

UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO FACULTAD CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CARRERA INGENIERÍA ELÉCTRICA

Proyecto de Investigación previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico.

Proyecto de Investigación

Análisis de armónicos en transformadores de potencia monofásicos mediante simulación

Autor

Darío Oswaldo Morales Sánchez

Director de Proyecto de Investigación Ing. Víctor Fernando Nasimba Medina, MBA.

> Quevedo – Los Ríos - Ecuador 2017



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, **Darío Oswaldo Morales Sánchez**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Técnica Estatal de Quevedo, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

f. _____

Darío Oswaldo Morales Sánchez C.C. # 1717029407



CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

El suscrito, Ing. Víctor Fernando Nasimba Medina, MBA., Docente de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, certifica que el estudiante Darío Oswaldo Morales Sánchez, realizó el Proyecto de Investigación de grado titulado "Análisis de Armónicos en transformadores de Potencia Monofásicos Mediante Simulación", previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, bajo mi dirección, haciendo cumplido con las disposiciones reglamentarias establecidas para el efecto.

> Ing. Víctor Fernando Nasimba Medina, MBA. DIRECTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

f.



CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO

Ing. Víctor Fernando Nasimba Medina, MBA., en calidad de Director de Proyecto de Investigación titulado **"ANÁLISIS DE ARMÓNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA MONOFÁSICOS MEDIANTE SIMULACIÓN",** me permito manifestar a usted y por intermedio al Consejo Académico de Facultad lo siguiente:

Que, el estudiante DARÍO OSWALDO MORALES SÁNCHEZ, egresada de la Facultad Ciencias de la Ingeniería, ha cumplido con las correcciones pertinentes, e ingresado su Proyecto de Investigación al sistema URKUND, tengo a bien de certificar la siguiente información sobre el informe del sistema anti plagio con un porcentaje de 5%

URKUND

Documento	MORALES.docx (D30182660)
Presentado	2017-08-19 13:42 (-05:00)
Presentado por	vnasimba@uteq.edu.ec
Recibido	vnasimba.uteq@analysis.urkund.com
Mensaje	tesis MORALES 01 Mostrar el mensaje completo
	4%6 de estas 34 páginas, se componen de texto presente en 5 fuentes.

f.

Ing. Víctor Fernando Nasimba Medina, MBA.

DIRECTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO FACULTAD CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CARRERA INGENIERÍA ELÉCTRICA

PROYECTO DE INVESTIGACION

Tema

ANÁLISIS DE ARMÓNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA MONOFÁSICOS MEDIANTE SIMULACIÓN

Presentado al Consejo Académico de Facultad como requisito previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico.

Aprobado por:

Ing. MSc. Jaime Macías Romero. PRESIDENTE DE TRIBUNAL DE TESIS

Ing. MSc. Cristian Laverde Albarracín. MIEMBRO DE TRIBUNAL DE TESIS Ing. MSc. Cristian Guamán Sánchez. MIEMBRO DE TRIBUNAL DE TESIS

QUEVEDO – LOS RÍOS – ECUADOR 2017

v

Agradecimiento

Expreso mi agradecimiento a los docentes de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo UTEQ en especial al Ing. Jaime Macías por sus consejos y apoyo para culminar mi carrera, al Ing. Duber Medina Moreira, por ser el maestro no solo en el aula sino ejemplo de vida y por último, pero no menos importante al Ing. Víctor Nasimba MBA, Director de este proyecto de investigación por su respaldo, predisposición y conocimientos aportados.

Dedicatoria

A mis padres que ya no están conmigo en este mundo y a los cuales dedico de manera póstuma este logro.

A mis compañeros los famosos "tuercas" integrantes de la primera promoción de Ing. Eléctrica con los cuales aprendí trabajo en grupo y a luchar por ser profesional.

A mi esposa Mayra Ocampo Urrutia que me apoyo incondicionalmente siendo mi apoyo incondicional.

Resumen

Este proyecto se lleva a cabo en la sala del laboratorio de Electrónica básica en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, el objetivo general empleado es analizar el comportamiento del transformador de potencia monofásico, trabajando individualmente o formando bancos de transformadores con distintos tipos de conexiones, ante la presencia de armónicos generados por cargas no lineales: los métodos de investigación empleada es el método analítico, deductivo inductivo; la técnica Cuasi experimental y las fuentes de recopilación de la información; como resultado se obtuvo que el aumento de la temperatura en el punto más caliente del enrollado, sobre la temperatura ambiente, excede el límite permisible con carga nominal. El estudio realizado ha permitido disponer de una amplia bibliografía actualizada, sobre el tema de los armónicos en general y la influencia de los mismos sobre los transformadores de distribución de potencia en particular, lo cual se logró mediante una extensa búsqueda bibliográfica, estudio y revisión crítica de la misma; Se han obtenido a partir de las simulaciones realizadas, numerosos datos que ilustran el trabajo de los sistemas de distribución de energía eléctrica y de los transformadores de distribución en particular. Se empleó el lenguaje de programación MatLab y su simulador Simulink, dentro del cual se utilizó de manera intensiva el paquete de funciones especializadas en temas de sistemas de potencia eléctrica, Power System Blockset, para la programación, simulación y análisis de los diferentes casos tratados en el trabajo realizado; Fueron simuladas diferentes tipos de cargas no lineales analizándose el comportamiento armónico de las mismas y su influencia en el transformador de distribución; los resultados fueron un conjunto de problemas a modo de ejemplos, que ilustran el análisis de un circuito eléctrico ante la presencia de armónicos, entre los cuales podemos señalar: el cálculo del factor K de una carga no lineal y la desclasificación (derating) de los transformadores de distribución.

Palabras claves: Factores de riesgo, Prevención, Maquinas, Actos Inseguros.

Abstract

This project is carried out in the laboratory of Basic Electronics in the Faculty of Engineering Sciences of Quevedo State Technical University, the general objective is to analyze the behavior of the single-phase power transformer, working individually or forming banks of transformers with different types of connections, before the presence of harmonics generated by nonlinear loads: the research methods used is the analytical, deductive - inductive method; the Quasi experimental technique and sources of information collection; as a result it was obtained that the increase of the temperature in the warmer point of the winding, above the ambient temperature, exceeds the allowable limit with nominal load. The study has made it possible to have an extensive bibliography updated on the subject of harmonics in general and their influence on transformers of power distribution in particular, which was achieved through an extensive bibliographical search, study and critical review Of the same; Numerous data have been obtained from the simulations that illustrate the work of electric power distribution systems and distribution transformers in particular. The MatLab programming language and its Simulink simulator were used, in which the Power System Blockset's specialized package of functions was used in an intensive way for the programming, simulation and analysis of the different cases treated in the work done; Different types of nonlinear loads were simulated analyzing the harmonic behavior of the same and their influence on the distribution transformer; the results were a set of problems by way of examples, which illustrate the analysis of an electric circuit in the presence of harmonics, among which we can note: the calculation of the factor K of a nonlinear load and the derating of the distribution transformers.

Key words: Risk Factors, Prevention, Machines, Unsafe Acts.

Índice

	DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS	ii	
	CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DE PROYECTO DE	iii	
	INVESTIGACIÓN		
	CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE	iv	
	PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO		
	Agradecimiento	vi	
	Dedicatoria	vii	
	Resumen	viii	
	Abstract	ix	
	Índice	х	
	Índice de Tablas	xi	
	Índice de Figuras	xii	
	Índice de Anexos	xiv	
	Código Dublín	XV	
	Introducción	1	
	CAPÍTULO I. CONTEXTUALIZACIÓN DE LA		
	INVESTIGACIÓN	2	
1.1.	Problema de investigación	3	
1.1.1.	Planteamiento del problema	3	
1.1.2.	Pronóstico		
1.1.2.1.	Formulación del problema	4	
1.1.3.	Sistematización del problema	5	
1.2.	Objetivos	5	
1.2.1.	Objetivo General	5	
1.2.2.	Objetivos Específicos	6	
1.3.	Justificación	7	
	CAPÍTULO II FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA		
	INVESTIGACIÓN	8	
2.1.	Marco conceptual	9	
2.1.1.	Fuentes generadoras de armónicos	9	
2.1.2.	Efectos de los armónicos. Transformadores. Capacitores. Neutros.	12	
	Líneas y cables. Resonancias		
2.1.3.	Disparo de interruptores y fusibles	14	
2.1.4.	Sobrecarga de transformadores	15	
2.1.5.	Sobrecarga de capacitores	16	
2.1.6.	Pérdidas en equipos de distribución	22	
2.1.7.	Excesiva corriente de Neutro	23	
2.1.8.	Mal funcionamiento de controles electrónicos y computadoras	23	
2.1.9.	Resonancia	24	
2.3.	Marco referencial	30	

2.4.	Marco legal	31
2.4.1.	Normas para el control de armónicos	31
	CAPÍTULO III. MÉTODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	32
3.1.	Localización	33
3.2.	Tipo de investigación	33
3.3.	Métodos de investigación	34
3.3.1.	Método Analítico	34
3.3.2.	Método deductivo – inductivo	34
3.3.2.1.	Técnica Cuasi – experimental	34
3.3.2.2.	Fuentes de recopilación de información	35
3.4.	Tratamiento de los datos	35
3.5.	Recursos humanos y materiales	36
	CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
4.1.	Resultados	38
	Resultados obtenidos en las simulaciones. Análisis de los mismos	38
4.2.	Discusión de los Resultados	76
4.2.1.	Determinación de la capacidad del transformador cuando suministra	76
	corrientes de carga no sinusoidales	
	CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
5.1.	Conclusiones	84
5.2.	Recomendaciones	85
	CAPITULO VI. BIBLIOGRAFÍA	86
	Bibliografía	87
	CAPITULO VII. ANEXOS	89

Índice de Tablas

Tablas		Pág.
1.	Porcentaje de armónicos de corriente respecto a la fundamental	
	(In)	11
2.	Características técnicas de los transformadores monofásicos	
	LATINO	38
3	Perdidas vs Cargas	82

Índice de Figuras

Figuras		Pág.		
1	Transformador de 10 kVA con carga no lineal			
2	Corriente en el secundario del transformador de 10 kVA			
3	Voltaje en el secundario de transformador de 10 kVA			
4	Transformador de 100 kVA con carga no lineal	41		
5	Corriente en el secundario de transformador de 100 kVA	41		
6	Figura 6. Voltaje en el secundario de transformador de 100 kVA	42		
7	THDV con carga no lineal pequeña			
0	Voltaje en el secundario de transformador de 10 kVA con carga no			
8	lineal pequeña	44		
9	THDV con carga no lineal grande	45		
10	Voltaje en el secundario del transformador de 10 kVA con carga no			
10	lineal grande	45		
11	Transformador monofásico con cargas balanceadas no lineales	49		
10	Corriente por los conductores exteriores conectados a cargas			
12	balanceadas no lineales	49		
13	Corriente por el neutro conectado a cargas balanceadas no lineales	50		
14	Transformador monofásico con cargas desbalanceadas	51		
15	Corriente por el conductor exterior conectado a la carga no lineal	51		
16	Corriente por el conductor exterior conectado a la carga lineal	52		
17	Corriente por el neutro conectado a cargas desbalanceadas	53		
10	Transformador estrella – estrella con neutro ideal. Cargas no lineales			
10	balanceadas	54		
19	Corriente por la fase A	55		
20	Corriente por el neutro	56		
21	Transformador estrella – estrella. Neutro con impedancia. Cargas no			
21	lineales balanceadas	57		
22	Transformador delta – estrella. Cargas no lineales balanceadas	58		
23	Corriente por la fase A	59		
24	Corriente por el neutro	60		
25	Corriente por el primario en delta (fase AB)	61		
26	Corriente por las líneas de alimentación del transformador	62		

27	Transformador delta – delta con cargas no lineales balanceadas		
28	Corriente por la fase de la carga (Iab)		
29	Corriente por las líneas secundarias (Ia)	64	
30	Corriente en el secundario del transformador conectado en delta	65	
31	Corriente por las líneas primarias (IA)		
32	Transformador estrella – delta. Cargas no lineales balanceadas	67	
22	Corriente en el secundario del transformador conectado en delta		
22	(IAB)	68	
34	Convertidor de 6 pulsos sin reactores	69	
25	Corriente de línea a la entrada del convertidor de 6 pulsos sin		
55	reactores	69	
36	Convertidor de 6 pulsos con reactores de línea	71	
37	Corriente de línea a la entrada del convertidor de 6 pulsos con		
	reactores	72	
38	Accionamiento de 12 pulsos	73	
39	Corriente de línea a la entrada del accionamiento de 12 pulsos	74	

Índice de Anexos

Anexo		Pág.
1	Introducción a Matlab y Simulink	91
2	Componentes de Matlab	92
3	Simulink	93
4	El entorno de trabajo de Matlab	93
5	Organización de ventanas	94
6	Operaciones básicas en líneas de comandos	94
7	Sintaxis de vectores y matrices	95
8	Operaciones básicas en Matlab	96
9	Funciones en Matlab	97
10	Operaciones lógicas	98
11	Operaciones de rango	98
12	Almacenamiento en archivos	99
13	Graficas en Matlab	99
14	Control System Toolbox	100
15	Operaciones con polinomios	101
16	Herramientas numéricas y graficas	101
17	El entorno de trabajo de Simulink	102
18	Uso de Simulink	102
19	El espacio de trabajo de Simulink	103
20	Fuentes y sumideros de señal	104

Código Dublín

Titulo:	Análisis de Armón	nicos en Tra	insformadores	de Potencia
	Monofásicos mediante Simulación			
Autor:	Darío Oswaldo Morales Sánchez			
Palabras claves:	Factores de riesgo F	Prevención	Maquinas	Actos inseguros
Fecha de publicación:	08-Sept- 2017			
Editorial:	Quevedo UTEQ 2017			
Resumen	Este proyecto se lle Electrónica básica en Universidad Técnica empleado es analizar potencia monofásico bancos de transformad presencia de armónio métodos de investig deductivo – inductivo; recopilación de la inf aumento de la temper sobre la temperatura ar nominal. Abstract: This project Electronics in the Facu Technical University, behavior of the s individually or formin connections, before nonlinear loads: the deductive - inductive r sources of information The temperature incre the ambient temperature load.	eva a cabo en la Facultad de Q Estatal de Q r el comportan , trabajando in dores con distinta cos generados gación emplead ; la técnica Cuas formación; coma ratura en el pun mbiente, excede ect is carried ou ulty of Engineer , the general single-phase po- g banks of trans the presence research meth method; the Qua an collection; as ease at the hottes ure, exceeds the	la sala del l Ciencias de la la uevedo, el ob- niento del trar ndividualmente os tipos de cone por cargas no la es el méto i experimental y o resultado se o to más caliente el límite permis at in the labora ing Sciences of objective is to ower transforr formers with dif of harmonics nods used is t asi experimental a result it was st point of the v allowable limit	laboratorio de ngeniería de la jetivo general nsformador de o formando exiones, ante la o lineales: los odo analítico, / las fuentes de obtuvo que El del enrollado, sible con carga atory of Basic Quevedo State o analyze the ner, working fferent types of generated by the analytical, technique and s obtained that vinding, above t with nominal
Descrinción	106 hojas: dimensiones 29 x 21 cm \pm CD $=$ ROM 6162			
URI	100 nojas. unnensione	.5, 27 A 21 CIII +	CD = KOM 010	

Introducción

Varios eventos durante el transcurso del siglo XX influyeron para que las cargas eléctricas y los servicios de los sistemas de distribución cambiaran radicalmente. El primero lo constituyó el desarrollo de la electrónica de potencia, cuya consecuencia inmediata fue la proliferación de las cargas no lineales, un segundo evento lo constituyó el problema de los energéticos ocurridos en los años setenta, debido a lo cual, la aplicación de la electrónica se generalizó, con el fin de producir equipos más eficientes, con menor consumo de energía y una tercera influencia mundial ocurrió a fines de los ochenta, donde se buscaba mejorar la productividad con equipos más eficaces y eficientes, conjugando la reducción de costos y a su vez ofreciendo servicios de calidad.

A inicios del siglo XX, las cargas eléctricas consideradas típicas, eran cargas lineales de tipo resistivo, inductivo o capacitivo, mientras que, a inicios del siglo XXI, las nuevas cargas eléctricas están constituidas en un alto porcentaje por cargas no lineales. Si se revisa la tendencia actual del desarrollo tecnológico, se encontrará que prácticamente todo equipo, tiene entre sus componentes internas algún dispositivo de control electrónico. La mayoría de estos equipos poseen fuentes de alimentación de modo conmutado. Se han producido cambios en la red de distribución eléctrica en el nuevo entorno, caracterizado por la presencia de cargas no lineales y como consecuencia inmediata de las mismas, la solución de la red con armónicos de corriente y voltaje.

CAPÍTULO I CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Problema de investigación

1.1.1. Planteamiento del problema

La presencia de las señales armónicas, ocasiona que se produzcan: interferencia en las señales de video y telefonía, sobre voltaje en los sistemas de potencia, incremento de la temperatura del dieléctrico de los bancos de capacitores, con la consecuente disminución de su vida útil, daño total o parcial de los bancos de capacitores, distorsión de la forma de onda (calidad de la energía), quema de fusibles y deterioro de diferentes equipos del sistema eléctrico, falsos accionamientos de relés y/o protecciones, influencia en la exactitud de la medición de energía activa, reactiva y factor de potencia, inestabilidad en los sistemas de potencia, incremento de las pérdidas técnicas, excesivo calentamiento en los transformadores y máquinas eléctricas, entre otros.

El estudio de los armónicos en los sistemas eléctricos es imprescindible en la actualidad, debido a tres razones fundamentales:

- 1. La proliferación de cargas no lineales.
- 2. El aumento de las resonancias en la red.
- 3. Las cargas del sistema de potencia son cada vez más sensibles a los armónicos.

Existen una variedad de técnicas, que pueden ser utilizadas para mitigar la presencia de las señales armónicas en las redes de las empresas eléctricas distribuidoras y en las redes internas del consumidor. Entre las más utilizadas se encuentran:

- Introducción de reactores en las líneas.
- Instalación de filtros pasivos sintonizados.
- Multiplicación de fases, de n-pulsos.
- Instalación de filtros activos de compensación.

1.1.2. Pronóstico

Las interferencias en las señales y demás problemas causados por la presencia de señales armónicas poco a poco han sido estudiadas y han ido disminuyendo.

Debemos señalar que el estudio de los armónicos es una real necesidad para todos los especialistas en la actualidad, pues cada vez mayor número de países han adoptado normas sobre el control de los armónicos, dirigidas en lo fundamental a:

- Limitar la cantidad de corriente armónica que un consumidor puede inyectar en la red de distribución eléctrica.
- Limitar el nivel de voltaje armónico que una empresa de distribución de electricidad puede suministrar al consumidor.

Se pronostica implementar normas más difundidas a escala mundial y regional como:

- Norma IEEE 519 1992. Recomendaciones prácticas y requerimientos para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia, aprobada por el IEEE en los Estados Unidos de América.
- Estándar europeo EN 61000 3 2, aprobado por el CENELEC (Comité Europeo para la Estandarización en Electrotecnia).
- Normativa IEC 1000 3 2, aprobada por la Comisión Internacional de Electrotecnia (IEC).

1.1.2.1. Formulación del problema

Desde hace ya varios años ha cobrado importancia el término de calidad de energía y esto se debe a que la causa de muchas de las fallas que anteriormente se catalogaban como inciertas, es precisamente la calidad de las variables eléctricas que alimentan a las cargas de una instalación.

La mala calidad de estas variables origina efectos nocivos en las cargas, sobre todo en las más sensibles, y en una instalación eléctrica se manifiesta de muchas maneras; algunas de ellas son:

- Desbalance de voltaje entre fases
- Variaciones súbitas de voltaje
- Flujo de armónicos en el sistema (una de las más comunes)
- Ruido en las señales de voltaje y corriente
- Variaciones lentas de voltaje (efecto Flicker)

Equipos tales como computadoras, equipos de fax, alumbrado electrónico, equipos de soldadura, hornos de inducción y de arco, transformadores de potencia saturados, cargadores de baterías, fuentes de potencia ininterrumpida (UPS), convertidores de potencia (CA a CD), accionamientos de motores eléctricos, son generadores de corrientes armónicas, que, en combinación con las impedancias de la fuente, producen distorsión de los voltajes de la línea

1.1.3. Sistematización del problema

- ¿Con la simulación y el estudio de diferentes armónicos se podrá determinar el trabajo de los transformadores?
- ¿Apoyado con la simulación se podrá determinar los diferentes tipos de cargas no lineales y análisis del comportamiento armónico?
- ¿La simulación permite determinar técnicas de mitigación de armónicos y análisis de los resultados obtenidos?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Analizar el comportamiento del transformador de potencia monofásico, trabajando individualmente o formando bancos de transformadores con distintos tipos de conexiones, ante la presencia de armónicos generados por cargas no lineales.

1.2.2. Objetivos Específicos

- 1. Simular el trabajo de los transformadores alimentando cargas no lineales (bajo la influencia de los armónicos).
- Simular los diferentes tipos de cargas no lineales y análisis del comportamiento armónico de las mismas.
- Simular las diferentes técnicas de mitigación de armónicos y análisis de los resultados obtenidos.

1.3. Justificación

La presencia de las señales armónicas, ocasiona que se produzcan: interferencia en las señales de video y telefonía, sobre voltaje en los sistemas de potencia, incremento de la temperatura del dieléctrico de los bancos de capacitores, con la consecuente disminución de su vida útil, daño total o parcial de los bancos de capacitores, distorsión de la forma de onda (calidad de la energía), quema de fusibles y deterioro de diferentes equipos del sistema eléctrico, falsos accionamientos de relés y/o protecciones, influencia en la exactitud de la medición de energía activa, reactiva y factor de potencia, inestabilidad en los sistemas de potencia, incremento de las pérdidas técnicas, excesivo calentamiento en los transformadores y máquinas eléctricas, entre otros.

El estudio de los armónicos en los sistemas eléctricos es imprescindible en la actualidad, debido a tres razones fundamentales:

- 4. La proliferación de cargas no lineales.
- 5. El aumento de las resonancias en la red.
- 6. Las cargas del sistema de potencia son cada vez más sensibles a los armónicos.

Existen una variedad de técnicas, que pueden ser utilizadas para mitigar la presencia de las señales armónicas en las redes de las empresas eléctricas distribuidoras y en las redes internas del consumidor. Entre las más utilizadas se encuentran:

- Introducción de reactores en las líneas.
- Instalación de filtros pasivos sintonizados.
- Multiplicación de fases, de n-pulsos.
- Instalación de filtros activos de compensación.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Marco conceptual

2.1.1. Fuentes generadoras de armónicos

Cualquier equipo que altere la forma de la onda sinusoidal o que sólo use una parte de la misma, causa distorsiones de la forma de onda y en consecuencia genera armónicos [8].

Los equipos no lineales que producen armónicos se pueden clasificar bajo las siguientes tres grandes categorías:

• Electrónica de potencia:

Las aplicaciones de la electrónica de potencia en los rectificadores, variadores de velocidad, sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS) e inversores están creciendo continuamente. La fuente más grande de armónicos son los convertidores. Los convertidores oscilan desde enormes subestaciones inversoras de 1000 MW para líneas de alto voltaje de CD (HVDC), hasta rectificadores de 75 W encontrados en un televisor [9]. Los problemas con los armónicos son ahora comunes, tanto en las instalaciones industriales como también en los edificios de oficinas.

Esto se debe principalmente a las nuevas tecnologías de conversión de potencia, tal como la fuente de potencia de modo conmutado (SMPS), la cual puede ser encontrada prácticamente en cualquier equipo electrónico tal como computadoras, impresoras, monitores, fotocopiadoras, etc [9].

La fuente de potencia de modo conmutado (SMPS) es una fuente de potencia excelente, pero también es una carga altamente no lineal. La fuente toma corriente en forma de pulsos no sinusoidales en los picos de la onda de voltaje. Esta forma de onda no sinusoidal es muy rica en armónicos de corriente Dos veces por ciclo, cada SMPS toma un pulso de corriente para recargar el capacitor al valor pico de la onda de voltaje. Entre los picos de voltaje el capacitor se descarga para alimentar la carga y la SMPS no toma corriente del sistema. El pico del voltaje de alimentación es aplanado, a causa de la caída instantánea de voltaje a través del sistema de distribución, como consecuencia de los pulsos simultáneos de

corriente tomados por las múltiples fuentes de potencia de modo conmutado (SMPS). La onda sinusoidal de voltaje esperada, con un valor pico de $120\sqrt{2} = 169,7V$ comienza a parecerse a una onda cuadrada. La forma de onda de voltaje aplanada contiene una componente fundamental menor y componentes armónicos de voltaje de orden tercero, quinto, séptimo, noveno y superiores [9].

Además de ser una importante fuente de armónicos en el sistema, este equipamiento también puede ser muy sensible a la distorsión armónica de la forma de onda de voltaje. Para lograr una operación segura del equipo conectado a la SMPS, debe garantizarse tanto el valor rms como el valor pico establecido del voltaje de alimentación, lo cual puede alcanzarse mediante equipos para mitigar los armónicos, que minimicen la distorsión del voltaje a través del sistema [9].

Diferentes cargas no lineales generan armónicos diferentes. La mayoría de las cargas no lineales en nuestros días son rectificadores con capacitores para suavizar el voltaje de CD a la salida del mismo. Estos rectificadores pueden ser:

- a) Monofásicos, línea a neutro.
- b) Monofásicos, línea a línea.
- c) Trifásicos.

Cargas rectificadoras monofásicas de línea a neutro, como las fuentes de potencia de modo conmutado, empleadas en computadoras personales, generan armónicos de corriente de orden 3, 5, 7, 9 y mayores. El tercer armónico será el más predominante y el más problemático [9].

A los armónicos impares múltiplos de tres se les denomina frecuentemente "triplen" y debido a que ellos se suman aritméticamente en el neutro son también considerados corrientes de secuencia cero. Cargas no lineales de línea a neutro pueden ser encontradas en centros de computación, escuelas, instituciones financieras, etc.

Cargas rectificadoras monofásicas de línea a línea pueden producir también armónicos de corriente de orden 3, 5, 7, 9 y mayores, pero si ellas están razonablemente balanceadas

entre las tres fases, la amplitud del tercer y noveno armónicos será pequeña. Los mayores armónicos de voltaje y corriente serán el 5^{to} seguido por el 7^{mo}. Las cargas rectificadoras típicas de este grupo son las fuentes de potencia de modo conmutado empleadas en computadoras y periféricos [9].

Las cargas rectificadoras trifásicas son inherentemente balanceadas y producen armónicos de corriente de 3_{er} y 9_{no} orden muy pequeñas, a menos que los voltajes de alimentación estén desbalanceados. Los principales armónicos producidos serán el 5_{to} y el 7_{mo} con el 11_{no} y 13_{ro} también presentes. Ellas no pueden producir corriente por el neutro a causa de que no están conectadas al conductor neutro. Los rectificadores de los accionamientos de velocidad variable y las fuentes de potencia ininterrumpida (UPS), son ejemplos típicos de cargas rectificadoras trifásicas [9].

Los rectificadores son los generadores de armónicos más comunes que se encuentran en la industria. Como un primer valor de cálculo, se puede considerar que los rectificadores presentan una distribución de los armónicos de corriente tal como se muestra en la tabla 1.1.

Número de pulsos		
6 Pulsos	12 Pulsos	
20		
14,3		
9,1	9,1	
7,7	7,7	
5,9		
5,3		
4,3	4,3	
4,0	4,0	
	Número 6 Pulsos 20 14,3 9,1 7,7 5,9 5,3 4,3 4,0	

Tabla 1. Porcentaje de armónicos de corriente respecto a la fundamental (In / I1)

Fuente: Darío M. 2017

También se pueden hallar mediante las siguientes ecuaciones:

$$I_n = \frac{I_1}{n} \tag{1.1}$$
$$n = kq \pm 1$$

n = orden del armónico k = 1,2,3,4, ... q = número de pulsos del rectificador I₁ = corriente a la frecuencia fundamental

• Equipos ferromagnéticos:

Los transformadores son los elementos más importantes en esta categoría. Los transformadores generan armónicos como resultado de características de magnetización no lineales. El nivel de armónicos aumenta sustancialmente cuando el voltaje aplicado aumenta por encima de los valores nominales del transformador [10].

• Equipos de arco eléctrico:

Los aparatos de arco generan armónicos debido a las características no lineales del arco en sí mismo [10]. Sin embargo, la iluminación fluorescente tiene básicamente las mismas características y es mucho más predominante en la carga del sistema de energía.

2.1.2. Efectos de los armónicos. Transformadores. Capacitores. Neutros. Líneas y cables. Resonancias

Los principales inconvenientes causados por los armónicos se pueden resumir en [11]:

- Efectos cuasi-instantáneos:
 - Fallo de interruptores automáticos por efecto di/dt.
 - Operación incorrecta de contactores y relés.
 - Interferencia con sistemas de comunicación (telemandos y sistemas telefónicos).
 - Reseteo de computadoras y errores en controladores lógicos programables (PLCs). [11].

• Efectos medios o cuadráticos:

- Calentamiento y hasta destrucción de capacitores por sobre voltaje. La impedancia de los mismos decrece proporcionalmente con el orden de los armónicos presentes.
- Sobrecalentamiento y averías en transformadores. Los componentes armónicos de frecuencias altas dan lugar a mayores pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas en los circuitos magnéticos y en los enrollados.
- Calentamiento de motores de inducción. Se originan campos giratorios de secuencia inversa (por ejemplo, el 5to armónico).
- Pérdidas en el cobre de los conductores por efecto pelicular (skin).
- Pérdidas dieléctricas en capacitores.
- Intensidad elevada en el conductor neutro, incluso en redes equilibradas, producido por los armónicos impares múltiplos de tres (3, 6, 9, 12,...). [11].

• Efectos de resonancia:

- La impedancia de inductores y capacitores depende de la frecuencia. La conexión en serie o en paralelo de inductores y capacitores da lugar a situaciones singulares, denominadas de resonancia [12], en las cuales la impedancia se hace mínima o máxima.
- Resonancia serie.
- Resonancia paralela.

• Errores en equipos de medición:

- Errores de medición de energía activa, reactiva y factor de potencia.
- Lecturas erróneas con multímetros basados en el valor medio o con poco ancho de banda.

La magnitud de las afectaciones económicas originadas por la operación de sistemas y equipos eléctricos con voltajes y corrientes distorsionadas puede percibirse considerando lo siguiente [12]:

- Una elevación de sólo 10° C de la temperatura máxima del aislamiento de un conductor reduce a la mitad su vida útil.
- Un aumento del 10% sobre el voltaje máximo del dieléctrico de un capacitor reduce a la mitad su vida útil.

La distorsión armónica se puede dividir en dos aspectos:

- 1. la distorsión de voltaje
- 2. la distorsión de corriente

Los sistemas electrónicos de control, los capacitores y los motores pueden ser perjudicialmente afectados por niveles significativos de distorsión de voltaje. Los controles eléctricos son potencialmente las partes más sensibles, ya que muchos controles se basan en una forma de onda sinusoidal limpia para sincronización o propósitos de control. Los bancos de capacitores son afectados por los picos de la forma de onda. El aislamiento puede ser degradado si la distorsión armónica es excesiva. Los motores y transformadores sufren mayor calentamiento en presencia de armónicos. Los armónicos de corriente son una preocupación por la interferencia que causan en las líneas de comunicaciones. También causan un aumento de las pérdidas en líneas y transformadores y pueden causar respuestas incorrectas de relés. [12].

Los efectos de interferencia de los armónicos en los sistemas de energía y en las cargas conectadas, son generalmente apreciados por los usuarios solo después de la ocurrencia de una salida de servicio y un costoso trabajo de reparación. En general se observan los siguientes efectos debido a la presencia de armónicos en los sistemas de energía [12]:

2.1.3. Disparo de interruptores y fusibles

Debido a efectos de resonancia, los niveles de corriente pueden incrementarse considerablemente provocando el disparo de interruptores y quemando fusibles.

Los interruptores magneto térmicos ordinarios tienen un mecanismo de disparo que reacciona al calentamiento producido por la corriente del circuito. Dicho mecanismo está diseñado para responder al valor eficaz de la onda de corriente de manera que se dispare si se calienta demasiado. Este tipo de interruptor ofrece una mayor protección frente a sobrecargas por corrientes armónicas. [11].

Los interruptores automáticos electrónicos detectores de "picos" reaccionan frente a estas elevaciones de corriente. Como el valor de pico de la corriente armónica suele ser superior al normal, este tipo de interruptor automático puede dispararse prematuramente con valores de corriente bajos. Por otro lado, si el nivel de pico es inferior al normal puede que el automático no reaccione cuando deba hacerlo.

2.1.4. Sobrecarga de transformadores

El efecto de los armónicos en los transformadores es doblemente perjudicial. Los armónicos de corriente causan un incremento en las pérdidas de cobre y en las pérdidas en el núcleo. Los armónicos incrementan el calentamiento, el esfuerzo sobre el aislamiento, pueden ocurrir posibles resonancias a la frecuencia del armónico entre los enrollados del transformador y la capacitancia de la línea y es posible que se produzcan pequeñas vibraciones del núcleo [11].

Las principales componentes de pérdida son: las pérdidas I^2R en los enrollados, las pérdidas por corrientes parásitas y las pérdidas por el flujo de dispersión. Las pérdidas debido a la componente I^2R se deben al calentamiento del conductor y al efecto pelicular. Las pérdidas por corrientes parásitas en el conductor se incrementan con el cuadrado de la corriente y con el cuadrado de la frecuencia. Otras pérdidas por el flujo de dispersión se incrementan con la potencia 0,8 de la frecuencia.

El calentamiento adicional causado por los armónicos requiere desvalorizar la capacidad del transformador de forma que su temperatura permanezca dentro de los límites establecidos por el fabricante o usar un transformador de construcción especial diseñado para corrientes de carga no sinusoidales. La vida del transformador se reducirá si el mismo

es operado por encima de la temperatura establecida. Los transformadores son diseñados para entregar energía a la frecuencia de la red, 50 Hz (60Hz). Las pérdidas en el hierro están compuestas por las pérdidas de la corriente circulante (que aumentan con el cuadrado de la frecuencia) y las pérdidas de histéresis (que aumentan linealmente con la frecuencia). Con frecuencias mayores las pérdidas aumentan, causando un calentamiento adicional al transformador [11].

En sistemas trifásicos, los transformadores conectados en configuración delta – estrella, ayudan a reducir los efectos de los armónicos. Los armónicos impares múltiplos de tres (3, 9, 15...) circulan a través del sistema de distribución hasta que alcanzan un transformador delta - estrella, son atrapados y circulan en el primario en delta del transformador. Los armónicos circulando en el lado primario del transformador producen calentamiento a causa de sus frecuencias elevadas [11].

Sobredimensionar el transformador para compensar lo anterior es mucho peor, pues conductores más gruesos acentúan los efectos de calentamiento, permitiendo que armónicos de corrientes mayores circulen en el sistema [11].

Por esta razón se requiere desclasificar (derating) el transformador existente o emplear un transformador que pueda soportar este calentamiento. Este transformador especial se denomina, transformador de rango K. El rango K está asociado con el valor denominado "Factor K", que los laboratorios UL (Underwriter's Laboratory) en los EEUU, desarrollaron para determinar el contenido de armónicos de corriente que un transformador puede soportar sin sufrir daños. [13].

Los transformadores de rango K, poseen conductores más gruesos en el primario para soportar los armónicos de corriente impares múltiplos de tres, su núcleo magnético posee una menor densidad de flujo pues son construido con aceros de alto grado, los conductores en el secundario son más finos y se conectan en paralelo para disminuir el efecto pelicular. Los transformadores se construyen con factores K típicos de 1, 4, 7, 13, 20, 30, 40. Estos transformadores son más caros que los transformadores convencionales [13].

2.1.5. Sobrecarga de capacitores

La decisión de instalar capacitores obedece fundamentalmente a criterios económicos, debido a que su empleo tiene como resultado tangible, la reducción de los costos por energía eléctrica. Empero, cuando se contempla su instalación, no hay que olvidar que también satisfacen condiciones técnicas como es el alivio de los cables que conducen la energía eléctrica, así como de los transformadores involucrados en el sistema eléctrico de la misma.

Las empresas generadoras y distribuidoras de energía eléctrica, penalizan económicamente a los usuarios de energía eléctrica que tienen un sistema eléctrico ineficiente, lo que se manifiesta, en un elevado consumo de energía reactiva. El término "penalización" se debe a que el consumo desmedido de la energía reactiva perjudica a los sistemas de distribución, ya que obliga a los distribuidores a incrementar las dimensiones de los transformadores y cables por donde se transmite la energía eléctrica. [2].

El factor de potencia es una medida de la efectividad con que una carga dada consume energía eléctrica para producir trabajo. Mientras mayor es el factor de potencia, mayor es el trabajo producido para un voltaje y una corriente dada. Para cargas lineales, la potencia aparente en kVA (S = V*I), es el vector suma de la potencia activa en kW (P) y la potencia reactiva en kVAR (Q). El factor de potencia es $fp = \frac{P}{s} = \cos(\varphi)$, donde f es el ángulo entre S y P. Este ángulo, es el mismo, que el ángulo de desplazamiento que existe entre el voltaje y la corriente en cargas lineales. Para un valor dado de corriente, el incremento del ángulo de desplazamiento incrementará Q, disminuirá P y disminuirá el factor de potencia (fp).

Para circuitos con cargas estrictamente lineales (una situación rara), un simple banco de capacitores puede añadirse al sistema para mejorar el factor de potencia en atraso debido a motores de inducción u otras cargas inductivas.

Lo antes expuesto se resume en las siguientes expresiones:

Con cargas lineales:

(1.2) 17

$$fp = \frac{P}{S} = \frac{kW}{kVA} = \cos\varphi$$
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$
$$KVA = \sqrt{kW^2 + kVAR^2}$$

Las cargas no lineales, toman armónicos de corriente los cuales no producen trabajo útil y por consiguiente son reactivas por naturaleza. La relación de los vectores de potencia se convierte en tridimensional con una potencia reactiva de distorsión (D), la cual se combina con P y Q para producir la potencia aparente que el sistema debe entregar. El factor de potencia (fp) sigue siendo la relación entre kW y kVA, pero los kVA tienen ahora una componente armónica también. El factor de potencia verdadero es ahora la combinación del factor de potencia de desplazamiento y el factor de potencia de distorsión. [1].

Lo antes expuesto se resume en las siguientes expresiones:

Con cargas no lineales:

$$fp = \frac{P}{S} = \frac{kW}{kVA} \neq \cos\varphi$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$

$$KVA = \sqrt{kW^2 + kVAR^2 + kVAR_D^2}$$
(1.4)

La mayoría de las cargas no lineales típicas, poseen un factor de desplazamiento cercano a la unidad. El factor de potencia verdadero, no obstante, es muy bajo debido a la componente de distorsión. Por ejemplo, el factor de potencia de desplazamiento de una computadora personal es aproximadamente la unidad, pero su factor de potencia total está en el rango de 0,65 a 0,7. La mejor forma de mejorar el factor de potencia bajo, causado por cargas no lineales, es eliminar los componentes armónicos de la corriente [1].

¿Pudieran fabricarse equipos que prácticamente no generasen armónicos? Técnicamente es posible, pero disminuir los niveles de distorsión en la entrada de fuentes de potencia de modo conmutado (SMPS) en una computadora, por ejemplo, elevaría el costo de la misma.

Esto es un paso que el fabricante de computadoras no está dispuesto a realizar, debido a la competencia continua e intensa, por reducir los costos en la industria de computadoras [1].

Realmente es menos costoso, en general, utilizar un transformador para mitigar armónicos, el cual alimente a cientos de computadoras, que tratar de mejorar la operación de la SMPS en cada computadora. Esto es especialmente cierto cuando consideramos que el costo que se añadiría por mejorar la SMPS de cada computadora reaparecería cada tres años aproximadamente, cuando se saque al mercado una nueva línea de computadoras [1].

En particular, al incorporar un banco de capacitores de compensación de potencia reactiva en una instalación con equipos productores de armónicos, debemos tener en cuenta que aunque los capacitores son cargas lineales, y por lo tanto no crean armónicos por sí mismos, pueden contribuir a producir una amplificación importante de los armónicos existentes [1].

Los capacitores son empleados en los siguientes métodos de compensación:

- Compensación en el lado de alto voltaje (fija o automática).
- Compensación en el lado de bajo voltaje (fija o automática).
- Compensación directa de los motores.
- Compensación directa de los transformadores.

La mayor parte de las fallas en los capacitores son atribuibles a las siguientes causas principales:

- Armónicos.
- Sobre voltaje.
- Transientes.

Armónicos:

Los armónicos generados desde el lado de la carga debido a los equipos de electrónica de potencia, conllevan a la mayoría de los fallos de los capacitores. Básicamente los
capacitores ofrecen una impedancia mucho menor que la ofrecida a la frecuencia fundamental, bajo condiciones de armónicos. Esto lleva a una condición sostenida de alta corriente a través del capacitor, disminuyendo la vida útil o provocando la rotura de los mismos. Por consiguiente, los capacitores deben estar protegidos contra la influencia de los armónicos. [14].

Sobre voltaje:

El sobre voltaje sostenido causa que los capacitores se dañen. Esto debe ser considerado durante el proceso de diseño del sistema [14].

Transientes:

Los procesos transitorios se producen durante la conexión o desconexión (sistemas automáticos para corrección del factor de potencia) de los capacitores. Durante la operación de conexión de múltiples capacitores en paralelo, la corriente transitoria puede alcanzar valores muy superiores al valor nominal de la corriente a través de los mismos. Mientras que, para un capacitor individual, sin conexión adicional con otros capacitores en paralelo, la corriente puede alcanzar también valores elevados, aunque un poco menores que en el caso anterior. Durante la operación de desconexión de los capacitores, se producen sobre voltajes transitorios elevados en los terminales del capacitor independientemente que esté conectado o no en paralelo con otros capacitores [14].

El efecto combinado de sobre corrientes y sobre voltajes causa que el capacitor se deteriore rápidamente.

Para disminuir los efectos de los armónicos en los capacitores [15], se recurre a:

• Instalación de capacitores con aislamiento reforzado.

Estos capacitores se emplean cuando el nivel de armónicos presente, aun siendo reducido, es suficiente para provocar sobre voltajes y sobre corrientes en los capacitores, que superen lo indicado en las normas. Estos capacitores están fabricados con dieléctrico reforzado, especialmente seleccionado para trabajar en condiciones adversas, presentan gran resistencia a las sobrecargas permanentes. Sus principales características son: voltaje de trabajo máximo igual a 2 veces el voltaje de trabajo nominal, corriente de trabajo máxima igual a 2,2 veces la corriente de trabajo nominal [15].

• Filtros de protección de capacitores.

Los filtros de protección de capacitores se emplean cuando el objetivo final es la compensación de energía reactiva a la frecuencia fundamental, en redes con un alto contenido en armónicos. Su misión consiste en evitar que los armónicos de corriente sobrecarguen el capacitor desviándolos hacia la red. Los filtros de protección de capacitores se construyen conectando una reactancia en serie con los capacitores, de forma que la frecuencia de resonancia del conjunto se sitúe en un valor entre la fundamental y la del armónico inferior, que es generalmente el de 5t^o orden. De esta manera el conjunto presenta una elevada impedancia inductiva para todos los armónicos. La conexión provoca que el capacitor trabaje a un voltaje superior al de la red. Por este motivo los capacitores que se instalen con reactancias de protección deberán ser diseñados para soportar los sobre voltajes que estas provocan. A un banco de capacitores diseñado para trabajar al voltaje de la red no se le puede instalar reactancias de protección estándar, ya que se haría trabajar a los capacitores a un voltaje superior al del diseño [15].

La elección del punto de resonancia del conjunto LC, es un compromiso entre la cantidad de armónicos rechazados por el filtro y el incremento de voltaje que a la frecuencia fundamental se produce en el capacitor. Los armónicos de corriente también provocan sobre voltajes que afectan al voltaje total aplicado al capacitor. Además, se ha de tener en cuenta que la potencia reactiva que a la frecuencia fundamental absorbe el conjunto es diferente a la que absorbería sin la reactancia. Atendiendo a todo esto la reactancia de filtro se elige de manera que su impedancia a la frecuencia fundamental sea del orden del 6 o 7% de la impedancia del capacitor que protege.

 Control continuo de los armónicos, para el bloqueo de los capacitores en presencia de armónicos elevados. La corriente a través de los capacitores se calcula de la siguiente forma:

$$I = \frac{V}{X_c}$$

$$I = V.2.\pi.f.C$$
(1.5)

La reactancia capacitiva disminuye con la frecuencia. Hasta las más pequeñas amplitudes de voltajes armónicos causan elevadas corrientes que perjudican a los capacitores. La distorsión armónica de voltaje puede ocasionar esfuerzos en el aislamiento de los equipos, particularmente en los capacitores. Cuando los armónicos deforman el voltaje en el banco de capacitores, el voltaje pico puede ser lo suficientemente alto como para ocasionar una descarga parcial, o efecto corona, dentro del dieléctrico del capacitor. Esto puede producir eventualmente un cortocircuito entre bornes y carcasa y hacer fallar al capacitor. [15].

Los armónicos de corriente altos también ocasionan el disparo de fusibles en bancos de capacitores. Esto ocasiona la pérdida de una fuente de alimentación reactiva al sistema, lo que puede generar otros problemas.

2.1.6. Pérdidas en equipos de distribución

Las cargas trifásicas balanceadas no lineales conectadas en delta, tales como fuentes de alimentación ininterrumpidas (UPS) y variadores de velocidad, no pueden generar armónicos de corriente múltiplos de tres. Los armónicos de secuencia positiva y de secuencia negativa, no obstante, circulan a través de los conductores de fase hacia la fuente. Esto incrementará el calentamiento de los conductores debido a la circulación de corriente con mayor valor eficaz y debido al efecto pelicular (skin) [15].

Para cargas trifásicas balanceadas no lineales conectadas en estrella, los armónicos de secuencia positiva y negativa se cancelan en el neutro. Los armónicos de secuencia cero (impares múltiplos de tres) circularán por el neutro, por lo que el mismo deberá tener la sección adecuada [15].

Los armónicos agregados a la fundamental causan pérdidas adicionales en los cables, fusibles y barras de distribución. El calentamiento causa que los interruptores de protección se disparen; los conductores de fase y neutro pueden alcanzar temperaturas críticas. El calentamiento de los conductores también causa una degradación del dieléctrico, conllevando a una reducción de su vida útil [15].

2.1.7. Excesiva corriente de Neutro

En condiciones de carga balanceada sin armónicos, las corrientes de fase se cancelan en el neutro, resultando en una corriente por el neutro nula. Sin embargo, en un sistema de 4 hilos con cargas monofásicas no lineales, los múltiplos impares del 3_{er} armónico (3_r° , 9_n° , 15_t° ...) no se cancelan, sino que se suman en el conductor neutro. Bajo condiciones de carga desbalanceada, por el neutro circularán corrientes de secuencia positiva, de secuencia negativa y componentes armónicos impares múltiplos de tres. En estas condiciones, la corriente por el neutro puede alcanzar valores hasta de 1,7 veces la magnitud de la corriente de fase. Hay una posibilidad de excesivo calentamiento del conductor neutro ya que no hay interruptores en el neutro, mientras sí los hay en las fases. Las barras colectoras neutras y los bornes de conexión están dimensionados para soportar el valor máximo de la corriente de fase, pero pueden sufrir sobrecarga si se agrega a los conductores neutros la suma de los armónicos impares múltiplos de tres (triplens). [15].

La corriente excesiva por el conductor neutro causa caídas de voltaje superiores a la normal entre neutro y tierra, lo cual puede afectar el funcionamiento de equipos electrónicos sensibles como computadoras. Para evitar la sobrecarga del conductor neutro, se trata de balancear las cargas y se acostumbra a emplear conductores neutros por cada fase, similares a los de las mismas. En otros casos se coloca un conductor neutro común con una sección transversal dos veces superior a la de uno de los conductores de fase [15].

2.1.8. Mal funcionamiento de controles electrónicos y computadoras

Los armónicos causan distorsión en las formas de onda, corrientes en el neutro y sobre voltaje que afectan el trabajo de estos equipos. Un reloj digital se adelantará en presencia de cruces por cero adicionales, debido a la presencia de armónicos. Múltiples cruces por cero pueden cambiar los tiempos de conmutación de los elementos semiconductores y afectar la operación del dispositivo [15].

2.1.9. Errores en sistemas de medición

La exactitud de los sistemas de medición se ve afectada por la presencia de armónicos. Los medidores de energía activa registran exactamente la dirección del flujo de energía a las frecuencias de los armónicos, pero tienen errores de magnitud que aumentan con la frecuencia. La exactitud de los medidores de demanda y de los medidores de energía reactiva es aún menor en presencia de armónicos. [16].

La exactitud de la medición del valor eficaz o rms del voltaje o la corriente de CA, también se ve afectada por la presencia de armónicos. La manera más habitual de medir este valor rms con un multímetro, es rectificar la corriente alterna, determinar el valor medio de la señal rectificada y multiplicar este valor por 1.11. Este factor es la constante que relaciona el valor medio y el valor rms de una señal sinusoidal perfecta. Sin embargo, si la forma de la señal está distorsionada esta relación es falsa. Esta es la razón por la cual los medidores que están basados en el valor medio dan lecturas incorrectas en presencia de armónicos. Por lo antes expuesto los instrumentos de medición y los sensores de las protecciones deben estar diseñados para considerar valores eficaces verdaderos [16].

2.1.9. Resonancia

Como se explicó anteriormente, las condiciones de resonancia causan sobre corrientes y sobre voltajes.

Para sistemas de bajo voltaje, la siguiente guía puede ser empleada para tener en cuenta los efectos de resonancia:

MVA de la carga productora de armónicos / Capacidad del transformador en MVA:

Menor 10 %	No se anticipa la posibilidad de resonancia.		
10 al 30 %	Depende de los MVAR del banco de		
	capacitores.		
Mayor 30 %	Los capacitores deben usarse como filtros.		

Hay dos posibilidades de condiciones de resonancia [17]: resonancia serie y resonancia paralelo.

• Resonancia serie en sistemas de potencia

En muchos casos, los armónicos están presentes en el lado primario del transformador. El transformador junto con los capacitores en el lado secundario de bajo voltaje actúa como un circuito resonante serie para el lado de alto voltaje. Si la frecuencia de resonancia de la combinación L y C coincide con la frecuencia de un armónico existente, puede sobrecargarse el equipo. Este circuito resonante serie provee un paso de baja impedancia al armónico en este caso [17].

La cantidad de absorción dependerá de la posición relativa de la frecuencia de resonancia con respecto a la frecuencia del armónico. Este armónico de corriente impone una carga adicional al transformador y especialmente a los capacitores. El voltaje del lado de bajo voltaje del sistema se distorsiona como resultado de la resonancia. Se debe tener en cuenta el aumento de voltaje sobre el lado secundario [17].

Resonancia paralela en sistemas de potencia

Muchos de los sistemas de energía están equipados con capacitores para corrección del factor de potencia. El capacitor forma un circuito resonante paralelo con las impedancias de la carga y del transformador. El armónico de corriente de esa frecuencia, encuentra una elevada impedancia, produciéndose un voltaje armónico elevado en comparación con el de la red no compensada, lo cual genera una gran distorsión. Los transformadores y capacitores son cargados adicionalmente lo cual puede causar la sobrecarga de los mismos. La correspondiente frecuencia de resonancia se puede calcular por [17]:

$$f_{R} = 50. \sqrt{\frac{S_{r} \cdot 100}{Q_{c} \cdot u_{k}}}$$
(1.6)
$$f_{R} = frecuencia \ de \ resonancia$$

$$S_{T} = potencia \ del \ transformador$$

$$Q_{C} = fpotencia \ del \ capacitor$$

25

El punto de resonancia paralelo depende de la inductancia de la red y de la potencia capacitiva. Por lo tanto, es posible ubicar el punto de resonancia de manera de asegurar la menor perturbación. En realidad, la impedancia de la red no permanece constante todo el tiempo porque está determinada por la potencia de cortocircuito de la red y de las cargas conectadas a ellas. La potencia de cortocircuito de la red varía con el estado de conexión y el punto de resonancia paralelo varía con la configuración de la red. Por lo tanto el fenómeno puede ser más complicado cuando el equipo de corrección del factor de potencia varía por pasos [17].

Los armónicos son corrientes y/o voltajes presentes en un sistema eléctrico, con una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental. Así en sistemas con frecuencia de 60 Hz, los armónicos característicos son el tercero (180 Hz), el quinto (300 Hz) y el séptimo (420 Hz) por ejemplo [1].

En los sistemas de potencia siempre han estado presentes los armónicos. En fecha tan temprana como en 1890, los armónicos fueron asociados con formas de onda distorsionada de voltajes y corrientes, observadas en los sistemas de transmisión [1]. En el pasado, la fuente más importante de generación de corrientes y voltajes poliarmónicos (también llamados no sinusoidales o simplemente armónicos) era la rectificación con diodos de vapor de mercurio y el principal inconveniente que originaba era la interferencia telefónica. En ese entonces los armónicos no causaban grandes problemas en las instalaciones industriales y edificios de oficinas porque los equipos eran menos sofisticados que los que existen en nuestros días.

Con el creciente aumento en el uso de cargas no lineales (procedentes de la electrónica de potencia), se han empezado a tener algunos problemas en las instalaciones eléctricas, debido a los efectos de los componentes armónicos de corrientes y voltajes en el sistema eléctrico, que no se contemplaban anteriormente. Entre estos están el sobrecalentamiento de cables, transformadores y motores, corrientes excesivas en el neutro, fenómenos de resonancia entre los elementos del circuito (si se cuenta con bancos de capacitores para corrección del factor de potencia) y en general la calidad en el suministro de energía eléctrica se ha ido deteriorando por la distorsión presente en los voltajes y corrientes. Esta

situación puede llegar a causar un funcionamiento incorrecto de muchos equipos (especialmente los menos robustos), que han sido diseñados para operar bajo condiciones normales (poca distorsión armónica). Además, se presenta un incremento en los costos de operación como resultado de algunos factores ligados a la generación de armónicos [1].

La creciente utilización de sistemas electrónicos para el control del flujo de potencia y el acondicionamiento de la misma, así como el empleo de cargas no lineales [2], contribuyen a la polución del entorno eléctrico por el aumento de los índices de armónicos de voltaje y corriente.

Por otra parte, la dependencia de muchas actividades sociales y económicas a la continuidad del suministro de energía eléctrica, hacen que fiabilidad de suministro y calidad de la potencia suministrada sean propiedades de la mayor importancia para la operación de los sistemas [2].

Según el IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos), un problema de calidad de potencia es debido a cualquier variación en el servicio de potencia eléctrica que dé lugar a funcionamiento defectuoso o fallo en el equipamiento del usuario, tal como: reducción de voltaje, sobrevoltaje, transitorios, distorsión armónica y ruido eléctrico [2].

Cualquier perturbación electromagnética que se manifieste en la degradación de la operación, el mal funcionamiento o la falla de un equipo eléctrico o electrónico se define como Interferencia Electromagnética (EMI por sus siglas en inglés) y la Compatibilidad Electromagnética (EMC por sus siglas en inglés) se define como la capacidad de un equipo o sistema eléctrico o electrónico para operar satisfactoriamente en su entorno electromagnético [2].

La utilización de energía eléctrica requiere un suministro de potencia con frecuencias y voltajes controlables, mientras que su generación y transmisión se realizan a niveles nominalmente constantes. Esta discrepancia necesita un acondicionamiento o conversión de la potencia que, en general, se realiza mediante circuitos no lineales. Estos circuitos están constituidos en gran medida por semiconductores que distorsionan las ondas de voltaje y corriente [2].

La calidad de la potencia comprende tres aspectos básicos:

 Calidad del producto técnico: Persigue analizar las características y nivel de la señal de voltaje en el punto de acoplamiento común (PAC), además de las perturbaciones, que a la vez se separan en tres: variaciones rápidas de voltaje, variaciones lentas de voltaje y armónicos.

Entre las perturbaciones podemos señalar:

- Caídas de voltaje (Sags): Decrecimiento en la señal de voltaje, con una duración de milisegundos a unos pocos segundos, los sub voltajes son caídas (Sags) que duran más de unos segundos, debido a salida o arranque de equipos eléctricos grandes, cortocircuito, circuitos eléctricos sub dimensionados
- Subidas de voltaje (Swells): Incremento en la señal de voltaje, con una duración de milisegundos a unos pocos segundos, los sobre voltajes son aumentos (Swells) que duran más de unos pocos segundos, debido a salida o arranque de equipos eléctricos grandes, cortocircuito, circuitos eléctricos sobredimensionados [3].
- Transitorios electromagnéticos: Cambio súbito en la señal de voltaje de cientos a miles de volts, con una duración de unos pocos microsegundos, debido a operaciones de maniobra en la empresa suministradora de energía, arranque y parada de equipos o máquinas, descargas estáticas, descargas eléctricas atmosféricas.
- Muescas (Notches): Perturbación de polaridad opuesta a la forma de onda, con una duración de microsegundos, debido a operaciones de maniobra en la empresa
- suministradora de energía, arranque y parada de equipos o máquinas, descargas estáticas, descargas eléctricas atmosféricas [4].
- Fluctuación de voltaje: Se define como la modulación de amplitud en baja frecuencia de la envolvente del valor eficaz del voltaje de suministro. Las altas corrientes consumidas en los arranques repetitivos de dispositivos accionados a motor (u otras cargas variables de gran consumo, como los hornos de arco), cuando circulan a través de la impedancia no nula de las redes de distribución de energía, suponen unas de las principales causas de dicha modulación. Un gran número de cargas del entorno doméstico, tales como frigoríficos, lavadoras, humidificadores o

equipos de aire acondicionado pueden ser catalogados como equipos susceptibles de provocar fluctuaciones de tensión [4].

- Ruidos: Una señal eléctrica inesperada de alta frecuencia, proveniente de otros equipos, con una duración esporádica, debido a interferencias electromagnéticas causadas por transmisiones de microondas y radares, emisiones de radio, TV, soldadores de arco, calentadores, impresoras láser, termostatos, o conexión a tierra inapropiada [4].
- Distorsión armónica: distorsión de la onda sinusoidal pura, debido a cargas no lineales.
- Calidad del servicio técnico prestado: Persigue analizar, controlar y sancionar lo referente a cortes de suministro, frecuencia de las interrupciones y duración de éstas.

Estas interrupciones pueden clasificarse en:

- Interrupción momentánea: Pérdida muy corta de la energía eléctrica, planeada o accidental con una duración de milisegundos a uno o dos segundos, debido a una operación de maniobra para solucionar un problema eléctrico.
- Interrupción temporal: Pérdida total de la energía, planeada o accidental de un área localizada, con una duración de dos segundos a dos minutos, debido a falla de un equipo, descargas eléctricas atmosféricas, animales, errores humanos.
- Interrupción sostenida (o de larga duración): Pérdida total de la energía eléctrica, planeada o accidental en un área localizada, con una duración de más de dos minutos, debido a falla de un equipo, descargas eléctricas atmosféricas, animales, errores humanos.
- Calidad de servicio comercial: Busca dar plazos y cualidades de la atención por parte de la empresa generadora o distribuidora, para el cumplimiento de las solicitudes e información requerida por el usuario [4].

2.3. Marco referencial

Las publicaciones existentes sobre el tema plantean una serie de consideraciones y métodos para cuantificar el incremento de las pérdidas por efecto de los armónicos, cómo y cuánto influyen estos, en los transformadores y cuánto debe reducirse la capacidad nominal de los mismos en dependencia del grado de distorsión que tenga la corriente de carga. [5].

En realidad, toda la bibliografía analiza el caso para cuando hay armónicos en la corriente de carga y relaciona estos armónicos con las pérdidas adicionales por corrientes parásitas, pero no se pronuncian con relación a los efectos que producen en los transformadores, una alimentación o una tensión secundaria no sinusoidal. [5].

Las pérdidas adicionales por corrientes parásitas sí dependen de los valores efectivos de las corrientes armónicas y del orden de estos armónicos y para todo fin práctico se pueden considerar dos aspectos:

- Las pérdidas por corrientes parásitas son proporcionales al cuadrado de la frecuencia. Esto es más exacto para estructuras con pequeños espesores (menores a 3 mm) en la dirección perpendicular al campo magnético y para armónicos menores [6]
- Se puede aplicar el principio de superposición para las pérdidas por corrientes parásitas. Esto permite sumar directamente las componentes de pérdidas de cada armónico [6].

En la IEEE. C57.110-1998, se plantean dos factores mediante los cuales se puede obtener el incremento que se verifica en las pérdidas adicionales en los transformadores, una vez conocido o registrado el tipo de carga que está alimentando el transformador con su contenido de armónicos y valores efectivos de cada componente de la corriente [7].

2.4. Marco legal

2.4.1. Normas para el control de armónicos

Debido al acelerado deterioro de la calidad de la potencia distribuida, la preocupación por regular el contenido armónico de la red de distribución ha estado presente en muchos países desde la década del setenta del siglo pasado. En 1975 el Comité Europeo para la Estandarización en Electrotecnia (CENELEC) dictó la norma EN50006 que fue adoptada por 14 países europeos [18]. Posteriormente, en 1991 el CENELEC aprobó el estándar IEC-555-2, dictado por la Comisión Internacional de Electrotecnia (IEC) en 1982 [19], como estándar europeo (EN 605552). La norma IEC-555-2 fue revisada y en abril de 1995 modificada por la normativa IEC 10003-2 que se ha adoptado en la actualidad como el estándar europeo EN 61000-3-2.

CAPÍTULO III MÉTODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Localización

La investigación se llevó a cabo en la sala del laboratorio de Electrónica básica en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo.



3.2. Tipo de investigación

El tipo de investigación es exploratoria y diagnóstica en virtud de haber tenido que levantar información primaria y secundaria en el estado del arte para así poder determinar los problemas que se presentan.

3.3. Métodos de investigación

3.3.1. Método Analítico

La aplicación de este método permitió analizar los diferentes tipos de armónicos y lograr establecer soluciones necesarias para ser aplicada en el desarrollo y aplicación del trabajo de investigación llevado a cabo.

3.3.2. Método deductivo – inductivo

Para iniciar con el proceso de investigación y posterior desarrollo se realizó un proceso de observación con el fin de conocer las principales falencias con respecto a los armónicos en los transformadores objeto de estudio, de esta manera se pudo iniciar con el proceso de experimentación y desarrollo aplicables, con el fin de dar un beneficio que solucione los principales inconvenientes presentes en el área de estudio en la simulación.

3.3.2.1. Técnica Cuasi – experimental

Para este tipo de trabajo investigativo la técnica utilizada fue la cuasi experimental, partiendo como variable independiente la tecnología empleada por los armónicos logrando así conocer como la variable dependiente puede dotar de servicios a la zona de estudio.

Fueron elaborados programas de computación escritos en MATLAB, los cuales permiten describir una carga no lineal y evaluar la capacidad del transformador existente para alimentar la misma, sin que sufra sobrecalentamiento, lo que pudiera dañarlo o acortar su vida útil. El análisis de la capacidad real del transformador ante cargas no lineales, que se ha desarrollado en los programas elaborados, no requiere información detallada sobre la distribución de la densidad de pérdidas dentro de cada uno de los enrollados del transformador (en la mayoría de los casos no se dispone de esta información detallada), solo se requiere de los datos generalmente brindados en los programas consideran los casos de los transformador de distribución, al alcance de los usuarios. Los programas consideran los casos de los transformadores con enfriamiento por aceite y tipo seco.

3.3.2.2. Fuentes de recopilación de información

La información obtenida ha sido a través de fuentes secundarias, como libros, reglamentos, artículos y varias páginas web relacionadas al tema de los armónicos.

3.4. Tratamiento de los datos

Se empleó el lenguaje de programación **MatLab** y su simulador **Simulink**, dentro del cual se utilizó de manera intensiva el paquete de funciones especializadas en temas de sistemas de potencia eléctrica, **Power System Blockset**, para la programación, simulación y análisis de los diferentes casos tratados en el trabajo realizado, entre los cuales se encuentran:

- Modelación del transformador monofásico cubano de 10 kVA y 100 kVA marca LATINO.
- Dependencia de la distorsión armónica total de voltaje en el secundario, de la impedancia de la fuente (transformador) y de la magnitud de la carga no lineal.
- Influencia del desbalance de las cargas en la distorsión.
- Comportamiento de bancos trifásicos con diferentes tipos de conexión ante cargas no lineales balanceadas.
- Distorsión del voltaje y la corriente provocada por un convertidor de 6 pulsos.
- Empleo de reactores para disminuir la distorsión armónica provocada por el convertidor de 6 pulsos.
- Distorsión del voltaje y la corriente provocada por un convertidor de 12 pulsos.
- Ejemplos de cálculos, que ilustran el manejo del tema de los armónicos, y en especial aquellos relacionados con el cálculo del factor K de una carga no lineal y la desclasificación (derating) de los transformadores de distribución.
- Elaboración de programas en MATLAB para la determinación de la capacidad del transformador cuando suministra corrientes de carga no sinusoidales.

HUMANO							
Ítem	Detalle	Descripción	Costo Unitario	Total			
1	640H	Darío Oswaldo Morales Sánchez					
2	128H	Víctor Fernando Nasimba Medina					
			TOTAL	\$			
	MATERIALES						
Ítem	Detalle	Descripción	Costo Unitario	Total			
1	u	Portátil dell latitude e6440 core i7	1200	1200,00			
2	u	Resmas de hojas a4	2,75	5,50			
			TOTAL	\$ 1205,50			

3.5. Recursos humanos y materiales

CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

4.1.1. Resultados obtenidos en las simulaciones. Análisis de los mismos

En la mayoría de las simulaciones realizadas y mostradas en este capítulo, se utilizaron los datos de los transformadores de fabricación nacional, marca **LATINO**, con capacidad de 10 kVA y 100 kVA, algunos de los cuales se muestran en el cuadro 2.

Características	10 kVA	100 kVA
Perdida en vacío (w) 100% voltaje nominal	55	275
Corriente en vacío (A) 100% voltaje nominal	1% In	0.6% In
Perdida en el cobre en la derivación principal, 85 C,	146	976
100% carga nominal (w)		
% impedancia de cortocircuito, max a 85° C	3	4.5
Voltaje nominal primario, derivación principal (V)	2400	7620
Voltaje nominal secundario (V)	120/240	120/240
Máxima elevación de temperatura (°C) en:		
• Devanados	65	65
• Aceite	65	65

Tabla 2. Característica	s técnicas de l	os transformadores	monofásicos LATINO
-------------------------	-----------------	--------------------	--------------------

Fuente: Matlab y Simulink

Los estudios de simulación, ayudan a comprender de manera efectiva, el comportamiento de diferentes cargas, tanto lineales como no lineales, y sus efectos en el sistema de potencia y en los elementos del mismo. Los resultados que se muestran en el presente capítulo, han sido obtenidos con ayuda del lenguaje de programación **MatLab** y del simulador del mismo **Simulink**.

• Dependencia de la distorsión de voltaje de la impedancia de la fuente

Las cargas electrónicas, como variadores de velocidad, computadoras, producen distorsiones de corriente cuando son alimentadas por una fuente sin distorsión. La distorsión de voltaje tiene lugar cuando la corriente distorsionada pasa por la impedancia de la fuente. La distorsión de voltaje será mayor cuanto mayor sea esta impedancia.

En las simulaciones realizadas, (figuras 1 a 6), se observa como el transformador de 10 kVA representa una impedancia mayor que el de 100 kVA, para una carga no lineal formada por computadoras, impresoras y otras similares, las cuales en su entrada poseen una fuente de potencia de modo conmutado. En todas las simulaciones realizadas, las ordenadas de los gráficos **señal seleccionada**, estarán dadas en Volt (V) o en Ampere (A), según la variable que se analice en cada caso.

La misma carga no lineal, con igual THDI, provoca mayor distorsión de voltaje en el transformador de 10 kVA que en el de 100 kVA. En los diagramas y gráficos que aparecen a continuación, empleando el Simulink del MatLab, se muestran las corrientes y voltajes distorsionados en el secundario de los transformadores, también se indica claramente, que la distorsión de voltaje, THDV, en el secundario del transformador de 10 kVA es de 1,64 %, mientras que en el de 100 kVA es de 0,92 %, mucho menor.

En la figura 2, se observa como las cargas que poseen en su entrada fuentes de potencia de modo conmutado (cargas tipo computadoras, impresoras, equipos de fax, etc.), generan corrientes distorsionadas, formadas por una componente fundamental y armónicos impares (3ero, 5to, 7mo...), con amplitud decreciente, siendo el 3_{er} armónico el predominante.

Para la carga empleada en la simulación (4000 W y 1300 VAR), el tercer armónico es el predominante, con un valor de alrededor del 40 % de la fundamental, muy superior a los armónicos de orden superior. La distorsión armónica total de corriente THDI, es de un 39%. En la figura se muestra con claridad, la forma de onda distorsionada de la corriente que circula por el secundario del transformador.

Para esta simulación y las siguientes, el análisis se realiza hasta el armónico decimocuarto (840 Hz).

En la figura 3 se observa claramente, que la distorsión de voltaje, THDV, en el secundario del transformador de 10 kVA es de 1,64 %.

En la figura 4, la carga no lineal, es similar a la del caso anterior, lo cual nos permite comparar los resultados obtenidos en las simulaciones, empleando los transformadores de 10 kVA y de 100 kVA.

En las figuras 1 y 4 se observan los medidores de potencia activa y reactiva, indicando el valor de estas magnitudes consumidas por la carga no lineal conectada a los transformadores de 10 kVA y 100 kVA . Los resultados muestran valores aproximadamente iguales en ambos casos, pues la carga no lineal conectada es la misma.

El amperímetro conectado en serie con la carga, también muestra que la corriente eficaz por el secundario de ambos transformadores es la misma aproximadamente, lo que junto a los valores de potencia activa (4000 W) y reactiva (1300 VAR), corroboran que la carga no lineal conectada a ambos transformadores, es la misma.

Los diferentes osciloscopios, permiten observar la forma de onda de corriente y voltaje en el secundario del transformador, así como la forma de onda de la corriente por el primario del transformador.



Figura 1. Transformador de 10 kVA con carga no lineal

Fuente: Matlab y Simulink



Figura 2. Corriente en el secundario del transformador de 10 kVA

Fuente: Matlab y Simulink



Figura 3. Voltaje en el secundario de transformador de 10 kVA

Fuente: Matlab y Simulink



Figura 4. Transformador de 100 kVA con carga no lineal

Fuente: Matlab y Simulink

Puede observarse en la figura 5, que la corriente en el secundario del transformador de 100 kVA, es similar a la del transformador de 10 kVA, lo cual está determinado por la carga no lineal, la cual no ha sido variada (4000 W y 1300 VAR inductivos).

Figura 5. Corriente en el secundario de transformador de 100 kVA



Fuente: Matlab y Simulink

A continuación, se muestra (figura 6), como la distorsión armónica total de voltaje, para el transformador de 100 kVA, ha disminuido a 0,92 %, valor mucho menor, que el de 1,64 % obtenido para el transformador de 10 kVA.



Figura 6. Voltaje en el secundario de transformador de 100 kVA

Fuente: Matlab y Simulink

• Dependencia de la distorsión armónica total de voltaje de la magnitud de la carga no lineal

La distorsión armónica total del voltaje en el secundario del transformador (THDV), depende de la magnitud de la carga no lineal conectada al mismo. En el grafico 7 a 10, el mismo transformador de 10 kVA alimenta una carga pequeña y otro mucho mayor, observándose la diferencia en el valor del THDV obtenido.

La carga no lineal relativamente pequeña (P = 400 W y Q = 15 VAR), conectada al secundario del transformador, provoca la circulación de una corriente distorsionada (THDI = 47,19 %), con un valor eficaz de 3,7 A. Por la característica de la carga, el tercer armónico es el predominante.

La distorsión del voltaje en el secundario del transformador, puede apreciarse en el grafico 8. La distorsión armónica total del voltaje en el secundario del transformador (THDV), es de 1,05 %.

En el mismo gráfico, se muestran los valores relativos de los armónicos de voltaje con respecto a la fundamental.

En el grafico 9, el mismo transformador de 10 kVA utilizado en la simulación anterior, alimenta una carga mucho mayor (P = 5750 W y Q = 2750 VAR), lo que permitirá observar la dependencia del valor del THDV, con respecto a la magnitud de la carga no lineal.

La carga no lineal relativamente grande (P = 5750 W y Q = 2750 VAR), conectada al secundario del transformador, provoca la circulación de una corriente distorsionada (THDI = 34,31 %), con un valor eficaz de 57,15 A. Por la característica de la carga, el tercer armónico es el predominante.

La distorsión del voltaje en el secundario del transformador, puede apreciarse en el grafico 10.

La distorsión armónica total del voltaje en el secundario del transformador (THDV), es de 1,89%, un valor mucho mayor que el valor de 1,05 % obtenido con la carga de menor magnitud. En el mismo gráfico, se muestran los valores relativos de los armónicos de voltaje con respecto a la fundamental. Los resultados obtenidos, muestran como al aumentar la magnitud de la carga no lineal conectada al transformador el voltaje en el secundario del mismo, se distorsiona en mayor grado.



Figura 7. THDV con carga no lineal pequeña

Fuente: Matlab y Simulink





Fuente: Matlab y Simulink



Figura 9. THDV con carga no lineal grande

Fuente: Matlab y Simulink





Fuente: Matlab y Simulink

• Desclasificación de los transformadores (derating)

Una forma de proteger al transformador de los armónicos, es limitando la magnitud de la carga no lineal conectada al mismo. Esto se conoce como desclasificar (**derating**) el transformador. El método más riguroso para la desclasificación es el descrito en las indicaciones ANSI/IEEE C57.110 –1986. Este método es algo impráctico, porque requiere numerosos datos sobre las pérdidas, que deben ser suministrados por el fabricante del transformador, además, se requiere el espectro armónico completo de la corriente de carga.

La Asociación de Fabricantes de Equipos de Computación y Oficina (CBEMA), ha recomendado un segundo método, que exige algunas mediciones directas, empleando instrumentos de medición comúnmente disponibles. Este método ha demostrado brindar resultados razonables, para transformadores que alimentan cargas no lineales, tipo computadoras y equipos de oficina, conectadas entre línea y neutro, las cuales producen corrientes distorsionadas, formadas por armónicos impares de baja frecuencia (tercero, quinto, séptimo).

Para determinar el factor de desclasificación del transformador (HDF), debe tomarse el valor pico y el valor eficaz verdadero, de la corriente entregada por el transformador a la carga. Se requiere un buen instrumento para conocer el valor eficaz verdadero de la corriente; los instrumentos antiguos y baratos no dan el valor eficaz verdadero, sino el valor medio. En el caso de un transformador trifásico, las mediciones se realizan en las tres fases. Si las fases no están balanceadas, debe obtenerse el valor promedio de las tres mediciones, y emplear el valor obtenido en el procedimiento señalado a continuación.

El factor de desclasificación del transformador (HDF), se obtiene, como se indica a continuación:

HDF = 1,4142 * valor eficaz verdadero de la corriente de fase / valor pico instantáneo de la corriente de fase

Esta fórmula genera un valor entre 0 y 1, típicamente entre 0,5 y 0,9. Si la corriente de fase es puramente sinusoidal (no distorsionada), el valor pico instantáneo es 1,4142 veces el valor eficaz verdadero y el factor de desclasificación es 1,0. Si este es el caso, no se requiere desclasificación.

No obstante, con armónicos presentes, el rango del transformador estará dado por el producto de los kVA nominales multiplicados por el HDF.

KVA desclasificados = HDF * kVA nominales

Consideremos el ejemplo del transformador de 10 kVA, alimentando una carga no lineal (P=5750 W y Q = 2750 VAR), visto con anterioridad.

Valor eficaz verdadero de la corriente de fase: 57,15 A Valor pico instantáneo de la corriente de fase: 100,0 A HDF = 1,4142*57,15/100,0 = 0,808kVA desclasificados = 0,808 * 10 = 8,08 kVA

Este resultado indica, que, con el nivel de armónicos presentes, el transformador debe ser desclasificado hasta el 80,8 % de su capacidad nominal, para evitar el sobrecalentamiento del mismo. Como la carga empleada en este ejemplo es de 6,37 kVA, este transformador desclasificado, con un nuevo valor de 8,08 kVA, puede alimentar la misma sin problemas de sobrecalentamiento.

• Influencia del desbalance de las cargas en la distorsión

Un sistema monofásico de tres conductores, se define como una fuente que tiene tres terminales de salida, en la cual los voltajes de dos conductores con respecto al tercero, común a ambos, son iguales y desfasados 180° uno con respecto al otro. Entre los dos conductores se tiene un voltaje, igual al doble de cualquiera de los voltajes con respecto al conductor común (neutro). Se tiene una fuente en la cual las cargas pueden operar a cualquiera de los dos voltajes. El sistema residencial normal, es monofásico de tres alambres, permitiendo la operación de cargas tanto a un voltaje de 120 V como de 240 V.

En un sistema monofásico de tres alambres con cargas balanceadas, no circula corriente por el conductor neutro. El conductor neutro puede ser eliminado sin que los voltajes y corrientes del sistema varíen. En caso de cargas diferentes entre los conductores exteriores y el neutro, por el neutro circulará una corriente.

En la simulación realizada, (figuras 11 a 13), un transformador de 10 kVA 2400 120 120 V, alimenta en el primer caso, cargas balanceadas, formadas por la combinación en paralelo de una carga lineal y otra no lineal. Se observa como por el conductor neutro no circula corriente, mientras que por los conductores exteriores la corriente está distorsionada con un THDI de 17,67% (solo se muestra la de un conductor, pues son similares los resultados). Evidentemente la distorsión de voltaje en los secundarios es la misma, e igual a 1,24 %, en este ejemplo. Se observa, de acuerdo a las características de las cargas no lineales, que las corrientes por los devanados de los transformadores están distorsionadas y sus componentes son los armónicos impares múltiplos de tres, siendo el 3_{er} armónico el predominante.

En el segundo caso simulado, (figuras 14 a 17), el mismo transformador, alimenta cargas desbalanceadas, las cargas no lineales se conectaron al conductor superior y las lineales al conductor inferior. Las cargas consumen la misma potencia activa (P) y reactiva (Q). Se observa, como por el conductor exterior conectado a la carga no lineal, la corriente está distorsionada (THDI = 44,37 %), siendo el 3_{er} armónico el predominante. Por el conductor inferior conectado a la carga no lineal, la corriente del distorsionada (THDI = 1,66 %). Por el conductor neutro, prácticamente solo circula corriente del 3_{er} armónico, como debe ser.

La combinación de cargas lineales y no lineales, hace que el THDI (17,67 %), de cualquiera de las corrientes por los conductores exteriores (figura 12), disminuya con respecto al caso extremo analizado a continuación, en que las cargas lineales y no lineales están separadas, observándose que por el conductor exterior conectado a las cargas no lineales el THDI es de 44,38 %, mucho mayor. Las características de la carga (tipo computadora), determinan el contenido armónico de las corrientes por los conductores exteriores. El 3_{er} armónico sigue siendo el predominante.



Figura 11. Transformador monofásico con cargas balanceadas no lineales

Figura 12. Corriente por los conductores exteriores conectados a cargas balanceadas no lineales

Fuente: Matlab y Simulink



Fuente: Matlab y Simulink

Por este sistema monofásico de tres alambres, con cargas balanceadas no lineales, no circula corriente por el conductor neutro (figura 13). En la figura se observa, que la magnitud de la corriente por el conductor neutro, es del orden de 10⁻⁵, prácticamente cero, como corresponde teóricamente.

Figura 13. Corriente por el neutro conectado a cargas balanceadas no lineales



Fuente: Matlab y Simulink

Por ser balanceadas las cargas conectadas a los secundarios del transformador, la distorsión armónica total de voltaje, es la misma para cada devanado secundario. Para este ejemplo particular, el THDV es de 1,33 %.

Cuando se tienen cargas desbalanceadas, el comportamiento es completamente diferente al analizado anteriormente. Por el conductor neutro circulará corriente. El circuito simulado (figura 14), es el caso extremo de asimetría entre las cargas, a un secundario están conectadas todas las cargas no lineales y al otro secundario las cargas lineales. Cada carga consume aproximadamente la misma potencia activa y reactiva, diferenciándose en el tipo (no lineal y lineal).



Figura 14. Transformador monofásico con cargas desbalanceadas

La corriente que circula por el conductor exterior conectado a la carga no lineal, está distorsionada (figura 15). El tipo de carga no lineal, impone los armónicos presentes en la corriente. El THDI para este caso particular, tiene un valor de 44,38 %, predominando el 3_{er} armónico.

Figura 15. Corriente por el conductor exterior conectado a la carga no lineal

Fuente: Matlab y Simulink



Fuente: Matlab y Simulink

En el caso que estamos analizando, la corriente que circula por el conductor exterior conectado a la carga lineal, es prácticamente sinusoidal. En la figura 16, se observa la forma de onda de la corriente, no distorsionada prácticamente. El THDI tiene un valor de 1,77 %, un valor muy bajo, como debe ser, dada la naturaleza lineal de la carga.

Figura 16. Corriente por el conductor exterior conectado a la carga lineal



Fuente: Matlab y Simulink

La corriente por el conductor neutro, conectado a cargas desbalanceadas, ya sea porque la potencia activa o reactiva consumidas no sean iguales, o por su naturaleza diferente (no lineal y lineal), ya no será igual a cero.

En el ejemplo analizado, la potencia activa para cada carga es de aproximadamente 2020 W y la reactiva es de 360 VAR, pero la naturaleza es diferente, una carga es no lineal (la superior) y la otra es lineal (la inferior). La figura 17, muestra como la corriente por el conductor neutro está constituida prácticamente por el 3_{er} armónico (180 Hz). La corriente del 3_{er} armónico es alrededor de 75 veces superior en magnitud, a la corriente fundamental, que circula por dicho conductor.



Figura 17. Corriente por el neutro conectado a cargas desbalanceadas

Fuente: Matlab y Simulink

• Transformador estrella – estrella. Neutro ideal. Balanceado. Cargas no lineales

En este análisis (figura 18), se considera que el conductor que une los neutros de la carga y la fuente (banco trifásico constituido por tres transformadores monofásicos de 10 kVA 2400 120 V) no posee impedancia. Las cargas no lineales conectadas a cada fase son idénticas, cada una de las cuales consume alrededor de 950 W y 360 VAR inductivo.

Figura 18. Transformador estrella – estrella con neutro ideal. Cargas no lineales balanceadas


Fuente: Matlab y Simulink

Las corrientes por las fases de la carga, son similares y desplazadas 120° una de otra. Por ser las cargas no lineales (del tipo computadora), las corrientes están distorsionadas, estando presentes los armónicos, tercero, quinto, séptimo, etc. La distorsión armónica total de las corrientes, corresponde a un THDI de 82 %. Solo se muestra la corriente de la fase A (figura 19), siendo los resultados, similares para el resto de las fases.





Fuente: Matlab y Simulink

A diferencia de los circuitos balanceados con cargas lineales, en los circuitos balanceados con cargas no lineales (productoras de armónicos), por el neutro circula corriente. Esa corriente como se muestra en la figura 20, está formada por los armónicos impares múltiplos de tres (triplen).

Se observa claramente la presencia del tercer y noveno armónico (no se observan los armónicos decimoquintos y superiores, pues se ha limitado la imagen hasta el armónico decimocuarto). Aún en condiciones de carga balanceada, los armónicos impares múltiplos de tres, se sumarán en el conductor neutro. El tercer armónico es generalmente mucho mayor que el resto y es habitualmente el más significativo.

En la simulación realizada, la corriente por el conductor neutro (18,78 A), prácticamente es el doble de las que circulan por las fases de la carga y por los secundarios de los transformadores (11,08 A). A partir de los datos obtenidos, puede demostrarse que la corriente del tercer armónico que circula por el conductor neutro (18,6 A), es el triple de la corriente del tercer armónico que circula por cualquiera de las líneas (6,2 A).

Aparecerá un voltaje de neutro a tierra siempre que exista corriente por el hilo neutro. La existencia de cierto voltaje de neutro a tierra no es un problema para la mayoría de las cargas, por ejemplo, para un refrigerador (carga monofásica) o un motor jaula de ardilla (carga trifásica); pero hay cargas a las cuales les afecta la presencia de dicho voltaje, a este tipo de cargas, pertenecen los equipos electrónicos sensibles. Con el objeto de reducir el voltaje de neutro a tierra, se puede utilizar un transformador de aislamiento cercano a la carga.



Figura 20. Corriente por el neutro

Fuente: Matlab y Simulink

Por las características del transformador monofásico empleado para conformar el banco trifásico, y por representar las cargas no lineales por fase, alrededor del 10 % de la capacidad del transformador monofásico, no se confrontan dificultades con la distorsión armónica total de voltaje (THDV), la cual es de 0,98 Los voltajes entre líneas no contienen prácticamente armónicos impares múltiplos de tres, (los pequeñísimos armónicos que aparecen en esta simulación, no mostrada, así como los de orden par, se deben a la exactitud de los algoritmos empleados). El valor del THDV para el voltaje de línea Vab, en este ejemplo, es de 0,74 % (los restantes voltajes de línea son similares).

Las corrientes por las líneas primarias contienen armónicos impares (1, 3, 5, 7...). La corriente por la fase A del primario posee un THDI de 75,91 %, siendo las corrientes por las fases B y C similares.

• Transformador estrella – estrella. Neutro con impedancia. Balanceado. Cargas no lineales

Para este circuito, como se observa en los resultados obtenidos (figura 21), a diferencia del caso en que el conductor neutro es ideal (impedancia cero), los neutros de la carga y del banco de transformadores, no son equipotenciales. Entre los mismos aparecerá un voltaje, constituido solamente por armónicos impares múltiplos de tres. Las restantes corriente y voltajes se comportan en general, de forma similar al caso en que el neutro es ideal. En la figura se observa, como el voltaje eficaz entre los puntos neutros de la carga y el transformador, es de 1,756 V.

Figura 21. Transformador estrella – estrella. Neutro con impedancia. Cargas no lineales balanceadas



Fuente: Matlab y Simulink

• Transformador delta – estrella. Balanceado. Cargas no lineales

Los transformadores alimentadores conectados en delta-estrella (figura 22), bloquearán la mayoría de los armónicos de corriente, impares múltiplos de tres, evitando que fluyan hacia el sistema de alto voltaje. Consecuentemente, esta conexión es preferida en esta aplicación.

En la figura 23, se observa el contenido armónico de las corrientes de línea que demandan las cargas no lineales balanceadas, conectadas en el lado estrella del banco trifásico. Los armónicos impares decrecen en amplitud a medida que su orden aumenta. Solo se muestra la corriente por la fase A, siendo las corrientes por las fases B y C similares.



Figura 22. Transformador delta – estrella. Cargas no lineales balanceadas

Fuente: Matlab y Simulink



Fuente: Matlab y Simulink

Debido a las corrientes por el neutro (figura 24) potencialmente altas en esta aplicación, un conductor neutro común debe dimensionarse tanto como al doble de los conductores de fase o puede emplearse neutros separados por fase. Esa corriente como se muestra en la figura, está formada por los armónicos impares múltiplos de tres (triplen). Se observa claramente la presencia del tercer y noveno armónico. Aún en condiciones de carga balanceada, los armónicos impares múltiplos de tres, se sumarán en el conductor neutro. El tercer armónico es generalmente mucho mayor que el resto y es habitualmente el más significativo, como se aprecia con claridad en la figura.

Aparecerá un voltaje de neutro a tierra siempre que exista corriente por el hilo neutro con impedancia. Un transformador de aislamiento cercano a la carga trifásica permitirá reducir el voltaje de neutro a tierra. Un transformador de aislamiento tiene los devanados primarios (entrada) y secundarios (salida) separados. Un autotransformador no tiene devanados separados, por lo tanto, no es un transformador de aislamiento. La relación de transformación puede ser cualquiera, no tiene que ser unitaria. Un transformador de aislamiento apropiado para equipo electrónico sensible, debe contar con al menos un blindaje electrostático para disminuir la intercapacitancia entre los devanados y como consecuencia, el ruido.

Figura 24. Corriente por el neutro



Fuente: Matlab y Simulink

El voltaje de fase está constituido fundamentalmente por armónicos impares. Por las características del transformador monofásico empleado para conformar el banco trifásico, y por representar las cargas no lineales por fase, alrededor del 10 % de la capacidad del transformador monofásico, el (THDV) obtenido en la simulación (no mostrada), es de 1,16%. Resultados similares se obtienen para las fases restantes.

Los voltajes entre líneas no contienen prácticamente armónicos impares múltiplos de tres. El valor del THDV para el voltaje de línea Vab, en este ejemplo, es de 0,93 % (los restantes voltajes de línea son similares).

La corriente que circula por los primarios de los transformadores conectados en delta, es una corriente distorsionada, debido a la no linealidad de las cargas. La corriente por las fases de la delta, está constituida por armónicos impares, como se muestra en la figura 25. Cuando los armónicos impares múltiplos de tres llegan al secundario del transformador, se reflejan sobre el devanado en delta del primario, pudiendo provocar un sobrecalentamiento que puede llevar a la destrucción del transformador. Se muestra la corriente de la fase AB, siendo las corrientes de las restantes fases, similares en forma y desfasadas 120°. Se observa en la figura, como a medida que el orden de los armónicos aumenta, su amplitud disminuye, siendo los de mayor influencia, el 3, el 5to y el 7mo.





Fuente: Matlab y Simulink

En los primarios conectados en delta, los armónicos impares múltiplos de tres, quedan atrapados en la delta, cuando las cargas son balanceadas; en caso de cargas desbalanceadas, por las líneas de alimentación del transformador circularían armónicos impares múltiplos de tres. Aunque esta forma de conexión podría utilizarse para eliminar los "triplen" equilibrados, solo es válida en determinadas aplicaciones, por los problemas que genera la recirculación por la delta de dichas corrientes.

En la simulación realizada con cargas no lineales balanceadas, se observa (figura 26), como por las líneas de alimentación del transformador delta - estrella, no circulan los

armónicos impares múltiplos de tres. La distorsión armónica total de corriente (THDI) por las líneas de alimentación del transformador, para esta conexión, es de 34,11 %, mucho menor que el valor de 75,91 % obtenido anteriormente, con una conexión estrella - estrella.



Figura 26. Corriente por las líneas de alimentación del transformador

Fuente: Matlab y Simulink

• Transformador delta – delta. Balanceado. Cargas no lineales

En este análisis (figura 27), se simula un banco trifásico constituido por tres transformadores monofásicos de 10 kVA 2400 120 V. Las cargas no lineales conectadas en delta son idénticas, cada una de las cuales consume alrededor de 1000 W y 380 VAR inductivo.

La corriente que circula por las fases de la carga conectada en delta, es una corriente distorsionada, debido a la no linealidad de las cargas. La corriente por las fases de la carga en delta, está constituida por armónicos impares, como se muestra en la figura 28. Se muestra la corriente de la fase ab, siendo las corrientes de las restantes fases, similares en forma y desfasadas 120°. Se observa en la figura, como a medida que el orden de los armónicos aumenta, su amplitud disminuye.



Figura 27. Transformador delta – delta con cargas no lineales balanceadas

Fuente: Matlab y Simulink





Fuente: Matlab y Simulink

En la simulación realizada con cargas no lineales balanceadas, se observa (figura 29), como por las líneas de alimentación de la carga conectada en delta, no circulan los armónicos impares múltiplos de tres.



Figura 29. Corriente por las líneas secundarias (Ia)

Fuente: Matlab y Simulink

El voltaje entre las líneas secundarias, está compuesto principalmente por armónicos impares que no sean múltiplos de tres (5_{to} , 7_{mo}). El THDV obtenido, para los valores empleados en la simulación (no mostrada), es de un 0,88 %.

La corriente por el secundario del transformador conectado en delta, es una corriente distorsionada, compuesta por armónicos impares que no sean múltiplos de tres. En la figura 30, se observa con claridad la existencia de los armónicos quinto, séptimo, decimoprimero y decimotercero.



Figura 30. Corriente en el secundario del transformador conectado en delta

Fuente: Matlab y Simulink

La corriente por el primario del transformador conectado en delta, se comporta de forma similar a la corriente por el secundario conectado también en delta.

Las corrientes por las líneas de alimentación del banco trifásico conectado en delta – delta, son corrientes distorsionadas, pues las cargas que se están alimentando son cargas no lineales. En la figura 31, se muestra la corriente por la fase A, siendo las corrientes por las fases B y C similares. Como corresponde a un sistema trifásico de tres líneas, la corriente de fase no tiene armónicos impares múltiplos de tres.



Figura 31. Corriente por las líneas primarias (IA)

La distorsión del voltaje entre las líneas de alimentación del banco de transformadores, es pequeña (0,40 %), dado por las características de la fuente de alimentación empleada en la simulación. Como corresponde a un sistema de tres conductores y cargas no lineales, los armónicos predominantes son: quinto, séptimo, decimoprimero y decimotercero.

• Transformador estrella – delta. Balanceado. Cargas no lineales

En este análisis (figura 32), se simula un banco trifásico estrella – delta, constituido por tres transformadores monofásicos de 10 kVA 2400 120 120 V. Las cargas conectadas en delta son idénticas, cada una de las cuales consume alrededor de 1000 W y 400 VAR inductivo.

Fuente: Matlab y Simulink



Figura 32. Transformador estrella – delta. Cargas no lineales balanceadas

Fuente: Matlab y Simulink

La corriente que circula por las fases de la carga conectada en delta, es una corriente distorsionada, debido a la no linealidad de las cargas. La corriente por las fases de la carga en delta, está constituida por armónicos impares, a medida que el orden de los armónicos aumenta, su amplitud disminuye.

Por las líneas de alimentación de la carga conectada en delta, no circulan los armónicos de corriente, impares múltiplos de tres. A los efectos de estos armónicos, el transformador está aislado de la carga.

El voltaje entre las líneas secundarias, está compuesto principalmente por armónicos impares que no sean múltiplos de tres. El THDV obtenido, para los valores empleados en la simulación (no mostrada), es de un 1,03 %.

La corriente por el secundario del transformador conectado en delta, es una corriente distorsionada, compuesta por armónicos impares que no sean múltiplos de tres. En la figura 33, se observa con claridad la existencia de los armónicos quinto, séptimo, decimoprimero y decimotercero.



Figura 33. Corriente en el secundario del transformador conectado en delta (IAB)

Las corrientes por las líneas de alimentación del transformador, para este circuito específico, son corrientes distorsionadas, constituidas por armónicos impares, con excepción de los impares múltiplos de tres.

• Empleo de reactores para disminuir la distorsión armónica provocada por el convertidor de 6 pulsos

En la figura 34 se observa un convertidor de 6 pulsos que no emplea reactores en las líneas de entrada. El convertidor alimenta un motor de corriente directa.

Fuente: Matlab y Simulink



Figura 34. Convertidor de 6 pulsos sin reactores.

Fuente: Matlab y Simulink

En la figura 35 se muestra el espectro armónico de la corriente de línea IA, para el convertidor de 6 pulsos sin reactores en las líneas de entrada, mostrado en la figura 34. Se observan los armónicos de orden $6n \pm 1$ (n = 1,2,3...), y la forma de onda de la corriente de línea IA. El valor de la distorsión armónica total de la corriente (THDI) es de 30,88 %.





Fuente: Matlab y Simulink

En la figura 36 se muestra el esquema correspondiente a un convertidor de 6 pulsos que emplea reactores en las líneas de entrada. El esquema del convertidor que alimenta un motor de corriente directa, es similar al mostrado en la figura 42, al cual se le han añadido reactores en las líneas de entrada al rectificador de 6 pulsos.

Un reactor en línea, es comúnmente un simple inductor. La reactancia inductiva del reactor presenta una gran oposición a la circulación de armónicos de corriente de un orden elevado $(X_L = 2\pi fL)$. Al aumentar la frecuencia, también aumenta la reactancia. El reactor presenta poca oposición a la componente fundamental y gran oposición a los componentes armónicos de la corriente de línea, por lo que las corrientes armónicas disminuyen cuando un reactor se coloca en cada línea. El voltaje de salida en el reactor de línea mostrará distorsión en su forma de onda y limitará frecuentemente el voltaje pico.

El reactor actúa como un elemento limitador de corriente, filtra la forma de onda y atenúa los ruidos y armónicos asociados con el trabajo de un accionamiento para el control de motores. Los reactores de línea protegen los accionamientos de velocidad variable, contribuyen a extender la vida útil del motor, reducen la distorsión en la línea de alimentación, atenúan los armónicos y evitan el trabajo erróneo de los dispositivos de protección. Los reactores de línea son clasificados de acuerdo a su impedancia en %, para mantener cierta similitud con la clasificación convencional de los transformadores de aislamiento, empleados en los accionamientos.



Figura 36. Convertidor de 6 pulsos con reactores de línea

Fuente: Matlab y Simulink

En la figura 37 se muestra el espectro armónico de la corriente de línea IA, para el convertidor de 6 pulsos con reactores en las líneas de entrada, mostrado en la figura 61. Se observan los armónicos de orden $6n \pm 1$ (n = 1, 2, 3...) y la forma de onda de la corriente de línea IA. El valor de la distorsión armónica total de la corriente (THDI) es de 15,22 %, inferior al obtenido para el mismo circuito sin empleo de reactores de línea (30,88 %). La magnitud del 5to armónico (el de mayor amplitud), es de un 13 % del valor de la fundamental, mientras que en el caso anterior sin el empleo de reactores era de un 27 %.



Figura 37. Corriente de línea a la entrada del convertidor de 6 pulsos con reactores

Fuente: Matlab y Simulink

En los años sesenta del siglo XX, cuando solo se disponía de elementos semiconductores de una potencia limitada, los accionamientos de doce pulsos proporcionaban una forma más simple y económica de obtener rangos más elevados de corriente que mediante la conexión de los elementos semiconductores en paralelo. Esta técnica aún es empleada en nuestros días, en aplicaciones de gran potencia. Un diagrama típico de un accionamiento de doce pulsos, se muestra en la figura 38.

El circuito de entrada del accionamiento, consiste de dos rectificadores de seis pulsos, desfasados por 30 grados. Los 30 grados de desfasaje se obtienen usando un transformador de aislamiento con un primario conectado en delta, un primer secundario conectado en delta y un segundo secundario conectado en estrella. La corriente por el primario del transformador, es la suma de las corrientes consumidas por cada rectificador de seis pulsos o una forma de onda de doce pulsos.

Los armónicos de la corriente de entrada del circuito rectificador, son una función del número de pulsos, y puede ser expresado como:

 $n = kp \pm 1$ k = 1, 2, 3... p = número de pulsos

Para un rectificador de seis pulsos, la corriente de entrada tendrá componentes armónicos de los siguientes múltiplos de la frecuencia fundamental: 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, etc. Para un sistema de doce pulsos como el mostrado en la figura 65, la corriente de entrada tendrá componentes armónicos de los siguientes múltiplos de la frecuencia fundamental: 11, 13, 23, 25, 35, 37, etc.



Figura 38. Accionamiento de 12 pulsos

Fuente: Matlab y Simulink

En la figura 39, se observa como los armónicos 5_{to}, 7_{mo}, etc., no aparecen en la corriente de entrada del accionamiento de 12 pulsos. Como la magnitud de cada armónico es proporcional al recíproco del número del armónico, el sistema de 12 pulsos tiene una distorsión armónica total de corriente (THDI) menor que la del sistema de 6 pulsos. En el ejemplo simulado el THDI es igual a 7,37 %, mientras que para el rectificador de 6 pulsos simulado en las figuras 3.34, y 3.35, el valor del THDI obtenido fue de 30,88 %, mucho mayor.

Para que se logren los resultados teóricos esperados con respecto a la reducción de armónicos, los dos rectificadores de 6 pulsos, deben entregar la misma corriente. Cuando los rectificadores de 6 pulsos son conectados en paralelo, se requiere que los voltajes secundarios de los transformadores que alimentan a cada rectificador sean iguales. A causa de la diferencia en la impedancia de los transformadores y el voltaje de salida en circuito abierto de los mismos, esto solo puede lograrse prácticamente para una condición específica de carga (normalmente para la carga nominal). Esto es un problema significativo relacionado con la conexión de los rectificadores en paralelo.

El circuito empleado (figura 38), corresponde a dos rectificadores de 6 pulsos conectados en serie. En esta conexión, cada rectificador entrega la mitad del voltaje que exige la carga, y se garantiza que la corriente entregada por cada rectificador sea la misma. Para aplicaciones donde la distorsión armónica, en vez de elevadas corrientes de salida sea lo más importante, la conexión en serie es mucho más simple de implementar que la conexión en paralelo.



Figura 39. Corriente de línea a la entrada del accionamiento de 12 pulsos

Fuente: Matlab y Simulink

4.2. Discusión de los Resultados

4.2.1. Determinación de la capacidad del transformador cuando suministra corrientes de carga no sinusoidales

La determinación precisa de las pérdidas extras por corrientes parásitas, producidas por corrientes armónicas, es un asunto extremadamente complejo, que es altamente dependiente del diseño y construcción del transformador y puede requerir análisis computacionales sofisticados [45].

El presente trabajo, no pretende llevar a cabo lo anterior, sino solo elaborar programas de computación escritos en MATLAB, los cuales permite describir una carga no lineal y evaluar la capacidad del transformador existente para alimentar la misma, sin que sufra sobrecalentamiento, lo que pudiera dañarlo o acortar su vida útil.

En el procedimiento utilizado, es fundamental el conocimiento del contenido armónico de la corriente de carga, lo cual no constituye un problema, pues en el mercado existen analizadores de redes que brindan con precisión el contenido armónico de la corriente de carga, el valor eficaz verdadero de la misma y muchos datos más.

El análisis de la capacidad real del transformador ante cargas no lineales, que se ha desarrollado en los programas elaborados, no requiere información detallada sobre la distribución de la densidad de pérdidas dentro de cada uno de los enrollados del transformador (en la mayoría de los casos no se dispone de esta información detallada), sino, solo se requiere de los datos generalmente brindados en los pasaportes o formularios del transformador de distribución, al alcance de los usuarios. De acuerdo a las consideraciones que se asumen, la evaluación es conservativa (existe un margen probado de seguridad). Este procedimiento está avalado por numerosas pruebas realizadas por el Grupo de Trabajo del Comité de Transformadores de la IEEE.

En este análisis, las pérdidas del transformador se clasifican en pérdidas sin carga (pérdidas de excitación); pérdidas con carga (pérdidas de impedancia); y pérdidas totales (la suma de las pérdidas sin carga y con carga). Las pérdidas con carga se subdividen en pérdidas I²R y

"pérdidas dispersas o adicionales". Las pérdidas dispersas se determinan substrayendo las I²R (calculadas a partir de las resistencias medidas) de las pérdidas con carga (pérdidas de impedancia).

Las pérdidas dispersas se subdividen en pérdidas dispersas en los enrollados y pérdidas dispersas en otros componentes que no sean los enrollados (P_{OSL}). Las pérdidas dispersas en los enrollados constituyen las pérdidas por corrientes parásitas en los conductores del enrollado, (P_{EC}). Las pérdidas totales con carga serán:

$$P_{LL}=I^2R + P_{EC} + P_{OSL}(W)$$
(3.1)

Si el valor eficaz de la corriente de carga se incrementa debido a los componentes armónicos, las pérdidas I²R se incrementarán en correspondencia.

Las pérdidas por corrientes parásitas en los enrollados (P_{EC}), en el espectro de frecuencia de alimentación, tiende a ser proporcional al cuadrado de la corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia. Es esta característica la que puede causar pérdidas excesivas en los enrollados, y por lo tanto, un aumento de temperatura anormal en los enrollados de transformadores que alimentan cargas no lineales.

Es conocido que otras pérdidas dispersas (P_{OSL})) en el núcleo, fijaciones, y partes estructurales, también incrementan proporcionalmente al cuadrado de la corriente de carga. Estudios realizados por fabricantes y otros centros de investigación, han demostrado que las pérdidas por corrientes parásitas en las barras de conexión, conexiones y partes estructurales, incrementan por un factor exponente armónico de 0,8 o menos. En los programas elaborados, se usa un factor de 0,8. El aumento de temperatura en estas regiones es menos crítico que en los enrollados, para transformadores tipo seco (enfriados por aire). No obstante, estas pérdidas deben ser tenidas en consideración en el caso de transformadores con enfriamiento por aceite.

Para transformadores con enfriamiento líquido, el aumento de la temperatura del nivel superior del aceite sobre la temperatura del medio ambiente (θ TO), incrementará en la medida que las pérdidas con carga total incrementen debido a la presencia de armónicos.

Los programas elaborados tienen en cuenta las siguientes premisas para determinar la capacidad equivalente del transformador:

Los transformadores, excepto por la distribución armónica de la corriente, operan en condiciones normales.

Se considera que los transformadores son capaces de suministrar una corriente de carga de cualquier contenido armónico, siempre que las pérdidas totales con carga, las pérdidas con carga en cada enrollado, y la densidad de pérdidas en la región de mayores pérdidas por corrientes parásitas en los enrollados, no exceda los niveles de plena carga, a frecuencia nominal y condiciones de diseño sinusoidal. Se considerará que la condición límite es la densidad de pérdidas en la región de mayores pérdidas por corrientes parásitas en las región de mayores pérdidas por corrientes parásitas en las región de mayores pérdidas por corrientes parásitas en los enrollados; esta es la base usada en los programas para determinar la capacidad equivalente del transformador.

Los programas exigen, que las características de la corriente de carga no sinusoidal deben ser definidas en términos de la magnitud de la componente de frecuencia fundamental. Cada componente de frecuencia debe ser determinada a partir de mediciones en el sistema de potencia, empleando analizadores de redes.

El método simple de cálculo de la capacidad equivalente del transformador, asume que las corrientes parásitas a todas las frecuencias armónicas, generan pérdidas en un camino de resistencia constante. De hecho, el efecto pelicular (skin) se hace más pronunciado al incrementarse la frecuencia y las perdidas por corrientes parásitas en los enrollados serán menores que las calculadas. Los resultados son muy conservativos para los armónicos superiores incluidos en los cálculos, particularmente para los de orden superior al 19_{no}.

Ya que el mayor problema de un transformador operando con cargas no lineales será el sobrecalentamiento de los enrollados, es conveniente considerar la densidad de pérdidas en los enrollados sobre una base en por unidad (la corriente base es la corriente nominal y la densidad de pérdidas base es la densidad de pérdidas I²R a corriente nominal).

Las pérdidas totales aplicadas a condiciones de carga nominal sobre bases en por unidad serán:

$$P_{LL-R}(pu) = 1 + P_{EC-R}(pu) + P_{OSL-R}(pu)$$
 (3.2)

Dadas las pérdidas por corrientes parásitas bajo condiciones nominales para un enrollado del transformador o parte del enrollado, (PEC-R), las pérdidas por corrientes parásitas debidas a cualquier corriente de carga no sinusoidal definida pueden ser expresadas en por unidad como:

$$P_{EC}(pu) = P_{EC-R}(pu) \sum_{h=1}^{h=hmax} I_h(pu)^2 h^2 pu$$
(3.3)

La expresión anterior asume que la corriente de trabajo es la corriente nominal del transformador.

Esta situación ocurre muy raramente en la práctica, por lo que se requiere un nuevo término para describir las pérdidas por corrientes parásitas en los enrollados, a la corriente de trabajo y frecuencia nominal, P EC-O.

Además de las premisas señaladas anteriormente, las siguientes asunciones son necesarias para determinar la capacidad equivalente del transformador:

Las pérdidas por corrientes parásitas son aproximadamente proporcionales al cuadrado de la frecuencia. Asumir lo anterior, implicará que los cálculos serán más precisos para conductores pequeños y armónicos inferiores, con errores mayores para una combinación de conductores más largos y armónicos superiores. Las pérdidas por corrientes parásitas son una función de la corriente en los conductores. Cualquier ecuación para las pérdidas puede ser expresada en términos del valor eficaz de la corriente de carga, I.

Se aplica la superposición de pérdidas por corrientes parásitas, lo cual permite la suma directa de las pérdidas por corrientes parásitas debidas a los diferentes armónicos.

El factor de pérdidas armónico (FHL), es la relación de las pérdidas totales por corrientes parásitas debidas a los armónicos (PEC), a las pérdidas por corrientes parásitas a la frecuencia nominal, como si no existieran corrientes armónicas (PEC-O). La definición anterior en forma de ecuación, con los valores de las corrientes armónicas normalizadas a la fundamental o primer armónico:

$$F_{HL} = \frac{P_{EC}}{P_{EC-O}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=hmax} \left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=hmax} \left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2}$$
(3.4)

El factor de pérdidas armónico es función de la distribución de corriente armónica.

Existe un factor de pérdidas armónico para otras pérdidas adicionales (dispersas) (FHL-STR). No obstante, las pérdidas debidas a las conexiones en las barras, partes estructurales, tanque, etc., son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga y a la frecuencia armónica al exponente 0,8.

La ecuación correspondiente al factor de pérdidas armónico para otras pérdidas adicionales (dispersas), normalizado a la corriente fundamental es:

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=hmax} {\left[\frac{I_h}{I_1}\right]}^2 h^{0,8}}{\sum_{h=1}^{h=hmax} {\left[\frac{I_h}{I_1}\right]}^2}$$
(3.5)

Para que los cálculos a realizar por los programas, puedan realizarse con datos limitados, que se pueden obtener sin dificultad en los pasaportes o formularios técnicos de los transformadores, se asumen ciertas consideraciones, lo que permite que los resultados sean conservativos (margen de seguridad).

Debe disponerse de los datos exigidos en los programas, referentes al transformador, y al espectro armónico de la corriente de carga, el cual debe obtenerse con analizadores de redes.

Una parte de las pérdidas dispersas (adicionales), determinadas por los multiplicadores que se muestran a continuación, se asume que son pérdidas por corrientes parásitas en los enrollados. Esta es una asunción conservativa. El 67% de las pérdidas totales dispersas, se

asumen que son pérdidas por corrientes parásitas en los enrollados para transformadores tipo seco. El 33% de las pérdidas totales dispersas, se asumen que son pérdidas por corrientes parásitas en los enrollados para transformadores con enfriamiento por aceite.

Se asume que las pérdidas I²R están distribuidas uniformemente en cada enrollado.

Se asume que las pérdidas por corrientes parásitas se distribuyen entre los enrollados de la siguiente forma:

60% en los enrollados de bajo voltaje y 40% en los de alto voltaje, para todos los transformadores que tienen una corriente nominal (sin enfriamiento forzado) menor que 1000 A, (independiente de la relación de vueltas).

60% en los enrollados de bajo voltaje y 40% en los de alto voltaje, para todos los transformadores que tienen una relación de vueltas de 4:1 o menor.

70% en los enrollados de bajo voltaje y 30% en los de alto voltaje, para todos los transformadores que tienen una relación de vueltas mayor que 4:1, y que además tienen uno o más enrollados con una corriente nominal (sin enfriamiento forzado) mayor que 1000 A.

La distribución de pérdidas dentro de cada enrollado, se asume que no es uniforme. Se asume que la densidad máxima de pérdidas por corrientes parásitas se encuentra en la región del punto más caliente del enrollado, y se asume que es 400% de la densidad de pérdidas por corrientes parásitas promedio para ese enrollado.

A continuación, se muestran algunos de los resultados obtenidos, del programa de análisis de un transformador con enfriamiento por aceite, que alimenta a una carga no lineal.

Datos:

- Transformador: Trifásico 2500 kVA Delta Estrella 34,5 kV a 2,4 kV
- Resistencia del primario y secundario: 4,0460 y 0,0166 Ω
- Aumento permisible de temperatura en el tope superior del aceite y en el punto más caliente del enrollado sobre la temperatura ambiente con carga nominal: 55 y 65 °C

- Pérdidas en vacío: 5100 W
- Perdidas al 100% de carga (sin considerar las pérdidas en vacío) bajo condiciones nominales: 21941 W
- Corriente eficaz verdadera tomada por la carga: 451 A
- Armónico máximo a considerar: 19
- Valores en p.u. de los armónicos de la corriente de carga con respecto a la fundamental:
- 1:1 7:0.186 13:0.0512 19:0.0387
- 3: 0.453 9: 0.0915 15: 0.0425
- 5: 0.267 11: 0.0712 17: 0.0402

Resultados:

Tipo de perdidas	Perdidas nominales	Perdidas (% carga) (w)	Multiplicador armónico	Perdidas (% carga y
			(Fhl. y Fhl -	armónicos) (w)
			STR)	
Sin carga (vacio)	5100	5100		5100
I ² R	19615	14592		14592
Corriente parasitas	767	571	7.11	4060
en los enrollados				
Otras perdidas	1559	1160	1.55	1798
Adicionales				
Pérdidas totales	27041	21423		25550

Tabla 3. Perdidas vs Cargas

Fuente: Darío M – 2017

• Aumento de la temperatura en el punto más caliente del enrollado sobre la temperatura ambiente, considerando % carga y armónicos: 66.7 °C.

El aumento de la temperatura en el punto más caliente del enrollado, sobre la temperatura ambiente, excede el límite permisible con carga nominal. DEBE DISMINUIRSE LA CARGA CONECTADA AL TRANSFORMADOR.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Los resultados principales, de forma resumida, son los siguientes:

- El estudio realizado ha permitido disponer de una amplia bibliografía actualizada, sobre el tema de los armónicos en general y la influencia de los mismos sobre los transformadores de distribución de potencia en particular, lo cual se logró mediante una extensa búsqueda bibliográfica, estudio y revisión crítica de la misma.
- Se han obtenido a partir de las simulaciones realizadas, numerosos datos que ilustran el trabajo de los sistemas de distribución de energía eléctrica y de los transformadores de distribución en particular, bajo la influencia de los armónicos generados, debido a la presencia de cargas no lineales. Se empleó el lenguaje de programación MatLab y su simulador Simulink, dentro del cual se utilizó de manera intensiva el paquete de funciones especializadas en temas de sistemas de potencia eléctrica, Power System Blockset, para la programación, simulación y análisis de los diferentes casos tratados en el trabajo realizado.
- Fueron simuladas diferentes tipos de cargas no lineales analizándose el comportamiento armónico de las mismas y su influencia en el transformador de distribución. Se consideraron tanto cargas balanceadas como desbalanceadas, cargas monofásicas y trifásicas, cargas tipo computadora, convertidores de seis pulsos, convertidores de doce pulsos.
- Se simularon diferentes técnicas de mitigación de armónicos y se analizaron los resultados obtenidos. Entre estas, fueron estudiadas la forma de conexión de los devanados de los transformadores trifásicos, el empleo de reactores en línea, el empleo de filtros armónicos, el empleo de convertidores con mayor número de pulsos.

 Fueron resueltos un conjunto de problemas a modo de ejemplos, que ilustran el análisis de un circuito eléctrico ante la presencia de armónicos, entre los cuales podemos señalar: el cálculo del factor K de una carga no lineal y la desclasificación (derating) de los transformadores de distribución.

5.2. Recomendaciones

- Continuar aplicando las técnicas empleadas en el presente trabajo, al análisis del comportamiento del transformador no lineal, ante la presencia de armónicos, en condiciones de carga y voltajes desbalanceados.
- Establecer como política de control de calidad del servicio por parte de las Empresas Eléctricas Distribuidoras un protocolo de Análisis de las cargas no lineales y armónicos a los cuales son sometidas.
- Realizar seguimientos a través de simulaciones a transformadores a los cuales se les ha aplicado técnicas de mitigación de armónicos como reactores en línea o filtros de armónicos antes, durante y después de las implementaciones necesarias para lograr reducir los armónicos.
- Tomando en cuenta que estos efectos(armónicos) son a veces muy difíciles de evaluar junto al costo de los equipos de medición para cuantificarlo. Entonces el conocimiento de aspectos generales de las causas y problemas que producen los armónicos nos ayudan a prevenir y tomar medidas en pos de la reducción de los mismos en busca de un sistema eléctrico más efectivo, seguro y de calidad.

CAPITULO VI BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

- EC&M, «Effects of harmonics on power systems [en línea].,» 1 Octubre 1995. [En línea]. Available: http://www.ecmweb.com/mag/electric_effects_harmonics_power_2/. [Último acceso: 02 02 2004].
- M. Zucker, «APPLICATION GUIDE FOR SOLVING HARMONICS PROBLEMS,» 07 07
 2004. [En línea]. Available: http://www.myronzuckerinc.com/Publications/HARMONIC%20APPL%20GUIDE.pdf. [Último acceso: 13 09 2004].
- [3] S. a. SWELLs, «Dranetz-BMI,» 16 02 1998. [En línea]. Available: http://www.dranetzbmi.com/pdf/sags-swells.pdf. [Último acceso: 18 06 2004].
- [4] Cinergy.PSI, «Power Quality,» 10 01 2004. [En línea]. Available: http://www.cinergypsi.com/Exploring_Energy/Power_Quality/tech_tip_ten.asp. [Último acceso: 04 05 2004].
- [5] O. Hernández, «El problema de los Armónicos en los transformadores. Estado Mundial del Arte,» *Energética*, vol. 26, nº 2, pp. 1-8, 2005.
- [6] S. N. a. A. E. E. Makarov, Corrected Harmonic Loss Factor for Transformers Suplying Nonsinusoidal Loads Currents, Worcester, MA. 01609, USA, 2002.
- [7] I. C57.110-1998., RecommendedPractice for Establishing Transformer Capability when Suplying Nonsinusoidal Load Current, New York, USA, 1999.
- [8] Ece, «Utexas,» 22 09 2000. [En línea]. Available: http://www.ece.utexas.edu/~grady/C1_Introduction.pdf. [Último acceso: 02 03 2004].
- [9] F. Index, «HVDC,» 03 06 1999. [En línea]. Available: http://www.factindex.com/h/hv/hvdc.html. [Último acceso: 22 02 2004].
- [10] P. Quality, «Aub.org,» 15 03 2003. [En línea]. Available: http://www.aub.org/indust_quality.php. [Último acceso: 09 10 2004].
- [11] Dranetz-BMI, «HARMONICS Understanding the Facts,» 16 02 1998. [En línea]. Available: http://www.dranetz-bmi.com/pdf/harmonicspart2.pdf. [Último acceso: 04 10 2004].
- [12] A. Techniques, «Resonance Elimination,» 23 01 2002. [En línea]. Available:

http://www.schneider-electric.ca/www/fr/techpaper/html/reseli.htm. [Último acceso: 04 10 2004].

- [13] S. Group, «K Rated Transformers,» 02 06 1998. [En línea]. Available: http://www.stanleygroup.com/krated.pdf. [Último acceso: 02 04 2004].
- [14] A. Technologies, «Harmonics,» 06 09 2002. [En línea]. Available: http://www.alpestechnologies.com/gb/prdt_harmoniques_influence.htm. [Último acceso: 10 05 2004].
- [15] EPCOS, «AC Characteristics of HighCap Ceramic Capacitors,» 01 07 2002. [En línea]. Available: http://www.epcos.com/web/produkt_katalog/pdf/intro.pdf. [Último acceso: 26 09 2004].
- [16] EC&M, «Effects of harmonics on power systems,» 01 02 1996. [En línea]. Available: http://www.ecmweb.com/mag/electric_effects_harmonics_power/. [Último acceso: 06 11 2004].
- [17] E. UTEXAS, «Effects and Symptoms,» 22 09 2000. [En línea]. Available: http://www.ece.utexas.edu/~grady/C5_Effects_and_Symptoms.pdf. [Último acceso: 07 11 2004].
- [18] QM-Lexikon, «CENELEC,» 01 04 1998. [En línea]. Available: http://www.quality.de/lexikon/cenelec.htm. [Último acceso: 10 05 2004].
- [19] IEC, «About the IEC,» 01 01 2004. [En línea]. Available: http://www.iec.ch/about/history/hentry-e.htm. [Último acceso: 11 10 2004].
- [20] R. Lam, «Metodología para la confección de un proyecto de investigación,» 18 08 2005. [En línea]. Available: http://bvs.sld.cu/revistas/hih/vol21_2_05/hih07205.pdf.
- [21] M. Amezcua, «El protocolo de investigación,» Antonio Frías Osuna, Salud Pública y educación para la salud, pp. 189-199, 2000.
- [22] R. Hernàndez, C. Fernández y B. Baptista, Metodología de la Investigación, Mèxico: McGraw-Hill, 2010.
- [23] M. Tamayo, El proceso de la investigación científica, México: Limusa, 2009.
- [24] C. Méndez, Metodología, México: Limusa, 2006.

- [25] A. Berthier, «Materiales para el taller de elaboración de proyectos,» 07 2004. [En línea]. Available: http://www.smo.edu.mx/colegiados/apoyos/marco_teorico.pdf.
- [26] CES, Reglamento de Regimen Académico, Quito: CES, 2015.
- [27] Revista Ciencia y Tecnología de la UTEQ, «Instrucciones para autores,» [En línea]. Available: http://www.uteq.edu.ec/revistacyt/archivositio/instrucciones.pdf. [Último acceso: 05 06 2014].
- [28] Senescyt, «Directrices para la asignación, distribución y operación de la herramienta de prevención de coincidencia y/o plagio académico,» Senescyt, Quito, 2010.
CAPITULO VII ANEXOS

Introducción a Matlab y Simulink

Regulación Automática Ingeniero en Electrónica. Curso 2006/2007. Javier Aracil y Fabio Gómez–Estern

1. Introducción

Matlab es un programa de gran aceptación en ingeniería destinado realizar cálculos técnicos científicos y de propósito general. En él se integran operaciones de cálculo, visualización y programación, donde la interacción con el usuario emplea una notación matemática clásica.

Los usos y aplicaciones típicos de Matlab son:

- Matemáticas y cálculo.
- Desarrollo de algoritmos.
- Adquisición de datos.
- Modelado, simulación y prototipado.
- Análisis y procesado de datos.
- Gráficos científicos y de ingeniería.
- Desarrollo de aplicaciones.

El tipo básico de variable con el que trabaja Matlab es una matriz que no requiere ser dimensionada previamente en la declaración. Una de las características más interesantes consiste en que el álgebra vectorial y matricial se expresa con la misma sintaxis que las operaciones aritméticas escalares. Por ejemplo, en lenguaje C, para realizar la suma de dos variables enteras o reales b y c, escribiremos:

a=b+c;

Mientras que en Matlab, emplearemos la misma sentencia tanto si b y c son enteros, reales, vectores o matrices.

Anexo 2. Componentes de Matlab

2. Componentes de Matlab

Matlab consta de cinco partes fundamentales:

- Entorno de desarrollo. Se trata de un conjunto de utilidades que permiten el uso de funciones Matlab y ficheros en general. Muchas de estas utilidades son interfaces gráficas de usuario. Incluye el espacio de trabajo Matlab y la ventana de comandos.
- 2. La librería de funciones matemáticas Matlab. Se trata de un amplio conjunto de algoritmos de cálculo, comprendiendo las funciones más elementales como la suma, senos y cosenos o la aritmética compleja, hasta funciones más sofisticadas como la inversión de matrices, el cálculo de autovalores, funciones de Bessel y transformadas rápidas de Fourier.
- Gráficos. Matlab dispone de un conjunto de utilidades destinadas a visualizar vectores y matrices en forma de gráficos. Existe una gran cantidad de posibilidades para ajustar el aspecto de los gráficos, destacando la visualización tridimensional con opciones de iluminación y sombreado, y la posibilidad de crear animaciones.
- El interfaz de aplicación de Matlab (API). Consiste en una librería que permite escribir programas ejecutables independientes en C y otros lenguajes, accediendo, mediante DLLs, a las utilidades de cálculo matricial de Matlab.

De estos cuatro puntos, en este capítulo trataremos, de forma somera, los dos primeros.

Los ejemplos que se presentan en este texto, se han desarrollado para la versión de Matlab 7.0. ellos no impide que puedan funcionar con otras versiones del programa. Concretamente, para la versión 6.5 y posteriores está prácticamente garantizado el funcionamiento.

Sin embargo, hay que señalar que algunos complementos de Matlab no aparecen incluidos en la instalación básica del mismo, por tanto un programa que funciona en un ordenador con la versión 7.0 instalada, puede fallar en otro ordenador con la misma versión.

La gestión de complementos de Matlab se realiza mediante lo que se denominan toolboxes (paquetes de herramientas). Un Toolbox de Matlab es un conjunto de funciones y algoritmos de cálculo especializados en un área de conocimiento: finanzas, tratamiento de señales, teoría de sistemas, etc. Para el desarrollo del curso es necesario

3. Simulink

Simulink es una aplicación que permite construir y simular modelos de sistemas físicos y sistemas de control mediante diagramas de bloques. El comportamiento de dichos sistemas se define mediante funciones de transferencia, operaciones matemáticas, elementos de Matlab y señales predefinidas de todo tipo.

Simulink dispone de una serie de utilidades que facilitan la visualización, análisis y guardado de los resultados de simulación. Simulink se emplea profusamente en ingeniería de control.

En el presente curso trabajaremos con la versión 6.0, que viene incluida en el paquete de Matlab 7.0. Su instalación es opcional, por tanto debemos seleccionar la opción correspondiente al instalar el programa

Anexo 4. El entorno de trabajo de Matlab

4. El entorno de trabajo de Matlab

4.1. Ayuda en línea

Si se ha seleccionado la la opción correspondiente en la instalación de Matlab, podremos acceder a la ayuda en línea en todo momento pulsando la tecla F1. Dicha documentación está organizada con un índice en forma de árbol y mediante herramientas de navegación como hipervínculos. Es sumamente recomendable su uso, tanto a modo de introducción como de referencia para temas específicos. Si se desea conocer la documentación específica asociada a un comando de Matlab, entonces se tecleará

>> doc nombre_comando

en la línea de comandos de Matlab.

Anexo 5. Organización de ventanas

4.2. Organización de ventanas

La figura 1 muestra la organización por defecto de ventanas que nos encontramos cuando arrancamos Matlab por primera vez. Las ventanas que en ella aparecen, de arriba a abajo son: en la parte izquierda, la estructura del directorio donde nos encontramos, y debajo de ella la historia de los comandos que se han tecleado en el pasado; en la mitad derecha nos encontramos, arriba, la ventana de edición de programas Matlab (que se escriben en un lenguaje propio de Matlab y se almacenan en ficheros .m), y debajo la línea de comandos, donde se sitúa el cursor para teclear comandos de Matlab.



Figura 1: Entorno de trabajo Matlab.

Inicialmente trabajaremos con la línea de comandos de Matlab.

Anexo 6. Operaciones básicas en líneas de comandos

4.3. Operaciones básicas en línea de comandos

Como se ha dicho previamente, en Matlab todos los objetos son matrices. Un escalar no es más que una matriz 1×1 . En la línea de comandos, podemos asignar un nombre simbólico para identificar una matriz.

>> a=[10; 20; -15]; % Asignacion

Esto es una asignación de un vector de columna que llevará el nombre a. A su derecha aparece un comentario, que tiene su utilidad cuando redactemos programas en

Anexo 7. Sintaxis de vectores y matrices

4.4. Sintaxis de vectores y matrices

Las matrices (y vectores como caso particular de las mismas) se expresan en Matlab empleando corchetes ([]); separando las filas por espacios o comas (,) y las columnas por ';'. De este modo, se puede crear un objeto matriz del siguiente modo:

>> mat=[1 2 3; 4 5 6; 7 8 9]

mat = 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Cuando se trata de un escalar, podemos prescindir de los corchetes

>> rad=3.1415;

Los elementos de las matrices pueden ser reales o complejos. En este último caso se emplea la letra i para representar el valor $\sqrt{-1}$. Como ejemplo crearemos el vector fila v = [2 + 3i, -5i, 3].

```
>> v=[2+31, -51, 3]
v =
    2.0000 + 3.00001 0 - 5.00001 3.0000
```

El acceso a elementos de una matriz previamente definida puede realizarse especificando la fila y columna del elemento que nos interesa entre paréntesis

>> mat(2,3) ans = 6

Además, dentro de estos paréntesis podemos indicar variables u operaciones más complejas, lo que da una gran potencia al desarrollo de algoritmos.

Una vez definidos los objetos con sus identificadores, podemos realizar operaciones aritméticas entre ello con total simplicidad. Para las operaciones vectoriales y matriciales, Matlab verificará la coherencia de las dimensiones de los operandos y si no hay producirá error producirá un resultado con las dimensiones adecuadas.

....

```
>> v1=[2+3i, -5i, 3];
>> v2=[0, 1, 7];
>> v3=v1+2*v2+[1, 1, 1]
v3=
   3.0000 + 3.0000i   3.0000 - 5.0000i   18.0000
```

97

4.5. Operaciones básicas con Matlab

La siguiente tabla ilustra las básicas aritméticas y lógicas que podemos realizar con Matlab.

Expresión en Matlab) Operación		
+	Suma aritmética		
-	Resta aritmética o cambio de signo		
	Multiplicación aritmética		
1	División		
2	Elevar un número a una potencia		
<	Relación "menor que"		
>	Relación "mayor que"		
<=	Relación "menor o igual que"		
>=	Relación "mayor o igual que"		
	Relación "igual que"		
	Relación "distinto que"		
de .	producto lógico (operación "y")		
1	suma lógica (operación .º")		
-	negación (operación "no")		

Cuadro 1: Operaciones aritméticas y lógicas de en Matlab.

Todas estas operaciones se aplican indistintamente a escalares, vectores y matrices, y se pueden emplear de dos modos diferentes: en primer lugar, Matlab funciona directamente como una calculadora, para lo cual tecleamos expresiones en línea de comandos para obtener inmediatamente el resultado de las mismas:

>> 12*24.8 ans = 297.6000

Así mismo se pueden emplear las operaciones dentro de otras expresiones más amplias, logrando así escribir expresiones matemáticas de cualquier complejidad.

>> x1=-b+sqrt(b^2-4*a*c)/(2*a);

Anexo 9. Funciones en Matlab

4.6. Funciones en Matlab

Buena parte de las operaciones que se realizan con Matlab, son llamadas a funciones. Las funciones procesan información, por lo que poseen datos de entrada y de salida,

que pueden ser matriciales. Los datos de entrada se especifican entre paréntesis, y si son varios separados por comas. Por ejemplo, la siguiente función calcula la raíz cuadrada de su único valor de entrada, que es el vector fila [4, 2].

>> sqrt([4 2]) ans = 2.0000 1.4142

Las funciones son programas escritos por el usuario o incorporados en el paquete básico de Matlab. Entre estas últimas destacan las siguientes funciones:

Nombre	e Función	
sin	Seno	
sinh	Seno hiperbólico	
COB	Coseno	
cosh	Coseno hiperbólico	
tan	Tangente	
tanh	Tangente hiperbólica	
cot	Cotangente	
coth	Cotangente hiperbólica	
sec	Secante	
sech	Secante hiperbólica	
CSC	Cosecante	
csch	Cosecante hiperbólica	
asin	Arcoseno (inversa del seno)	
asinh	Inversa del seno hiperbólico	
acos	Arcocoseno (inversa del coseno)	
acosh	Inversa del coseno hiperbólico	
atan	Arcotangente (inversa de la tangente)	
atan2	Arcotangente de cuatro cuadrantes	

Cuadro 2: Funciones elementales de Matlab: Trigonometría.

Nombre	Función
exp	Exponencial
log	Logaritmo natural (base e)
log2	Logaritmo en base 2
log10	Logaritmo en base 10
sgrt	Raíz cuadrada

Cuadro 3: Funciones elementales de Matlab: Exponenciales.

Anexo 10. Operaciones lógicas

4.7. Operaciones lógicas

Algunas de las operaciones y funciones presentadas no devuelven un valor numérico o matricial como resultado. En su lugar, evalúan si cierta condición es verdadera o falsa. En estos casos, el valor devuelto por la función equivaldrá a 1 si la condición se cumple, y 0 si no.

A modo de ejemplo comprobaremos si una variable \boldsymbol{x} se encuentra en un intervalo determinado

Las operaciones lógicas se emplearán sobre todo para implementar bifuraciones y bucles en los programas Matlab.

Anexo 11. Operaciones de rango

4.8. Operaciones de rango

En Matlab existe un operador de gran utilidad que no tiene parangón en otros lenguajes de programación: el operador de rango (:). Para ilustrar su utilidad, baste indicar que si se desea crear un vector con todos los números enteros entre 1 y 10, podemos emplear la expresión 1:10.

>> a=1:10 a = 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

En general, para secuencias no enteras o no crecientes la sintaxis del operador de rango es

valor_minimo : incremento : valor_maximo

Por ejemplo, para generar todos los números entre 1 y 2 en incrementos de 0.2 escribiremos

>> a=1:0.2:2 a = 1.0000 1.2000 1.4000 1.6000 1.8000 2.0000

Una segunda aplicación del operador de rango es el acceso a submatrices o subvectores. Supongamos que hemos definido la matriz mat anteriormente mencionada:

>> mat=[1 2 3; 4 5 6; 7 8 9];

Para acceder a la submatriz comprendida entre los elementos (2, 1) y (3, 2) bastará con escribir

Anexo 12. Almacenamiento en archivos

4.9. Almacenamiento en archivos

Matlab permite almacenar en el disco las variables del espacio de trabajo. De este modo es posible parar una sesión de trabajo y continuar en otro momento sin volver a repetir cálculos. La orden más común para almacenar datos es save, que puede usarse de varias maneras. En la tabla siguiente se presenta un resumen.

Orden	Operación realizada.	
save	Crea el archivo de nombre matlab.mat en la carpeta actual. Dicho archivo contiene todas las variables que existen en ese momento en entorno Matlab	
save nombrearchivo	Crea el archivo de nombre en <i>nombrearchi-</i> <i>vo.mat</i> en la carpeta actual. Dicho archivo contiene todas las variables que existen en ese momento en el entorno Matlab.	
save nombrearchivo x y z	Crea el archivo de nombre <i>nombrearchi- vo.mat</i> en la carpeta actual. Dicho archivo contiene únicamente las variables x, y y z.	

Para recuperar las variables almacenadas en un fichero previamente creado emplearemos principalmente la función load. La siguiente tabla ilustra tres operaciones típicas de recuperación de datos.

Anexo 13. Graficas en Matlab

4.10. Gráficas en Matlab

Las posibilidades de Matlab a la hora de crear gráficos de todo tipo son vastísimas. Para tener una visión general de ellas se recomienda al lector un recorrido por la ayuda en línea partir del comando

>> doc plot

En este punto veremos los pasos básicos para crear una gráfica a partir de una tabla de valores (x, y). Concretamente, trazaremos la parábola de ecuación

$$y = 2x^2 + 3x - 1$$

en el intervalo [-3, 3].

Toda gráfica de Matlab ha de ser creada a partir de una nube de puntos, que en el caso bidimensional consiste en una serie de valores de las coordenadas x y otra serie del mismo tamaño de valores de y. Cada pareja (x,y) formada a partir de ambas series será un punto de la gráfica. Para ello crearemos dos vectores de igual tamaño n. El primer vector será x, para las coordenadas de los puntos, a partir de una división suficientemente fina del eje de abcisas:

>> x=-3:0.1:3;

y a continuación creamos el vector y, sabiendo que en el gráfico el elemento *i*-ésimo del dicho vector formará un punto (x, y) con el elemento *i*-ésimo del vector x. Por tanto,

5. Control System Toolbox

El Control System Toolbox es un componente opcional en la instalación de Matlab que consta de una serie de funciones, objetos, bloques Simulink y herramientas destinados a la asistencia en el análisis y diseño de sistemas de control. El objeto fundamental con el que trabajaremos es la función de transferencia. Para ilustrar sus propiedades y el álgebra asociada, estudiaremos un ejemplo sencillo de control.

Considérese el sistema realimentado de la figura 3. Dicho sistema está formado por tres bloques independientes: $G_1(s)$, que representa el controlador, $G_2(s)$, que corresponde a la planta a controlar, y $G_3(s)$, la función de transferencia del sensor con el que se mide la salida del sistema. Los valores de las tres funciones son:

$$G_1(s) = \frac{1}{s+0.5}$$

$$G_2(s) = \frac{3}{s^2+2s+1}$$

$$G_3(s) = \frac{40}{s^2+5s+40}$$

Supongamos que deseamos calcular la función de transferencia en bucle cerrado de dicho sistema, y a continuación trazar su diagrama de Bode. Lo primero que debemos conocer es cómo definir una función de transferencia en el entorno Matlab.

Un polinomio en s se representa en Matlab como un vector cuyos elementos son los coeficientes del polinomio por orden de exponente descendente: por ejemplo, $s^2 - 2s + 1$ se define en Matlab como el vector [1 - 2 1]. Por tanto, para definir una función de transferencia en Matlab necesitamos dos vectores. A partir de ellos, con la función tf construiremos las función de transferencia del ejemplo:

>> G1=tf([1],[1 0.5]);
>> G2=tf([3],[1 2 1]);
>> G3=tf([40],[1 5 40]);

Lo más interesante de esos objetos es la posibilidad de realizar operaciones matemáticas entre ellos. Para ilustrar esto, calcularemos la función de transferencia del sistema realimentado en bucle cerrado, desde la referencia hasta la salida. Sabiendo que dicha función tiene la forma

$$G_{bc}(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_1(s)G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)G_3(s)}$$

teclearemos en Matlab simplemente

Anexo 15. Operaciones con polinomios

5.1. Operaciones con polinomios

El Control System Toolbox permite, además de lo explicado, realizar ciertas operaciones con polinomios almacenados en forma de vector, que son muy interesantes dentro de la teoría del control automático. Por ejemplo, podemos calcular el producto de dos polinomios en s mediante la función conv y a partir de ellos calcular el producto (cascada) de dos funciones de transferencia:

>> num1=[1]; den1=[1 0 0.5]; >> num2=[3]; den2=[1 2 1]; >> num_producto=conv(num1,num2); >> den_producto=conv(den1,den2); >> G12=tf(num_producto,den_producto)

en este caso el resultado del cálculo sería igual al producto de las funciones $G_1(s)$ y $G_2(s)$, que como sabemos, también se obtendría, a partir de las definiciones anteriores,

Anexo 16. Herramientas numéricas y graficas

5.2. Herramientas numéricas y gráficas

Dada una función de transferencia, ya sea de bucle abierto o cerrado, existen en el Control System Toolbox operaciones numéricas y gráficas de gran utilidad a la hora de analizar la estabilidad y otras propiedades. Algunas de ellas aparecen en la siguiente tabla

Comando	Operación realizada.
evalfr	Evalúa la magnitud y fase de una función de transferencia en la
	frecuencia especificada.
bode	Traza el diagrama logarítmico de Bode de una función de transfer-
	encia dada. Además presenta interesantes opciones de visualización
	como son los márgenes de ganancia y fase.
nyquist	Traza el diagrama de Nyquist de una función de transferencia dada.
rlocus	Traza el lugar de las raíces al realimentar negativamente con una
	ganancia K (variable) la función de transferencia dada.
margin	Calcula, sobre el diagram de Bode, los márgenes de fase y ganancia
	de una función de transferencia y las frecuencias de corte.
pzmap	Muestra en una gráfica del plano complejo la ubicación de los polos
	y los ceros de una función de transferencia dada.

Como ejemplo, se obtendrá el diagrama de Bode de la función de transferencia (estable)

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 0, 1s + 0, 5}$$

y se calcularán los márgenes de fase y ganancia. Para ello tecleamos

Anexo 17. El entorno de trabajo de Simulink

6. El entorno de trabajo de Simulink

Simulink es una herramienta de gran utilidad para la simulación de sistemas dinámicos. Principalmente, se trata de un entorno de trabajo gráfico, en el que se especifican las partes de un sistema y su interconexión en forma de diagrama de bloques. De nuevo, se trata de una herramienta amplísima que además se complementa con numerosos elementos opcionales. Por tanto, nos limitaremos a dar unas pinceladas de los elementos más útiles en Regulación Automática.

Además de las capacidades de simulación de las que está dotado Simulink, conviene destacar que contiene cómodas utilidades de visualización y almacenamiento de resultados de simulación.

Anexo 18. Uso de Simulink

6.1. Uso de Simulink

En primer lugar, lanzaremos la aplicación escribiendo simulink en la línea de comandos de Matlab, o abriendo desde el Explorador de Windows cualquier fichero con extensión .mdl. En el primero de los casos se abrirá la ventana de la figura 6. Esta

Manufacture International	-	-liil M
Carten I Industrial Bada and Carten		
+ in 2000	and a second second	
 M Hempion Ektinet. Ecologia System Tables 	The same	
 B Jain G Groupe Stationt B Instructed Target Its Homosethic 	See.	
 W Noural Testschill Bildtatet Rash Tree mesikusis Tanget 	12-	
 M Rood Trips Handwhee Sockeed and C M Rood Trips Handwhee Sockeed and C 	The loss of Briles	-
Contemport	artis Lookug Tame	
B Service Contractor	TT to beam	
 B Scrutte Tuble B Scrutte Feature Systems 	Ra anima	
Statifier	Har Wassiven Dellas	
. St tritue dealth Solten	Paint Paint Ladardown	
000000	Et Harrison	
	ha	
4] J #		

Figura 6: Ventana navegación de bloques de Simulink (Simulink Library Browser).

ventana inicial no está destinada a crear modelos de simulación; su función principal consiste en navegar por la enorme librería de bloques disponibles para el modelado.

En ella distinguimos dos partes: la izquierda contiene una visión en forma de árbol de todos los Toolboxes instalados que contienen bloques Simulink. La amplitud de este árbol dependerá de las opciones que hayamos activado al seleccionar Matlab. De todos los nodos del árbol nos interesan, de momento, los denominados Simulink y Control System Toolbox. Cabe mencionar además, por su interés, los bloques Real Time Workshop destinados a generar automáticamente código de control para determinadas plataformas Hardware comerciales.

Anexo 19. El espacio de trabajo de Simulink

6.2. El espacio de trabajo de Simulink

Si pulsamos en el icono superior izquierdo de la ventana de la figura 6 (página en blanco), se abre una ventana blanca sobre la que iniciaremos la creación de un modelo de simulación. Dicha ventana se muestra en la figura 7.



Figura 7: Espacio de trabajo de Simulink.

En el espacio de trabajo de Simulink crearemos un modelo insertando los bloques correspondientes. Concretamente realizaremos la simulación del sistema de control representado en la figura 3. En lugar de emplear las definiciones en Matlab de las funciones de transferencia presentadas en el apartado anterior (empleando la función tf), crearemos las funciones de transferencia directamente sobre el diagrama de bloques.

En primer lugar, hemos de insertar tres bloques de tipo Función de Transferencia en el modelo. Para ello tecleamos la palabra transfer en el campo de búsquedas en la parte superior de la ventana de navegación y el buscador localizará el bloque llamado Transfer Fcn, que cuelga del nodo Simulink, como se muestra en la figura 8.

Una vez localizado el bloque *Transfer Fcn* arrastraremos dicho bloque hacia el espacio de trabajo de Simulink. El arrastre de bloques se realiza seleccionando el icono del bloque con el botón izquierdo del ratón, y manteniendo éste pulsado se desplazará el cursor hasta la ventana del modelo.

Repetiremos la operación tres veces, para reproducir la estructura de la figura 3, dando lugar a la ventana mostrada en la figura 9.

Una vez insertados los bloques de las funciones de transferencia, les asignamos nombres específicos (G1,G2 y G3) editando el texto al pie de cada icono, y les damos valores a dichas funciones, para que coincidan con los parámetros de las funciones $G_1(s)$, $G_2(s)$ y $G_3(s)$ definidas anteriormente.

Con este fin, haremos doble click sobre cada bloque de función de transferencia, y

Anexo 20. Fuentes y sumideros de señal

6.3. Fuentes y sumideros de señal

Los bloques de suma y resta de señales y los de funciones de transferencia, funcionan como procesadores de señal. Sin embargo, en las simulaciones han de existir fuentes de señal externas, pues lo que se pretende en general es ver cómo responden determinados sistemas a estímulos exteriores.

En nuestro ejemplo necesitamos una señal externa para generar una referencia a seguir por el sistema controlado. Esta referencia debe ser, lógicamente, cambiante con el tiempo. En nuestro caso emplearemos una señal de tipo escalón, que se implementa, con sus parámetros específicos, mediante el bloque *Step*. Bloques como éste, que sólo tienen salidas y ninguna entrada, se localizan en el árbol de navegación de Simulink en el nodo *Simulink/Sources*.

Por otro lado, existen bloques con entradas y sin ninguna salida: nodos sumidero. Uno de ellos es el empleado en nuestro modelo para visualizar la salida del sistema: Scope. Los bloques de este tipo se ubican en el árbol de navegación de Simulink en el nodo Simulink/Sinks.

A modo de referencia, la tabla 7 muestra algunas fuentes de señal de uso común (nodo Simulink/Sources), mientras que la tabla 8 muestra algunos de los bloques sumidero (Simulink/Sinks) más comunes.