrientes armónicas puede circular [33].

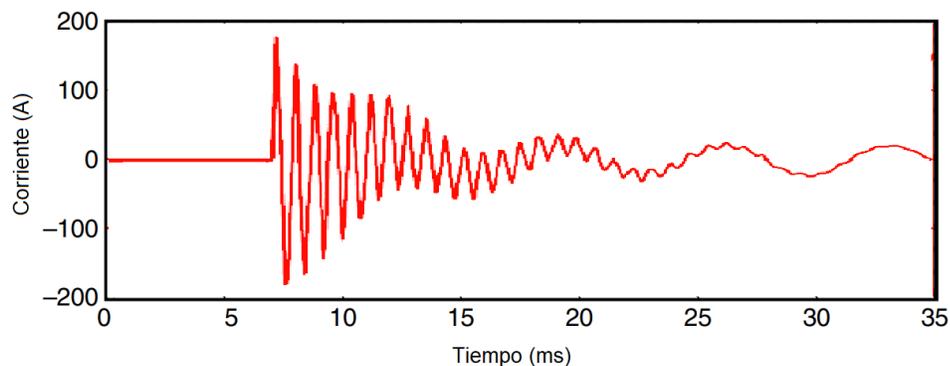


Figura 13. Corriente de la energización de un banco de capacitores.

4.7. Convertidores de potencia trifásicos

Los convertidores de potencia trifásicos a diferencia de los monofásicos no generan corrientes en el tercer armónico, lo cual es una ventaja debido a que el tercer armónico suele ser el mayor componente de los armónicos. Sin embargo, aún pueden ser fuentes significativas de voltaje como se muestra en la Figura 14. En donde se muestra una típica fuente de corriente de tipo de variador da velocidad ajustable, también sería típico de la corriente de entrada de un controlador de motor de DC.

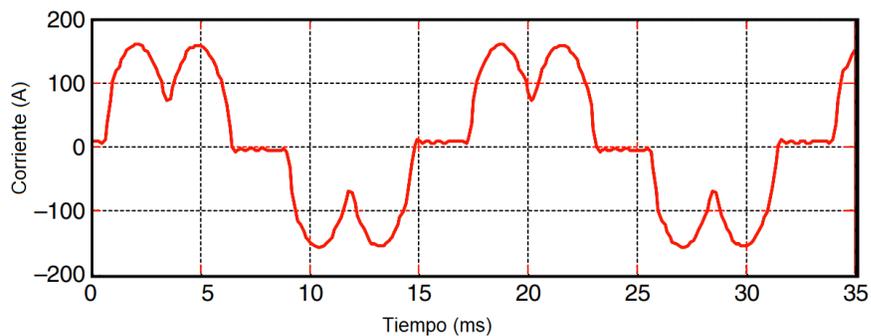


Figura 14. Corriente de un variador da velocidad ajustable.

Los variadores de voltaje (como los dispositivos de tipo PWM) pueden tener niveles de distorsión muchos más altos. Las entradas de los dispositivos PWM generalmente está diseñadas como una versión trifásica de una fuente de alimentación conmutada en las computadoras. El rectificador se alimenta directamente al bus de AC a un condensador de gran tamaño a un bus de DC. El capacitor de se carga en pocos y cortos pulsos, creando la distintiva onda de corriente del lado de AC de "oreja de conejo" con una distorsión muy alta como se muestra en la Figura 15.

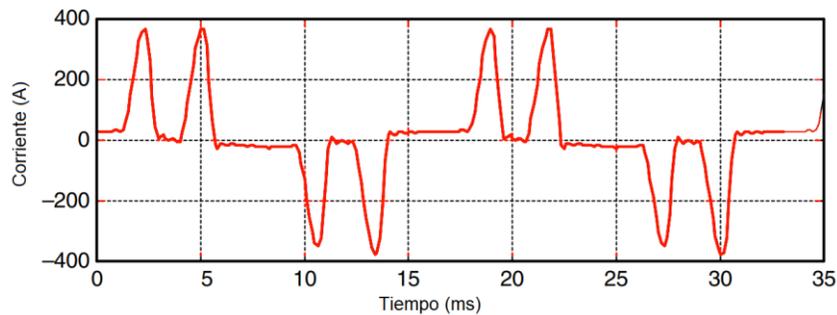


Figura 15. Corriente de PWM-type ASD.

Por otro lado, la rectificación es el único proceso necesario para las unidades de control de corriente continua, lo cual les confiere una mayor capacidad de velocidad y torque de arranque en motores de corriente continua, como los que se utilizan en el sistema de transporte público en la Ciudad de México.

La mayoría de las unidades de control de corriente continua emplean el rectificador de seis pulsos por lo general estos equipos generan corrientes armónicas del orden $h = 6k \pm 1$ donde $k=1,2,3, \dots n$.

Mientras que las unidades de mayor tamaño pueden utilizar un rectificador de doce pulsos. Este último reduce la carga de corriente de los tiristores y atenúa algunos de los armónicos de corriente alterna más prominentes. En particular, estos generan las corrientes armónicas del tipo $h = 12k \pm 1$ donde $k=1,2,3, \dots n$.

4.8 Mediciones reales de una carga no lineal

En este trabajo se llevó a cabo la medición de señales reales del metro de la Ciudad de México en donde se obtuvieron las formas de onda a través del medidor HIOKY PQ3100. Cabe mencionar que los voltajes y corrientes fueron obtenidos del lado secundario de los Tcs y los Tps. En cuanto a las formas de onda que se muestran en la Figura 16 y 17, es importante observar que ambas señales tienen cierta cantidad de distorsión armónica. En la Figura 16, se muestra la forma de onda de corriente, se pueden observar que indica la presencia de armónicos. Al procesar la señal se obtiene un $THD=24\%$.

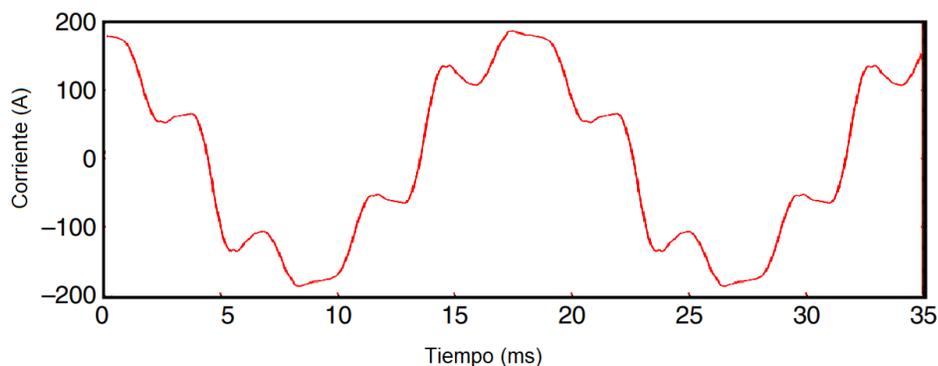


Figura 16. Corriente medida en una estación del metro.

Por otro lado, en la Figura 17, se muestra la forma de onda de voltaje, se puede ver que la forma de onda no es completamente sinusoidal, lo que sugiere que hay cierta cantidad de distorsión armónica presente.

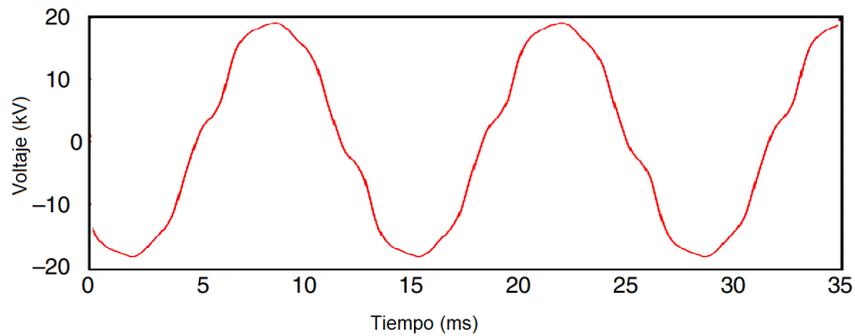


Figura 17. Voltaje medido en estación del metro $THD=6.4\%$.

La Figura 18, muestra las componentes armónicas respecto a la fundamental, y como era de esperarse se comporta como un rectificador de 6 pulsos, debido a que este tiene mayor contenido armónico en la 5 y 7. Donde el THD del voltaje resulta ser de $THD=6.48\%$ lo cual es mayor a lo establecido al código de red [24], debido a que este debe de ser menor al 5%. Para reducir los armónicos, se pueden utilizar filtros pasivos o activos, o bien, cambiar a un tipo de rectificador que genere menos armónicos. También es importante asegurarse de que los equipos conectados a la red eléctrica estén diseñados para soportar una cierta cantidad de armónicos.

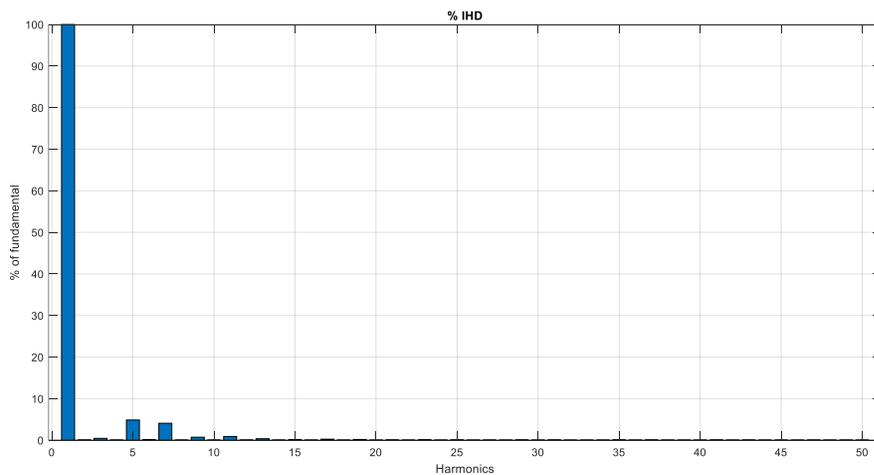


Figura 18. Componentes armónicas del voltaje medido en la estación del metro.

Una vez analizadas las señales de voltaje y corriente en el sistema de transporte colectivo metro se utilizará la información para evitar su comportamiento en un sistema típico de distribución y posteriormente se hará el procesamiento de las señales aplicando la Transformada digital de Taylor-Fourier.

Capítulo 5. Simulaciones y Casos de Estudio

5.1. Parametrización y simulación de un circuito de distribución de 23 kV

En la Figura 19, se muestra el diagrama unifilar de un sistema de distribución el cual cuenta con un alimentador de 23 kV y cargas lineales de diferentes capacidades. Se considerará la energización de un banco de capacitores, el arranque de un motor de inducción, la energización de un transformador y finalmente la conexión de la no carga que representa a una estación del metro de la ciudad de México. Para desarrollar un modelo que represente la carga no lineal en un sistema de distribución es de gran utilidad realizar mediciones tanto de las corrientes y voltajes de la carga durante el evento que se desea representar. Estas mediciones son de suma relevancia ya que proporciona información precisa y confiable sobre el comportamiento de la carga no lineal a analizar. En este sentido y en función de las presentaciones que ofrece, se propone la utilización del software de simulación ATP/EMTP.

El ATPDraw es una interfaz gráfica de la versión ATP (Alternative Transients Program) del programa “*Electromagnetic Transients Program*” (EMPT), que permite realizar simulaciones de transitorios tanto electromagnéticos como electromecánicos, que es muy útil a la hora de realizar diseños de sistemas de control asociados a los equipos eléctricos o definir parámetros eléctricos.

El ATPDraw puede resolver sistemas eléctricos (monofásicos o polifásicos), calculando el valor que adquieren a lo largo del tiempo, trabaja con modelos caracterizados por su comportamiento en sistemas eléctricos como resistencias inductancias, capacitores, maquinas eléctricas o interruptores.

Otra característica importante es la capacidad de guardar los resultados (voltaje o corriente), en puntos específicos de la simulación y poder ser utilizados en otro software como en nuestro caso Matlab.

Para evaluar el desempeño de los algoritmos propuestos se llevan a cabo algunas simulaciones de maniobras típicas de sistemas de distribución, se propone la energización de un banco capacitores, arranque de un motor de inducción, energización de un transformador y la conexión de la carga no lineal del STC metro. La tabla V muestra el evento y los tiempos asociados.

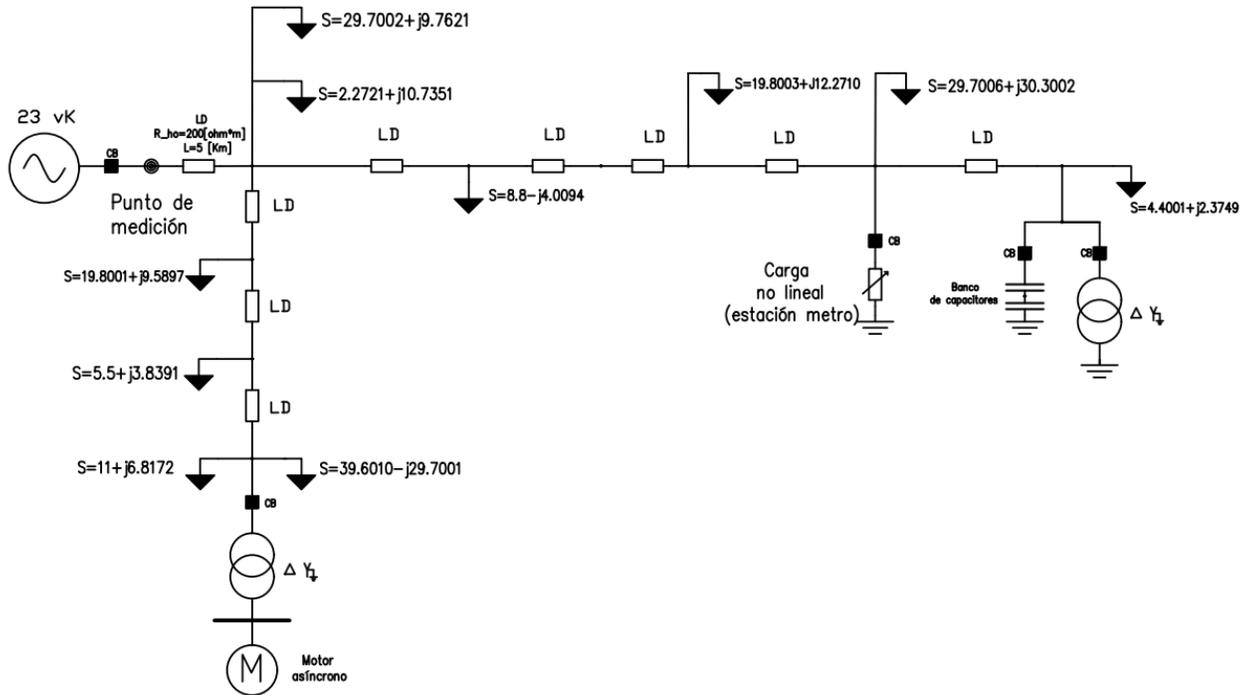


Figura 19. Diagrama unifilar del sistema de distribución 23 kV.

Tabla V. Eventos de simulación en el sistema de distribución.

Evento	Tiempo	Descripción.
A	0.20s	Banco de capacitores
B	0.40s	Arranque de motor
C	0.60s	Energización de transformador
D	0.80s	Carga no lineal (estación metro)

Para diseñar el sistema de distribución mostrado en la Figura 19, se utilizan elementos de circuitos disponibles en ATPDraw. Esto incluye el alimentador de 23 kV de todo el sistema. Se crearon las líneas aéreas trifásicas de distribución, El sistema es representado por un equivalente de Thévenin correspondiente a la subestación eléctrica del alimentador de distribución, líneas de distribución y cargas de tipo inductivo.

5.2. Parámetros del circuito eléctrico y condiciones iniciales.

Antes de iniciar la simulación, se establece las condiciones iniciales que incluye la configuración de la fuente de alimentación que desde un inicio estará operando, el tiempo de simulación de un segundo, una frecuencia base del sistema de 60 Hz y el tiempo de muestreo de 8.05×10^{-5} [s] debido a que es la frecuencia del medidor.

Una vez modelado el sistema sin cargas no lineales se realiza una simulación y los resultados son observados desde el punto de medición indicado en la Figura 19. La Figura 20a) muestra los 3 voltajes del sistema antes de conectar las cargas no lineales como se puede observar el sistema esta balanceado. Por otra parte, la Figura 20b) muestra las 3 corrientes del sistema antes de conectar las cargas no lineales, en esta es más notable que esta desbalanceado esto debido a que el sistema cuenta con algunas cargas monofásicas. Cabe resaltar que a pesar de que el sistema de distribución esta desbalanceado sigue sin contener armónicos.

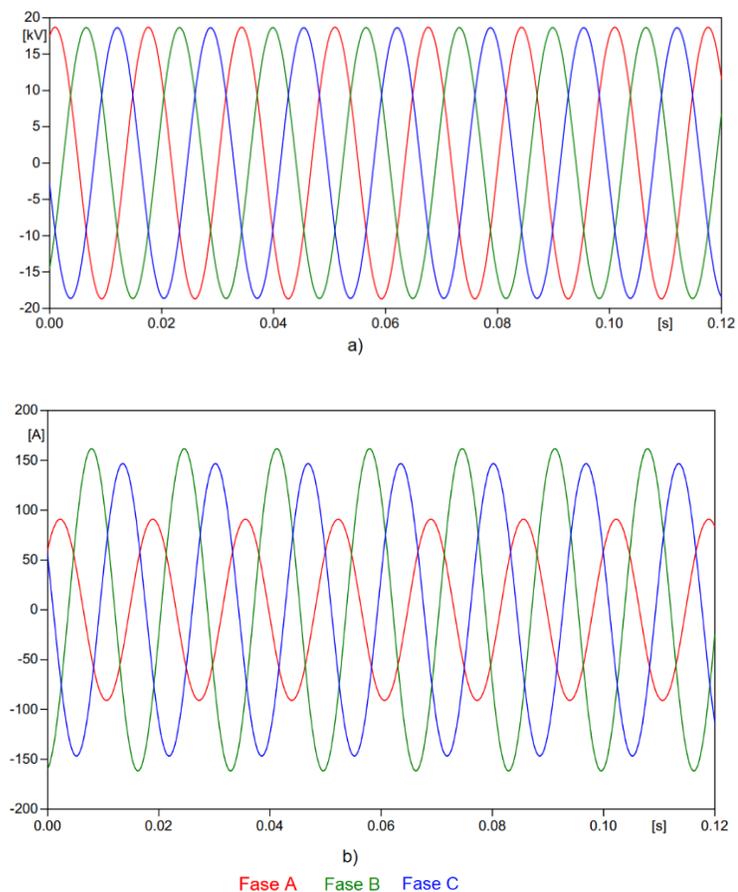


Figura 20. a) Voltaje obtenido en la simulación del sistema. b) Corriente obtenido de la simulación del sistema.

5.3. Análisis de los eventos utilizando la transformada Taylor-Fourier

El procesamiento de la señal con la transformada de Taylor-Fourier se le aplicará a la señal de corriente, en una sola de sus fases del sistema y requiere seguir varios pasos. El primero paso consta de adquirir la señal de interés de la simulación de ATPDraw. Posteriormente se exportan a la plataforma Matlab en un formato compatible *.m* formato del archivo que se maneje sea compatible con los archivos que puedan ser leídos por el software Matlab.

Como segunda parte del método de la transformada digital de Taylor-Fourier, es la obtención de la frecuencia de muestreo y la frecuencia base del sistema que se está analizando, para generar los bancos de filtros necesarios para el análisis de la señal. El banco consta de la misma cantidad de filtros como de armónicos a analizar, debido a que la normativa IEC 519-2014 nos indican 50, son los que se usaran de base en la implementación. La obtención de la frecuencia de muestreo es especialmente importante debido a que dependiendo del equipo de medición la frecuencia de muestreo puede variar, sin embargo en la mayoría de los manuales vienen especificado este valor. Por lo contrario, la frecuencia base comúnmente es de 60 [Hz], puede ser cambiada a una de 50 [Hz] pero el número de ciclos por segundo pasaría de 12 a 10 y debe ser cambiado para seguir cumpliendo con lo establecido en la normativa IEC 519-2014.

Como se explicó en el capítulo 3, se aplica un ventaneo a la señal para reducir los efectos de discontinuidad, se divide la señal analizada en segmentos solapados, se aplica el método de Taylor-Fourier y se obtiene la descomposición espectral de la señal en sus componentes armónicos y la estimación de sus amplitudes.

En nuestro caso de estudio el sistema de distribución 23 kV simulado en ATPDraw es fácil obtener este dato, pues entro de las propiedades de la simulación se encuentra el "*Delta T*", que es el tiempo de muestreo de la señal por lo que solo es necesario obtener el inverso de este mismo para poder obtener la frecuencia de muestreo, adicional a esto también se cuenta con la frecuencia base del sistema. Otra ventaja que nos presenta usar ATPDraw es la facilidad con la que podemos exportar las señales, pues nos permite guardarlas con una extensión compatible con Matlab facilitando el análisis, como se mencionó anteriormente.

Por último, se implementó una interfaz gráfica en Matlab para que se vuelva una herramienta para futuros proyectos en el análisis armónico en los sistemas eléctricos de potencia, La cual está disponible en el Anexo A.

5.3. Energización de banco de capacitores

Para crear el modelo del banco de capacitores, es necesario el uso de los elementos de circuitos disponibles de ATPDraw como los “*RLC trifásicos*”, pero para ellos es necesario conocer la capacidad total del banco, tensión nominal de operación y la configuración de los bancos individuales, en nuestro caso son capacitores en paralelo. Una vez creado el modelo del banco se deben de configurar las propiedades del modelo como su capacitancia, para acercarnos lo más posible a su comportamiento real.

El modelo es conectado al sistema de distribución simulado a través de un “*switch*” el cual es el encargado de conectar el modelo al sistema de distribución en el tiempo especificado en la Tabla V.

Una vez finalizada la simulación, se puede analizar los resultados en el punto de medición indicado en el Figura 19. La forma de onda resultante de las tres fases puede ser observada en la Figura 21.

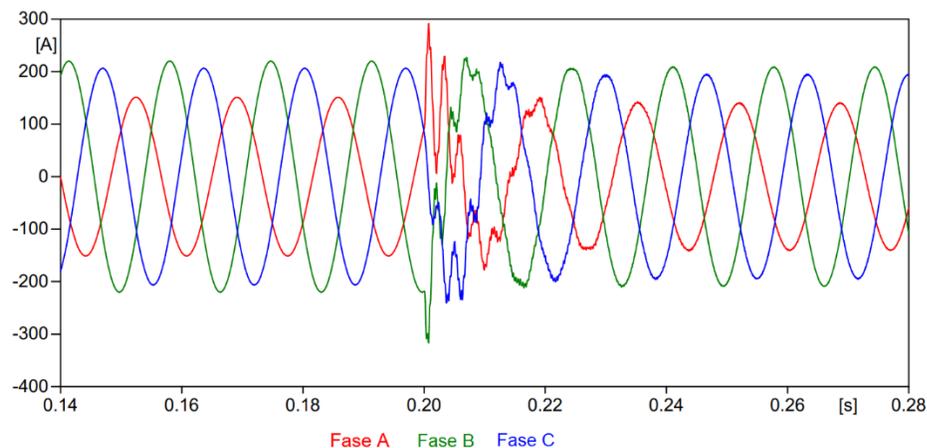
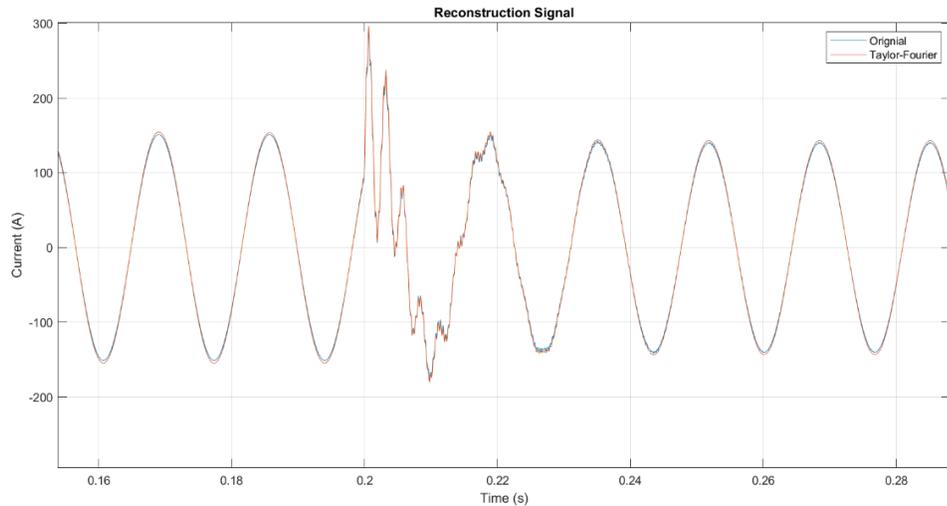
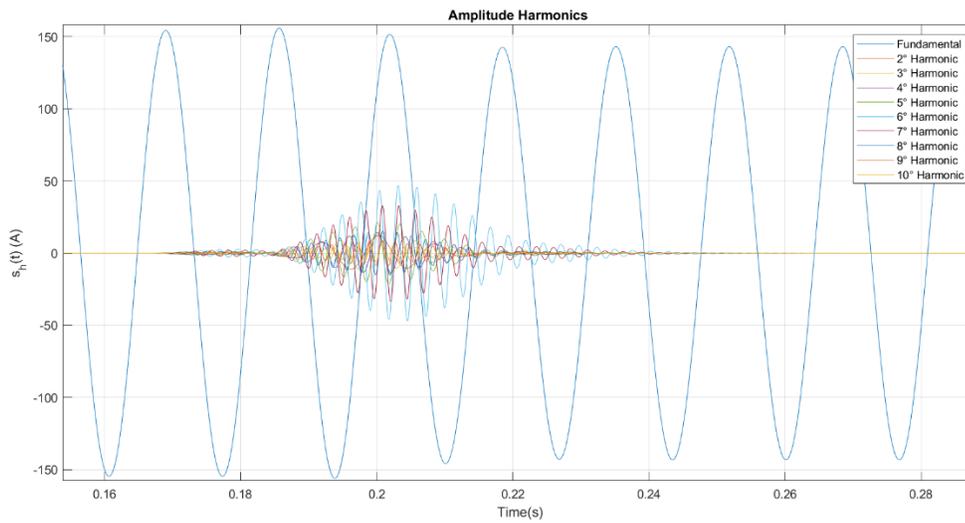


Figura 21. Corrientes resultantes al energizar un banco de capacitores.

Se utilizará la fase A para realizar el análisis de la transformada de Taylor-Fourier para encontrar el contenido armónico en el momento en que se energiza el banco de capacitores. En la Figura 22 a) se muestra la reconstrucción de la señal a partir de sus componentes armónicos y su componente fundamental. La Figura 22 b) muestra los monoccomponentes con magnitud mayor a 5 al energizar el banco de capacitores. Con base en al contenido armónico se calculó el *THD* de mayor valor que alcanzó el sistema al conectar el banco de capacitores tomando el valor de *THD=44.67%*



a)



b)

Figura 22. a) Reconstrucción de la forma de onda a partir de sus monocomponentes. b) Componentes armónicas que componen a la corriente aparecidos durante la energización de un banco de capacitores.

Durante la energización se presentaron los armónicos del 2do al 10mo, sin embargo, lo de mayor magnitud y duración fueron el 6to y 7mo, y es importante resaltar que al cabo del tiempo los armónicos causados por la energización de banco de capacitores desaparecieron del sistema.

5.4. Arranque de motor de inducción

Para crear el modelo de un motor de inducción nos apoyamos de ATPDraw que contiene un apartado de máquinas eléctricas, seleccionamos la máquina universal

con 4 polos trifásico. Se configuraron los parámetros de la máquina eléctrica universal para que se comporte como un motor de 50 hp.

El modelo es conectado al sistema de distribución simulado a través de un “switch” el cual es el encargado de conectar el modelo al sistema de distribución en el tiempo especificado en la Tabla V.

Una vez finalizada la simulación, se puede analizar los resultados en el punto de medición indicado en el Figura 19. La forma de onda resultante de las tres fases puede ser observada en la Figura 23. Donde se observa un ligero aumento de corriente en $t=0.4$ s. El ligero aumento se debe a que el motor se conecta a través de un transformador 23/0.440 kV, por lo que la corriente en el lado primario es más pequeña en el lado secundario.

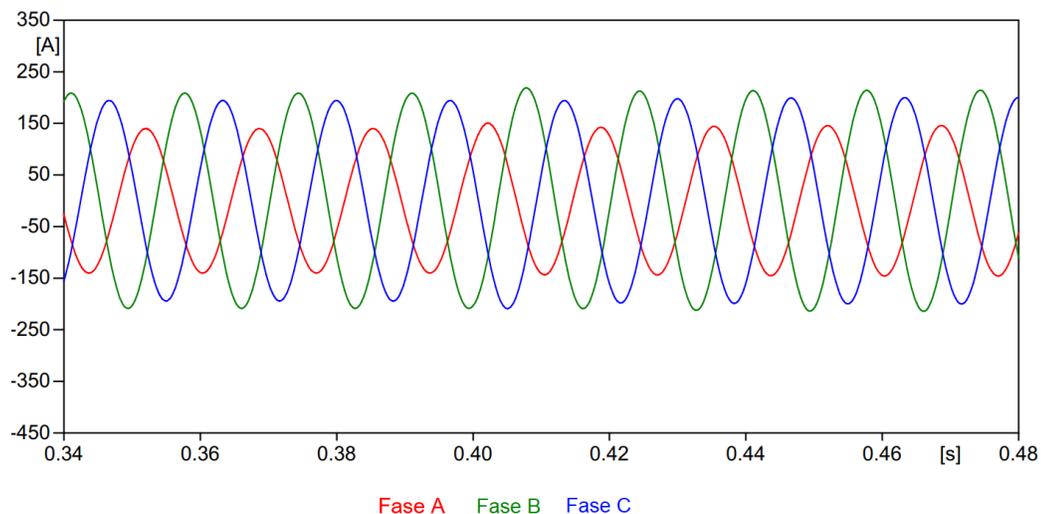


Figura 23. Arranque de un motor de inducción.

En este caso, hay magnitudes pequeñas de armónicos de baja frecuencia, como consecuencia es difícil distinguir si tuvo un efecto en el sistema desapareciendo en un periodo corto de tiempo. Sin embargo, si la maquina es arrancada frecuentemente habrá presencia de armónicos y puede ocasionar problemas a largo plazo. En la Figura 24, se muestra la descomposición de la señal y sus componentes armónicos, en este caso al ser de magnitud baja solo se muestra la que son mayores a 0.5. También se calculó el THD siendo este de $THD=1.33\%$

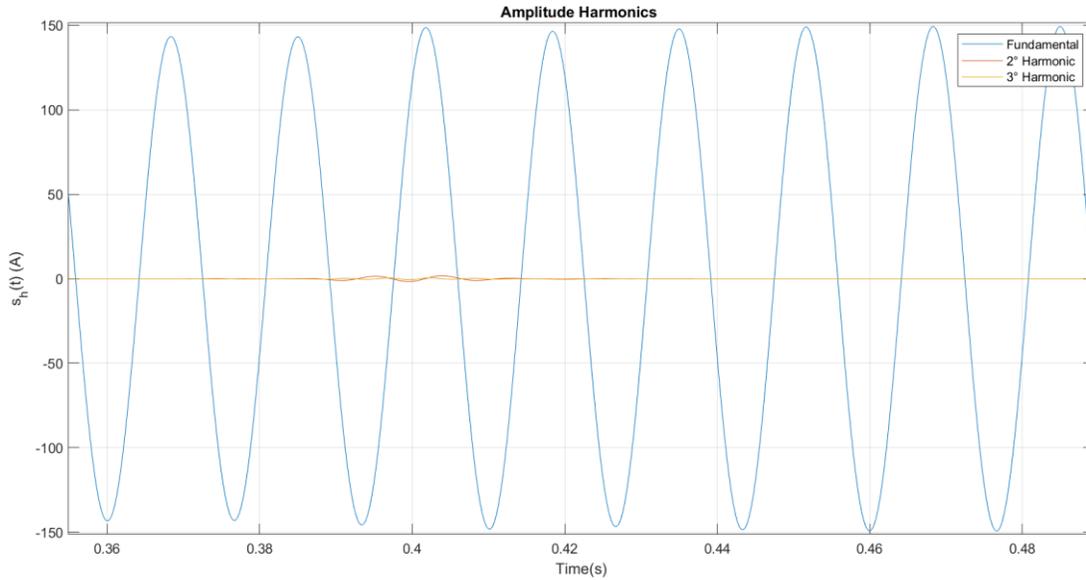


Figura 24. Componentes armónicas durante el arranque de un motor.

5.5. Energización de transformador

De manera similar la creación del modelo del transformador utilizó los elementos de biblioteca de ATPDraw, seleccionando el transformador de conexión tipo delta-estrella. Los parámetros usados para modelar el transformador de potencia para distribución fueron calculados a partir de su voltaje nominal en el devanado de alta es de 23 kV, el voltaje nominal en baja de 220 V, con una capacidad 750 kVA y una frecuencia base de 60 Hz.

El modelo es conectado al sistema de distribución simulado a través de un “switch” el cual es el encargado de conectar el modelo a la alimentar de distribución en el tiempo especificado en la Tabla V.

Una vez finalizada la simulación, se puede analizar los resultados en el punto de medición indicado en el Figura 19. La forma de onda resultante de las tres fases puede ser observada en la Figura 25.

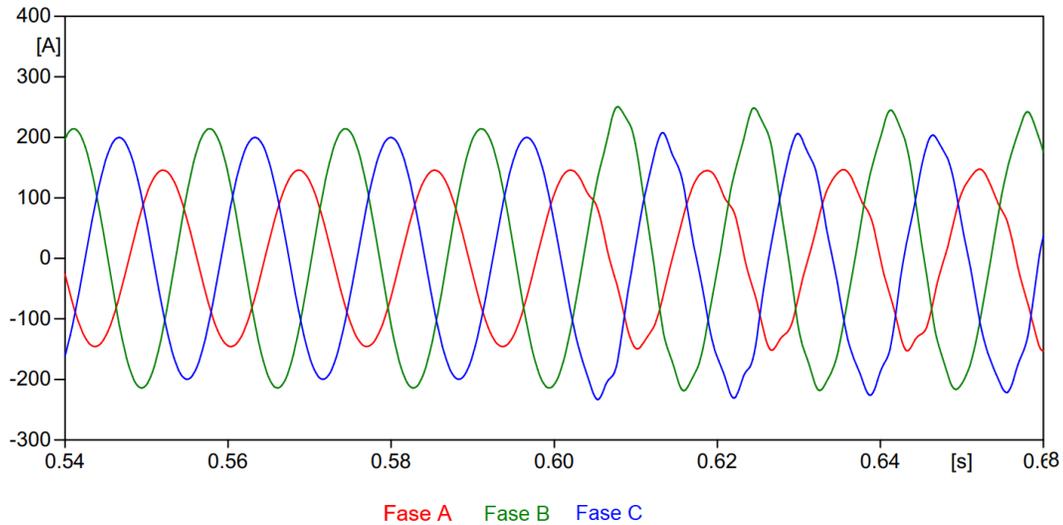


Figura 25. Corrientes al energizar un transformador.

Los componentes armónicos con magnitud mayores a 1.5 como se muestra en la Figura 26, siendo las armónicas más prominentes los primeros 7. También se calculó el THD siendo este de $THD=9.05\%$

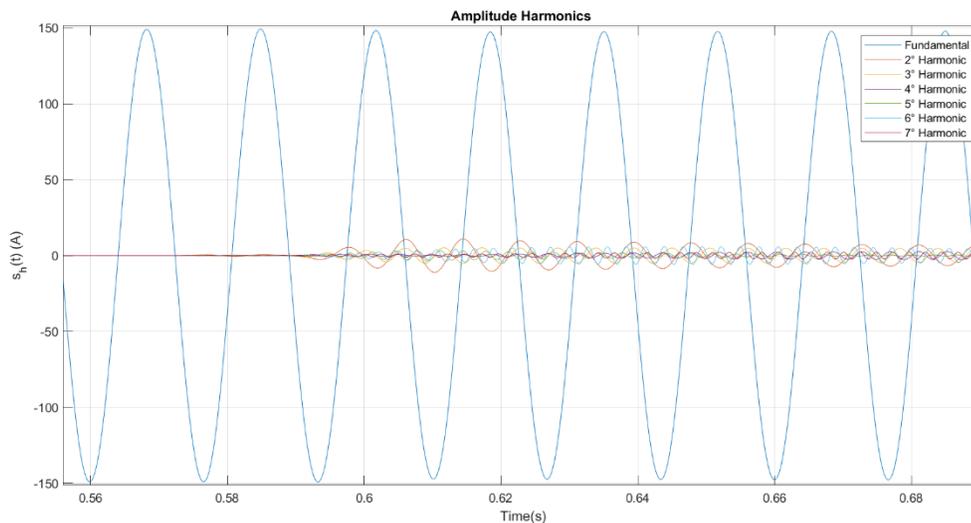


Figura 26. Componentes armónicos durante la energización de un transformador.

5.6. Carga no lineal estación del metro

Finalmente, para crear el modelo de la estación del metro se usó una característica especial ATPDraw donde nos permite leer importar archivos con la terminación “.prm” en el cual están incluidas las formada de onda de la corriente medidas. A partir de ahí se obtienen fuentes de corriente que se van a inyectar y simular el comportamiento de una estación del metro.

El modelo es conectado al sistema de distribución simulado a través de una “Fuente de corriente controlada por TACS” la cual es la encargada de conectar las mediciones al sistema de distribución en ATPDraw, en el tiempo especificado en la Tabla V.

Una vez finalizada la simulación, se pueden analizar los resultados en el punto de medición indicado en el Figura 19. La forma de onda resultante de las tres fases puede ser observada en la Figura 27. Como se observa en la figura, las formas de onda de la corriente inyectada en $t=0.8$ s no tienen un comportamiento senoidal, lo que sugiere un alto contenido armónico.

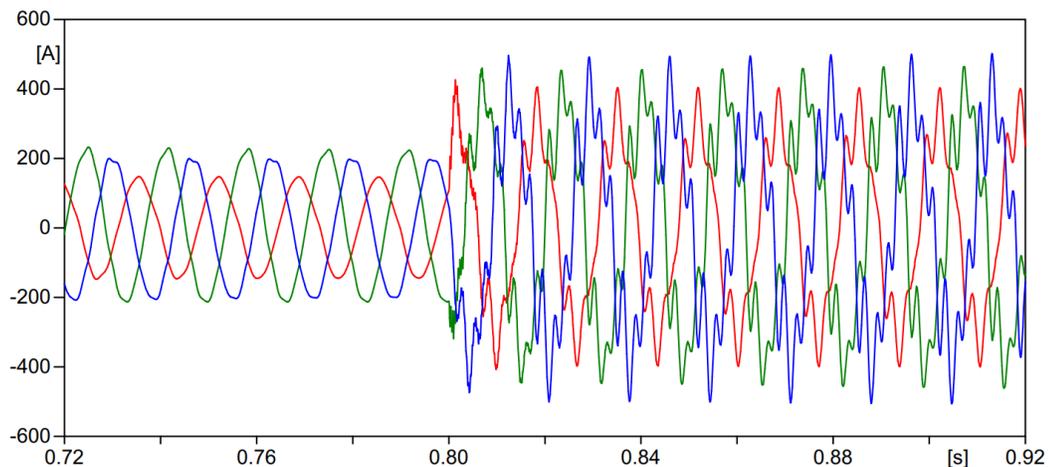


Figura 27. Corrientes resultantes ATPDraw al conectar la estación del metro.

En este sentido, mientras más componentes armónicos en la forma de onda más distorsión tendrá la corriente y con magnitudes significativas. La Figura 28 muestra el análisis armónico, utilizando la técnica de Fourier. Como se puede observar en $t=0.8$ s se puede observar un incremento en los componentes armónicos, principalmente la 5ª y la 7ª, que es como se esperaba según lo analizado en la carga no lineal del metro de Figura 28. El programa puede calcular hasta la armónica 50, sin embargo, el análisis de las cargas no lineales no se observan componentes armónicos a frecuencias más altas. Por último, se calculó el THD de corriente que obtuvo un valor de $THD=23.09\%$.

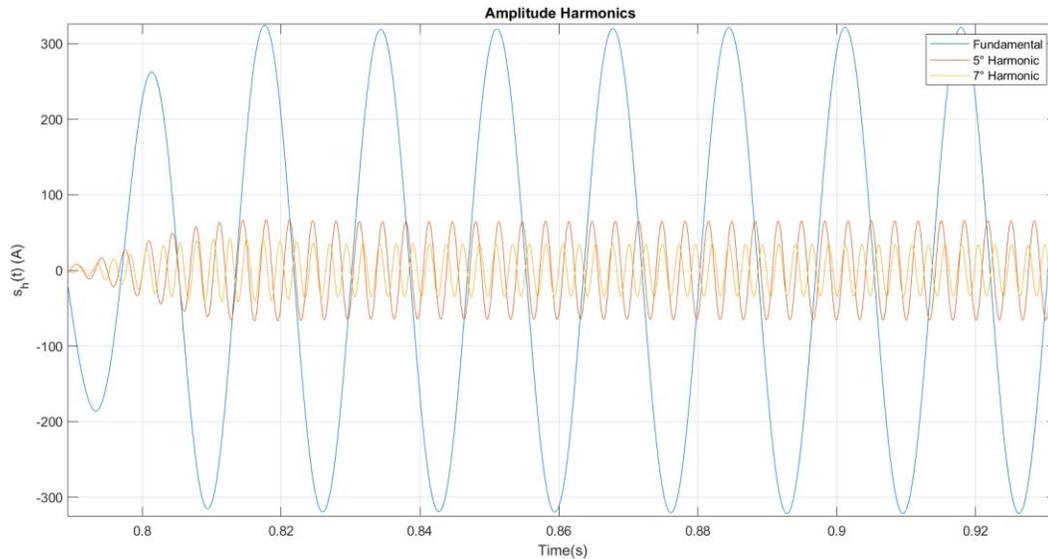


Figura 28. Componentes armónicos de la carga no lineal.

5.7. Resultados de simulación del sistema de 23 kV en ATPDraw y procesamiento con la transformada de Taylor-Fourier

Uno de los objetivos de este trabajo es presentar el modelado de algunas cargas no lineales, así como una herramienta que ayude en el análisis de la calidad de la energía y a lo largo de este capítulo se han analizado las corrientes sus componentes armónicas con el objetivo de identificar las cargas no lineales. En la Figura 29 se presenta la corriente de cada fase durante todo el tiempo de simulación y el procesamiento de la señal con el análisis de la transformada de Taylor-Fourier. En el cual es fácil identificar en que instante de tiempo se conectan las diferentes cargas y con el análisis previamente realizado identificar las características de cada una de ellas. Cabe mencionar que en la Tabla V se especifica el tipo de carga y su tiempo de conexión.

En la Figura 29, la primera subgráfica se encuentra la reconstrucción de la señal de la fase A, la segunda subgráfica contiene los componentes armónicos reconstruidos de la fase A, la tercera subgráfica muestra las magnitudes de las componentes armónicas en toda simulación y en la cuarta subgráfica se muestra el THD obtenido ante los diferentes eventos.

Para este estudio solo es necesario mostrar las armónicas de bajo orden, sin embargo, para observar todas las componentes obtenidas se puede consultar el **Apéndice A**. En la Figura 29 también se puede observar que un comportamiento similar ocurre en las Fases B y C debido a que las cargas simuladas son trifásicas.

Cabe mencionar que el sistema propuesto es desbalanceado por lo que las diferencias son más perceptibles en magnitud.

En el análisis de la Figura 29 se puede observar que, en $t=0.2$ s cuando se conecta el banco de capacitores hay un pequeño aumento de corriente y algunos componentes armónicos, sin embargo, se atenúan rápidamente. En $t=0.4$ s se observa un pequeño aumento de corriente debido al arranque del motor de inducción, sin embargo, este arranque solo incrementa la componente fundamental debido a que no se aprecian componentes armónicos. En $t=0.6$ s se energiza un transformador, donde se pueden apreciar componentes armónicos especialmente la 2ª armónica y con un comportamiento descendiente. Finalmente, cuando se conecta la carga que representa la estación del metro se puede apreciar una gran magnitud y aumento de los componentes armónicos en especial la 5ª y la 7ª. Finalmente el aumento de estos armónicos da lugar a incrementos en THDi de hasta 33% en la fase C.

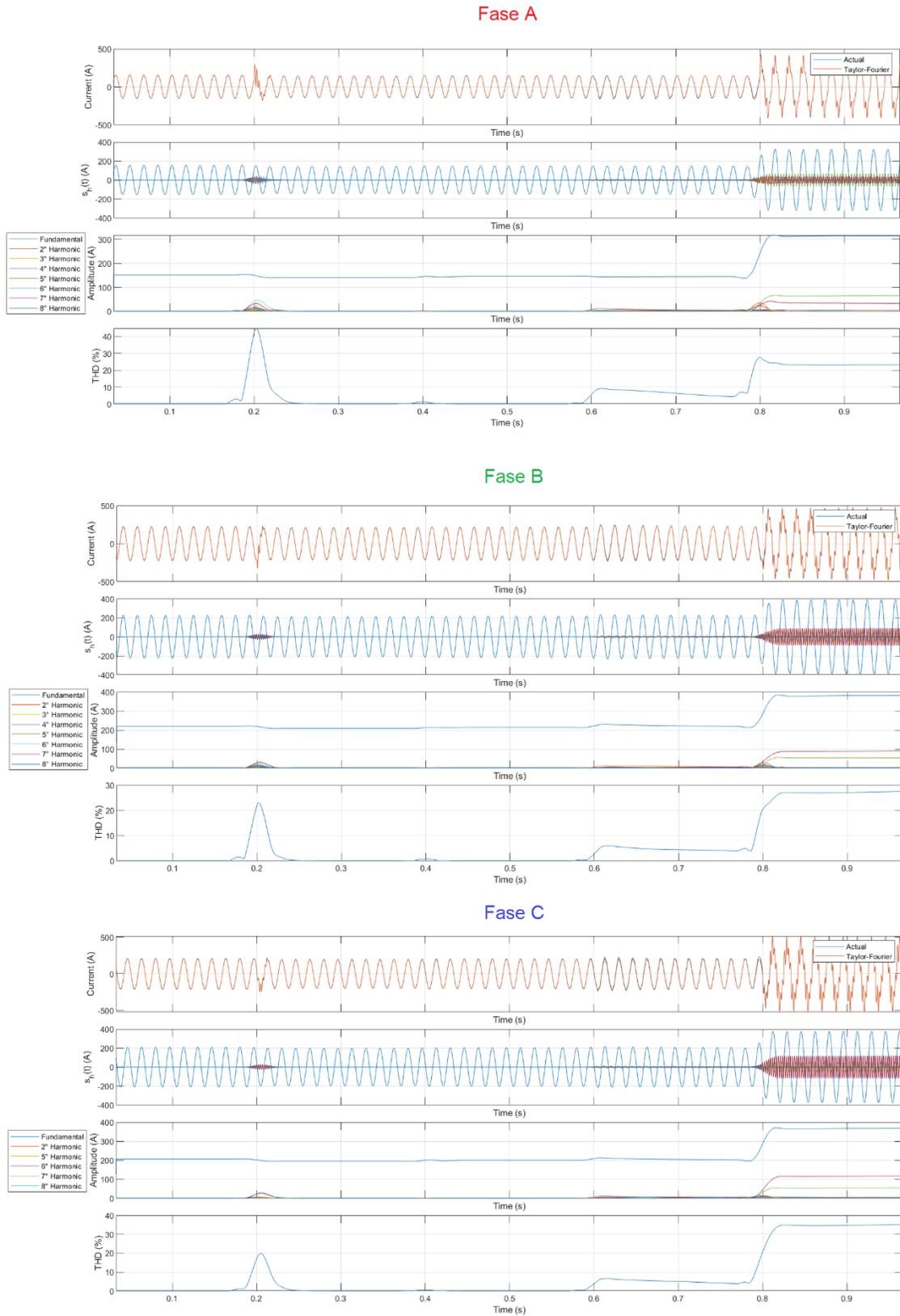


Figura 29. Comportamiento armónico utilizando Taylor-Fourier.

Al modelar y analizar cada una de las cargas por separado, se pudieron conocer sus componentes armónicos más significativos, por lo cual, nos permite localizarlas en el sistema cuando se presentan individualmente. En la Figura 30, se muestran los incrementos de $THDi$ y los cuales son calculados a partir de sus componentes armónicos más pronunciados en cada una de sus fases, por lo que, se puede encontrar una relación de cada carga en cada fase y su $THDi$. Por último, el $THDv$ de voltaje obtuvo un valor de 8.3272% lo que en principio no cumple con el código de red.

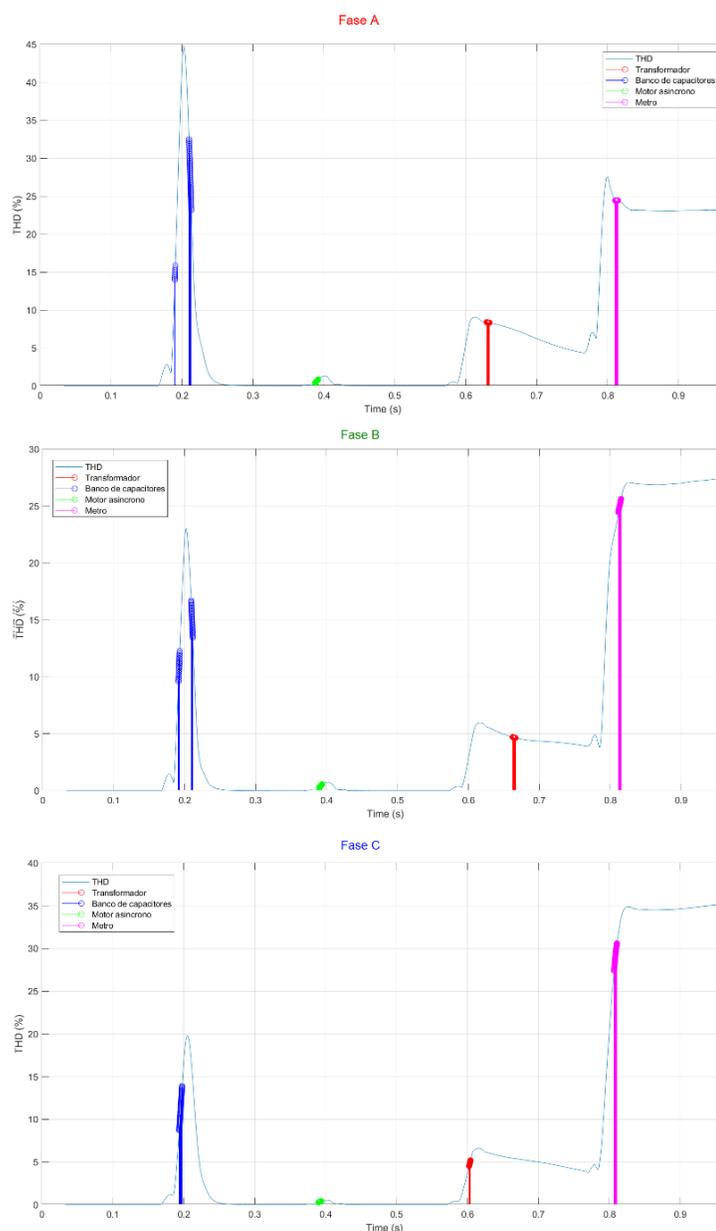


Figura 30. Identificación de cargas no lineales en el sistema simulado.

Capítulo 6.

Conclusiones y Trabajo a futuro

Los armónicos en los sistemas de distribución, así como en los sistemas de transmisión son un problema que cada vez toma mayor importancia. En ese sentido la implementación de técnicas novedosas como es la transformada digital de Taylor-Fourier que ha demostrado ser muy útil para el análisis armónico por lo que el surgimiento de este tipo de herramientas ha sido de gran utilidad.

De manera general podemos concluir que el *THD* es una medida importante para evaluar la calidad de la energía, ya que indica la presencia de armónicos en la señal. En los casos presentados, se observaron diferentes valores de *THD*. Al analizar las señales de corriente, se puede indicar problemas en el sistema eléctrico. El más alto fue el caso de la energización del banco de capacitores llegando a un valor máximo de 44.76%, sin embargo, el tiempo de duración es pequeño, por lo cual no pone en riesgo la operación del sistema. El *THD* aumenta y disminuye de manera progresiva y regresa a cero lo que en un sistema real eso no sucede incluso pueden coincidir eventos.

En cambio, el arranque del motor de inducción al no mostrar muy alta corriente al sistema su *THD* fue bajo apenas alcanzando el 1.33% en su punto más alto, además de ser de corta duración debido a que el *THD* se vuelve cero en menos de los 200 ms.

Durante la energización del transformador, el *THD* experimenta un aumento abrupto, alcanzando su valor máximo de 9.05%. Aunque el *THD* disminuye gradualmente, no alcanza a disminuir por completo antes del siguiente evento, lo que provoca un aumento adicional del *THD* en el siguiente evento. Con el tiempo, el *THD* volvería a ser cero.

En cuanto al caso de la estación de metro, se observó un alto nivel de *THD*, alcanzando un máximo del 21.19% en ese punto. Además, de los 50 armónicos medidos, todos tenían valores mayores a 0.5. A medida que avanzaba la simulación, el *THD* disminuyó, pero nunca llegó a cero, manteniéndose en un valor constante con las armónicas predominantes de quinta y séptima, y un *THD* constante de 23.09% hasta el final de la simulación, debido a que la carga no lineal es constante.

Por otra parte, el algoritmo propuesto para el análisis de las señales a pesar de ser una herramienta adecuada para el análisis armónico aún tiene espacio de mejora

como podría ser la implementación en un lenguaje de libre uso como C# o Python. Además, del detalle que está limitada al tipo de archivo que soporta Matlab, siendo necesaria una preparación del voltaje o corriente que se desee analizar.

Finalmente, dentro del código de la transformada digital de Taylor-Fourier obtiene las primeras 2 derivadas del voltaje o corriente analizado, por lo que en algún futuro o trabajo posterior dichas derivadas pueden ser utilizadas para obtener las frecuencias de la fuente de armónicos lo que nos abre dos posibilidades, crear otra aplicación que nos de características de filtros para proteger el sistema o mejor la localización de fuente de armónicos.

Referencias.

- [1] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, D. Santoso y H. W. Beaty, "Electrical Power Systems Quality", McGraw-Hill, 2002.
- [2] C. F. d. E. CFE, "Calidad de la energía: características y límites de las perturbaciones de los parámetros de la energía eléctrica.", CFE L0000-70, México, 2009.
- [3] IEEE power and energy society, "IEEE Recommended Practice and requirements for harmonic control in electric power systems", New York: IEEE standards association, 2014.
- [4] J. K. Phipps, J. P. Nelson y P. K. Sen, "Power quality and harmonic distortion on distribution systems", IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 476-484, Marzo 1994.
- [5] "Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks. I. Concepts, models, and simulation techniques", IEEE Transactions on Power Delivery, pp. 452-465, enero 1996.
- [6] R. A.-H. e. al, "Test systems for harmonics modeling and simulation", IEEE Transactions on Power Delivery, pp. 579-587, Abril 1999.
- [7] J. Desmet, D. Putman, F. D'hulster y R. Belmans, "Thermal analysis of the influence of nonlinear, unbalanced and asymmetric loads on current conducting capacity of LV-cable", IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, 2003.
- [8] J. A. Pomilio y S. M. Deckmann, "Characterization and Compensation of Harmonics and Reactive Power of Residential and Commercial Loads", IEEE Transactions on Power Delivery, pp. 1049-1055, abril 2007.
- [9] W. Abbas y M. A. Saqib, "Effect of Nonlinear Load Distributions on Total Harmonic Distortion in a Power System", International Conference on Electrical Engineering, pp. 1-6, 2007.
- [10] C. Venkatesh, D. S. Kumar, D. V. S. S. S. Sarma y M. Sydulu, "Modeling of non-linear loads and estimation of harmonics in industrial distribution system", Proc. 15th Nat. Power Syst. Conf. (NPSC), pp. 592-597, diciembre 2008.
- [11] R. D. Patidar y S. P. Singh, "Harmonics estimation and modeling of residential and commercial loads", 2009 International Conference on Power Systems, pp. 1-6, 2009.
- [12] M. J. H. Rawa, D. W. P. Thomas y M. Sumner, "Simulation of non-linear loads for harmonic studies", 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, pp. 1-6, 2011.
- [13] W. C. Carreño, G. Plata, A. L. M. Wandurraga y C. A. D. Gualdrón, "Simulación de sistemas eléctricos con cargas no lineales y variantes en el tiempo", Revista chilena de ingeniería, pp. 76-92, 2011.

- [14] T. A. Abdul-Hemeed, M. F. A. korede, Y. Abdulrahman y O. M. Tijani, "Investigation of the harmonic effects of nonlinear load son power distribution network", Nigerian Jopurnal of Technology, 17 4 2019.
- [15] L. I. Kovernikova y V. C. Luong, "New approach to modeling the nonlinear loads", Methodological problems in reliability study of large energy systems, 16 Diciembre 2019.
- [16] S. Lu, "Application of DFT filter bank to power frequency harmonic measurment", IEEE Proccedings - Generation, Transmission and Distribution, pp. 132-136, Enero 2015.
- [17] F. Zhang, Z. Geng y W. Yuan, "The algorithm of interpolating windowed FFT for harmonic analysis of electric power system", IEEE Transactions on Power Delivery, pp. 160-164, Abril 2001.
- [18] Q. Tang, Y. Wang y S. Guo, "Design of Power System Harmonic Measurement System Based on LabVIEW", 2008 Fourth International Conference on Natural Computation, pp. 489-493, 2008.
- [19] P. E. J. Servando, "Simulación y caracterización de cargas no lineales en baja tensión para la estimacion y control de contenido armónico", Escula Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional., 2011.
- [20] W. Yao, Q. T. Z. Teng y Y. Gao, "Measurement of power system harmonic based on adaptive Kaiser self-convolution window", IET Generation, Transmission & Distribution, pp. 390-398, 2016.
- [21] J. Bohórquez, A. Emiro y S. Betancur, "Estudio de los principales problemas que afectan la calidad de la potencia eléctrica (caso de aplicación en Antioquia)", Medellín: Facultada de Ingeniería eléctrica de la Universidad Pontificia Boliviana, 2002.
- [22] IEEE Standars Coordinating Committee 22 on Power Quality, «IEEE Recommended Practice for Monotoring Elctric Power Quality,» IEE, pp. 9-11, 2 august 2001.
- [23] M. d. A. Casuso, "Método de detección en tiempo real de perturbaciones transitorias en redes de suministros eléctrico", Santander: Universidad de Cantabria, Departamento de Electrónica y Compotadores , 2013.
- [24] IEEE, 519-2014, "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", 2004.
- [25] COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD, "DESVIACIONES PERMISIBLES EN LAS FORMAS DE ONDA DE TENSION Y CORRIENTE EN EL SUMUNISTRO Y CONSUMO DE ENERGIA ELECTRICA", ENERO 2005.
- [26] A. T. Martínez, "Series de Taylor y Series de Fourier: Un estudio comparativo", Departamento de análisis matemático, Facultad de ciencias, Universidad de Granada, 7 septiembre 2015.

- [27] C. J. C. González, "Fundamentos del análisis de Fourier", Departamento de Ingeniería Eléctrica, Escola Técnica Superior de Enxeñeiros Industriais, Universidad de Vigo, 2003.
- [28] G. Á. Almazán, "Implementación en tiempo real de una unidad de medición fasorial basada en sistemas embebidos", Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2018.
- [29] G. C. Garcia, "Implementacion de un sistema de medición de armónicos utilizando sistemas embebidos", Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de ingeniería, 2019.
- [30] G. Á. Almazán, "Implementación en tiempo real de una uinidad de medición fasorial basada en sistemas embebidos", Universidad Nacional Autonoma de México, Facultad de ingeniería., 2018.
- [31] M. Grandy, "Understanding Power System Harmonics", Texas: University of Texas at Austin, Dep. of Electrical & Computer Engineering, 2012.
- [32] H. M. Manzano, Evaluacion de los efectos del arranque de motores de gran potencia en los sistemas electricos industriales., Quinto: Escuela Politecnica Nacional, Facultad de Ingenieria Electrica, 1983.
- [33] A. M. Erazo, "Energizacion de bancos de capacitores de una subestación", Ciudad de México : Escuela Politecnica Nacional, Facultad de ingenieria electrica. , 1987.
- [34] Comisión Federal de Electricidad, "Calidad de la energía: caracteristicas y limites de las perturbaciones de los parámetros de la energía eléctrica", Guía CFE L0000-70, Ciudad de México : Comisión Federal de Electricidad., 2009.

7. Anexo

6.1. Interfaz gráfica en Matlab

Este programa cuenta con una interfaz sencilla y limitada, pero su enfoque principal es la practicidad y la facilidad de uso. Se ha priorizado esta característica debido a que uno de los objetivos del trabajo es proporcionar una herramienta que permita identificar fácilmente la contaminación de armónicos en la corriente o en su defecto cualquier tipo de señal que contenga contaminación armónica.

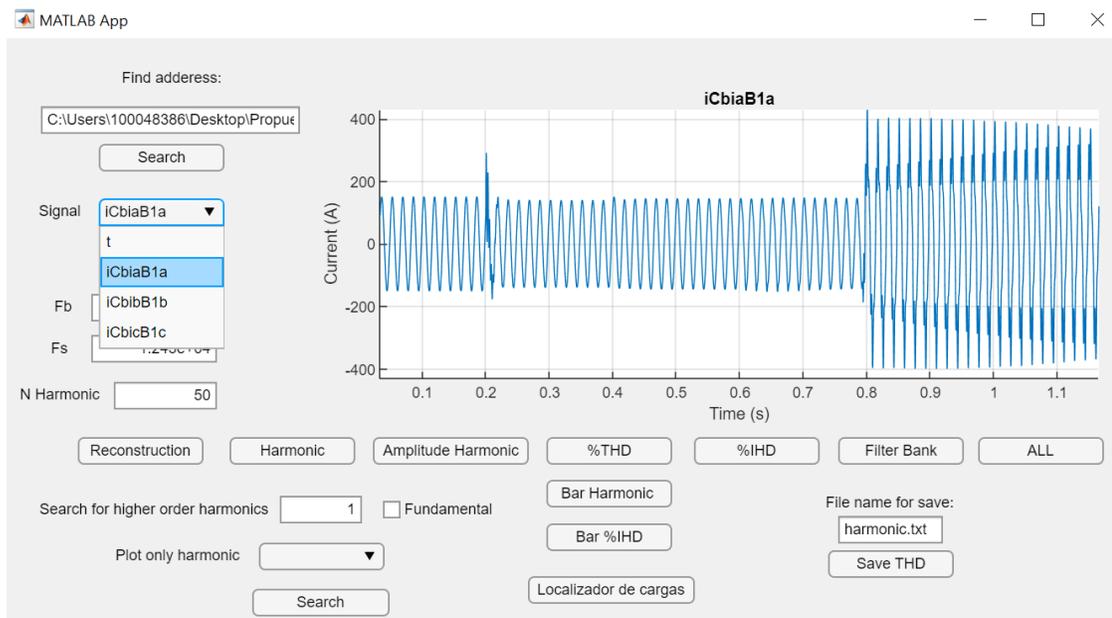


Figura A. 1. Interfaz gráfica utilizando Matlab.

Como se puede observar, solo se necesitan 3 cosas, la dirección del archivo que se va a cargar, la frecuencia base y la frecuencia de muestreo. Los archivos que soporta son preprocesados por Matlab y con una extensión “.m” o en el caso del proyecto al utilizar ATPDraw este los exporta directo y pueden ser utilizados sin necesidad de procesar, solo es necesario colocar la ubicación del archivo y el nombre de la señal. Adicional a esto se agregó un recuadró donde se puede seleccionar el número de armónicas que se desean adquirir con el nombre de “*N harmonic*” la cual está en 50

componentes armónicas por defecto, pero si se desea obtener menos cantidad de componentes armónicos el programa lo hará sin problemas.

Una vez localizado el archivo se desplegará el nombre de las corrientes que contenga el archivo, al ser seleccionado el nombre se graficará la corriente para decidir si es la corriente correcta como se muestra en la Figura A.1. Para empezar el programa solo es necesario presionar el botón “Play” y se realiza procesamiento de la señal cuando termine el proceso, saldrá una ventana avisando que ya se pueden usar las demás funciones.

El botón “Reconstruction” como su nombre lo indica reconstruye la señal de corriente a partir de la descomposición espectral y la estimación de sus amplitudes. Se coloca la gráfica original para poder apreciar la reconstrucción con resultados satisfactorios como se muestra en la Figura A.2.

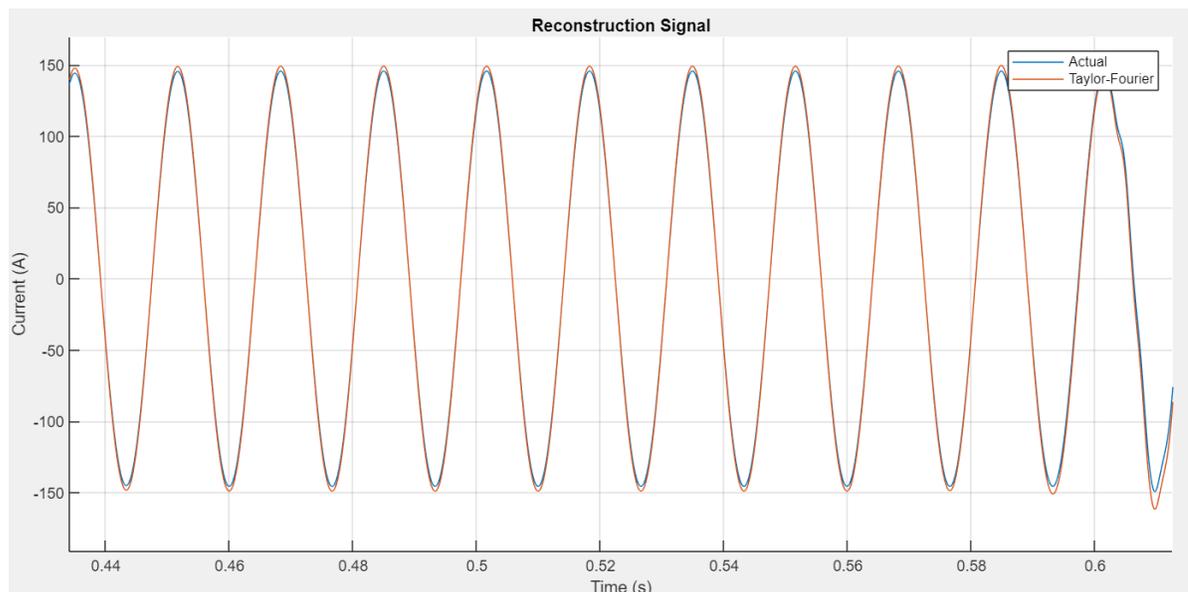


Figura A. 2. Reconstrucción de la corriente con la Transformada digital de Taylor-Fourier.

El botón “Harmonic” grafica los 50 componentes armónicos de la corriente que la compone, por lo que es fácil detectar en qué instancia es conectada una carga no lineal, además claro que si una carga no lineal es muy prominente en el sistema es fácilmente localizable en el instante de tiempo en el que se presentó el fenómeno, como se muestra en la Figura A.2. Sin embargo, si se desea observar los componentes de mayor magnitud se puede hacer usando la casilla “Search for higher order harmonics”, al usarla mostrará únicamente las componentes iguales o mayores a la magnitud seleccionada, como extra se pueden decir si se desea graficar la fundamental o no marcando la casilla, como se muestra en la Figura A.3. Si se desea ver con más detenimiento la fundamental o cualquier n-ésimo

armónico, se puede hacer seleccionando componente deseado en el listado mostrado en “*Plot only harmonic*”. Si se de ver las magnitudes que toman los armónicos a lo largo del tiempo se tiene el botón “*Amplitude Harmonics*”, el cual nos deja que valores de toman en cada instante de forma gráfica y percatarnos que armónicos tiene mayor presencia en el sistema. Por último, el botón “*Bar harmonic*” grafica en barras la última magnitud obtenida por la TDTF, de manera similar a lo que hace el ATPDraw.

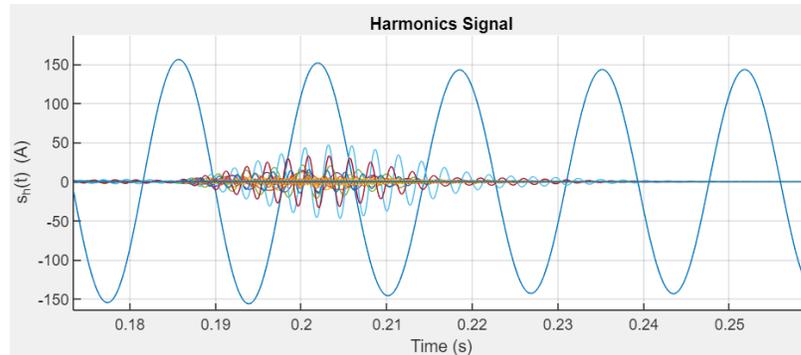


Figura A. 3. Descomposición de corriente en sus principales en sus componentes.

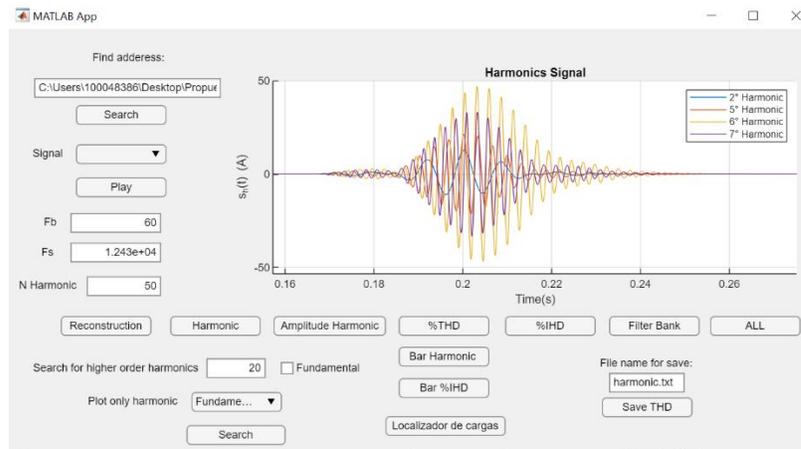


Figura A. 4. Descomposición de la corriente, mostrando que los armónicos que alcanzaron una amplitud mayor a 20 y sin mostrar la fundamental.

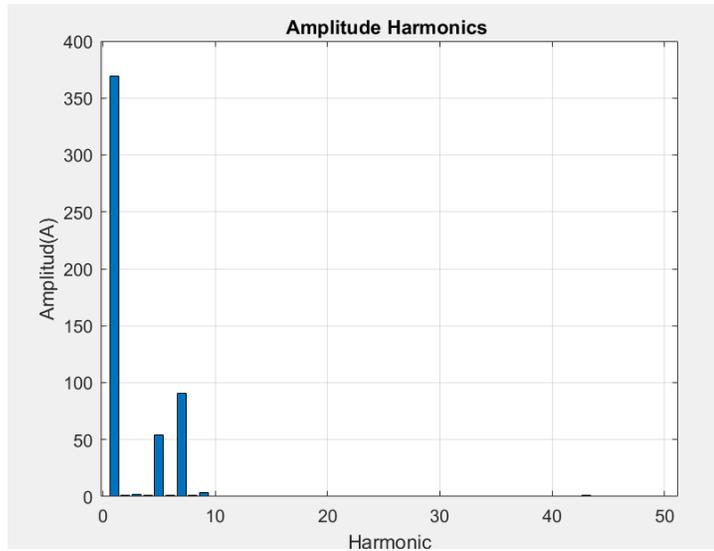


Figura A. 5. Gráfica de barras la última magnitud obtenida por la TDTF.

El botón “%THD” muestra la distorsión armónica total de la señal durante el transcurso del tiempo como se muestra en la Figura A.6, es importante recordar que el THD es utilizado para medir la calidad de una señal, debido a que un THD alto puede ser menos eficiente y causar problemas en los equipos que la procesan.

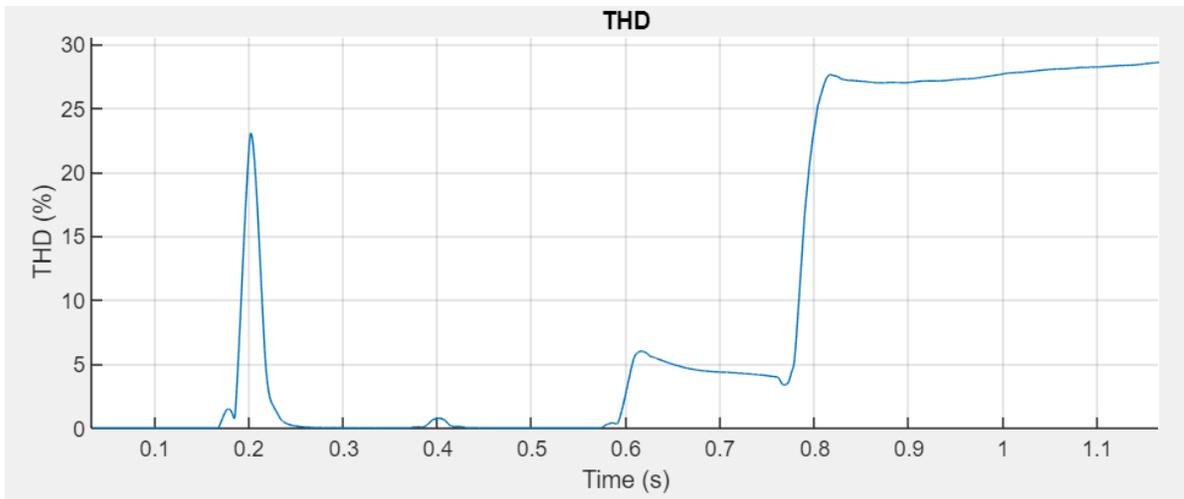


Figura A. 6. THD del sistema durante todo el tiempo.

De manera similar, el botón “% IHD”, gráfica la distorsión armónica individual, que es la medida de la cantidad de la distorsión armónica presente en la señal en relación con cada armónico individual como se muestra en la Figura A.7. Adicionalmente a esto se agregó la opción de ver el IDH del último valor obtenido con el método de la transformada de Taylor-Fourier con el botón “Bar %IHD”.

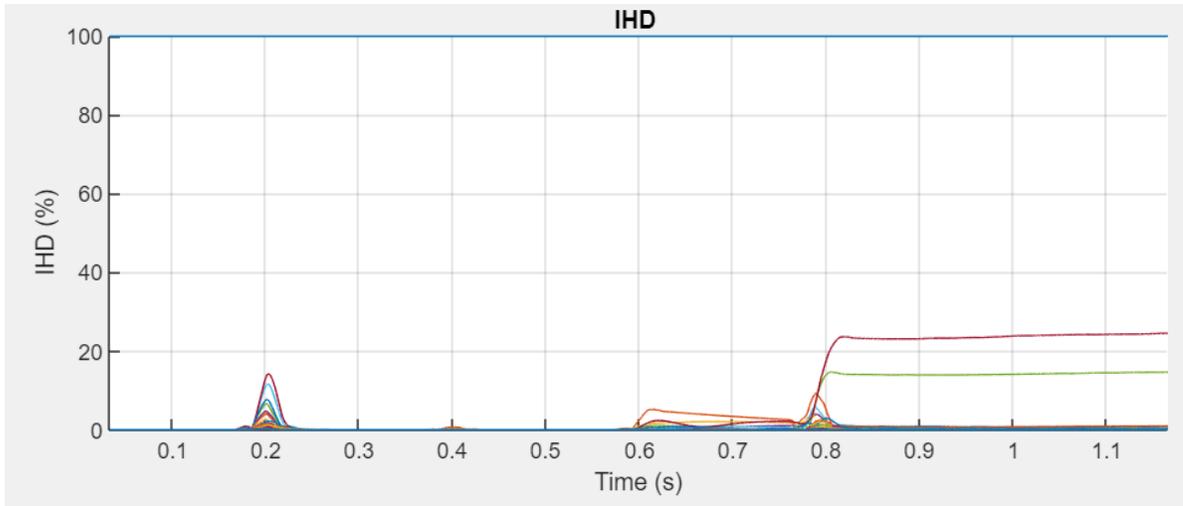


Figura A. 7. Gráfica la distorsión armónica individual durante el tiempo.

El botón “Filter bank”, muestra el banco de filtro usados en el proceso de la TDTF, con una frecuencia normalizada para que sea más fácil observar los 50 filtro base que contiene.

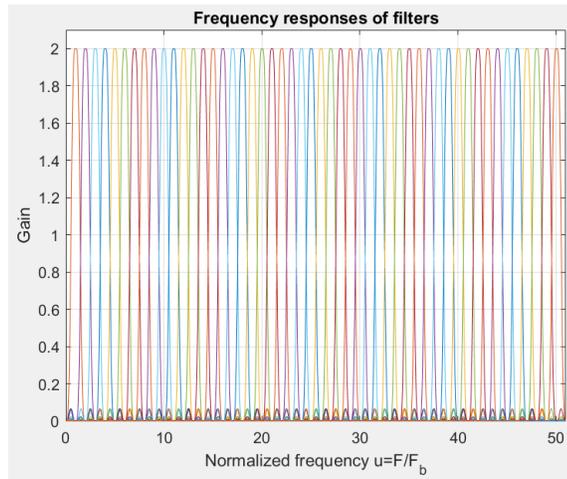


Figura A. 8. Banco de filtros digitales de Taylor-Fourier con su frecuencia normalizada.

El botón “ALL” muestra las gráficas más relevantes, mencionadas anteriormente, como se muestra en la Figura A.8, es fácil notar como las distorsiones de ondas, está acompañada de una inyección de armónica, así como el THD del sistema aumente.

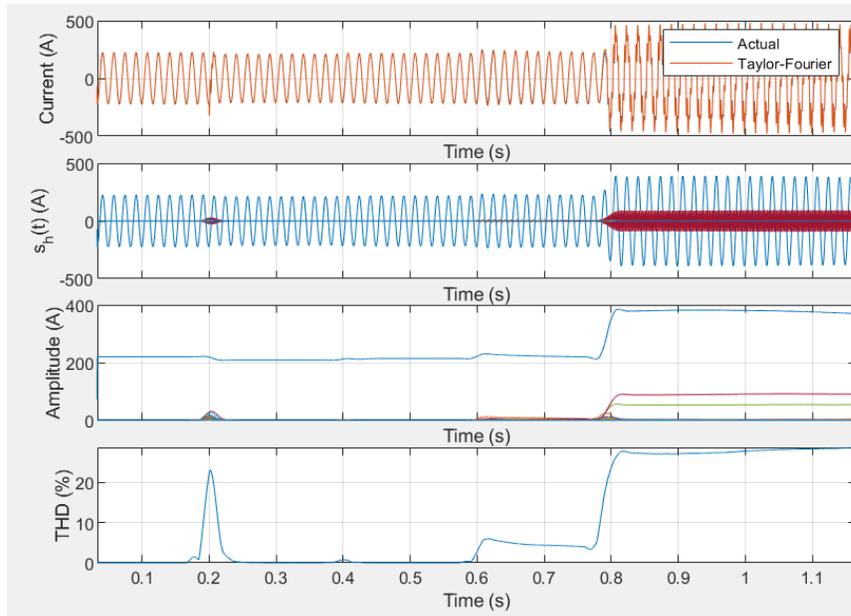


Figura A. 9. Recopilación de graficas obtenidas con el método de la transformada digital de Taylor-Fourier.

La última parte se conforma de crear un archivo “.txt” donde se guardan los archivos, solo es necesario poner el nombre con el que quieres guardar la magnitud y ángulo de los 50 armónicos y el THD del último valor obtenido por la transformada digital de Taylor-Fourier, como se muestra en la Figura A.9.

Harmonic: Bloc d... — □ ×

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

Var1	Magnitud	angle
Fundamental	369.2678	-3.118
2° Harmonic	0.9116	-0.9743
3° Harmonic	1.7987	1.4329
4° Harmonic	0.8059	-2.0434
5° Harmonic	53.9862	0.8857
6° Harmonic	1.5279	-3.1272
7° Harmonic	90.5557	2.3299
8° Harmonic	1.3124	-0.5517
9° Harmonic	3.4834	-2.4738
10° Harmonic	0.2824	-1.733
11° Harmonic	0.7716	-1.5763
12° Harmonic	0.2507	2.795
13° Harmonic	0.1008	-2.8545
14° Harmonic	0.0523	1.7715
15° Harmonic	0.1929	-1.7657
16° Harmonic	0.0198	0.9902
17° Harmonic	0.0127	0.6599
18° Harmonic	0.0133	-0.0962
19° Harmonic	0.0697	2.2284
20° Harmonic	0.0134	0.9431
21° Harmonic	0.0159	-0.2847
22° Harmonic	0.0208	1.0565
23° Harmonic	0.1394	-0.0028
24° Harmonic	0.002	-0.129
25° Harmonic	0.1337	-2.838
26° Harmonic	0.0059	-1.341
27° Harmonic	0.0554	1.1846
28° Harmonic	0.0123	0.5461
29° Harmonic	0.2261	-1.3529
30° Harmonic	0.0191	-0.3458
31° Harmonic	0.1049	0.826
32° Harmonic	0.0352	-2.843
33° Harmonic	0.0329	1.9573
34° Harmonic	0.0244	2.5088
35° Harmonic	0.2945	-1.8529
36° Harmonic	0.0342	-1.2116
37° Harmonic	0.4298	-0.1141
38° Harmonic	0.176	-1.129
39° Harmonic	0.1892	-2.9128
40° Harmonic	0.0345	-2.8214
41° Harmonic	0.3718	2.8482
42° Harmonic	0.067	-2.4652
43° Harmonic	1.2216	-2.4095
44° Harmonic	0.1173	1.7158
45° Harmonic	0.393	-1.3181
46° Harmonic	0.0781	-2.477
47° Harmonic	0.0937	-1.5843
48° Harmonic	0.0162	-0.7265
49° Harmonic	0.0206	-2.5469
50° Harmonic	0.0237	-0.213
THD(%)		
	28.58100	

Figura A. 10. Archivo obtenido en formato “.txt”.

6.2. Código principal Matlab

```
function [mag,phase,phase0,sr,t,N] = MainDTFT(data,Fb,Fs)
f = waitbar(0,'Please wait...');
pause(.5)

%% Cosntantes
Nharmonic=50;
N=floor(round(Fs/Fb)); %Numero de muestras por ciclo
Ts=1/Fs;
K=3;
C=K+1;
L=C*N;
ls = length(data);
t = 0:Ts:(ls-1)*Ts;
%% Matrix B
%% Fourier
W_N=FunctionW_N(N);
Omega_CN=FunctionOmega_CN(W_N,N);
%% Taylor
TCN=FunctionTK_CN(L);
%% Taylor-Fourier
Pa=FuntionTaylorFourierMatrix(Omega_CN,N,TCN);
Pa_new=FilterBank(Pa,Nharmonic,N);

sr = zeros(Nharmonic,size(data,1));
mag=zeros(Nharmonic,size(data,1)); %por señal
phase=zeros(Nharmonic,size(data,1));
phase0=zeros(Nharmonic,size(data,1));

pe = 1:2*C:2*Nharmonic*C;
Fh = Fb:Fb:Nharmonic*Fb;
ce = 0;
waitbar(.67,f,'Processing your data');
    for m = L/2 + 1 : length(data) - L/2
        stx = data(1 + ce : L + ce, :); % Four cycles
        [ ak, phk, phk0,sr_temp] = DTFT( L,stx, Pa_new, pe', Fs, Fh', t(m)
    );
        sr(:,m)=sr_temp;
        mag(:,m) = ak;
        phase(:,m) = phk;
        phase0(:,m) = phk0;
        ce = ce + 1;
    end

delete(f)
end
```