



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

MODELO PARA EL ANÁLISIS Y TOMA DE DECISIONES MEDIANTE EL EMPLEO DE TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA REDUCCIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN REDES DE ENERGÍA ELÉCTRICA

ERIK FERNANDO MÉNDEZ GARCÉS

Trabajo de Titulación modalidad: Proyectos de Investigación y Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de:

**MAGÍSTER EN SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN
INDUSTRIAL**

Riobamba-Ecuador

Mayo 2017



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

CERTIFICACIÓN:

EL TRIBUNAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, titulado: “MODELO PARA EL ANÁLISIS Y TOMA DE DECISIONES MEDIANTE EL EMPLEO DE TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA REDUCCIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN REDES DE ENERGÍA ELÉCTRICA”, de responsabilidad del señor Erik Fernando Méndez Garcés, ha sido prolijamente revisado y se autoriza su presentación.

Tribunal:

ING. WILSON ZÚÑIGA VINUEZA; M.S.c.

PRESIDENTE

ING. ARLYS LASTRE ALEAGA; PhD.

DIRECTOR

ING. ALEXIS CORDOVÉS GARCÍA; PhD.

MIEMBRO

ING. WILSON GUAMÁN GUAJALA; PhD.

MIEMBRO

Riobamba, Mayo de 2017

DERECHOS INTELECTUALES

Yo, Erik Fernando Méndez Garcés, declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

ERIK FERNANDO MÉNDEZ GARCÉS

No. Cédula: 172323649-1

©2017, Erik Fernando Méndez Garcés

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Erik Fernando Méndez Garcés, declaro que el presente proyecto de investigación, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación de Maestría.

ERIK FERNANDO MÉNDEZ GARCÉS

No. Cédula: 172323649-1

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo investigativo, a mi hijo Isaac Mendez por ser el motor que me impulsa a seguir adelante, a mi madre Erica Garcés por ser incondicional en cada una de mis acciones, y a toda la juventud que quiere enriquecerse con el conocimiento, viéndolo como una herramienta para el desarrollo de la sociedad.

Erik

AGRADECIMIENTO

Agradezco a los distinguidos miembros del tribunal por las enseñanzas impartidas, las correcciones, y la motivación para la culminación del presente trabajo investigativo, así también a mi madre Erica Garcés por haberme guiado en todo el camino de mi formación académica, a mi hijo Isaac Méndez porque su sola sonrisa transforma mi vida y me motiva a ser mejor, finalmente agradezco a Dios por darme sabiduría cada día para afrontar los problemas y retos que se me han presentado.

Erik

ÍNDICE DE CONTENIDO

TEMA	PAG.
PORTADA.....	i
CERTIFICACIÓN.....	ii
DERECHOS INTELECTUALES.....	iii
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD.....	v
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii
CONTENIDO.....	viii
ÍNDICES DE TABLAS.....	xiii
ÍNDICES DE FIGURAS.....	xiv
ÍNDICES DE ECUACIONES.....	xvii
RESUMEN.....	xviii
SUMMARY.....	xix

CAPITULO I	Páginas
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.1.1 Situación problemática	1
1.1.2 Formulación del problema.....	2
1.1.3 Preguntas directrices o específicas de la investigación	2
1.1.4 Justificación de la investigación	2
1.2 Objetivos de la investigación.....	3
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
1.3 Hipótesis	4
1.3.1 Hipótesis general.	4
1.3.2 Identificación de las variables	4

CAPÍTULO II

2.	MARCO TEÓRICO	6
2.1	Antecedentes del problema.....	6
2.2	Bases teóricas	8
2.2.1	Armónicos en redes de energía eléctrica	8
2.2.1.1	Cargas resistivas	8
2.2.1.2	Cargas no resistivas	9
2.2.1.3	Definición de potencia activa, reactiva y aparente	9
2.2.1.4	Sistemas eléctricos de potencia	10
2.2.1.5	Generación de Armónicos en redes de energía eléctrica	12
2.2.1.6	Fundamentos matemáticos para la obtención de armónicos en redes de energía eléctrica.....	13
2.2.1.7	Definición de distorsión armónica total en redes de energía eléctrica.....	16
2.2.1.8	Leyes, estándares y normativas referentes a la distorsión armónica eléctrica en el Ecuador.....	20
2.2.2	Mitigación de armónicos en redes de energía eléctrica	22
2.2.2.1	Métodos convencionales para la disminución de armónicos en redes de energía eléctrica.....	22
2.2.2.2	Métodos modernos para la detección y disminución de armónicos en redes de energía eléctrica.....	24
2.2.3	Técnicas de inteligencia artificial enfocadas al desarrollo de modelos y corrección de armónicos en redes de energía eléctrica.	26
2.2.3.1	Redes de Petri en la elaboración de modelos de análisis y toma de decisiones.....	26
2.2.3.2	Redes neuronales artificiales aplicadas a corrección de problemas aplicados a la ingeniería	30
2.2.3.3	Algoritmos de toma de decisiones generalizados enfocados al desarrollo de modelos automatizados	35
2.3	Marco conceptual	37

CAPÍTULO III

3.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE LA CONCEPCIÓN GENERAL DEL MODELO	39
----	--	----

3.1	Desarrollo de la metodología de la investigación	39
3.1.1	Tipo y diseño de la investigación	39
3.1.2	Métodos de investigación	39
3.1.2.1	Método Inductivo	39
3.1.2.2	Método estadístico	41
3.1.3	Enfoque de la investigación.....	42
3.1.4	Alcance de la investigación	42
3.1.5	Población de estudio	43
3.1.6	Unidad de análisis.....	43
3.1.7	Selección de la muestra	43
3.1.8	Tamaño de la muestra.....	43
3.1.9	Técnicas de recolección de datos primarios y secundarios.....	44
3.1.10	Instrumentos para la recolección de datos	44
3.1.11	Instrumentos para procesar datos recopilados	44
3.2	Desarrollo y estudio del modelo propuesto para el análisis y toma de decisiones en aras de la mitigación armónica	45
3.2.1	Adquisición de señales por medio de datos históricos	46
3.2.2	Adquisición de señales por medio de la simulación de señales.....	49
3.2.3	Análisis de las señales de entrada.....	50
3.2.4	Análisis de los modelos de corrección.....	50
3.2.5	Selección del modelo de corrección	51
3.2.6	Breve detalle del modelo de corrección (filtro) seleccionado	52
3.2.7	Ventajas y desventajas de los modelos de corrección en comparación del modelo propuesto	52

CAPÍTULO IV

4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN DEL DESARROLLO DEL MODELO PROPUESTO CONSIDERANDO LA VALIDACIÓN Y LA IMPLEMENTACIÓN MEDIANTE EL EMPLEO DE TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL	54
4.1	Introducción.....	54
4.2	Descripción de la herramienta utilizada para la validación y la implementación del modelo propuesto	55
4.2.1	Justificación del software a utilizar para la implementación del modelo mitigante propuesto	55
4.2.2	Generalidades del software escogido para la implementación del modelo Matlab	56

4.2.3	Definición del software principal escogido para el desarrollo del modelo Matlab	56
4.2.4	Desarrollo e integración de procesos matemáticos e implementación de algoritmos en Matlab.....	58
4.2.5	Desarrollo de entornos GUI's (Interfaz gráfica de usuario) en Matlab	60
4.2.6	Descripción general de las “Redes neuronales artificiales” en el entorno de Matlab.....	65
4.2.7	Matlab enfocado a la simulación de modelos mediante la integración de las redes de Petri.....	67
4.3	Validación y simulación del modelo conceptual mitigante propuesto, mediante redes de Petri.....	69
4.3.1	Validación del modelo conceptual generalizado en Matlab	69
4.3.1.1	Detalle de la etapa de adquisiciones de señales, parte del modelo conceptual generalizado simulado mediante redes de Petri en Matlab.....	75
4.3.1.2	Detalle de la etapa de análisis de la señal de entrada, parte del modelo conceptual generalizado mediante redes de Petri en Matlab	77
4.3.1.3	Detalle de la etapa de análisis de los modelos de corrección, parte del modelo conceptual generalizado mediante redes de Petri en Matlab	79
4.3.1.4	Detalle de la etapa de selección del modelo de corrección, parte del modelo conceptual generalizado mediante redes de Petri en Matlab	81
4.3.1.5	Detalle de la etapa de análisis de los modelos de corrección, parte del modelo conceptual generalizado mediante redes de Petri en Matlab	83
4.4	Implementación del modelo propuesto para el análisis de casos de estudio en Matlab ..	85
4.4.1	Implementación del modelo enfocado al análisis de casos de estudio para la mitigación	85

CAPITULO V

5.	PROPUESTA MITIGANTE, Y ANÁLISIS DE CASOS DE ESTUDIO, SIMULADOS Y DE CAMPO EN ARAS DE MITIGAR LA DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL DE VOLTAJE EN REDES DE ENERGÍA ELÉCTRICA	93
5.1	Evaluación de casos de estudio a procesar con el modelo mitigante implementado, con una connotación analítica, en aras de reducir la distorsión armónica total.....	93
5.2	Análisis de casos propuestos simulados mediante el modelo mitigante implementado para el análisis de casos de estudio en aras de reducir la distorsión armónica total en Matlab.....	95

5.2.1	“Caso de estudio simulado 1”, mediante una forma de onda cuadrada correspondiente a un sistema eléctrico, simulando armónicos de un orden séptimo	95
5.2.2	“Caso de estudio simulado 2”, mediante una forma de onda cuadrada correspondiente a un sistema eléctrico, simulando armónicos de un orden onceavo	99
5.3	Análisis de casos propuestos mediante la adquisición de datos a través del modelo mitigante implementado para el análisis de casos de estudio en aras de reducir la distorsión armónica total en Matlab	103
5.3.1	“Caso de estudio 1”, obtenido mediante la adquisición de datos históricos, en el transformador de distribución No. 114728, “Alimentador Nuevo Israel”, de la “Subestación de distribución El Carmen”, de la Corporación Eléctrica Nacional (CNEL EP)	103
5.3.2	“Caso de estudio 2”, obtenido mediante la adquisición de datos históricos, en el transformador de distribución - comercial No. 125135, “Alimentador Flavio Alfaro”, de la “Subestación de distribución SESME”, de la Corporación Eléctrica Nacional (CNEL EP)	109
CONCLUSIONES		115
RECOMENDACIONES		117
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2:	Estructura de un sistema eléctrico	11
Tabla 2-2:	Límites de distorsión armónica total máxima permisible en tensión	18
Tabla 3-2:	Límites de distorsión armónica máxima permisible en corriente para sistemas de distribución de 120 V a 69,000 V	19
Tabla 4-2:	Límites de distorsión armónica máxima permisible en corriente para sistemas de distribución según la CONELEC – 004/01	21
Tabla 5-2:	Características de los principales tipos de RNA's	32
Tabla 1-3:	Ficha de datos resumen de un análisis realizado de un transformador comercial de 300 KVA por el departamento de calidad de la CNEL EP	47
Tabla 1-4:	Detalle de los componentes utilizados del entorno "GUIDE" de Matlab	89
Tabla 1-5:	Particularidades de la distorsión armónica total del modelo "Caso 1"	97
Tabla 2-5:	Particularidades de la distorsión armónica total del modelo "Caso 2"	101
Tabla 3-5:	Registros obtenidos para el análisis del "Caso 1", mediante históricos	104
Tabla 4-5:	Datos de entrada "Caso 1" (Históricos)	105
Tabla 5-5:	Resultados del modelo mitigante "Caso mediante históricos 1"	107
Tabla 6-5:	Registros obtenidos para el análisis del "Caso 2", mediante históricos	110
Tabla 7-5:	Datos de entrada "Caso 2" (Históricos)	111
Tabla 8-5:	Resultados del modelo mitigante "Caso mediante históricos 2"	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2:	Voltaje-Corriente de una carga lineal	8
Figura 2-2:	Voltaje-Corriente de una carga no lineal	9
Figura 3-2:	Triangulo de las potencias en la corriente alterna	10
Figura 4-2:	Producción, transporte y distribución de energía eléctrica.	11
Figura 5-2:	Convertor AC a DC, o rectificador de onda	13
Figura 6-2:	Función Periódica	14
Figura 7-2:	Función Sinusoidal Periódica	14
Figura 8-2:	Análisis de series de Fourier para cuatro índices (armónicos)	16
Figura 9-2:	Conexión de un filtro de armónicos pasivo para una carga no lineal	22
Figura 10-2:	Conexión de un filtro de armónicos activo para una carga no lineal	23
Figura 11-2:	Redes de Petri especificando lugares, transiciones, arcos y pesos	28
Figura 12-2:	Esquema de funcionamiento de una neurona	31
Figura 1-3:	Detalle del modelo mitigante	45
Figura 2-3:	Mediciones de distorsión armónica en campo mediante el equipo AEMC	46
Figura 3-3:	Comparativa entre señal senoidal pura (azul) y carga no lineal (rojo) mediante la herramienta computacional Matlab	49
Figura 4-3:	Ventajas y desventajas de los modelos de corrección actuales	52
Figura 5-3:	Propuesta del modelo generalizado incluyendo la solución mitigante	53
Figura 1-4:	Logo de la herramienta informática Matlab	57
Figura 2-4:	“Command Window” en Matlab	58
Figura 3-4:	“Scripts” en Matlab	59
Figura 4-4:	Inicialización de herramienta GUIDE en Matlab por medio del comando “guide” en el “prompt”	61
Figura 5-4:	Inicialización de la herramienta GUIDE por medio del menú de herramientas “guide”	61
Figura 6-4:	Entorno de GUIDE en Matlab	62
Figura 7-4:	Descripción de los componentes del entorno “GUIDE” en Matlab	63
Figura 8-4:	Propiedades de los componentes en “GUIDE”	64
Figura 9-4:	Opción “Property Inspector” en “GUIDE”	64
Figura 10-4:	Inicialización de la aplicación referente a redes neuronales en Matlab	66
Figura 11-4:	“Acerca de”, toolbox “Petri Net Toolbox”	67
Figura 12-4:	Entorno del toolbox “Petri Net Toolbox”	68
Figura 13-4:	Inicialización del toolbox “Petri Net Toolbox”	69

Figura 14-4:	Entorno del toolbox “Petri Net Toolbox”	70
Figura 15-4:	Funcionalidades del entorno gráfico de “Petri Net Toolbox”	71
Figura 16-4:	Desarrollo de la validación del modelo en Matlab	72
Figura 17-4:	Modelo conceptual generalizado validado mediante “redes de Petri” en Matlab	73
Figura 18-4:	Datos y simulación del modelo conceptual generalizado en Matlab	74
Figura 19-4:	Adquisición de datos parte del modelo conceptual generalizado mediante redes de Petri en Matlab	76
Figura 20-4:	Análisis de la señal de entrada parte del modelo conceptual generalizado mediante redes de Petri en Matlab	78
Figura 21-4:	Análisis de los modelos de corrección parte del modelo conceptual generalizado mediante redes de Petri en Matlab	80
Figura 22-4:	Selección del modelo de corrección parte del modelo conceptual generalizado mediante redes de Petri en Matlab	82
Figura 23-4:	Breve descripción del modelo de corrección parte del modelo conceptual generalizado mediante redes de Petri en Matlab	84
Figura 24-4:	Algoritmo de adquisición de datos, destacando sección de históricos	86
Figura 25-4:	Algoritmo de adquisición de datos, destacando sección de simulación	86
Figura 26-4:	Algoritmo de análisis de la señal	87
Figura 27-4:	Algoritmo de análisis de los modelos de corrección	87
Figura 28-4:	Selección del modelo de corrección	88
Figura 29-4:	Breve descripción del modelo de corrección seleccionado	88
Figura 30-4:	Desarrollo de la GUI en la herramienta informática Matlab	91
Figura 31-4:	Funcionamiento de la GUI del sistema automatizado de predicción en Matlab	92
Figura 32-4:	Visualización del training del modelo de corrección por RNA, diálogos del modelo seleccionado y “Acerca de” de la interface.	92
Figura 1-5:	Aplicación del modelo mitigante para la reducción armónica, “Caso simulado 1”	95
Figura 2-5:	Detalle de la señal simulada y respuesta mitigante del “Caso simulado 1”	96
Figura 3-5:	Datos obtenidos del “Caso simulado 1”	96
Figura 4-5:	Entrenamiento de la RNA, “Caso 1”	98
Figura 5-5:	Detalle del modelo de corrección, “Caso simulado 1”	98
Figura 6-5:	Aplicación del modelo mitigante para la reducción armónica, “Caso simulado 2”	99
Figura 7-5:	Detalle de la señal simulada y respuesta mitigante del	100

	“Caso simulado 2”	
Figura 8-5:	Datos obtenidos del “Caso simulado2”	100
Figura 9-5:	Entrenamiento de la RNA, “Caso 2”	102
Figura 10-5:	Detalle del modelo de corrección aplicado, “Caso 2”	102
Figura 11-5:	Modelo mitigante para la reducción armónica, “Caso mediante históricos 1”	105
Figura 12-5:	Detalle de la señal mitigada “Caso 1”, análisis mediante históricos	106
Figura 13-5:	Datos obtenidos “Caso históricos 1”	106
Figura 14-5:	“Caso históricos 1”, resultados RNA	108
Figura 15-5:	“Caso mediante históricos 1”, detalle del modelo aplicado	108
Figura 16-5:	Modelo mitigante para la reducción armónica, “Caso mediante históricos 2”	111
Figura 17-5:	Detalle de la señal mitigada “Caso 2”, análisis mediante históricos	112
Figura 18-5:	Datos obtenidos “Caso históricos 2”	112
Figura 19-5:	“Caso históricos 2”, resultados RNA	114
Figura 20-5:	“Caso mediante históricos 2”, detalle del modelo aplicado	114

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1-2: Definición formal de la potencia eléctrica	9
Ecuación 2-2: Definición de una función periódica	14
Ecuación 3-2: Periodo de una función	15
Ecuación 4-2: Series trigonométricas de Fourier	15
Ecuación 5-2: Modelo generalizado de las series de Fourier	15
Ecuación 6-2: Distorsión armónica eléctrica	16
Ecuación 7-2: Relación de la corriente y la distorsión armónica total	23
Ecuación 8-2: Definición formal de las redes de Petri	28

RESUMEN

El presente trabajo investigativo propone como objetivo principal el desarrollo de un modelo conceptual mitigante para el análisis y la toma de decisiones para reducir la distorsión armónica en redes de energía eléctrica, los métodos principales usados para el desarrollo del modelo, se basan esencialmente en la aplicación de técnicas de inteligencia artificial, tanto en la validación de la propuesta de modelo mitigante mediante redes de Petri, como en la implementación para el análisis de casos estudios, en donde se propone una comparativa entre modelos convencionales de corrección, y modelos de corrección mediante técnicas de inteligencia artificial que integran redes neuronales artificiales (RNA's) para el efecto mitigante, el modelo propuesto evalúa resultados enfocados en dos connotaciones orientadas a la adquisición de datos, la primera es de forma simulada y la segunda mediante la incorporación de datos históricos medidos por equipos analizadores de calidad de energía utilizados por las empresas de distribución del medio, este último aspecto permite vincular el modelo propuesto a la industria eléctrica, y dado los casos de estudio evaluados se obtiene un respuesta mitigante satisfactoria para cada caso de estudio planteado, estos casos de estudio son provistos por la Corporación Nacional de Electricidad Empresa Pública Estratégica Unidad de Negocio Santo Domingo de los Tsachilas (CNEL EP), las conclusiones finales fueron la viabilidad de las RNA's para casos atípicos, y los modelos convencionales para casos normalizados, finalmente se recomienda velar por la calidad de la energía eléctrica para causar el menor impacto a las cargas no lineales del medio (consumidor final).

Palabras claves: <MODELO CONCEPTUAL>, <CALIDAD DE ENERGÍA>, <INTELIGENCIA ARTIFICIAL>, <REDES NEURONALES ARTIFICIALES>, <DISTORSIÓN ARMÓNICA ELÉCTRICA>, <MODELOS DE CORRECCIÓN ARMÓNICA>, <FILTROS DE ARMÓNICOS>, <REDES DE PETRI>

SUMMARY

In the present research work, a model is proposed for the analysis and decision making in order to reduce the harmonic distortion in electrical energy networks, for the purpose is included artificial intelligence techniques, both, in the validation and simulation for the proposal model for mitigation through "Petri Nets", and in the implementation for the analysis of the study cases, which proposes a comparison between conventional correction models, and artificial intelligence correction models using techniques that integrates artificial neural networks for The mitigating effect, in particular, considering the specific analysis of the study cases, the proposed model focuses on two connotations oriented to the acquisition of data, the first is simulated and the second is the incorporation of the historical data measured by analyzing equipment Of energy quality used by distribution companies, the latter aspect will allow to link the proposed model to the electricity industry and provide a perspective of analysis, through regular cases raised in companies in charge of Ecuadorian electricity distribution, such as the "National Corporation of Electricity Public Company Strategic CNEL EP", this companies are the main producers of harmonic disturbances in an electrical system, due to the non-linear nature of the behavior in their electric charges (final consumer).

Keywords: <CONCEPTUAL MODEL>, <ENERGY QUALITY>, <ARTIFICIAL INTELLIGENCE>, <NEURONAL ARTIFICIAL NETWORKS>, <ELECTRONIC HARMONIC DISTORTION>, <HARMONIC CORRECTION MODELS>, <HARMONIC FILTERS>, <PETRI NETWORKS>

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

1.1.1 *Situación problemática*

Los armónicos en redes de energía eléctrica son tensiones o corrientes eléctricas, las cuales disponen de una frecuencia de múltiplo entero correspondiente a la frecuencia fundamental proporcionada por la fuente de alimentación o de suministro (Hanzelka & Bien, 2004, pp. 5-24).

Dentro del estudio de los armónicos en redes de energía eléctrica podemos destacar varias definiciones conceptuales básicas, como la frecuencia de onda fundamental que corresponde a la frecuencia de la fuente de origen energético principal, el valor eficaz total, el cual se refiere a la raíz cuadrada de la suma de todas las componentes al cuadrado que conforman la forma de onda, y finalmente la distorsión armónica total en la cual se sitúa la presente investigación de postgrado. (Pastor Gutierrez & Ortega Jiménez, 2014, pp. 1-5)

La distorsión armónica total es la relación entre el valor eficaz del total de las componentes armónicas que pueden ser de corriente o de voltaje y el valor eficaz correspondiente a la componente fundamental de las mismas. (Suarez, Di Mauro, Anaut, & Agüero, 2005, p. 429)

En sistemas de energía eléctrica, específicamente en redes de energía eléctrica ya sean de distribución o transmisión, los armónicos y la distorsión armónica total (THD), se han vuelto un grave problema tanto para los usuarios que están conectados al suministro eléctrico, como para las entidades encargadas de la prestación del servicio eléctrico, la producción de armónicos en la red ocasionados por cargas no lineales (inductivas-capacitivas) producidas en la red genera diversos efectos nocivos en distintos componentes eléctricos (protecciones eléctricas, aislamiento de equipos eléctricos, calidad de energía eléctrica, variación de voltaje en el suministro eléctrico, etc. (Arcilla, 2010, pp. 1-26)

La mitigación de armónicos se ha vuelto una problemática vigente en todas las empresas de comercialización de energía eléctrica, especialmente en las empresas encargadas de la distribución de la energía, la regulación “004/01” vigente aprobada por el “Consejo Nacional de Electricidad” (CONELEC) en el año 2001, determina que la calidad de energía es una necesidad urgente en todas las empresas de distribución eléctrica y brinda las pautas para el correcto suministro de energía al cliente final (los usuarios). (CONELEC, 2001)

1.1.2 Formulación del problema

- ¿Cómo mitigar de forma precisa, fiable y anticipada la distorsión armónica en redes de energía eléctrica?

1.1.3 Preguntas directrices o específicas de la investigación

- ¿Existe actualmente un modelo correctivo que pueda disminuir la distorsión armónica en redes de energía eléctrica?
- ¿Cuáles son los principales aspectos teóricos habilitantes para el desarrollo de un modelo integrando técnicas de inteligencia artificial que permita disminuir la distorsión armónica de la red?
- ¿Cuál es el proceso que permitirá el correcto desarrollo de un modelo para la disminución de la distorsión armónica en la red eléctrica, usando para el efecto, técnicas de inteligencia artificial?
- ¿Cómo integrar el uso de un modelo para la disminución de la distorsión armónica bajo el concepto de técnicas de inteligencia artificial en las áreas de operación, mantenimiento, y calidad energética de los procesos de generación, transmisión y distribución eléctrica?

1.1.4 Justificación de la investigación

Teniendo en cuenta la problemática vigente sobre la generación de armónicos en redes de energía eléctrica, y considerando de manera general a las empresas de distribución de energía eléctrica, debido a que la generación de armónicos se realiza de manera dinámica en esta sección de un sistema eléctrico de potencia (debido al tipo de carga del usuario final), para el presente trabajo se utilizarán casos de estudio proporcionados por empresas de distribución, específicamente de la “Corporación Eléctrica Nacional Empresa Pública” (CNEL EP) , la cual

permitirá el análisis de la información obtenida por su “Departamento de Calidad de Energía” y brindará el aval para el desarrollo del presente trabajo investigativo.

La importancia del presente trabajo de titulación relaciona la necesidad de la mitigación de armónicos en redes de distribución eléctrica con el desarrollo de un modelo automatizado que permitirá asistir en el análisis y la toma de decisiones oportunas en los procesos de distribución eléctrica. El ignorar este índice energético puede desembocar en situaciones indeseadas tales como la repercusión en la calidad energética para consumidores finales de la energía eléctrica en redes de distribución, el sobre calentamiento del aislamiento de los componentes (protecciones eléctricas) que integran la topología de la red eléctrica de distribución, variaciones de voltaje constantes en los circuitos de distribución por el comportamiento no lineal de las cargas de energía eléctrica, y la descoordinación y afectación directa para planificación de los procesos de calidad y distribución eléctrica en el Ecuador.

Finalmente en el presente trabajo de titulación se propone un modelo dinámico integrando técnicas de inteligencia artificial (I.A), tanto para la toma de decisiones de los modelos correctivos a ser usados para la mitigación de la distorsión armónica total, como en los mismos modelos correctivos a ser utilizados, utilizando modelos convencionales, y modelos adaptativos tales como los filtros adaptativos que integran redes neuronales artificiales (RNA's) para el desarrollo, finalmente también se integran estas técnicas de I.A para la concepción del modelo generalizado utilizando redes de Petri , desarrollando el modelo general en base al desarrollo de técnicas vanguardistas de “I.A” que pretenden solucionar un problema arraigado en los sistemas de energía eléctrica del Ecuador y el mundo.

1.2 Objetivos de la investigación

1.2.1 Objetivo general

- Desarrollar un modelo para el análisis y toma de decisiones mediante el empleo de técnicas de inteligencia artificial con la finalidad de reducir la distorsión armónica en redes de energía eléctrica.

1.2.2 Objetivos específicos

- Indagar sobre modelos de análisis y toma de decisiones para la reducción de la distorsión armónica que se utilizan actualmente en redes de energía eléctrica

- Determinar cuáles son los principales aspectos teóricos habilitantes para la construcción de un modelo que permita reducir la distorsión armónica en redes de energía eléctrica empleando técnicas de inteligencia artificial.
- Proponer un modelo de análisis y toma de decisiones que permita reducir la distorsión armónica en redes eléctricas.
- Evaluar la viabilidad del modelo para la reducción de la distorsión armónica propuesto utilizando técnicas de inteligencia artificial en los procesos de operación, mantenimiento y calidad energética en empresas de distribución de energía eléctrica.

1.3 Hipótesis

1.3.1 Hipótesis general.

El análisis del comportamiento de la distorsión armónica total eléctrica, asociado a las exigencias tecnológicas y de servicio correspondientes bajo un enfoque innovador mediante la inclusión de técnicas de inteligencia artificial permitirá desarrollar un modelo generalizado que brindará una tentativa de solución mitigante, con la incorporación de componentes enfocados al análisis y toma de decisiones en aras de disminuir la distorsión armónica total en conjunto con la calidad energética en redes eléctricas.

1.3.2 Identificación de las variables

Variables independientes

- Indagar sobre modelos de análisis y toma de decisiones para la reducción de la distorsión armónica que se utilizan actualmente en redes de energía eléctrica.
- Determinar cuáles son los principales aspectos teóricos habilitantes para la construcción de un modelo que permita reducir la distorsión armónica en redes de energía eléctrica empleando técnicas de inteligencia artificial.
- Estudiar las propuestas mitigantes de la actualidad en materia de reducción de armónicos eléctricos, y que además incorporen, técnicas innovadoras de inteligencia artificial.
- Evaluar la viabilidad del modelo para la reducción de la distorsión armónica propuesto utilizando técnicas de inteligencia artificial en los procesos de operación, mantenimiento y calidad energética en empresas de distribución de energía eléctrica.

Variables dependientes

- Comprender los modelos de análisis y toma de decisiones para la mitigación de la distorsión armónica que se ha desarrollado en la actualidad.
- Construir un modelo para el análisis y toma de decisiones aplicando técnicas de inteligencia artificial.
- Desarrollar un modelo de análisis y toma de decisiones que permita reducir de forma fiable la distorsión armónica en redes de energía eléctrica mediante técnicas de inteligencia artificial.
- Asistir en el proceso de toma de decisiones de los procesos de operación, mantenimiento y calidad energética en empresas de distribución de energía eléctrica.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del problema

En ingeniería eléctrica, electrónica, y de control la mitigación de armónicos siempre será un problema latente, que es sobrellevado con la implementación de filtros, en pequeña, mediana y gran escala (Petit Suárez, 2005, p. 1). La presente investigación dispone de pocos antecedentes teóricos y prácticos que relacionen modelos de análisis y toma de decisiones para la disminución de la distorsión armónica total, en adición a lo mencionado, el desarrollo de estos modelos integrando técnicas de I.A, complica aún más el trasfondo analizar de esta sección del presente trabajo investigativo. Sin embargo, a continuación, se citarán investigaciones referentes que permitirán analizar, la bibliografía básica y especializada de esta investigación.

Los problemas que se presentan debido a la generación de armónicos en la red eléctrica se ven evidenciados por los siguientes efectos:

- Sobrecalentamiento de equipos eléctricos de distribución, tales como transformadores, generadores, cables, etc.
- Voltajes altos y corrientes circulantes adicionales, generados por la distorsión armónica
- Malfuncionamiento de los equipos debido al sobre voltaje de la distorsión.
- Errores de la medición
- Fallas en generadores eléctricos
- Fallas en los devanados de los sistemas eléctricos
- Factor de potencia bajo, que resulta en penalidades en pagos mensuales debido a la regulación vigente de empresas de distribución
- Falsa operación de las protecciones eléctricas

Estos problemas han sido ampliamente estudiados por investigadores, que han podido desarrollar técnicas de filtrado para la correcta mitigación de armónicos en las redes eléctricas, la principal fuente de mitigación de armónicos en la actualidad son los filtros, los cuales se pueden presentar en diversas denominaciones y tipos. (De la Rosa, 2015, pp. 30-55)

Los filtros de armónicos se crean debido al creciente aumento de cargas no lineales en redes de energía eléctrica, estas provocan la distorsión de las formas de onda de tensiones y corrientes, los cuales se convierten armónicos y consecuentemente distorsión armónica total en la red, este antecedente en conjunto con las normas internacionales, tales como la IEEE 519-2014, la IEC 61000, recomiendan los límites que podrían tener las distorsiones armónicas generadas en sistemas eléctricos (Perez, 2012, pp. 134-143). Los filtros de armónicos cumplen un papel esencial en la reducción de armónicos, los principales filtros de armónicos convencionales son:

- Filtros activos
- Filtros pasivos

Para la concepción general del modelo se utilizarán las redes de Petri las cuales fueron creadas en 1962, por Carl Petri, permiten representar de forma estructurada un sistema de eventos discretos, su aporte para el desarrollo de sistemas manufacturados fue esencial (Zhou & Kurapati, 2000, p. 41). Para investigaciones afines que brinden una solución a la generación de armónicos en la red las redes de Petri se convierten en recurso innovador, tratando de vincular la informática a problemas aplicados de la industria.

En cambio, las redes neuronales artificiales tienen una historia remarcable que ha desembocado en la aplicabilidad con connotaciones informáticas que tienen hoy en día. Los precursores de la investigación fueron McCulloch y Pitts que dieron origen a los modelos conexionista definiendo formalmente la neurona en 1943 como una máquina binaria con varias entradas y salidas. Hebb, definió en 1949 dos conceptos muy importantes y fundamentales que han pesado en el campo de las redes neuronales, basándose en investigaciones psicofisiológicas:

- El aprendizaje se localiza en las sinapsis o conexiones entre las neuronas.
- Las informaciones se representan en el cerebro mediante un conjunto de neuronas activas o inactivas.

En resumen, existen muy pocos antecedentes para el desarrollo de la presente investigación debido a que se pretende brindar una alternativa de solución mediante la incorporación de técnicas avanzadas de I.A, la cual no solo integre componentes mitigantes para casos específicos de solución, sino que brinde un espectro de soluciones, para cualquier caso existente y simulado en aras de mitigar las perturbaciones armónicas eléctricas, y que además incluya un módulo de análisis y toma de decisiones, creando un modelo generalizado para la solución de problemas aplicados a la industria eléctrica, electrónica y de control.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Armónicos en redes de energía eléctrica

Existen diversos tipos de cargas conectadas en sistemas eléctricos de potencia, estas cargas se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Cargas lineales (resistivas)
- Cargas no lineales (inductivas, capacitivas)

2.2.1.1 Cargas resistivas

Este tipo de carga conectada en un sistema eléctrico de potencia es definido como carga lineal, tiene una relación proporcional entre la fuente de alimentación y el voltaje aplicado a la misma. En la “Figura 1-2”, se puede apreciar el voltaje y la corriente típica de una carga lineal. (Shah, 2013, pp. 1-24)

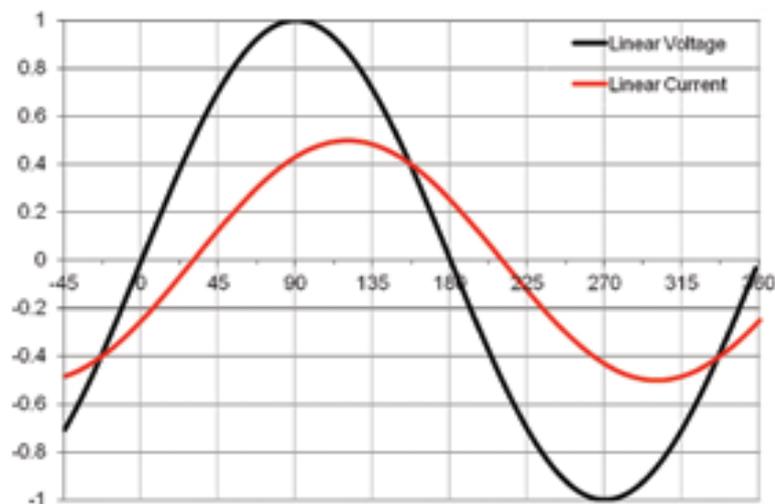


Figura 1-2: Voltaje-Corriente de una carga lineal

Fuente: (Shah, 2013, pp. 1-5)

2.2.1.2 Cargas no resistivas

En redes eléctricas los sistemas no lineales, generalmente se encuentran representados por elementos como: semiconductores de potencia, y la saturación de los núcleos de los transformadores (Carvajal, Ordoñez, Moreno, & Duarte, 2011, pp. 76-92), una carga no resistiva es considerada variante en su impedancia, cuando se induce un voltaje fijo o variable aplicado a la misma.

Una representación del comportamiento de este tipo de carga se ve evidenciada en la “Figura 2-2”

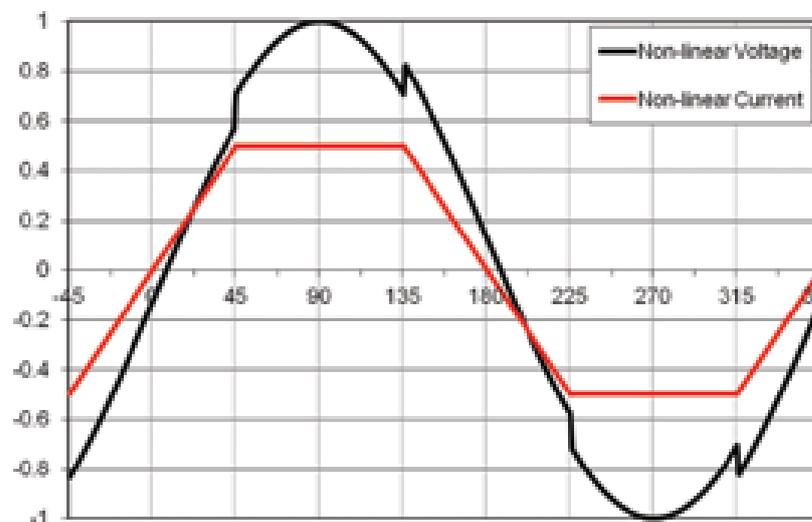


Figura 2-2: Voltaje-Corriente de una carga no lineal

Fuente: (Shah, 2013, pp. 1-5)

2.2.1.3 Definición de potencia activa, reactiva y aparente

Las cargas resistivas y no resistivas son sinónimos en el campo de la ingeniería eléctrica de la definición formal de “Potencia”, esta se transmite o se transfiere cuando existe flujo de electricidad, esta es un índice energético que tiene una estrecha relación con el voltaje y la corriente eléctrica, la potencia específicamente se define como el trabajo realizado por unidad de tiempo por lo que sus dimensiones en el sistema internacional se expresan en “Joules” (J) sobre segundo (s). (Segui, Sanchez, & Orts, 2002, pp. 10-20)

$$P = \frac{T(\text{Trabajo})}{t(\text{tiempo})} = V(\text{Volt}) * A(\text{Amperio}) \Rightarrow \text{Unidades} \frac{J(\text{Joules})}{s(\text{segundos})} \quad \text{Ecuación 1 – 2:}$$

A partir de esa definición general se puede representar y dar forma a la potencia eléctrica que no es nada más que la relación del trabajo eléctrico o energía que se disipa por unidad de tiempo. La potencia eléctrica se clasifica en 3 tipos (Wildi, 2007, pp. 9 -109) tal y como se indica en el “Figura 3-2”

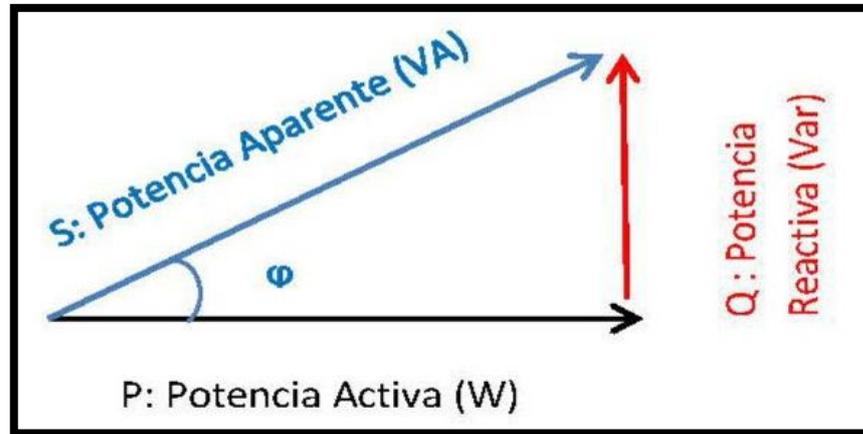


Figura 3-2: Triangulo de las potencias en la corriente alterna

Fuente: (Mecfi, 2017, p.1)

- Potencia activa “P” (Se mide en “Watts” y representa las cargas resistivas).
- Potencia reactiva “Q” (Se mide en “VAR” y representa las cargas inductivas y capacitivas).
- Potencia aparente “S” (Se mide en “VA” y representa la resultante vectorial de ambas potencias, la potencia activa y potencia reactiva).

Habiendo definido los conceptos básicos a tratar en esta investigación, es imperativo analizar la generación de armónicos como tal para así poder comprender la primera parte de esta investigación y la necesidad de desarrollarla.

2.2.1.4 *Sistemas eléctricos de potencia*

Un sistema eléctrico de potencia se encarga de integrar la producción, el transporte y la distribución de la energía eléctrica. La generación, distribución y transmisión generalmente se suelen definir como subsistemas eléctricos (Mcgraw-Hill, 2010, pp. 2-10). De la “Tabla 1-2” se cita los conceptos de la estructura de un sistema eléctrico detallándolos con sus características principales.

Tabla 1-2: Estructura de un sistema eléctrico

Estructura del sistema eléctrico de un país		
Subsistema de producción	Subsistema de transmisión	Subsistema de distribución
Se encarga de generar la energía eléctrica.	Comprende desde el centro de producción hasta las subestaciones de transformación.	Es el encargado de repartir la energía eléctrica a todos los consumidores

Fuente: McGraw-Hill, Conceptos básicos eléctricos

Realizado por: Mendez, Erik, 2017

Dentro del subsistema de distribución, los centros de transformación tienen como función reducir la tensión de la red de distribución a los valores de consumo doméstico, comercial e industrial (120, 240, 400 V, hasta 600 v), es decir a niveles de baja tensión o bajo voltaje.

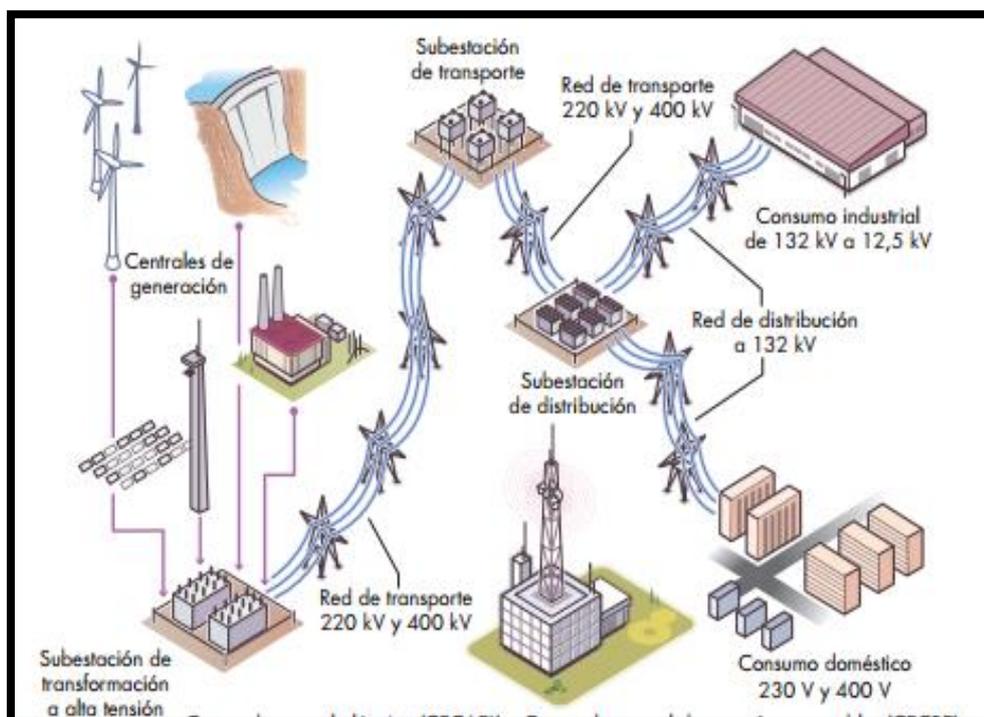


Figura 4-2: Producción, transporte y distribución de energía eléctrica.

Fuente: (Mcgraw-Hill, 2010, p. 5)

En la Figura 4-2 se puede apreciar de manera esquemática el sistema eléctrico propiamente dicho, destacando las partes ya mencionadas en la “Tabla 1-2”, para una mejor comprensión de los distintos subsistemas que hacen posible la generación, traslado y uso de la energía eléctrica.

Un sistema eléctrico es el corazón energético de un país, haciendo posible que el consumidor final, las personas, puedan aprovechar de manera fiable, eficiente y con un alto nivel de confiabilidad la energía eléctrica obtenida y transportada por procesos variados que generalmente varían en cada país adecuándose a las características de producción de la energía. (Mendez, 2015, pp. 15-45)

Generalmente los sistemas eléctricos son invariablemente trifásicos, las empresas eléctricas de distribución deberían procurar mantener un sistema completamente equilibrado en todas sus fases, permitiendo así analizar una sola fase y obtener datos representativos de todo el sistema generalizado. (Wildi, 2007, pp. 9 -109)

2.2.1.5 Generación de Armónicos en redes de energía eléctrica

Los armónicos son ondas periódicas, derivadas a partir de la onda fundamental o primer armónico, siempre se encuentran en múltiplos equivalentes a la frecuencia fundamental dada, el valor en frecuencia de los armónicos depende de la frecuencia incorporada en la red pudiendo ser 50 o 60 Hz para “Sistemas Eléctricos de Potencia (S.E.P)”.

Dos características a considerar en cada armónico son la magnitud y el orden, la magnitud de un armónico es directamente proporcional al valor de voltaje o de intensidad de corriente, en cambio el orden referencia el valor preciso de la frecuencia reflejado a la frecuencia fundamental. (Paulino & Rangel, 2013, pp. 1-7)

Generalmente los convertidores de potencia, son equipos que usan semiconductores en su constitución, debido a esto generan grandes cantidades de perturbaciones armónicas eléctricas, estas conversiones se producen entre dos tipos de formas de generación de energía eléctrica, las conversiones entre la corriente continua (C.D) o “D.C” de sus siglas en inglés y la corriente alterna (C.A) o “A.C”, de donde se puede obtener las siguientes transiciones:

- AC a DC, de DC a DC, de DC a AC y de AC a AC

Estas conversiones son posibles debido a los elementos semiconductores que disponen los convertidores eléctricos, constituyendo la cantidad más grande de cargas no lineales en sistemas

eléctricos de potencia (Shah, 2013, p. 4), y por ende de mayor aportación armónica en la red. En la “Figura 5-2” se puede apreciar el esquema de un conversor eléctrico AC a DC de una sola fase.

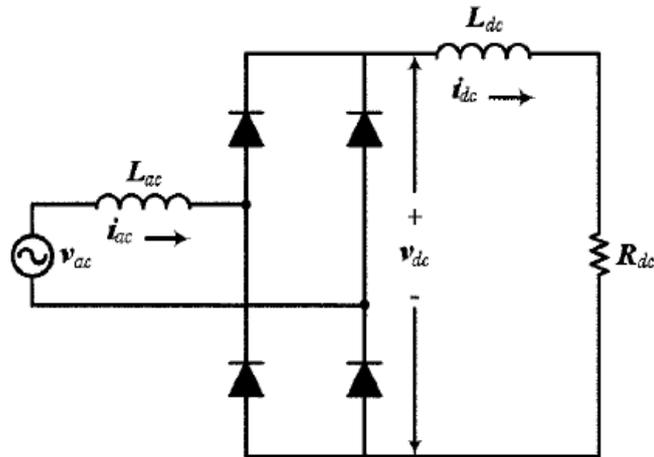


Figura 5-2: Conversor AC a DC, o rectificador de onda

Fuente: (Shah, 2013, p. 4)

Donde:

- L_{dc} : Es la impedancia de salida (Corriente Continua)
- L_{ac} : Es la impedancia de entrada (Corriente Alterna)
- R_{dc} : Es la resistencia de salida (Corriente Continua)
- V_{ac} : Es el voltaje alterno de entrada
- V_{dc} : Es el voltaje continuo de salida

2.2.1.6 Fundamentos matemáticos para la obtención de armónicos en redes de energía eléctrica

En la ingeniería moderna, y en los avances tecnológicos en general la generación de señales periódicas tales como la corriente o el voltaje son recurrentes en la mayoría de estos sistemas, estas señales conforman funciones periódicas que pueden ser examinadas mediante sus ondas fundamentales y los armónicos que estas señales generan, bajo el análisis de las series de Fourier.

Las series de Fourier conforma una rama del análisis de Fourier, las cuales permiten la descomposición de las señales periódicas en una sumatoria de series trigonométricas que tienen tendencia infinita, en términos del seno y el coseno (Anumaka, 2012, pp. 125-128). En el siguiente gráfico (Figura 6-2) se puede observar una función periódica.

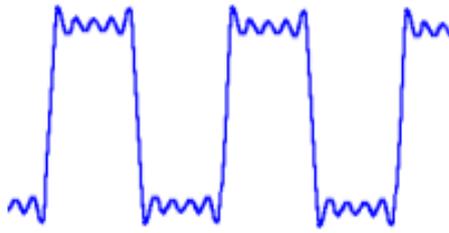


Figura 6-2: Función Periódica

Fuente: (Anumaka, 2012, p. 125)

El análisis de series de Fourier para las ramas afines a la ingeniería (eléctrica, electrónica, control), se centra mayoritariamente en señales sinusoidales periódicas como son las generadas por la corriente alterna, la cual es ampliamente utilizada en los procesos de generación, transmisión y distribución eléctrica. Un ejemplo de una señal periódica sinusoidal se representa en la “Figura 7-2”.

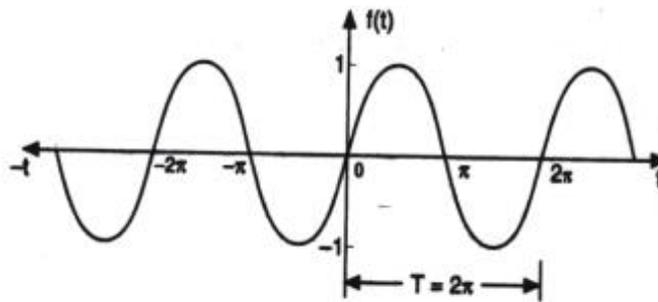


Figura 7-2: Función Sinusoidal Periódica

Fuente: (Anumaka, 2012, p. 128)

Donde:

- T es el periodo de la función periódica
- t es el tiempo
- f(t) es la función que en este caso es $x = \sin(x + 2\pi)$

Mediante la definición formalizada anterior, se determina que una función periódica cumple con el siguiente postulado, para cualquier variante en el tiempo:

$$f(t) = f(t + T)$$

Ecuación 2 – 2:

La mínima constante necesaria para que se cumpla el postulado anterior se denomina “Periodo” de la función (Michoacana, 2003), repitiendo la propiedad anterior se puede obtener:

$$f(t) = f(t + nT), \text{ donde } n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

Ecuación 3 – 2:

Varias funciones periódicas $f(t)$, de un periodo “T” definido pueden asociarse y expresarse en series, usualmente estas series son llamadas “Series Trigonómicas de Fourier”, tal y como se muestra en la siguiente fórmula:

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + a_1 \cos(\omega_0 t) + a_2 \cos(2\omega_0 t) + b_1 + \dots$$

Ecuación 4 – 2:

Donde:

- $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$

Recopilando la información mencionada, las “Series de Fourier” pueden ser expresadas para el cálculo de armónicos de la siguiente manera generalizada:

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n * \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + b_n * \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \right]$$

Ecuación 5 – 2:

Donde:

- “n” representa el índice o el número del armónico a calcular
- “ a_0, a_n, b_n ”, representan los coeficientes de las series de Fourier las cuales son determinadas por la forma de onda
- “T” denota el periodo de la forma de onda
- “F(t)” denota la serie de Fourier aproximada a una serie de tiempo

Entre más índices calculados (mas armónicos), más se distorsiona la forma de onda en comparación a la onda fundamental que en este caso es sinusoidal, una gráfica representando los primeros armónicos (n=1, 2, 3, 4) calculados por las aproximaciones de las series de Fourier se ven representados en la “Figura 8-2”.

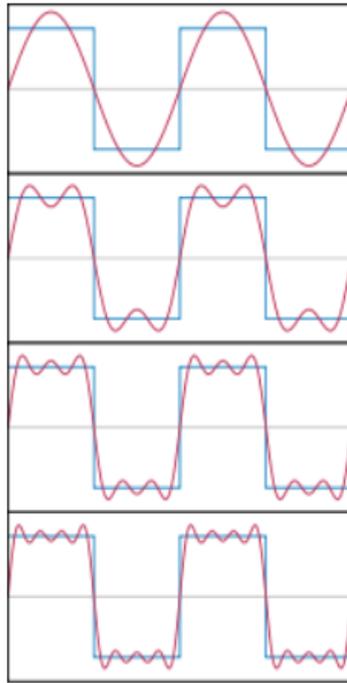


Figura 8-2: Análisis de series de Fourier para cuatro índices (armónicos)

Fuente: (Shah, 2013, pp.1-7)

2.2.1.7 Definición de distorsión armónica total en redes de energía eléctrica

Una vez analizados los fundamentos matemáticos correspondientes a las “Series de Fourier” para el análisis de armónicos en redes de energía eléctrica, se introduce el concepto de distorsión armónica total o también llamada en el idioma inglés como “Total Harmonic Distortion” (THD), la distorsión armónica total (THD) en términos generales se define como un indicador de las características de una señal que incorpora armónicos eléctricos (Esperanza & López, 2004, pp. 1-84), formal y matemáticamente la distorsión armónica total corresponde al siguiente postulado:

$$THD = \frac{\sqrt{C_2^2 + C_3^2 + C_4^2 + \dots + C_n^2}}{C_1} * 100$$

Ecuación 6 – 2:

Donde:

- C_k , representa la magnitud de la componente del armónico definido por el valor “k”, puede ser calculada para señales de corriente y de tensiones eléctricas.
- THD, representa la distorsión armónica total generada por una carga no lineal en un sistema eléctrico

Cabe destacar que este índice energético, por sí solo no describe las generalidades y particularidades de una señal en específico, esto es debido a que la distorsión armónica total se calcula de manera porcentual, y dos espectros de señales diferentes podrían tener “THD’s” de igual magnitud, es por eso que siempre se recomienda para un análisis minucioso, examinar el espectro completo de la señal armónica, acompañado de los resultados porcentuales de distorsión armónica total o “THD” (Esperanza & López, 2004, pp. 1-84).

En las redes de distribución eléctrica existen límites permisibles definidos de distorsión armónica total, para lo mencionado existen normativas y estándares tales como la IEEE-519 y la IEC 1000-3-2, que regulan y detallan la tolerancia máxima de la distorsión armónica total que un sistema eléctrico puede tener por nivel de voltaje, tendiendo siempre a asegurar la confiabilidad y calidad energética que se distribuye por un sistema eléctrico. (Mora Barajas & Bañuelos Sanchez, 2010, pp. 189-190)

Cabe destacar que la norma IEC 1000-3-2, dictamina los límites admisibles para cargas no lineales de potencias bajas específicamente, y de manera general la norma IEC-519, se enfoca en dar los límites admisibles para todos los niveles de voltaje de un sistema eléctrico en general, al ser esta la normativa más difundida, a continuación, se exponen las generalidades de esta norma – estándar en términos de la distorsión armónica total “THD” y del nivel de voltaje, cuya única finalidad es la de controlar la difusión y generación de armónicos para asegurar la calidad energética de un sistema eléctrico.(Ver Tabla 2-2).

Tabla 2-2: Límites de distorsión armónica total máxima permisible en tensión

VOLTAJE O TENSIÓN ELÉCTRICA (V)	DISTORSIÓN INDIVIDUAL DE TENSIÓN EN % (POR COMPONENTE ARMÓNICA, EXCEPTO LA FUNDAMENTAL)	DISTORSIÓN TOTAL DE TENSIÓN EN % (%THDV)
V <= 1000 V	5.0	8.0
1000 V a 69,000 V	3.0	5.0
69,000 V a 161,000 V	1.5	2.5
161,001 V y Mayor	1.0	1.5

Fuente: (IEEE-519, 2014), Recomendaciones y requerimientos para el control de armónicos en sistemas eléctricos

Realizado por: Méndez, Erik, 2017

De la tabla anterior (Tabla 1-2), se destaca que para los distintos valores de voltaje existen rangos permisibles porcentuales por componente armónica y por distorsión armónica total de voltaje para cada nivel de tensión eléctrica, esto quiere decir por ejemplo, que para sistemas eléctricos menores a 69.000 voltios las componentes armónicas a excepción de la fundamental no deben ser superiores a 3 %, (2do, 3ro, 4to, 5to,.. armónico), y la distorsión armónica total de voltaje (THDV) no debe ser superior a 5 %.

Con respecto a la distorsión armónica total de la corriente eléctrica, los límites permisibles se encuentran dados por el tamaño del circuito en comparación con el circuito o sistema del que se alimenta, esta comparativa está dada entre la relación de la corriente de corto circuito (I_{sc}) y la demanda máxima (I_L), para el análisis de los armónicos en la corriente eléctrica, se introduce el concepto de distorsión total de la demanda o “Total Demand Distortion” (TDD) de sus siglas en inglés que no es nada más que la razón de la raíz cuadrada media del contenido armónico de una señal y se mide como el porcentaje de la corriente de demanda máxima en un sistema.

En la siguiente tabla “Tabla 3-2”, se exponen los límites de la distorsión armónica total y de componentes armónicas en relación a las corrientes antes mencionadas (I_{sc} / I_L) para un rango comprendido desde los 120 V hasta los 69 Kv, siendo en estos niveles de voltaje donde existe la mayor concentración e incidencia de armónicos, por ser estos los voltajes usuales de un sistema eléctrico de distribución:

Tabla 3-2: Límites de distorsión armónica máxima permisible en corriente para sistemas de distribución de 120 V a 69,000 V

RELACIÓN: ISC / I _L	LÍMITES PARA COMPONENTES ARMÓNICAS IMPARES EN % DE I _L					DISTORSIÓN DE DEMANDA TOTAL EN% (%TDD)
	Armónicos 3-11	Armónicos 11 a 17	Armónicos 17 a 23	Armónicos 23 a 35	Armónicos 35 a 50	
ISC / I _L < 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < ISC / I _L < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < ISC / I _L < 100	10.0	4.0	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < ISC / I _L < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
ISC / I _L > 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Fuente: (IEEE-519, 2014), Recomendaciones y requerimientos para el control de armónicos en sistemas eléctricos

Realizado por: Méndez, Erik, 2017

De la tabla anterior se destaca los límites admisibles estipulados en la normativa IEEE 519-2014, obligatoriamente los valores de distorsión armónica por componente y la distorsión de demanda total en porcentaje no debe sobrepasar los valores indicados. Cabe destacar que para componentes armónicas pares se considera el 25 % de los valores dados en las componentes impares. (IEEE-519, 2014)

Cabe destacar que para el dimensionamiento de filtros se consideran entre otros índices los límites de las componentes de la distorsión armónica total tanto en corriente como en voltaje, así también los valores dados de “THD” y “TDD” en porcentaje, siendo lo indicado lo fundamental a considerar para el dimensionamiento, de igual manera y en complemento de lo mencionado, se deben considerar los valores de voltaje de alimentación, potencia, carga eléctrica (realizando un levantamiento de carga en el circuito eléctrico a analizar), entre otros índices básicos.

2.2.1.8 *Leyes, estándares y normativas referentes a la distorsión armónica eléctrica en el Ecuador*

De acuerdo al análisis del subcapítulo anterior existen límites para los niveles de distorsión armónica por componente y por valores totales (THD y TDD) para todos los niveles de voltaje y corriente, haciendo un énfasis principal de los niveles de voltaje donde existe una mayor concentración de cargas no lineales las cuales son las precursoras de armónicos eléctricos en un sistema.

Las normativas y estándares tales como la IEEE-519 y la IEC 1000-3-2, regulan y detallan la tolerancia máxima de distorsión armónica que un sistema eléctrico puede tener por nivel de voltaje y corriente, tendiendo siempre a asegurar la confiabilidad y calidad energética que se dictamina en un circuito o sistema eléctrico. (Mora Barajas & Bañuelos Sánchez, 2010, pp. 189-190).

Los límites de distorsión armónica por componente y por valores totales (TDD y THD), se detallan en las “Tablas 2-2 y 3-2” del presente trabajo investigativo, de igual manera se realiza un análisis completo detallado de acuerdo a lo estipulado en la normativa IEEE-519, relacionando los niveles de voltaje de distribución en los cuales se encuentra la mayor incidencia de armónicos eléctricos.

En el Ecuador existe una normativa detallada para la aplicación de las empresas de distribución eléctrica, siendo esta la etapa de un sistema eléctrico de potencia donde existe la mayor incidencia de armónicos por la concentración de cargas eléctricas no lineales de los usuarios comerciales, residenciales e industriales, la normativa vigente desde 2001, es la “Regulación No. CONELEC – 004/01” para la “Calidad del servicio eléctrico de distribución”, elaborada por el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC).

Esta regulación fue desarrollada con el propósito de garantizar al usuario final, un suministro eléctrico de alta confiabilidad y sobre todo continuo, para la cual era necesario desarrollar una regulación la cual dictamine los estándares mínimos para la medición y evaluación a los cuales estarán sometidas las empresas de distribución eléctrica del Ecuador. (CONELEC, 2001)

En el apartado 2.2.2 de la “Regulación No. CONELEC- 004/01” analiza la problemática de los armónicos para las empresas de distribución eléctricas de la localidad, para garantizar la calidad de la energía la regulación propone realizar un registro de cada uno de los puntos de medición en número equivalente al 0,15% del todo el sistema eléctrico. Para seleccionar los puntos de

medición se considerarán los niveles de voltaje, la topología de la red y el tipo de zona, pudiendo ser urbana o rural todo esto con la finalidad de escoger una muestra representativa para todo el sistema. (CONELEC, 2001)

Para las mediciones y muestras del sistema la regulación del CONELEC menciona que deben ser realizadas con un medidor para distorsiones armónicas de voltaje de acuerdo a la normativa IEC 61000-4-7, estos equipos permitirán medir y monitorear las mediciones de voltaje con contenido armónico para garantizar la calidad de la medición. Con respecto a los límites de distorsión armónica la “Regulación No. CONELEC- 004/01” cita un cuadro parecido al estipulado en el estándar IEEE-519-2014 (“Tablas 2-2 y 3-2”), con valores propios mencionados a continuación en la “Tabla 4-2” del presente trabajo de investigación:

Tabla 4-2: Límites de distorsión armónica máxima permisible en corriente para sistemas de distribución según la CONELEC – 004/01

ORDEN (n) DE LA ARMONICA Y THD		TOLERANCIA $ V_i $ o $ THD $ (% respecto al voltaje nominal del punto de medición)	
V > 40 kV (otros puntos)		V < = 40 kV (Transformadores de distribución)	
Impares no múltiplos de 3			
5	2.0	6.0	
7	2.0	5.0	
11	1.5	3.5	
13	1.5	3.0	
17	1.0	2.0	
19	1.0	1.5	
23	0.7	1.5	
25	0.7	1.5	
> 25	$0.1 + 0.6*25/n$	$0.2 + 1.3*25/n$	
Impares múltiplos de tres			
3	1.5	5.0	
9	1.0	1.5	
15	0.3	0.3	
21	0.2	0.2	
Mayores de 21	0.2	0.2	
Pares			
2	1.5	2.0	
4	1.0	1.0	
6	0.5	0.5	
8	0.2	0.5	
10	0.2	0.5	
12	0.2	0.2	
Mayores a 12	0.2	0.5	
THD	3	8	

Fuente: (CONELEC, Regulación 004/001 "Calidad del servicio eléctrico de distribución", 2001), Calidad del servicio eléctrico de distribución

Realizado por: Méndez, Erik, 2017

2.2.2 Mitigación de armónicos en redes de energía eléctrica

2.2.2.1 Métodos convencionales para la disminución de armónicos en redes de energía eléctrica

Existen varios métodos para la mitigación de armónicos en redes eléctricas y en procesos industriales en general (Shah, 2013, pp. 15-19), entre los principales están:

- **Transformadores Delta-Delta y Delta-Y:** Esta configuración pretende utilizar dos fuentes de alimentación diferentes para cargas estrictamente no lineales esto permite la cancelación de varios convertidores de 6 pulsos mediante métodos de cancelación.
- **Transformadores aislados:** Un transformador aislado brinda en ciertos casos una solución directa para armónicos generados por cargas no lineales, la ventaja principal de este tipo de transformador es la posibilidad de disponer un voltaje dividido.
- **Reactores:** El uso de reactores es simple y barato en la reducción de armónicos producidos en la red, los reactores generalmente se usan para cargas individuales tales como variadores, pretendiendo mitigar el efecto armónico que estos equipos aportan.
- **Filtros Pasivos para armónicos (Filtros armónicos de línea):** Este tipo de método se usa para controlar y eliminar armónicos de orden inferior, específicamente el 5to, 7mo, 11vo, 13vo. En la “Figura 9-2” se puede apreciar la conexión estándar generalizada de:

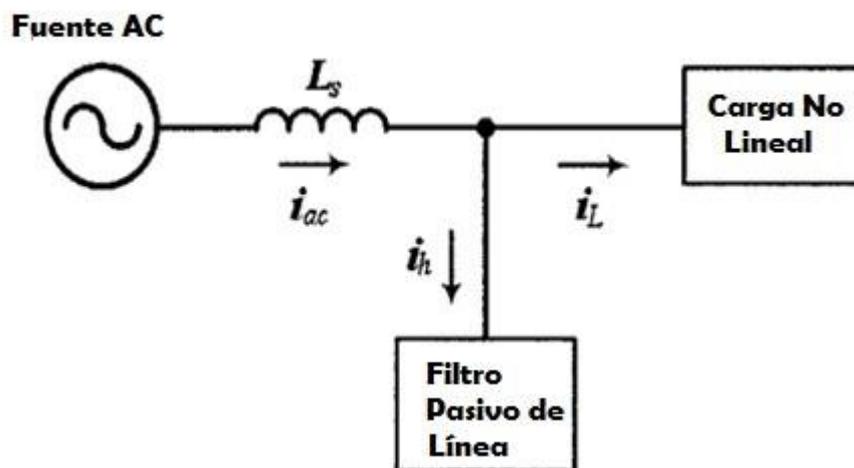


Figura 9-2: Conexión de un filtro de armónicos pasivo para una carga no lineal

Fuente: (Shah, 2013, p. 18)

- Filtros Activos:** Este método es el más utilizado y común en la mitigación de todos los órdenes de armónicos eléctricos a nivel industrial o residencial, donde además permite la compensación de la potencia reactiva en la red (para mejoras en el factor de potencia, correcciones de factor de potencia, etc.). A diferencia de los filtros pasivos, los filtros activos no aportan una resonancia a la red a la que están conectados, y adicionalmente no son afectados por las impedancias de cambio de fuentes. En la “Figura 10-2” se indica la conexión más usual de este tipo de filtro para redes de energía eléctrica.

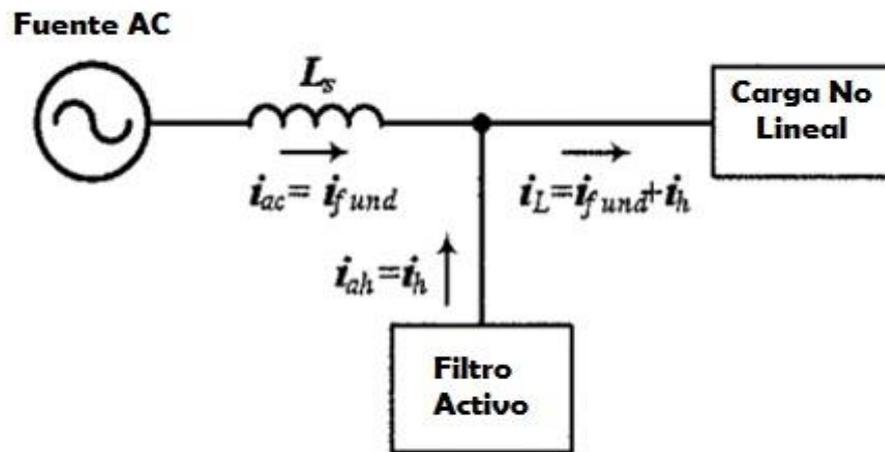


Figura 10-2: Conexión de un filtro de armónicos activo para una carga no lineal

Fuente: (Shah, 2013, p. 19)

Generalmente los filtros activos de fase son los más usuales en voltajes inferiores a 69 kV, para dimensionar este tipo de filtros se necesita conocer entre otros parámetros la corriente “RMS (Root Mean Square)” que no es nada más que la corriente efectiva o eficaz de un circuito, esta se calcula mediante la fórmula citada a continuación (7) cuando se la existe una relación con la distorsión armónica total:

$$I_{rms} = I_1 * \sqrt{1 + THD^2}$$

Ecuación 7 – 2:

Donde I_1 , es la corriente adicional generada por la presencia de armónicos, **THD**, es la “Distorsión Armónica Total” de voltaje en porcentaje, e I_{rms} es la corriente eficaz del sistema, que crece de manera proporcional con la corriente adicional generada por la presencia de armónicos en el sistema.

Esta fórmula permite dimensionar un filtro de armónicos, para una corriente generada por las cargas conectadas al circuito o sistema eléctrico, de igual manera es necesario destacar que se necesitan de otros parámetros básicos (potencia, voltaje de suministro, etc.), para poder seleccionar un filtro de armónicos que se adapte completamente a los voltajes antes mencionados. (Schneider, 2016)

- **Diseño de un sistema de potencia:** Los armónicos pueden ser reducidos limitando la carga no lineal del sistema al 30% de la capacidad máxima del transformador conectado a ellas, de la misma manera, el factor de potencia puede ser corregido mediante la instalación de capacitores, para prevenir la resonancia de los equipos conectados a la red se sugiere limitar al 15 % las cargas no lineales del sistema eléctrico.

2.2.2.2 *Métodos modernos para la detección y disminución de armónicos en redes de energía eléctrica*

Existen varios métodos para la mitigación de armónicos en redes eléctricas, en el apartado anterior se pudieron exponer algunos de los métodos más usuales para el tratamiento de armónicos en redes de energía eléctrica, de los cuales los filtros pasivos y los filtros activos especialmente, son los principales modelos de corrección debido a que modificar la topología de la red y considerar una expansión de futuras cargas no lineales en un sistema eléctrico de potencia se convierten en un análisis complejo debido a la creciente población y distribución demográfica actual de cualquier localidad.

De los modelos de corrección quizá el que mayor impacto tiene para el tratamiento de señales que incorporan componentes armónicas eléctricas es el “Filtro activo”, debido a su versatilidad y gran precisión, será el filtro utilizado para la comparativa con uno de los filtros modernos fundamentados en técnicas de inteligencia artificial tales como filtros para armónicos eléctricos basados en “Redes Neuronales Artificiales” (RNA’s).

A continuación, se exponen de manera general ciertos modelos de corrección (filtros) para la reducción de la distorsión e identificación de armónicos para cualquier nivel de voltaje, estos modelos de corrección utilizan técnicas de inteligencia artificial para el efecto mitigante, presentando resultados considerables, en el ámbito de la reducción de las perturbaciones armónicas, en redes de energía eléctrica (Gil, 2014, pp. 49-64):

- Filtros o modelos de corrección de armónicos que integran lógica difusa y neuro-difusa, utilizando la lógica de los conjuntos difusos es posible desarrollar controladores utilizando un método por “Supresión de armónicos en inversores monofásicos con modulación senoidal por ancho de pulso (SPWM)”, Al utilizar controladores PI (Proporcional-Integral) y PD (Proporcional-Derivativo) combinándolos con redes neuronales y lógica difusa, es posible la integración de un controlador PI neuronal (El controlador PI provee los datos para el entrenamiento de la red neuronal) y PD lógico difuso, a través de la lógica compensativa de señales, por medio de una métrica proporcional derivativa mediante la inclusión de 25 reglas difusas a dicho modelo de corrección. La simulación por medio de herramientas computacionales con programas tales como Matlab permiten poner a prueba este tipo de controladores obteniendo ondas sinusoidales casi puras, con un mínimo de componentes armónicas y con una distorsión armónica total (THD) porcentual mínima de igual manera. (Salazar, 2012).
- Filtros o modelos de corrección de armónicos que utilizan redes neuronales artificiales para el efecto mitigante, utilizando un acondicionador activo de potencia “Active Power Line Conditioner” (APLC), basado en la constitución de dos tipos de redes neuronales, “ADALINE” y “FEEDFORWARD” mediante un algoritmo de entrenamiento llamado “Backpropagation” se puede suprimir los armónicos generados en un sistema eléctrico, permite simular el comportamiento de un equipo de “switchero” (relay) con histéresis, el concepto de los dos tipos de redes se aplica para la señales PWM (Modulación por anchura de pulso), permitiendo compensar las cargas desequilibradas y no lineales, la implementación de este modelo en un sistema eléctrico de potencia permite la compensación de la potencia reactiva, el equilibrio de fases y por ende la eliminación de armónicos eléctricos en la red. (Pérez, Salmerón, & Vásquez, 2002).
- Filtros o modelos de corrección que utilizan redes neuronales artificiales, y la modulación de tensiones por espacios vectoriales, el desarrollo de este tipo de filtros avanzados activos de potencia se fundamenta en la compensación de componentes armónicas provocadas por cargas no lineales desequilibradas conectadas a la red, en primera instancia se utilizan las redes neuronales artificiales para la identificación de las

componentes armónicas en tiempo real, y por medio de la conmutación por medio de la modulación de tensiones por espacios vectoriales permite controlar los armónicos generados y equilibrar los sistemas desequilibrados en un porcentaje admisible para un sistema eléctrico, el desarrollo de este tipo de sistemas se ha probado mediante la simulación por medio de herramientas computacionales. (Rukonuzzama & Nakaoka, 2001, pp. 1602-1607)

Los diferentes filtros o modelos de corrección expuestos, son una compilación de ciertas investigaciones en técnicas de inteligencia artificial aplicadas a la corrección de armónicos eléctricos, con lo mencionado se pretende generar una idea general de los métodos modernos basados en técnicas de inteligencia artificial para la corrección de armónicos en redes de energía eléctrica. De igual manera para el presente trabajo investigativo se seleccionará uno de estos modelos de corrección modernos para compararlo con un método de corrección convencional, esto será viable mediante el desarrollo de un modelo general automatizado que no solo permita la corrección de armónicos sino que también podrá decidir cuál es el modelo de corrección que mejor se adapta a las características de cualquier sistema propuesto, haciendo énfasis principal en los sistemas de distribución eléctrica, en donde existe un mayor índice de cargas no lineales.

2.2.3 Técnicas de inteligencia artificial enfocadas al desarrollo de modelos y corrección de armónicos en redes de energía eléctrica.

En la presente sección, se pretende esclarecer de manera detallada los conceptos y definiciones, referentes a las técnicas de inteligencia artificial a ser utilizadas para el desarrollo del modelo mitigante propuesto, las generalidades de las técnicas utilizadas se exponen a continuación:

- Redes de Petri (Utilizadas para la validación, comprensión grafo-analítica, identificación de tiempos, y análisis generalizado del modelo propuesto)
- Redes Neuronales Artificiales (Utilizadas en la sección mitigante del modelo propuesto, siendo una alternativa a los modelos convencionales enfocados a la mitigación de armónicos en redes de energía eléctrica)

2.2.3.1 Redes de Petri en la elaboración de modelos de análisis y toma de decisiones

Las redes de Petri se enfocan esencialmente en la caracterización de sistemas, son modelos gráficos y matemáticos aplicables a un sinnúmero de sistemas estructurados, este tipo de redes

establecen una completa identificación de cualquier modelo propuesto, por medio de estados discretos que permiten una fácil visualización de la caracterización a establecer, con datos de interés necesarios para la comprensión del modelo o sistema (tiempos entre transición, validación entre etapas, etc.). (Murata, 1999, pp. 541-580)

Las redes de Petri tiene una versatilidad considerable, entre sus características más destacadas esta, la visualización de su desarrollo como la sincronización del modelo, la concurrencia de las redes con respecto al modelo, y los recursos compartidos generales del desarrollo, adicionalmente las redes de Petri disponen de una variedad de métodos para el análisis de las mismas, permitiendo una fácil relación, con procedimientos convencionales de estudio aplicadas al modelado de sistemas, al igual que la inclusión de técnicas de inteligencia artificial basadas en el modelado. (Cervantes, 2005, pp. 12 -39)

La principal característica de las redes de Petri, es su arquitectura basada en la validación y desarrollo de modelos o sistemas, mediante el auge de las mismas, a lo largo de los años, las redes de Petri han ido evolucionando, y formando relaciones con varias teorías formales en el ámbito de la inteligencia artificial, un ejemplo de lo mencionado son las denominadas “Redes de Petri -Difusas” (Pedricz & Gomide, 1994, pp. 295-301), donde existe una conjunción entre la teoría formal de redes de Petri y las reglas formalizadas de la lógica difusa, otro caso a destacar es el nexo de las redes de Petri con la teoría de los “Sistemas continuos – híbridos” (Alla & David, 1998, pp. 159-188), entre otros casos. De los componentes principales de las redes de Petri, se destacan los denominados “nodos”, los cuales son detallados en el siguiente apartado:

Las redes de Petri poseen dos tipos de “nodos de enlace”, sus generalidades son:

- Lugares o plazas, los cuales son representados por círculos (Variables del sistema definido o a definir)
- Transiciones, los cuales son representados por barras rectangulares. (Transformaciones de las variables)

Como componente principal de los “nodos”, en aras de dar cabida a la transición entre plazas o lugares, las redes de Petri integran los denominados “arcos”, los cuales permiten establecer nexos entre plazas y transiciones, en concordancia con las condiciones previamente asignadas, cada arco posee una identificación ponderada, la cual en el modelo representa la cantidad de “marcas” permisibles por “arco” (Murillo, 2008, p. 104). Un esquema de las redes de Petri se observa en la “Figura 11-2”. Cabe destacar que las marcas se representan gráficamente como puntos situados en la red y los arcos al igual, como flechas, permitiendo el nexo entre plazas.

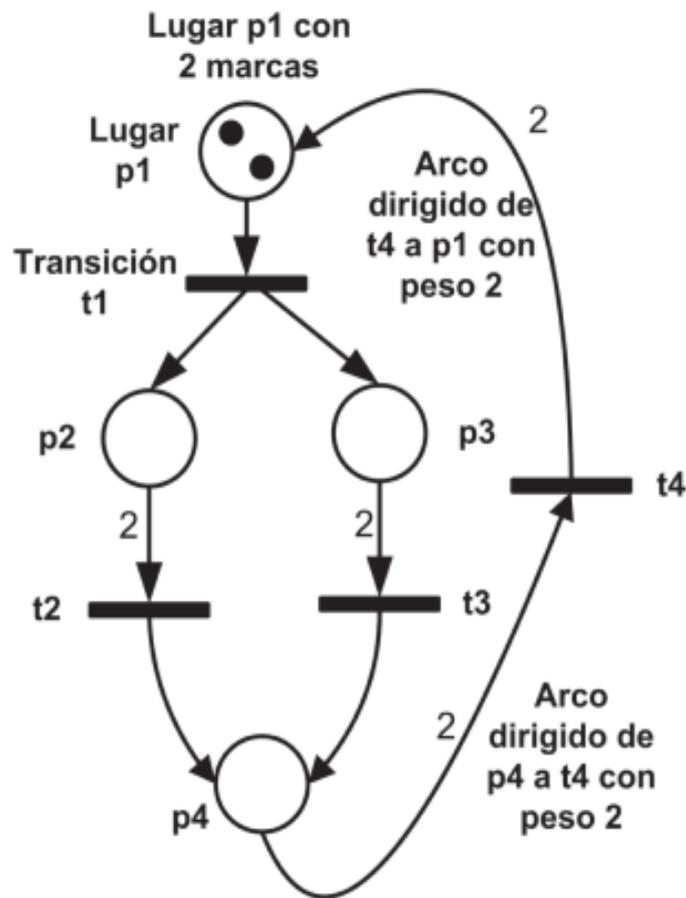


Figura 11-2: Redes de Petri especificando lugares, transiciones, arcos y pesos

Fuente: (Murillo, 2008, pp. 108-125)

Formalmente un “Red de Petri” se define como:

$$PN = (P, T, F, W, M_0)$$

Ecuación 8 – 2:

Donde:

- “P” es un conjunto finito de lugares
- “T” es un conjunto finito de transiciones
- “F” es un conjunto relacionado a los arcos dirigidos
- “W” es una función que relaciona los pesos
- M_0 es la marca inicial de la red

Las redes de Petri pueden ser definidas matricialmente, específicamente en dos matrices las cuales pueden ser de incidencia previa (C^-) o incidencia posterior (C^+) (Silva, 1985), adicionalmente de las redes se puede mencionar algunas propiedades principales que permiten definir las conceptual y matemáticamente en los casos que se requieran para al momento de desarrollar un modelo, estas propiedades se detallan a continuación:

- Vivacidad, se define que una red de Petri se encuentra viva para “Mo” (Marca inicial de la red) cuando, todas sus transiciones “T”, se encuentran vivas para la marca inicial antes mencionada. (Cervantes, 2005, pp. 12 -39)
- Ciclicidad, en redes de Petri la ciclicidad permite garantizar la no existencia de subconjuntos finales de estados, es decir posee una secuencia de disparos cíclicos que siempre tienden a alcanzar la marca inicial de la red “Mo” a partir cualquier marca “M” propuesta. (Murata, 1999, pp. 541-580)
- Acotamiento, el propósito principal de esta propiedad es la de asegurar que el sistema modelado por esta red posea un número limitado y finito de estados, estos estados finitos son determinados formalmente por el término “k-acotado” que formula que todas marcas iniciales de la red sin excepción alguna deben estar necesariamente limitadas. (Cervantes, 2005, pp. 12 -39)
- Conservatividad, formalmente para una red la conservatividad procura mantener las marcas de red, que generalmente suelen ser representados como los recursos de un modelo general de cualquier sistema, si posterior a una transición (disparo) la marca se mantiene, se dice que la red tiene una propiedad conservativa. (Cervantes, 2005, pp. 12 -39)
- Alcanzabilidad, en redes de Petri la alcanzabilidad permite que al momento de habilitarse una transición, automáticamente se ejecute un cambio en la secuencia de la marca de red, analizando lo mencionado, se detalla que si existiese un número “n” de transiciones, debería existir obligatoriamente el mismo número “n” de marcas que vayan a la par con el número de transiciones desarrolladas para el modelo propuesto. (Cervantes, 2005, pp. 12 -39)

2.2.3.2 *Redes neuronales artificiales aplicadas a corrección de problemas aplicados a la ingeniería*

Durante las últimas décadas se han desarrollado numerosas aplicaciones integrando la redes neuronales artificiales (RNA's) para la solución de problemas de ingeniería aplicada tales como la predicción de índices, análisis de series de tiempo, mitigación de armónicos, solución de problemas prácticos, etc. Estas aplicaciones utilizan redes neuronales artificiales e inclusive relacionan este tipo de técnica de inteligencia artificial y la relacionan con otras técnicas afines tales como la lógica difusa, máquinas de soporte vectorial y modelos híbridos.

Una de las ramas más destacadas del campo científico de la Inteligencia Artificial es la que corresponde a las Redes Neuronales Artificiales (RNAs), comprendiendo como tales aquellos tipos de redes en las que existen elementos procesadores de información de cuyas interacciones locales depende el comportamiento del conjunto del sistema a desarrollar o analizar. (Hilera & Martínez, 1995, p. 19)

Las Redes de Neuronas Artificiales (RNA) son un paradigma de aprendizaje y procesamiento automático inspirado en la forma en que funciona el sistema nervioso. Se trata de un sistema de interconexión de neuronas que colaboran entre sí para producir un estímulo de salida los cuales están estrechamente relacionados con las entradas y la importancia otorgada a esta entrada en el desarrollo de la red. (Mitchel, 1997, pp. 15-35)

El concepto de una red de neuronal artificial, es similar al concepto de las neuronas incorporadas en el cerebro humano, cada neurona dispone de nexos con otras neuronas, por lo que recibe estímulos o entradas con un cierto valor o peso, cabe destacar que el elemento principal de una red neuronal son las neuronas, estas neuronas se pueden analizar bajo un enfoque de control, estas incorporan entrada, las cuales son la información a procesar y sus respectivas salidas las cuales se detallan como la información procesada, las redes neuronales artificiales disponen de 3 tipos de funciones tendiendo a hacer un símil con la biología del cuerpo humano, estas se citan a continuación:

- Función de excitación, esta función relaciona la entrada de neurona la cual es parte de la red neuronal artificial con el peso o valor otorgado a la entrada antes mencionada, este peso es proporcional a la relevancia que tenga el dato de entrada y le da relevancia a la hora de procesar, analizar y emitir una salida deseada. Cabe destacar que si el valor otorgado a la entrada de la neurona es positivo se le

denomina excitatoria; si en cambio el peso o valor otorgado a la neurona es negativo, esta es denominada inhibitoria.

- Función de activación, una vez receptada la información ponderada y con la finalidad de denotar la importancia de la misma se procesa y analiza a través de una función de activación, la cual está estrechamente relacionada con la función de transferencia precursora del tratamiento de información previamente receptada. En algunos casos una función de activación intermedia entre una función de transferencia puede ser opcional.
- Función de transferencia, En términos matemáticos se identifica como una función no lineal, esta función puede ser una función sigmoide, o una función tangente hiperbólica en la mayoría de los casos, este tipo de función permite procesar y realizar un tratamiento de los datos obtenidos mediante una función de activación de existir y emitir una futura respuesta de salida para la red neuronal artificial.

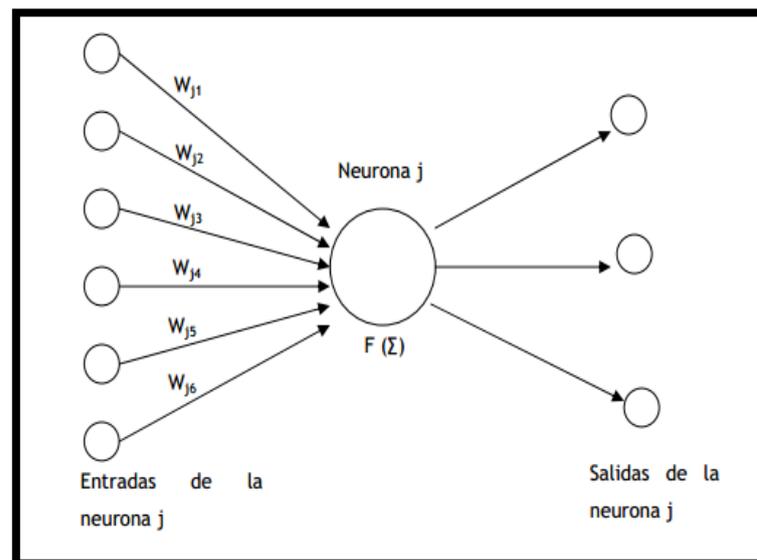


Figura 12-2: Esquema de funcionamiento de una neurona

Fuente: (Moreno, 2009, p. 20)

Algunas de las ventajas más destacadas de las RNA's, que se pueden mencionar son el aprendizaje instantáneo y automático de este tipo de redes, debido a que para emitir una salida, estas aprenden por sí mismas obteniendo resultados con tendencia a una mejora en la respuesta vinculada con la entrada proporcionada.

Otra de las ventajas de las RNA's es la reestructuración automática, las redes neuronales artificiales se agrupan por si solas formando una estructura sólida (arquitectura) permitiendo así cumplir con el procesamiento de la información para así obtener una salida deseada (predecir índices energéticos, corrección de la distorsión armónica total eléctrica, etc.).

Finalmente la flexibilidad, es una ventaja adicional debido a que se puede procesar la información de la entrada a pesar de que esta tenga ruido o datos no deseados, proporcionando una salida en concordancia con la calidad de la entrada proporcionada (datos previos), adicionalmente de las RNA's se puede citar en base a todo lo anteriormente mencionado, que estas disponen de una capacidad de procesamiento en línea, es decir pueden funcionar en un sistema en tiempo real si el usuario lo necesitase. (Hilera & Martínez, 1995, pág. 19)

Existen diferentes tipos de redes neuronales artificiales desarrolladas a lo largo de los años con las diversas aportaciones e investigaciones de diversos autores en el campo de la inteligencia artificial, en cuanto al campo de la ingeniería aplicada la resolución de problemas integrando RNA's es relativamente nuevo, a continuación y para la comprensión general del presente trabajo investigativo se presentan algunos de los tipos de RNA's más utilizados destacando el tipo de clasificación en función de ciertos parámetros citados en la siguiente tabla de resumen "Tabla 5.2"

Tabla 5-2: Características de los principales tipos de RNA's

Tipo de Clasificación	Tipo de RNA	Descripción
Clasificación en función del patrón de conexiones que representa la RNA.	<p>Redes de propagación hacia adelante "Feed-Forward" y sus dos modelos de RNA's:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Monocapa • Multicapa <p>Dentro de la clasificación de "Monocapa" se pueden encontrar ejemplos de red derivados como:</p> <ul style="list-style-type: none"> • "Perceptron " • "Adaline" <p>Dentro de la clasificación de "Multicapa" se pueden encontrar ejemplos de red derivados como el perceptrón multicapa.</p>	En este tipo de red los datos fluyen desde la entrada directamente hacia las unidades de salida por eso son denominadas "Feed-forward" o redes de propagación hacia adelante. Los datos pueden extenderse sobre múltiples (capas) unidades, pero las conexiones no "Feed-back" están presentes, esto significa, extender las conexiones desde las unidades de la salida a las unidades de la entrada en la misma capa o capas anteriores.
	Redes recurrentes con sus distintos modelos	Una red neuronal recurrente debe

	<p>como por ejemplo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Elman • Hopfield • Máquina de Boltzman 	<p>presentar al menos un ciclo de activación neuronal para ser denominada como tal, esta concepción es contraria a la redes “Feed-forward”, ya que en ella las propiedades dinámicas de la red son importantes. En algunos casos referentes a las redes recurrentes los valores de activación sufren un proceso de relajación tales que la red evolucionará a un estado estable en el cual estas activaciones no cambian más. (Kröse, 2006)</p>
<p>Clasificación referente al tipo de aprendizaje de la RNA.</p>	<p>Aprendizaje supervisados principales modelos son las siguientes redes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • “Perceptron simple” • “Adaline” • “Perceptron multicapa” • “Backpropagation” 	<p>La característica principal de las RNA’s que disponen de aprendizaje supervisado es que necesitan un conjunto de datos de entrada previamente clasificado, en otras palabras la respuesta o el “target” objetivo tiene que conocerse.</p>
	<p>Aprendizaje no supervisado o auto-organizado donde sus principales ejemplos son las redes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • “Hopfield” • “Máquina de Clautchy” • “Redes de Kohonen” • “Redes de resonancia adaptativa (ART)” 	<p>La redes neuronales que no disponen de un aprendizaje supervisado, no necesitan de un conjunto de datos previo, se auto-organizan por si solas.</p>
	<p>Redes híbridas donde el ejemplo principal de este tipo de red son las redes de base radial</p>	<p>Este tipo de red es un enfoque mixto en el que se utiliza una función de mejora para facilitar la convergencia, con juntamente con las redes “feed-forward” son las RNA’s más utilizadas para la resolución de problemas investigativos y de ingeniería.</p>

Clasificación referente a los tipos de entrada de la RNA.	Redes analógicas , donde los modelos principales de este tipo de RNA's son: <ul style="list-style-type: none"> • Hopfield • Kohonen • Redes de aprendizaje competitivo 	En este tipo de red se procesan datos de entrada con valores continuos que son generalmente acotados para el desarrollo, es decir rangos variables.
	Redes discretas , donde los tipos de redes neuronales artificiales principales de esta selección son: <ul style="list-style-type: none"> • "Boltzman" • "Cauchy" • "Red discreta de Hopfield" 	En este tipo de red se procesan datos de entrada de naturaleza discreta, como ejemplo los valores lógicos booleanos, en los cuales se tienen rangos definidos (0-1).
Otros tipos de RNA's	Redes neuronales tipo "SOM" (Self-organizing map)	Es un tipo de red neuronal que es entrenada usando referencias del aprendizaje no supervisado, esta red desarrolla una representación discreta del espacio de las muestras de entrada, llamado mapa.
	Redes neuronales (LVQ) "Learning Vector Quantization" (Cuantificación Vectorial)	Este tipo de RNA utiliza el espacio de las entradas para dividirlo en un número determinado de regiones, una vez hecho esto cada una de ellas se define como un vector caracterizado para el desarrollo.

Fuente: (Kröse, 2006) & (Matlab, 2016)

Realizado por: Méndez, Erik, 2017

De todos los tipos y modelos de redes neuronales artificiales se pueden detallar las fases principales que las RNA's incorporan en su arquitectura a la hora de realizar el procesamiento de datos e información, estas fases de procesamiento son:

- Etapa de entrenamiento, en la etapa de entrenamiento se ajustan los errores de predicción por medio de las capas de las redes neuronales artificiales y algoritmos propios incorporados para el desarrollo de la RNA, uno de los modelos de redes neuronales artificiales más utilizados es el denominado "Backpropagation", adicionalmente cada modelo de una RNA dispone de varios algoritmos embebido para el entrenamiento, algunos de los algoritmos más usuales son el denominado "Levenberg-Marquardt" o el algoritmo "Bayesiano", adicional a estos existen algoritmos adicionales, cada uno de estos con sus particularidades y generalidades.

- Etapa de validación, en la etapa de validación se usa un apartado de datos disponibles para asistir al proceso de entrenamiento, permite que la red sea cuantificada por sus métodos de generalización, algunos algoritmos de aprendizaje tales como el denominado método “Bayesiano de regulación” no utilizan esta etapa debido a que se auto validan en el mismo proceso de entrenamiento.
- Etapa de pruebas, en esta etapa también denominada “testing”, se tiene una estrecha relación indirecta con el proceso de entrenamiento y validación de la red neuronal artificial, esta etapa ofrece pruebas o evaluaciones de los datos procesados y entrenados de la RNA, por medio de esta etapa se puede disponer de datos de salida (validados y entrenados) que son sometidos a pruebas correlacionales para determinar el mínimo error cuadrático para el análisis de la información.

2.2.3.3 *Algoritmos de toma de decisiones generalizados enfocados al desarrollo de modelos automatizados*

En la solución de cualquier problema de ingeniería la toma de decisiones toma un papel fundamental a la hora de avizorar y planificar cualquier proceso que tenga cierta prioridad en un proceso jerarquizado tal como la construcción y desarrollo de un modelo automatizado, una definición formal de un proceso de toma de decisiones podría ser el análisis, identificación y elección de opciones disponibles por parte del encargado de emitir un juicio o criterio, al momento de tomar una decisión hay que estar plenamente consciente de que existen dos o más alternativas u opciones, y la alternativa a ser seleccionado, será la que mejor encaje con la solución propuesta o deseada. (Harris, 1998)

Dependiendo del autor, y la investigación a considerar, un proceso de toma de decisiones tiende a tener 8 pasos generalizados que permiten hallar una solución definitiva acorde a las necesidades requeridas (Baker, Bridges, Hunter, Johnson, & Krupa, 2001, pp. 2-20), en base a este antecedente y un análisis metodológico realizado para el presente trabajo investigativo, se citan los pasos y una breve descripción que permitirá esclarecer el proceso de toma de decisiones y permitirá introducir el concepto algorítmico, para una futura implementación y descripción en capítulos posteriores, a continuación se detallan los pasos:

1. Definición de la problemática, es importante declarar las condiciones iniciales y deseadas, para la correcta definición de la problemática latente en el proceso. (Sánchez-Pascuala, 2015, pp. 29-43)

2. Requisitos para la obtención de la solución, este paso se refiere esencialmente al detalle de las condiciones necesarias para la obtención de resultados, con la implicación de que estos resultados brindarán una solución al problema general. (Sánchez-Pascuala, 2015, pp. 29-43)
3. Declarar los objetivos, los objetivos son fundamentales a la hora de definir los deseos y el alcance de la problemática vigente. (Sánchez-Pascuala, 2015, pp. 29-43)
4. Encontrar e identificar las alternativas, es necesario precisar las alternativas, para de esta manera disponer de todos los enfoques necesarios para encontrar la solución deseada. (Sánchez-Pascuala, 2015, pp. 29-43)
5. Definición de los criterios, los criterios permiten cuantificar si es que una alternativa, cumplió con su objetivo, que fue inicialmente planteado para la solución del problema. (Sánchez-Pascuala, 2015, pp. 29-43)
6. Selección de la herramienta que permitirá la toma de decisiones, es en este punto donde se define el método, algoritmo o herramienta para la solución de un problema determinado, generalmente en modelos automatizados la selección de un algoritmo es fundamental para el desarrollo y obtención de la respuesta deseada. (Sánchez-Pascuala, 2015, pp. 29-43)
7. Evaluación de las alternativas propuestas, de los algoritmos, herramientas y métodos se puede hacer una preselección de los mismos con la finalidad de seleccionar el más adecuado, eficiente, eficaz y el que más se adapte al modelo propuesto. (Sánchez-Pascuala, 2015, pp. 29-43)
8. Validación de las soluciones con respecto a la problemática planteada, la validación es una parte fundamental en la solución de un problema propuesto, debido a que la herramienta utilizada para el proceso de toma de decisiones pudo en principio no ser la adecuada para la solución general del problema, esta etapa es netamente analítica, generalmente la validación se emite con un criterio investigativo por parte de la persona encargada de la elaboración del proceso de toma de decisiones. (Sánchez-Pascuala, 2015, pp. 29-43)

Algunos de los algoritmos más usados para la toma de decisiones en la rama de la ingeniería aplicada, se mencionan a continuación, con una breve descripción de cada uno, cabe destacar

que el uso de este tipo de herramientas representa un gran avance para el análisis de la información y al desarrollo de modelos conceptuales y automatizados, en adición a lo mencionado, el desarrollo de herramientas informáticas permiten materializar este tipo de métodos que asisten al proceso de toma decisiones:

- Algoritmos condicionales, este tipo de algoritmos permiten realizar comparativas entre distintos datos, mediante la utilización de las sentencias “if”, “else” y “ifnot”, mas su fácil integración a sistemas a modelos con respuestas precisas y definidas por el usuario, hacen de este tipo de algoritmos los más usados en la integración de sistemas y modelos mediante herramientas informáticas.
- Algoritmos genéticos, este tipo de algoritmos utilizan una métrica basada en la genética del cuerpo humano, obteniendo respuestas para casos de solución complejos por medio de mutaciones de familias, tendiendo a un error mínimo en la solución.
- Algoritmos heurísticos, este tipo de algoritmos se utilizan para el desarrollo de problemas que a pesar de que presentan ciertas restricciones para su análisis, estos problemas necesitan de una respuesta inmediata con los datos disponibles habilitantes, con una tendencia al error mínimo, donde la precisión de este tipo de algoritmos depende de la calidad de la información otorgada, siendo la respuesta “óptima” en la mayoría de los casos.

2.3 Marco conceptual

Modelo para la toma de decisiones: Un modelo puede ser reconocido como un agente autónomo que permite servir de patrón general, de tal forma que, sometido a cualquier complejidad, este pueda ir construyendo por niveles sucesivos de control la estructura total, la respuesta final o el análisis final de cualquier proceso o producto. (Lozada & Velasco, 2010, pp.140-145)

RNA: Las redes neuronales artificiales son aquellas que tratan de emular el comportamiento del cerebro humano, caracterizado por el aprendizaje a través de la experiencia y la extracción de conocimiento genérico a partir de un conjunto de datos. (Flores López & Fernández, 2008, p. 11).

Transmisión de energía eléctrica: Es el transporte de energía eléctrica por medio de conductores tales como líneas de transmisión elevadas y cables subterráneos (Wildi, 2007, pp. 9 - 109)

Generación de energía eléctrica: Es la producción de energía eléctrica que se consigue gracias al fenómeno de la inducción electromagnética, descubierto por Faraday en 1830. Es decir, que es posible generar un flujo de electrones a través de un conductor cuando éste se mueve con respecto a un campo magnético. (Bermúdez, 2000, p. 119).

Sistema eléctrico de potencia: Un sistema eléctrico de potencia incluye las etapas de generación, transmisión, distribución y utilización de la energía eléctrica, y su función primordial es la de llevar esta energía desde los centros de generación hasta los centros de consumo y por último entregarla al usuario en forma segura y con los niveles de calidad exigidos. (Ramírez, 2004, p. 2).

MATLAB: Es un potente lenguaje diseñado para la computación técnica. El nombre MATLAB proviene de “MatrixLABoratory”, dado que el tipo de dato básico que gestiona es una matriz (array). MATLAB puede ser utilizado en computación matemática, modelado y simulación, análisis y procesamiento de datos, visualización y representación de gráficos, así como para el desarrollo de algoritmos. (Gilat, 2005, p. 1).

Sistema automatizado: Un sistema automatizado es el trabajo de automatización de un sistema realizado por recursos humanos llamados operarios, hacia una serie de dispositivos, herramientas, y elementos tecnológicos. (Loyola, 1995)

Simulación: El concepto de simulación es inherente al ser humano, manifestándose en las distintas etapas de desarrollo desde la infancia hasta el adulto. En la infancia los niños simulan durante el juego, emulando a los adultos, las tareas que estos realizan, las relaciones entre sujetos, etc. (Lahoz-Beltra, 2004, p. 3).

Inteligencia artificial: Es la ciencia y la ingeniería de hacer máquinas inteligentes, especialmente los programas informáticos inteligentes. Se presenta de una forma automatizada por medio de los ordenadores o computadores tratando de emular la inteligencia humanada, la Inteligencia Artificial no solo se limita a métodos biológicamente observables. (McCarthy, 2007, pp. 7-15)

Distribución eléctrica: La distribución de energía eléctrica se encarga de comercializarla y hacer que esta llegue al consumidor final. Esta división depende del sistema eléctrico de un país y de las competencias estatales y no estatales que este disponga. (Mcgraw-Hill, 2010, pp. 2-10)

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE LA CONCEPCIÓN GENERAL DEL MODELO

3.1 Desarrollo de la metodología de la investigación

3.1.1 Tipo y diseño de la investigación

En la presente investigación se desarrollaron contenidos referentes a modelos de análisis y toma de decisiones para la reducción de la distorsión para redes eléctricas, haciendo uso de técnicas de inteligencia artificial desde la concepción del modelo propuesto, hasta la propuesta mitigante con la finalidad de realizar una comparativa entre modelos clásicos correctivos y modelos vanguardistas aplicados a la ingeniería en aras de asistir al proceso de análisis y toma de decisiones.

El enfoque en el que se orienta el presente trabajo investigativo, será netamente *experimental* debido a que se verificará si la hipótesis planteada anteriormente, tiene una validez en el marco del presente trabajo de investigación propuesto, adicionalmente en capítulos posteriores, se describirán y explicarán todos los procesos que enmarquen los modelos automáticos y correctivos que empleen técnicas de inteligencia artificial con el propósito de disminuir la distorsión armónica total en redes de energía eléctrica.

3.1.2 Métodos de investigación

Los métodos en los que se enfasca la presente investigación esencialmente son:

- Método Inductivo
- Método Estadístico

3.1.2.1 Método Inductivo

Por una parte, se presenta el desarrollo de la investigación haciendo inclusión del método

inductivo, ya que, de premisas particulares tales como la “distorsión armónica” siendo de extrema relevancia en el presente trabajo investigativo, permitió definir aspectos generales tales como el análisis de los casos de estudio presentados para la validación de la propuesta mitigante, con la finalidad de iniciar el proceso de toma de decisiones en la distribución de energía eléctrica en aras de mejorar y mantener la calidad de la energía bajo los rangos e índices estipulados en la normativa nacional (CONELEC) y extranjera (IEC y IEEE).

Las etapas desarrolladas en el método inductivo de la presente investigación fueron:

- **Observación**, se aplicó la etapa mencionada con la finalidad de comprender la problemática vigente, que destaca la necesidad de obtener un método de corrección para la distorsión armónica en uno de los sectores de mayor índice de producción de armónicos eléctricos por sus altos componentes no lineales y su importancia con el usuario final, como lo son las redes de energía eléctrica del sector de distribución de energía de un sistema eléctrico nacional.
- **Registro**, se aplicó el registro de las premisas particulares por medio de las mediciones dadas por las empresas de distribución tales como CNEL (Corporación Nacional de Electricidad)
- **Análisis**, el análisis se evidencio cuando en el registro de las señales eléctricas se detectó componentes armónicas y parámetros que afectan la calidad de la energía.
- **Clasificación**, la clasificación de las señales se enmarca en dos grupos a destacar, el primero de las señales que integran armónicos eléctricos, pero que no sobrepasan los índices y rangos estipulados en las normativas nacionales e internacionales, el segundo grupo es netamente de las señales que sobrepasan los rangos antes mencionados y que necesitan una medida de mitigación parcial o definitiva en aras de cumplir las normativas y estándares de calidad energética.
- **Derivación inductiva hacia la generalización**, a partir de los pasos antes analizados se destaca la problemática vigente de armónicos eléctricos en redes energía eléctrica, y la necesidad de desarrollar una medida mitigante, que para la presente investigación será un modelo que permita mejorar la calidad de la energía, manteniendo la distorsión armónica dentro de los rangos estipulados en las normativas nacionales y extranjeras y que aplique técnicas de inteligencia artificial para el efecto.
- **Contrastación o conclusión**, de los pasos anteriores se destaca que la finalidad principal es la mitigación de armónicos y el propósito principal del presente trabajo investigativo fue desarrollar un modelo que permita viabilizar las técnicas de inteligencia artificial hacia un enfoque técnico práctico al dar una solución a los

problemas de calidad de energética con casos prácticos simulados de las empresas de distribución eléctricas nacionales.

3.1.2.2 *Método estadístico*

Finalmente, el segundo método utilizado para el desarrollo de la presente investigación es el método estadístico, esto es debido a que los resultados finales son netamente cuantitativos debido a que se obtuvieron valores y rangos de distorsión armónica los cuales permitieron el análisis y la toma de decisiones del modelo correctivo seleccionado para el propósito, adicionalmente se analizaron y se interpretaron índices energéticos (distorsión armónica), con el propósito de mitigar la distorsión armónica en redes de energía eléctrica y de garantizar la calidad energética para el usuario final de acuerdo estándares y normativas presentadas en capítulos anteriores.

Las etapas desarrolladas en el método estadístico de la presente investigación fueron:

- **Planificación del estudio**, para el presente trabajo investigativo se utilizó la planificación de la información determinando en primera instancia la problemática vigente de armónicos eléctricos en redes de energía eléctrica, destacando el correspondiente respaldo metodológico para comprender el problema generalizado y así plantear una hipótesis en aras de una solución innovadora que aplique técnicas de inteligencia artificial para el efecto de mitigación.
- **Búsqueda de la información**, la información obtenida mediante la colaboración de CNEL EP (Corporación Nacional de Electricidad) para los casos de estudio a mitigar mediante el modelo propuesto, en adición de la investigación científica teórica previa, con la finalidad de disponer de herramientas teóricas, técnicas y computacionales hicieron de este paso uno de los más dinámicos de toda la investigación, adicionalmente de este paso se destaca la relevancia de la normativa nacional y extranjera en materia de calidad energética, la cual fue un aporte sustancial para la viabilidad del proceso metodológico analizado y de toda la investigación propuesta.
- **Elaboración y procesamiento de los datos**, El procesamiento de los datos se realizó de manera integradora con el modelo propuesto realizado, donde la adquisición de señales y el análisis de los datos para la selección del método de corrección fueron el pilar fundamental para la concepción del modelo y la síntesis del procesamiento se evidencia

en dependencia de la fundamentación metodológica estadística que permitió el desarrollo del presente trabajo investigativo.

- **Análisis e interpretación,** Los datos finales fueron interpretados presentando un breve detalle del modelo de corrección mitigante propuesto, siendo este parte del modelo generalizado permitiendo obtener una alternativa a la mitigación de armónicos de manera práctica con la integración de casos de estudios prácticos, e inclusive la facilidad de integrar casos de estudio simulados con condiciones extremas o atípicas.

3.1.3 Enfoque de la investigación

Con respecto al proceso desarrollado por parte del método estadístico, cabe recalcar que es crucial la aplicación del mismo debido a la información presentada de los índices de calidad energética, esto es debido a que se manejan variables y datos (distorsión armónica), y este método brinda una gran facilidad en el uso de los mismos, adicionalmente de este método se destacó la propiedad de establecer nexos con el método inductivo debido a que se cuantificaron los resultados respetando los rangos y límites establecidos en las normativas nacionales y extranjeras, permitiendo así dar una solución generalizada a los problemas de armónicos para cualquier caso dado en los que se puede utilizar una herramienta para la simulación.

Finalmente, de la investigación se puede mencionar que se aplicó un enfoque cuantitativo-cualitativo, esto es debido a que se utilizó el método estadístico para el tratamiento de datos de forma cuantitativa y a partir de los procesos de análisis y toma de decisiones se obtuvieron soluciones cualitativas descriptivas que ayudarán a los procesos de calidad energética de las redes de distribución eléctrica.

3.1.4 Alcance de la investigación

El alcance de este trabajo investigativo es de carácter aplicado con una connotación experimental y correlacional debido a que se tuvo la integración de variables o índices técnicos eléctricos tales como la distorsión armónica para poder asistir en la toma de decisiones, medidas correctivas y mantenimientos oportunos programados de los procesos de distribución de un sistema eléctrico nacional. Al no dar una relevancia a un problema energético tan serio como la contribución de armónicos por cargas no lineales en un sistema eléctrico nacional con mucha seguridad se propagarán problemas tales como el deterioro de las protecciones eléctricas de los equipo eléctricos conectados a la red, afectaciones severas en términos de la amplitud de la onda

senoidal entregada al usuario e indirectamente afectaciones al factor de potencia debido a que las cargas que se conectan a la red incluyen reactivos que también repercuten en la generación de armónicos eléctricos.

3.1.5 Población de estudio

En la investigación no es preciso definir una población o una muestra debido a que los datos con los que se va a desarrollar la investigación son netamente históricos y de carácter simulado para ciertos casos, los datos históricos fueron proporcionados como casos de estudio, al igual que los datos simulados que permitieron la inclusión de datos atípicos a ser analizados para la simulación y desarrollo del modelo propuesto, los datos históricos fueron presentados por empresas de distribución eléctrica debido a que estas empresas son donde existe la mayor concentración de distorsión armónica de todo un sistema eléctrico nacional generalizado.

3.1.6 Unidad de análisis

La unidad de análisis que referencia a la presente investigación, es la disponibilidad de los datos históricos de la empresa CNEL EP UN STD perteneciente a una de las empresas de distribución más grandes del Ecuador. Para el correcto uso de los datos se consideró analizarlos previo al ingreso del modelo, y para algunos casos se depuró la información obtenida eliminando datos atípicos presentados por los equipos que realizaron mediciones en campo, para el efecto se utilizaron métodos convencionales para el tratamiento de datos en aras de mejorar la confiabilidad del modelo y que la solución no contemple ruidos o perturbaciones que afecten al proceso de toma de decisiones.

3.1.7 Selección de la muestra

No aplica en la presente investigación tal y como se mencionó en el desarrollo del procedimiento metodológico de la presente investigación, adicionalmente cabe destacar que los datos históricos y los datos a simular podrían considerarse como una muestra siempre y cuando se analice primero la información haciendo comparativas con otras empresas del medio eléctrico.

3.1.8 Tamaño de la muestra

No aplica en la presente investigación debido a que los datos a considerar para el procesamiento de la información y desarrollo del modelo mitigante son datos históricos y datos simulados los

cuales permitirán disponer de una respuesta a la distorsión armónica latente en los casos a analizar o simular para lo cual no es preciso definir un tamaño de la muestra ya que los armónicos eléctricos se presentan en los lugares de mayor concentración de cargas no lineales, y en sistemas eléctricos lo mencionado no sigue una tendencia definida.

3.1.9 Técnicas de recolección de datos primarios y secundarios.

Con respecto a la obtención de los datos para el desarrollo del modelo mitigante antes mencionados (distorsión armónica), cabe recalcar que estos datos tal y como se ha mencionado a lo largo del desarrollo metodológico serán netamente históricos, y para el análisis también se presentarán datos simulados, los datos históricos fueron proporcionados de ante-mano por la empresa CNEL EP, la cual brindó el aval para el desarrollo del presente trabajo investigativo, destacando la relevancia que tiene la vinculación entre el sector industrial con el sector académico del país.

3.1.10 Instrumentos para la recolección de datos

La información para el desarrollo de la presente investigación consistió en la utilización de dos técnicas de recopilación de información en específico:

- Experimentos
- Técnicas clásicas de recopilación de información (entrevistas, libros, artículos, etc.)

Con respecto a los experimentos se definió que es el método más preciso para la recopilación de información debido a que el tema de estudio tiene muy pocas fuentes informativas, y el desarrollo del modelo es netamente experimental.

Adicionalmente, se utilizarán recursos clásicos de recopilación de información que permitieron dar nuevas aristas a la investigación desarrollada, el apoyo en estas fuentes informativas (libros, artículos, entrevistas, revistas, etc.) fue crucial para el desarrollo del estudio del arte del presente trabajo investigativo, lo cual permitió avizorar de una forma anticipada el modelo mitigante planteado para el presente proyecto de titulación.

3.1.11 Instrumentos para procesar datos recopilados

- Matlab
- Excel

- Redes de Petri

3.2 Desarrollo y estudio del modelo propuesto para el análisis y toma de decisiones en aras de la mitigación armónica

El modelo generalizado propuesto en el presente trabajo investigativo se orienta en cinco fases debidamente detalladas y analizadas a lo largo de este capítulo, siempre en aras de cumplir con el propósito principal, el cual es la mitigación de armónicos en redes de energía eléctrica, este modelo mitigante, posteriormente será simulado y analizado haciendo uso de herramientas computacionales para una mayor comprensión del mismo, las cinco fases planteadas para el funcionamiento del modelo son:

- Adquisición de los datos (Adquisiciones de señales por medio de datos históricos y Adquisición de datos por medio de la simulación de señales).
- Análisis de la señal de entrada
- Análisis de los modelos de corrección
- Selección del modelo de corrección
- Breve detalle del modelo de corrección seleccionado

En la figura (Figura 1-3) se gráfica el detalle general del modelo propuesto para la mitigación de armónicos.

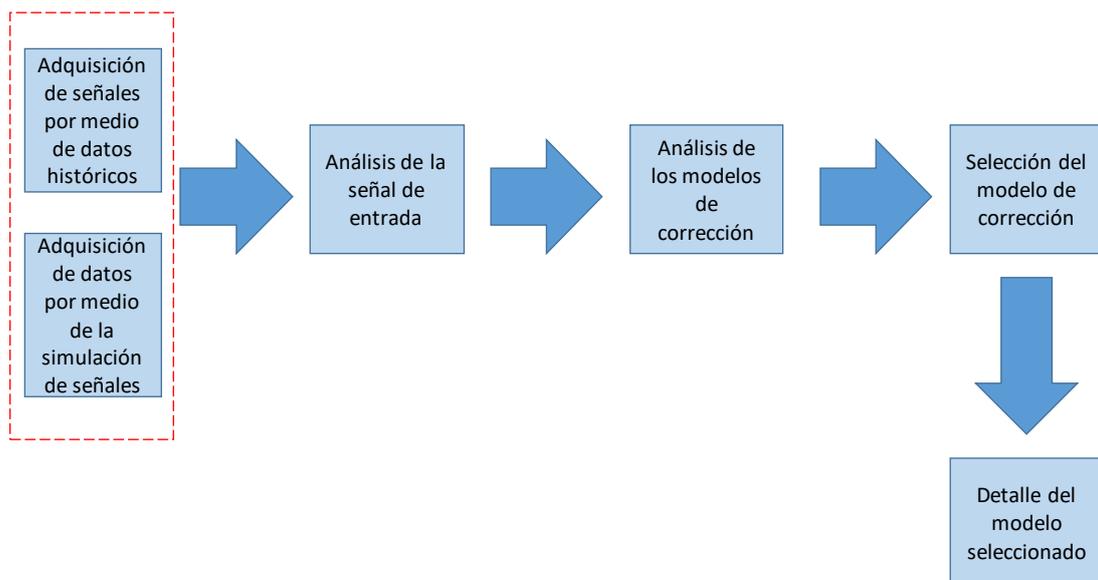


Figura 1-3: Detalle del modelo mitigante

Fuente: Méndez, Erik, 2017

Por medio de la figura anterior (Figura 1-3), a continuación se presenta un detalle de cada una de las fases consideradas para el funcionamiento del modelo mitigante propuesto:

3.2.1 Adquisición de señales por medio de datos históricos

Tal y como se ha mencionado en capítulos anteriores del presente trabajo investigativo, el sector en donde existe una mayor conglomeración de armónicos eléctricos en un sistema eléctrico generalizado y estandarizado, es el sector de distribución o comercialización de electricidad, esto es debido a que la mayor concentración de cargas no lineales (inductivas-capacitivas), están inmersas en la distribución de energía de este subsistema.

En esta etapa se analizarán señales físicas de entrada mediante mediciones reales en campo o mediciones históricas, para el efecto pueden considerarse, señales de empresas de distribución (voltaje, amperajes, potencias, etc.) las señales adquiridas serán ingresadas al modelo conceptual para su posterior simulación y análisis, y de ser necesario se aplicará un tratamiento de señal por métodos convencionales para eliminar datos atípicos.

Cabe recalcar que el mayor índice de cargas no lineales se registra con los usuarios finales (las personas) los cuales inyectan una cantidad considerable de armónicos. En empresas eléctricas de distribución el análisis de los armónicos eléctricos y la adquisición de los datos de este tipo de señales se hace mediante equipos analizadores de calidad energética o carga (Ver “Figura 2-3”), este tipo de dispositivos se conectan a la red adquiriendo señales de forma periódica de acuerdo a la exigencia de la regulación vigente de cada país o ente encargado para el control energético del medio.

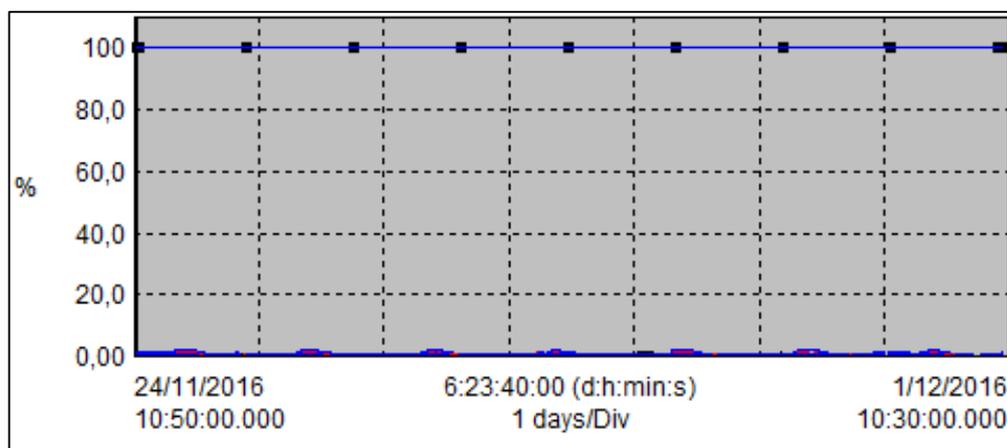


Figura 2-3: Mediciones de distorsión armónica en campo mediante el equipo AEMC 3945-B PowerPad

Fuente: (CNEL, 2016, p.5)

En el Ecuador el CONELEC (Consejo Nacional de Electricidad) en base a la “Regulación 004/01” (basada en normas internacionales tales como la IEEE 519 o la IEC) y el ARCONEL (Agencia De Regulación y Control De Electricidad) exige muestras, cada 10 minutos por una semana (7 días), completando un registro de 1008 muestras para el análisis en empresas de distribución, destacando que esta metodología es sugerida para el estudio generalizado de cualquier sistema o circuito eléctrico, con esto se pretende analizar todos los parámetros de calidad de energía procediendo a realizar la examinación y revisión de todos los datos recabados en campo. (CONELEC, 2001)

Cabe recalcar que en una etapa posterior a la adquisición de datos (históricos o simulados), se procederán a analizar los datos obtenidos para el modelo mitigante, siendo este estudio parte de la etapa de análisis de datos en la cual se procederá excluir datos atípicos considerados en los registros históricos, si es que existiera la necesidad, con la finalidad de facilitar el análisis de la señal y para la correcta selección del modelo de mitigación que permita solucionar el problema con una tendencia de distorsión armónica mínima, ésta permitirá obtener un modelo de análisis y toma de decisiones integral y permitirá hacer un símil con la gestión del mantenimiento actual para el tratamiento de las señales afectadas en el sistema eléctrico.

Los datos de mayor relevancia para un estudio detallado de la distorsión armónica y análisis de la calidad energética son los presentados en la “Tabla 1-3”, cabe destacar que los equipos analizadores de calidad de la energía utilizados para la adquisición de señales y datos en campo (redes de energía eléctrica de empresas de distribución) integran varios parámetros e índices eléctricos adicionales, en la tabla antes mencionada se presenta un resumen de los datos de mayor relevancia para un análisis generalizado de armónicos y distorsión armónica cumpliendo normativas y resoluciones locales, estos datos se presentan a continuación:

Tabla 1-3: Ficha de datos resumen de un análisis realizado de un transformador comercial de 300 KVA por el departamento de calidad de la CNEL EP

TRAFO N°						52757823	
ESTUDIO DE CALIDAD CNEL EP UN STD							
1.- PERIODO A EVALUARSE							
FECHA INICIO	24/11/2016	FECHA FIN	01/12/2016	DIAS EVALUADOS		7	
2.- DATOS TECNICOS							
POTENCIA kVA	VOLTAJE PRIMARIO (kV)	CORRIENTE PRIMARIO f-f (A)	NRO FASE	VOLTAJE SECUNDARIO NOMINAL f-f (V)	VOLTAJE SECUNDARIO NOMINAL f-N (V)	CORRIENTE 2ND f-f (A)	ENERGIA SUMINISTRADA kWh (PERIODO)
300	13,2	13,14	3	220	127,2	788,23	7575,29

3.- DATOS REGISTRADOS CON ANALIZADOR									
DEMANDA MAXIMA kVA	VOLTAJE SECUNDARIO PROM f-n.			FLICKER (PST)			ARMONICOS DE VOLTAJE (THD)		
	L1 (V)	L2 (V)	L3 (V)	L1	L2	L3	L1	L2	L3
98,95	125,47	124,74	125,61	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
CARGA (%)	ΔV_{rms}			CORRIENTE SECUNDARIO PROMEDIO			FACTOR DE POTENCIA PROMEDIO		
	L1 f-n (A)	L2 f-n (A)	L3 f-n (A)	L1	L2	L3	L1	L2	L3
33%	4,56%	3,95%	4,68%	136,81	128,21	114,76	0,96	0,95	0,95
FACTORES DE UTILIZACIÓN								DISPONIBILIDAD	
FASE 1	FASE 2	FASE 3		TOTAL					
37%	34%	32%		33%		67%			
TIEMPO QUE SOBREPASA LA CAPACIDAD NOMINAL DEL TRANSFORMADOR (HORAS)									
FASE 1	FASE 2		FASE 3		TOTAL				
0,00	0,00		0,00		0,00				
4.- CONCLUSIONES COMPARADAS CON LA RESOLUCION DEL ARCONEL 004/01									
PARAMETRO	REFERENCIA		CRITERIO DE COMPROBACION						
1.- NIVELES DE VOLTAJE	L1	<i>SI CUMPLE</i>		La ΔV_{rms} , del voltaje promedio rms, no excede el 8% del voltaje nominal					
	L2	<i>SI CUMPLE</i>							
	L3	<i>SI CUMPLE</i>							
2.- FLICKERS	L1	<i>SI CUMPLE</i>		Menos del 5% de los registros están bajo PST ≥ 1					
	L2	<i>SI CUMPLE</i>							
	L3	<i>SI CUMPLE</i>							
3.-ARMONICOS DE VOLTAJE	L1	<i>SI CUMPLE</i>		La Regulación 004/01 no especifica el límite para el número de registros THD que sobrepasan el 8%					
	L2	<i>SI CUMPLE</i>							
	L3	<i>SI CUMPLE</i>							

Fuente: (CNEL, 2016), Ejemplo de datos obtenidos de un analizador de calidad de energía por análisis de un transformador de 300 KVA particular perteneciente al "Hospital General" de Santo Domingo, Ecuador

Realizado por: Méndez, Erik, 2017

De la tabla anterior (Tabla 1-3) se destacan los datos de distorsión armónica (Perturbaciones en la señal senoidal pura que para este caso en específico es nula debido a que los datos fueron medidos en un transformador Y-Delta), factor de potencia (Provocado por cargas netamente inductivas, y de alta penalización en las empresas de distribución regionales) y "flicker" (Oscilaciones de voltaje en un sistema o circuito eléctrico), todos los datos antes mencionados son parámetros de calidad energética a considerar en un sistema eléctrico. En el Ecuador la "Regulación CONELEC 004/01", dictamina los límites máximos de este tipo de índices energéticos, para un óptimo funcionamiento del sistema eléctrico nacional siempre en aras de mantener la calidad de la energía en el país.

3.2.2 Adquisición de señales por medio de la simulación de señales

Otra alternativa para la generación de señales para el modelo mitigante propuesto, será la generación simulada de rangos de distorsión armónica, que permitirá la simulación de casos de estudios de campo (siendo el complemento de la etapa de adquisición de datos históricos) al igual que la inclusión de la simulación de casos aislados o extremos de armónicos y distorsión armónica, en adición de casos recurrentes que dispongan una cantidad aceptable de distorsión armónica (Distorsión armónica inferior al 5 %).

En complemento de todo lo mencionado y para un análisis más exhaustivo con rangos moderados de distorsión armónica e inclusive para la exposición de casos extremos o aislados en los que se involucre la presencia de armónicos eléctricos y afecte la calidad de la energía, se utiliza la simulación de las señales eléctricas, mediante potentes herramientas computacionales tales como Matlab, CYMDIST, LabView, entre otras. Cabe destacar que, para el desarrollo de modelos de mitigación que integren índices eléctricos para el efecto, generalmente se simulan casos de estudio suscitados en campo, digitalizando (simulando) la información e inclusive brindando perspectivas alternas al investigador dedicado al campo de la calidad de energía, a continuación, se expone un caso simulado de la afectación de cargas no lineales previo la generación de armónicos (Ver “Figura 3-3”), mediante la herramienta computacional de Matlab, una herramienta computacional de gran relevancia en temas relacionados a la ingeniería e informática aplicada, avizorando el uso del software seleccionado para el desarrollo del modelo tanto conceptual mediante redes de Petri y la integración de los modelos mitigantes para el análisis y toma de decisiones.

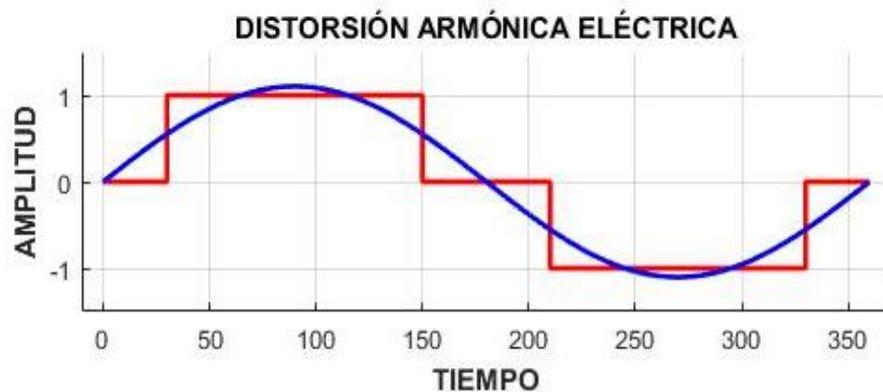


Figura 3-3: Comparativa entre señal senoidal pura (azul) y carga no lineal (rojo) mediante la herramienta computacional Matlab

Fuente: (Matlab, 2016)

Realizado por: Méndez, Erik, 2017

3.2.3 *Análisis de las señales de entrada*

El análisis de la señal de entrada permitirá identificar los parámetros cruciales necesarios para que el modelo propuesto, pueda definir el modelo o los modelos de corrección adecuados para el caso de estudio dado. En esta etapa también se analizarán los datos y de ser necesario se eliminarán valores atípicos que representen ruido en el estudio de la señal, para esta etapa se pretende identificar los valores necesarios para la corrección y el análisis de los modelos mitigantes implícitos en el modelo general desarrollado.

Específicamente los datos a considerar para el análisis de los armónicos son los valores de distorsión armónica total y componentes armónicas para el desarrollo y aplicación de modelos correctivos que ataquen el problema de los armónicos generados en barra (voltaje), para un análisis de espectro más preciso se podría considerar la forma de la onda de la carga, la cual es la onda senoidal que regresa a la red incluyendo las componentes armónicas, para realizar una revisión gráfica y minuciosa mediante el ingreso de los datos al software de simulación.

Los datos simulados y los datos históricos (enunciados en el subcapítulo de adquisición de señales) que incorporen señales con componentes armónicas eléctricas serán procesados en esta etapa de análisis, donde preferente la información podría ser indicada de forma gráfica y cuantitativa (valores de distorsión armónica total) para una mayor comprensión del investigador en aras de brindar datos necesarios e indispensables para una posterior selección de un modelo de corrección mitigante (filtros, modelos matemáticos enfocados a la mitigación, etc.) de armónicos en redes de energía eléctrica.

3.2.4 *Análisis de los modelos de corrección*

En esta etapa se pretende realizar una comparativa con un modelo mitigante convencional que más se adapte a la solución de problemas de armónicos y filtros adaptativos que aplique técnicas de inteligencia artificial para el efecto mitigante de armónicos en redes de energía eléctrica, alguno de los modelos convencionales más utilizados se enumeran a continuación:

- Modelos sintonizados (filtros sintonizados)
- Modelos amortiguados (filtros amortiguados)
- Modelos corrección activos (filtros activos para sistemas eléctricos)
- Modelos de corrección pasivos (filtros pasivos para sistemas eléctricos)
- Modelos de corrección electrónicos (filtros híbridos o combinación de modelos)

convencionales con electrónica enfocada a la mitigación de armónicos eléctricos)

De los modelos convencionales se seleccionará el modelo más utilizado en empresas eléctricas que intervengan en sistemas de distribución de energía, debido a que como ya se ha mencionado en capítulos anteriores estos sistemas eléctricos son los que tienen una alta intervención de cargas no lineales, las cuales son las causales de la generación de armónicos en una red o circuito generalizado, para la presente propuesta de modelo se selecciona el “filtro activo”.

El modelo de corrección mediante I.A a ser considerado en el presente trabajo investigativo es el filtro que integra redes neuronales artificiales para el efecto de corrección de armónicos, el despliegue y filtrado simultáneo por medio del modelo mitigante antes mencionado permitirá tener un espectro de soluciones, las cuales serán evaluadas por el modelo generalizado y posteriormente pretenderá seleccionar la mejor solución en función de los parámetros mínimos requeridos en la normativa nacional y extranjera, tal y como se detallará en la etapa de “Selección del modelo de corrección”.

3.2.5 Selección del modelo de corrección

Dados los modelos convencionales y los modelos adaptativos innovadores antes mencionados en la etapa anterior del modelo propuesto, para la selección del modelo de corrección se elegirá la decisión más fiable para el caso de estudio analizado, considerando las generalidades y particularidades de la señal obtenida mediante los dos métodos anteriormente citados (“Adquisición de datos por medio de registros históricos” y “Adquisición de datos por medio de la simulación”)

Para el efecto mitigante y para una selección del modelo corrección que mejor se adapte al caso propuesto se empleará el uso de un algoritmo de toma de decisiones que permitirá disponer de una selección automatizada de la respuesta obtenida de los modelos de corrección que brinde una mejora considerable a la distorsión armónica de la señal analizada, en concordancia de los límites estipulados en las normativas nacionales y extranjeras (Regulación del CONELEC “004/01” ARCONEL y IEEE 519) para selección autónoma de los modelos de corrección en modelo general con una fiabilidad y precisión aceptable para el caso de estudio o para cualquier caso de estudio a analizar.

3.2.6 Breve detalle del modelo de corrección (filtro) seleccionado

Con la finalidad de describir el modelo de mitigación seleccionado perteneciente al modelo general propuesto, se presentará un breve resumen del filtro (modelo de corrección) seleccionado destacando sus generalidades y particularidades en aras de desarrollar en una futura investigación una implementación práctica del mismo, cabe destacar que debido al carácter investigativo del presente trabajo de titulación, el modelo general se presentará haciendo uso de técnicas de inteligencia artificial tales como las redes de Petri para la simulación del modelo, en inclusión de herramientas computacionales aplicadas al uso de la inteligencia artificial para la ingeniería (Matlab), su integración es necesaria debido a que presentan una verdadera facilidad a la hora de validar el modelo propuesto y evaluar varios casos que integran la problemática de la distorsión armónica eléctrica.

3.2.7 Ventajas y desventajas de los modelos de corrección en comparación del modelo propuesto

Las principales ventajas y desventajas de los modelos mitigantes actuales (filtros y arreglos para la corrección de armónicos) se presentan a continuación:

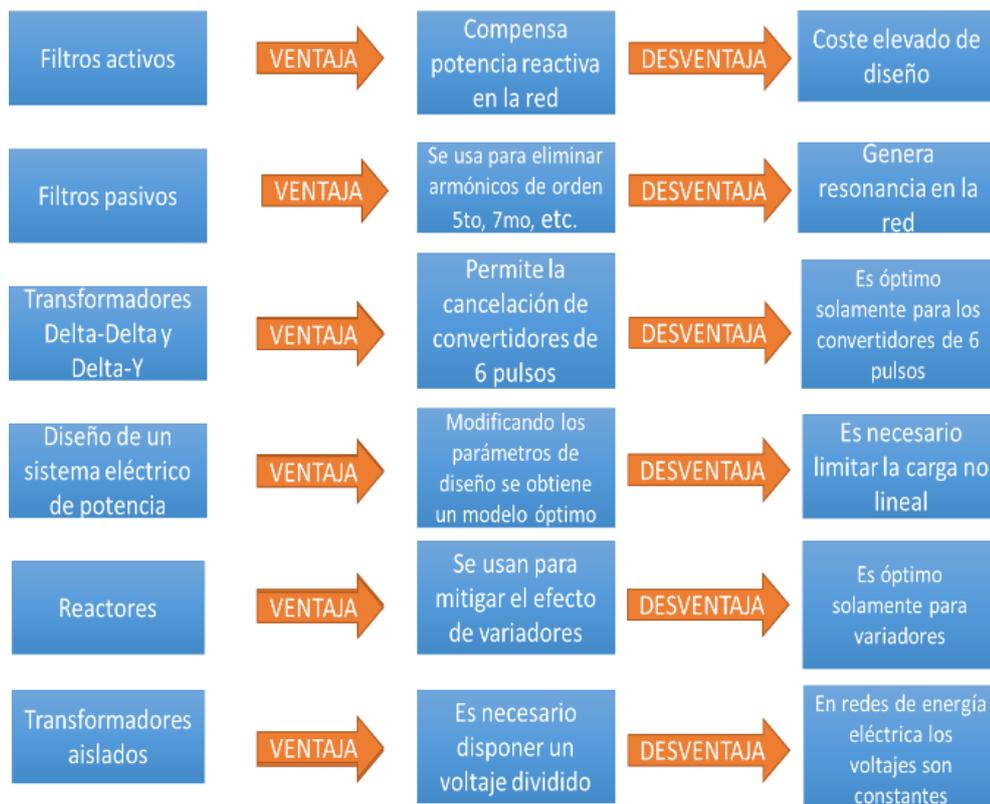


Figura 4-3: Ventajas y desventajas de los modelo de corrección actuales

Fuente: Méndez, Erik, 2017

El presente modelo generalizado pretende, obviar las desventajas de los modelos físicos y lógicos para la corrección de la actualidad (filtros y arreglos eléctricos), generando respuestas a valores de la distorsión armónica total para cualquier caso de solución planteado en redes de energía eléctrica, haciendo un énfasis principal en las empresas de distribución eléctrica donde se concentra la mayor cantidad de armónicos producidos en un sistema eléctrico de potencia, debido a la no linealidad de las cargas. La propuesta final del modelo que aparte de realizar una función mitigante integra distintas fases y como se indica en la “Figura 5-3”



Figura 5-3: Propuesta del modelo generalizado incluyendo la solución mitigante

Fuente: Méndez, Erik, 2017

Del modelo generalizado, se espera la máxima precisión, fiabilidad y confiabilidad, debido a que incorpora varias fases tales como el análisis de las señales, análisis y selección del modelo de corrección (modelo de corrección convencional o modelo de corrección adaptativo), y la respuesta para cualquier caso de estudio permitirá establecer un modelo dinámico e innovador que brindará una alternativa a la distorsión armónica mediante el empleo de técnicas de inteligencia artificial para su desarrollo (redes de Petri) para cualquier caso de estudio, para complementar lo mencionado, las fortalezas del modelo propuesto en comparativa con los modelos convencionales son:

- Aplicabilidad de técnicas de inteligencia artificial en los modelos mitigantes
- Aplicabilidad de algoritmos en la toma de decisiones
- Respuesta para cualquier caso de estudio dado, en un sistema o circuito eléctrico donde exista una concentración de armónicos haciendo un énfasis específico a la distribución de energía eléctrica.
- Capacidad de procesamiento para múltiples casos de estudio en diversas condiciones mediante el uso de herramientas computacionales para el propósito.
- Inclusión de modelos correctivos (convencionales y mediante el uso de redes neuronales artificiales) los cuales permiten comparar el modelo de mitigación propuesto y la posibilidad de seleccionar el “mejor” modelo de corrección de acuerdo a las exigencias de las regulaciones de calidad energética locales.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DEL DESARROLLO DEL MODELO PROPUESTO CONSIDERANDO LA VALIDACIÓN Y LA IMPLEMENTACIÓN MEDIANTE EL EMPLEO DE TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

4.1 Introducción

Como foco principal del presente capítulo se presentará la validación y la implementación enfocada al análisis de casos de estudio del modelo propuesto, esto permitirá la evaluación y discusión de la selección de las técnicas de inteligencia artificial aplicadas al desarrollo de modelos mitigantes en materia de reducción de la distorsión armónica eléctrica en sistemas eléctricos que integran redes de energía para la propagación de este tipo de perturbaciones.

Para la implementación del modelo considerando el análisis de casos de estudio, se procederá a incluir datos históricos proporcionados por medio de las empresas de distribución eléctrica del medio (CNEL EP) o casos simulados con las correspondientes peculiaridades, generalidades y altos niveles de distorsión armónica se procederá a desarrollar una implementación para el análisis de casos de estudio complemento del modelo conceptual generalizado a presentarse utilizando redes de Petri, tal y como se ha mencionado en capítulos anteriores del presente trabajo investigativo.

Como aclaración cabe destacar que se exponen dos connotaciones del modelo para dos propósitos de validación y análisis (Análisis de casos de estudio), pero ambas connotaciones siguen siendo parte de un modelo generalizado estructurado, el cual se expuso y se analizó a detalle en el capítulo anterior (“Capítulo 3”) donde las redes de Petri permitirán la validación generalizada del modelo, y la implementación de ciertos algoritmos (incluyendo el algoritmo de las redes neuronales artificiales para el efecto mitigante) permitirá la evaluación de los casos de estudio a presentarse, donde ambas implementaciones son conceptualmente idénticas y fieles al modelo propuesto.

Para la validación y la implementación del modelo tanto para el análisis de casos de estudio, y para la simulación secuencial esquemática mediante redes de “Petri”, es necesario el uso de herramientas computacionales, estas deben de disponer una notaría versatilidad a la hora de

manejar técnicas de inteligencia artificial, y de incorporar diversas funcionalidades en aras de combinar métodos clásicos de programación con técnicas modernas que impliquen la integración de modelos matemáticos enfocados al desarrollo de modelos mitigantes.

En resumen, el modelo tendrá dos etapas complementarias, siendo la primera enfocada a la validación del modelo de forma conceptual generalizada, y la segunda enfocada al estudio de casos propuestos, para el desarrollo del modelo en ambas fases es necesario utilizar una herramienta computacional que brinde las prestaciones de entorno y arquitectura para el efecto, a continuación se detallará una justificación de la herramienta computacional a utilizar para el desarrollo del modelo orientado a las dos connotaciones antes mencionadas.

4.2 Descripción de la herramienta utilizada para la validación y la implementación del modelo propuesto

4.2.1 Justificación del software a utilizar para la implementación del modelo mitigante propuesto

La herramienta predominante para el desarrollo del modelo propuesto será Matlab, debido a que esta herramienta computacional, permite de manera integral realizar la validación e implementación del modelo mitigante propuesto, a continuación el detalle:

- Validación del modelo para el análisis conceptual generalizado, mediante la utilización de redes de Petri para el efecto.
- Implementación del modelo para el análisis de casos de estudio propuestos, a través del desarrollo de algoritmos, incluyendo la incorporación de las redes neuronales artificiales para el efecto mitigante.

De manera general Matlab permitirá cumplir con el propósito principal del presente trabajo investigativo, mediante la validación y la implementación del modelo utilizando técnicas de inteligencia artificial para el efecto (tanto para la construcción del modelo conceptual generalizado, como en el desarrollo enfocado a solventar los problemas presentados por los casos de estudio propuestos).

La selección de Matlab como herramienta principal para el desarrollo del modelo se realiza debido a la gran versatilidad de esta software computacional de alto impacto, además de su

facilidad a la hora de integrar modelos matemáticos en el desarrollo de algoritmos que permitan solventar la problemática de la mitigación armónica, y en general de cualquier problemática enfocada a las ciencias, ingeniería y de más ramas de estudio.

En adición a todo lo mencionado, considerando la versatilidad, practicidad y fiabilidad de la herramienta principal utilizada para la implementación del modelo (Matlab), a continuación, se procede a describir algunas de las generalidades del software seleccionado para el desarrollo.

4.2.2 Generalidades del software escogido para la implementación del modelo Matlab

Del apartado anterior podemos destacar a Matlab como el software de desarrollo principal a considerar para la construcción del modelo propuesto en todas sus connotaciones, debido a que suple todas las necesidades presentadas a la hora de validar e implementar el modelo propuesto, dicho esto es importante destacar las herramientas que propone Matlab como software para el desarrollo del presente modelo mitigante, es decir describir las aplicaciones de desarrollo que dispone Matlab y definir el propósito del mismo como herramienta informática la cual permite la asistencia al desarrollador para la construcción de programas, sistemas, y de más.

4.2.3 Definición del software principal escogido para el desarrollo del modelo Matlab

Matlab es una abreviatura de “MATrix LABoratory” perteneciente al desarrollador de paquetes de software “MathWorks”, es una herramienta de desarrollo de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con lenguaje de programación incorporado, “Lenguaje M”, está disponible para las siguientes plataformas:

- Unix
- Windows
- Mac OS X
- GNU / Linux

Entre las prestaciones principales de Matlab se halla el desarrollo de matrices (operaciones, relaciones, etc.), la representación de datos y funciones matemáticas, la implementación de algoritmos adaptándolos a su lenguaje incorporado, el diseño de interfaces gráficas de usuario (GUI), y el enlace con otros programas de diferentes lenguajes (No lenguaje “m”) y de dispositivos de hardware como microprocesadores, tarjetas de adquisición de datos y de más. (MathWorks, 2015).

El paquete de Matlab dispone de las siguientes prestaciones de asistencia al proceso de programación informática, estas prestaciones son:

- Simulink (Plataforma de simulación multidominio), GUIDE (Editor de interfaces de usuario “GUI”)

Adicional a las prestaciones de software ya mencionadas, y por medio de las actualizaciones constantes de Matlab se puede añadir cajas de herramientas “toolboxes” que brindan asistencia al proceso de desarrollo y dentro de la prestación “Simulink” se pueden integrar paquetes de bloques adicionales o “blocksets”.

El uso de Matlab ha cobrado mucho auge en los últimos años debido a su rol fundamental para tareas de investigación y desarrollo, tanto en la ciencias básicas como en la ingeniería aplicada, una de las características fundamentales del entorno de Matlab son sus constantes actualizaciones que lo convierten en un software robusto en comparación a otras paquetes informáticos del mercado.

Del software se destaca su gran funcionalidad y practicidad, debido a su rol en aplicaciones matemáticas de la industria y la investigación, lo cual hace viable el desarrollo e implementación de modelos mediante algoritmos enfocados a la mitigación. El logo de esta herramienta computacional se presenta en la “Figura 1-4”

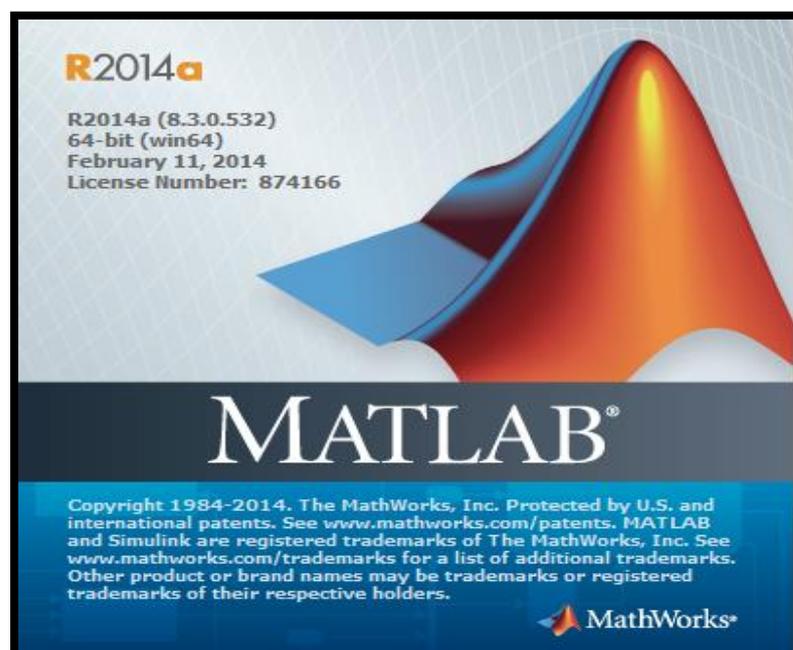


Figura 1-4: Logo de la herramienta informática Matlab

Fuente: (MathWorks, 2015)

4.2.4 *Desarrollo e integración de procesos matemáticos e implementación de algoritmos en Matlab*

La función más destacable de Matlab razón por la cual se convierte en una de las mejores herramientas de programación para el investigador es su entorno de trabajo, enfocado y maximizado para trabajar por medio de vectores y matrices, esto último mencionado permite implementar algoritmos que integran desarrollo matemático con mucha facilidad.

Matlab dispone de un entorno denominado “Command Window” (Ver “Figura 2-4”) que es destacable por su practicidad a la hora de ingresar códigos integrando expresiones matemáticas si son requeridas, Matlab también permite el desarrollo de “Scripts” (Ver “Figura 3-4”) que mejora la integración de comandos, y permite desarrollar e implementar algoritmos de forma simple, dinámica, y práctica. Los “Scripts” incorporan el lenguaje de programación propio de Matlab, “Lenguaje M” estas sentencias de código están basadas en los lenguajes de alto nivel tales como “Fortran”, “Lisp” entre otros, e inclusive tiene similitudes con lenguajes de medio nivel como por ejemplo los lenguajes “C” y “C++”.

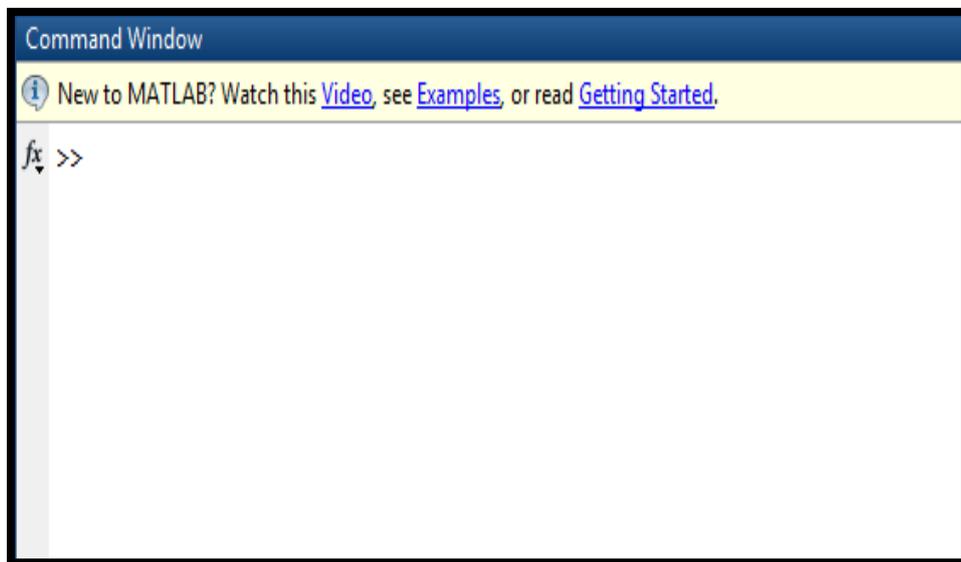


Figura 2-4: “Command Window” en Matlab

Fuente: (Matlab, 2016)

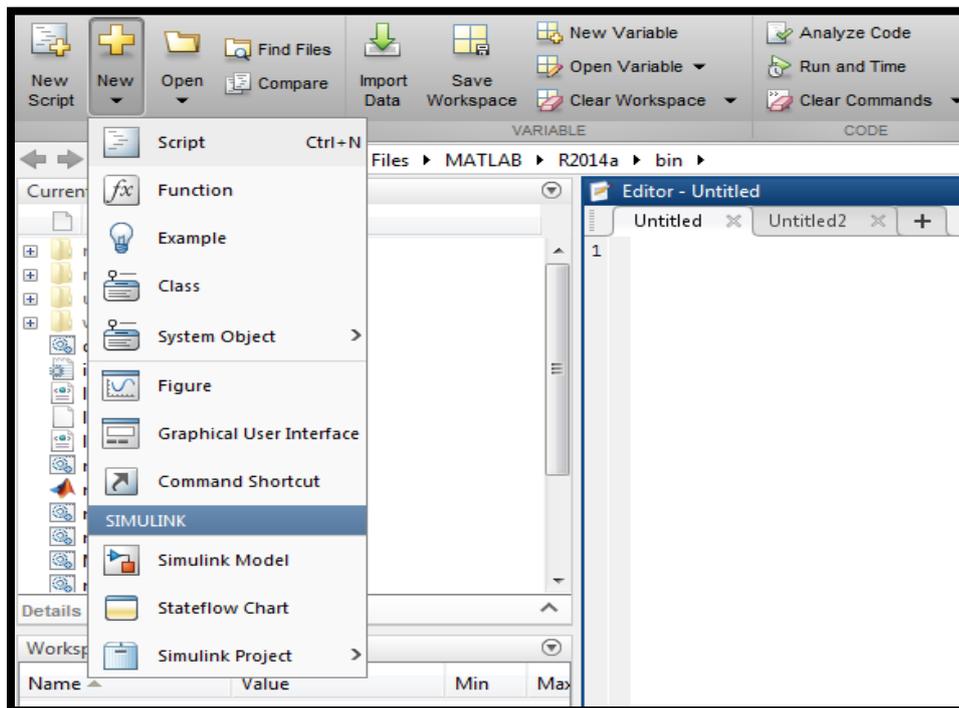


Figura 3-4: “Scripts” en Matlab

Fuente: (Matlab, 2016)

Los archivos generados tanto como por los “Scripts” y el “Command Window”, o el desarrollo de matrices de Matlab, generan ficheros con extensiones muy características estas se detallan a continuación:

- “Scripts” son guardados como “archivos m” (.m) permiten desarrollar e implementar algoritmos, así ofrecen facilidad de integración con GUI’s para el desarrollo de interfaces por medio de la herramienta “GUIDE” incorporada en Matlab.
- Archivos “mat” (.mat) son archivos característicos de Matlab y pueden ser matrices, operaciones matemáticas, datos generados, etc, son los archivos básicos generados en Matlab se guardan en función de matrices dentro de la arquitectura de Matlab y están enfocados a resolver problemas matemáticos con gran practicidad.

Debido a lo planteado y a las prestaciones que dispone la arquitectura de desarrollo del entorno de Matlab, se lo consideró como herramienta principal para la implementación del modelo mitigante propuesto, enfocándose en el correcto desarrollo de la implementación en todas sus connotaciones, adicionalmente cabe destacar que sus potentes herramientas de desarrollo, representan un aporte crucial para la implementación y desarrollo de la modelos mitigantes , y

su practicidad a la hora de integrar algoritmos matemáticos presentan una alternativa verdadera para el desarrollo de cualquier sistema o modelo.

4.2.5 Desarrollo de entornos GUI's (Interfaz gráfica de usuario) en Matlab

Para el desarrollo de interfaces graficas de usuario, Matlab presenta una prestación dedicada para ello esta herramienta dentro de Matlab se llama "GUIDE", "GUIDE" es un entorno de programación visual disponible en Matlab para realizar y ejecutar programas que necesiten ingreso continuo de datos (Barragan, 2008, pp. 1-5). Tiene las características básicas de todos los programas visuales y del paradigma de programación orientado objetos como:

- Visual Basic
- Visual C++.
- Borland Delphi
- Java
- Etc

Para inicializar "GUIDE" en Matlab basta con digitar en el "Command Window" de Matlab, la línea de código

- >>guide (Ver "Figura 4.4")

O a su vez en la versiones más recientes se puede ejecutar en el entorno "Guide" dirigiéndose a la barra de herramientas de "Home", seleccionando la opción "New", luego de esto se desplegará un submenú , al momento de ejecutarse seleccionar la opción "Graphical User Interface" (Ver "Figura 5.4" y "Figura "6.4")

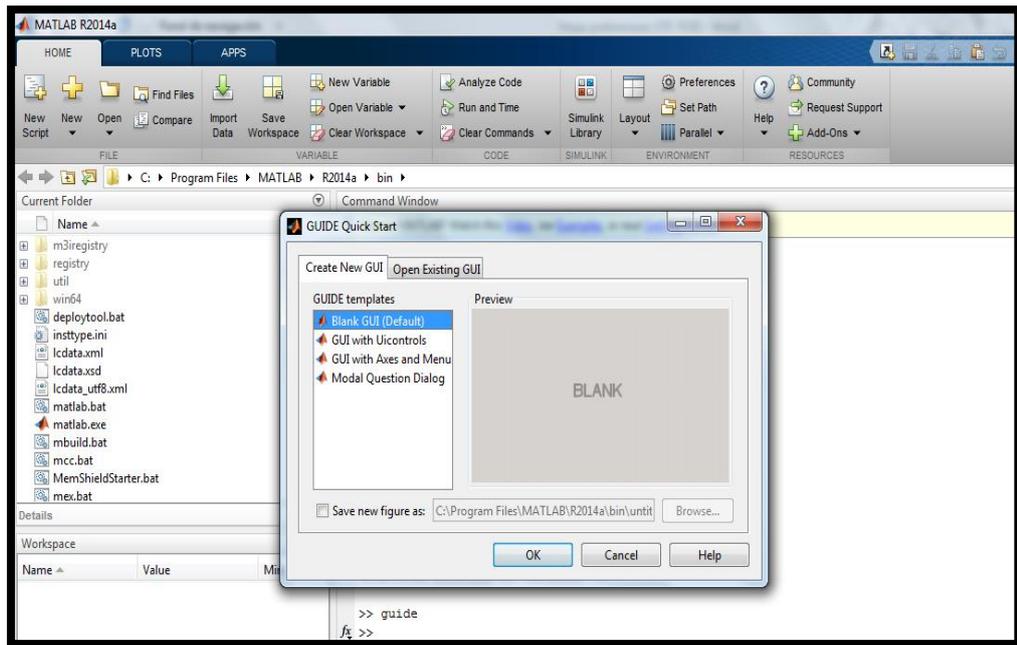


Figura 4-4: Inicialización de herramienta GUIDE en Matlab por medio del comando “guide” en el “prompt”

Fuente: (Matlab, 2016)

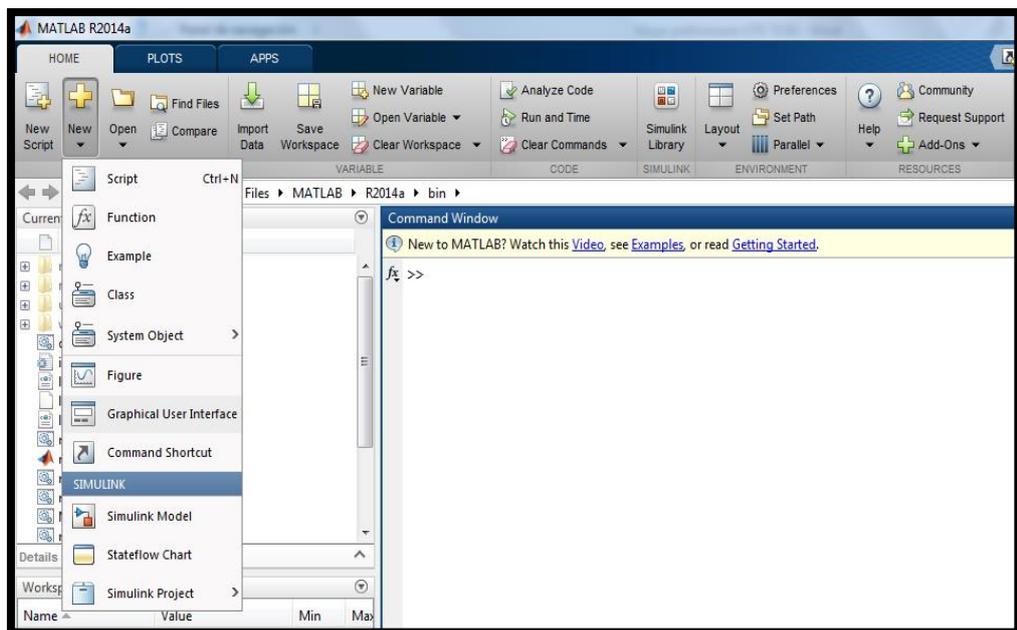


Figura 5-4: Inicialización de la herramienta GUIDE por medio del menú de herramientas “guide”

Fuente: (Matlab, 2016)

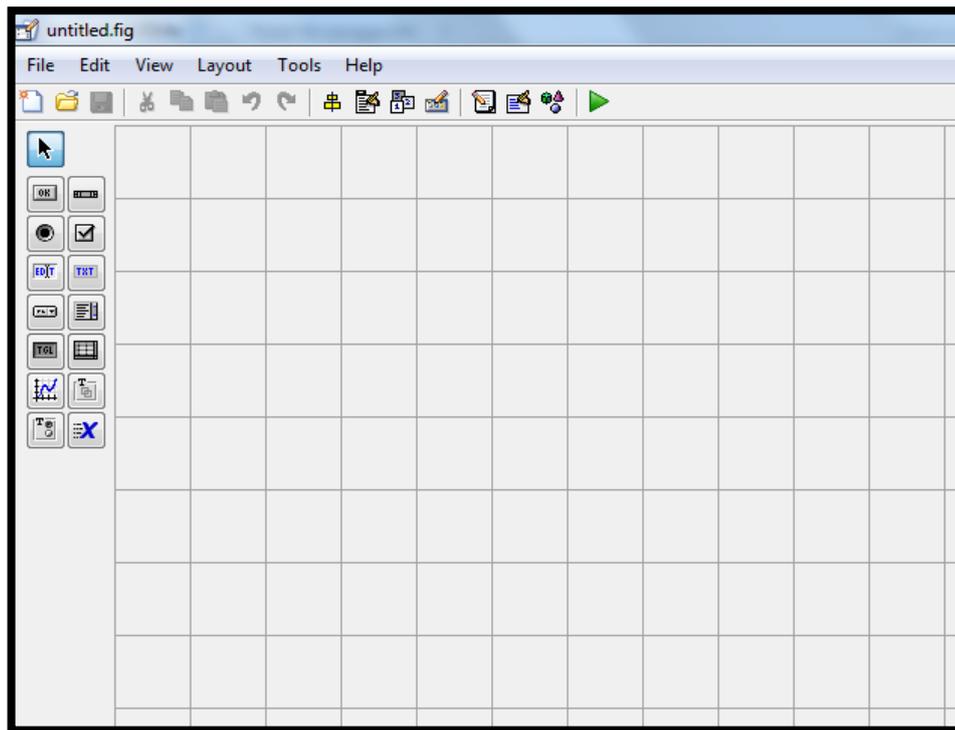


Figura 6-4: Entorno de GUIDE en Matlab

Fuente: (Matlab, 2016)

Cabe destacar que la herramienta “GUIDE” tiene cuatro tipos de plantillas predefinidas que se pueden seleccionar antes de iniciar el entorno, estas plantillas sirven para comenzar un nuevo proyecto de desarrollo de interface con herramientas gráficas ya superpuestas, las opciones son:

- “Blank GUI”, la interfaz gráfica se inicia con el espacio en blanco
- “GUI with uicontrols”, dentro de la interfaz se diseñan de manera predefinida indicadores con distintos tipos de botones, y espacios de texto y de muestra de datos
- “GUI with Axes and Menu”, esta opción permite iniciar la interface con gráficas de ejemplo y con opción para modificarlas para el desarrollo
- “Modal Question Dialog”, esta opción permite iniciar GUIDE con un ejemplo de cuadro emergente de respuesta, acompañada con un icono de interrogación

Cabe destacar que “GUIDE”, dentro de su entorno de desarrollo de interfaces, dispone de opciones muy variadas para garantizar el correcto desarrollo, destacando la maniobrabilidad para asistir al usuario encargado del desarrollo de la GUI, las principales herramientas que ofrece “GUIDE” a la hora de diseñar un entorno gráfico de usuario están explicadas a detalle en la “Figura 7-4”.

<i>Control</i>	<i>Valor de estilo</i>	<i>Descripción</i>
Check box	'checkbox'	Indica el estado de una opción o atributo
Editable Text	'edit'	Caja para editar texto
Pop-up menu	'popupmenu'	Provee una lista de opciones
List Box	'listbox'	Muestra una lista deslizable
Push Button	'pushbutton'	Invoca un evento inmediatamente
Radio Button	'radio'	Indica una opción que puede ser seleccionada
Toggle Button	'togglebutton'	Solo dos estados, "on" o "off"
Slider	'slider'	Usado para representar un rango de valores
Static Text	'text'	Muestra un string de texto en una caja
Panel button		Agrupar botones como un grupo
Button Group		Permite exclusividad de selección con los radio button

Figura 7-4: Descripción de los componentes del entorno "GUIDE" en Matlab

Fuente: (Manual de GUI en Matlab, 2017)

Cada componente en "GUIDE" tiene varias opciones las cuales se pueden acceder presionando click derecho del ratón tal y como se indica en la "Figura 8-4", adicional a esto la opción "Property Inspector" permite la personalización de cada componente seleccionado en el entorno "GUIDE" (Ver "Figura 9-4"). Una de las opciones más importantes que ofrece el entorno de "GUIDE" es la opción de hacer una referencia a algoritmos integrados en el sistema principal, esta opción se activa mediante un "click" derecho seleccionando la opción desplegada "View Callback", esta opción permite trabajar en el "archivo .m", este archivo se encuentra anexado a la interfaz gráfica representada por un "archivo .fig", las características de ambos archivos asociados a "GUIDE" se detallan a continuación:

- "archivo .m", es el entorno que permite desarrollar algoritmos y ejecuta subrutinas, para complementar la funcionalidad del mismo se puede anexar una "GUI" que comande códigos de programación dentro del mismo "archivo .m"
- "archivo .fig", es el archivo referente a la interfaz gráfica de usuario "GUI", siempre estará acompañada de un "archivo .m" donde se implementan todos los códigos de programación anexados a la interfaz gráfica en desarrollo

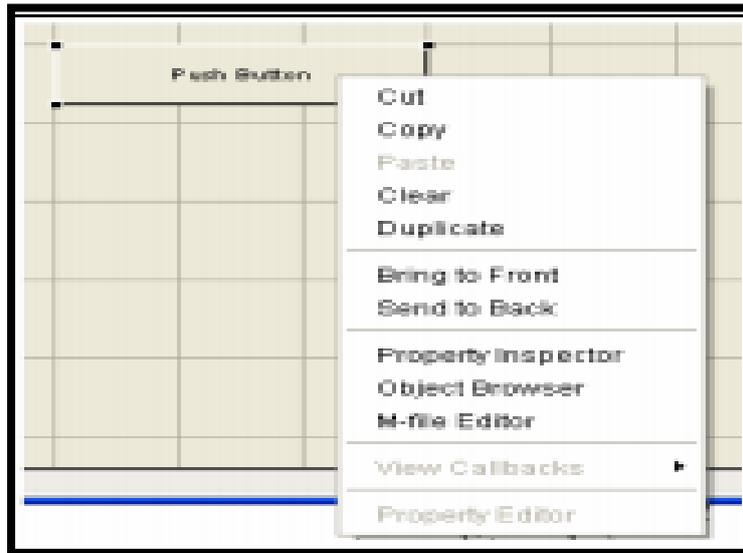


Figura 8-4: Propiedades de los componentes en “GUIDE”

Fuente: (MathWorks, 2015)

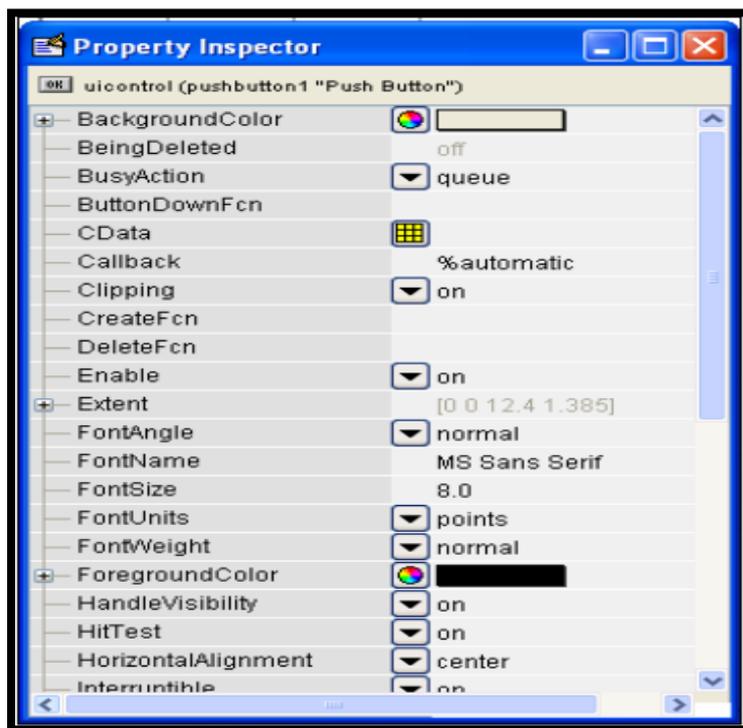


Figura 9-4: Opción “Property Inspector” en “GUIDE”

Fuente: (MathWorks, 2015)

4.2.6 Descripción general de las “Redes neuronales artificiales” en el entorno de Matlab

Definiciones y conceptos sobre las RNA's se pueden revisar en apartados anteriores del presente trabajo de titulación. Cabe destacar que los métodos para la clasificación general de este tipo de técnica de inteligencia artificial, son realmente vastos, algunas variantes enfocadas a la clasificación se orientan mediante diversos parámetros predominantes, tales como:

- De acuerdo al autor
- De acuerdo a la necesidad de predicción
- De acuerdo a los patrones de conexión
- De acuerdo al aprendizaje
- De acuerdo a la capacidad de procesamiento.

El entorno de desarrollo Matlab” es muy flexible en cuanto a las necesidades de selección de los distintos tipos de RNA's (MathWorks, 2015), Matlab se caracteriza por trabajar con redes “Feed-forward” o redes de propagación hacia delante, en sus dos denominaciones:

- Monocapa, también conocido como red neuronal artificial “perceptrón unicapa” o red neuronal artificial “Adaline” (ADaptative LINear Element).
- Multicapa, también conocido como red neuronal perceptrón multicapa.

Dentro del paquete de Matlab, este software también permite el desarrollo de distintos tipos de redes neuronales basadas en las características mencionadas anteriormente, dando versatilidad y multiplicidad de opciones al desarrollador las redes neuronales artificiales, que integra el entorno de Matlab estos tipo de redes se detallan a continuación:

- Redes neuronales tipo “SOM” (Self-organizing map), que es un tipo de red neuronal que es entrenada usando aprendizaje no supervisado para producir una representación discreta del espacio de las muestras de entrada, llamado mapa.
- Redes neuronales dinámicas que son empleadas en su mayoría para resolver problemas de tiempo no lineales en sus distintos tipos
- Redes neuronales de base radial que son un tipo de redes de neuronas artificiales que calculan la salida de la función en función de la distancia a un punto denominado

centro e igual que con los perceptrones multicapa, sirven como aproximadores universales.

- Redes neuronales de regresión generalizada que es un tipo de red neuronal evolutiva, y permite trabajar mediante procesos estadísticos distintos problemas planteados.
- Redes neuronales (LVQ) “Learning Vector Quantization” (Cuantificación Vectorial) es una técnica por la cual el espacio de entradas es dividido en un número determinado de regiones y para cada una de ellas es definido un vector que la caracteriza.
- Redes neuronales de “Hopfield” que se usan principalmente como sistemas de memoria asociativa con unidades binarias. Están diseñadas para converger a un mínimo local, pero la convergencia a uno de los patrones almacenados no está garantizada.

Adicional a la topología mencionada que está incorporada para el desarrollo en Matlab, esta paquete informático también dispone de una herramienta incorporada (“toolbox”) encargada del procesamiento de los tipos de redes neuronales artificiales más utilizadas en el campo de la investigación, esta herramienta es inicializada por el comando “nstart” tecleado en el “Command Window” de Matlab (Ver “Figura 10-4”)

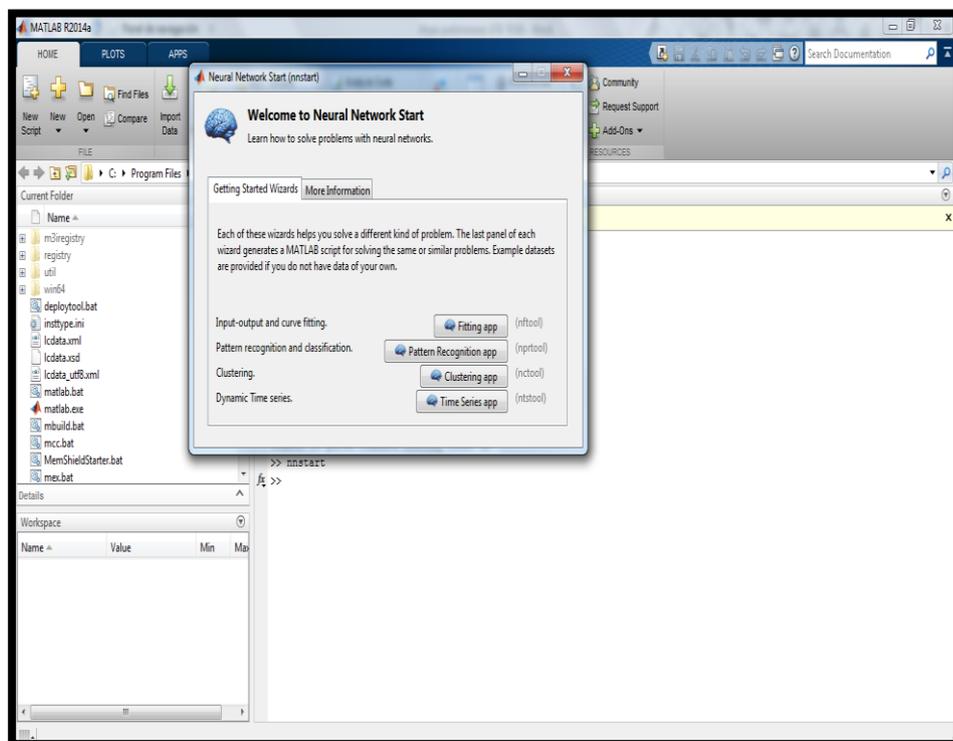


Figura 10-4: Inicialización de la aplicación referente a redes neuronales en Matlab

Fuente: (Matlab, 2016)

En cuanto a la integración de las redes neuronales artificiales con filtros o modelos de corrección que permitan la mitigación de armónicos en este paquete de desarrollo informático, Matlab integra diversas alternativas para el desarrollador, tanto como en el tratamiento de algoritmos, o mediante la utilización del entorno de simulación denominado “Simulink”

4.2.7 Matlab enfocado a la simulación de modelos mediante la integración de las redes de Petri

Para el desarrollo de modelos utilizando redes de Petri, Matlab por medio de desarrolladores privados e independientes agregados a la plataforma de desarrollo de “MathWorks”, integra un “toolbox”, que permite la constitución de la arquitectura generalizada propuesta por las redes de Petri para el presente trabajo investigativo además que permite la integración de opciones de simulación en tiempo real y programado para la comprensión generalizada del modelo.

El “toolbox” dentro del entorno de Matlab es denominado “Petri Net Toolbox” y fue desarrollado por la “Universidad Técnica Gheorghe Asachi” de Rumania (Ver “Figura 11-4”)

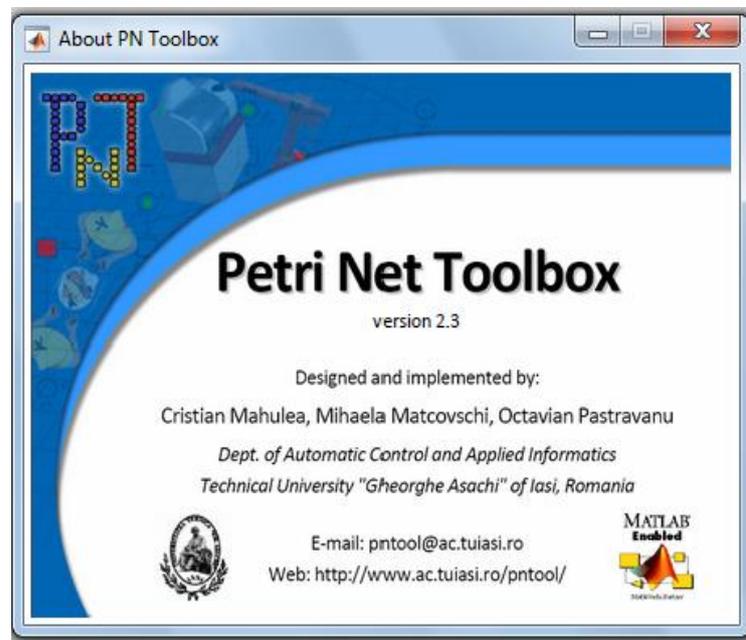


Figura 11-4. “Acerca de”, toolbox “Petri Net Toolbox”

Fuente: (Matlab, 2016)

Este “toolbox” proporcionado por desarrolladores independientes, dispone de varias funcionalidades a la hora de integrar modelos o sistemas utilizando redes de Petri para el efecto, alguna de las funciones más destacadas dentro del entorno de este “toolbox” se detallan a

continuación, en adición a lo mencionado en la “Figura 12-4” se puede apreciar el entorno generalizado del “toolbox”:

- Versatilidad al momento de utilizar, transiciones, plazas, marcas de inicio y arcos en un entorno gráfico del “toolbox” desarrollado en Matlab, con la finalidad de realizar el modelo grafo-analítico con prestaciones de simulación para la comprensión generalizada del desarrollador.
- Capacidad de simulación de los modelos desarrollados mediante redes de Petri en un entorno nativo de Matlab.
- Capacidad de asignar tiempos de ejecución a las transiciones de acuerdo a la distribución del tiempo seleccionada, pudiendo ser de varios tipos de acuerdo a la necesidad de la simulación y del modelo, de donde se pueden destacar las prestaciones para modelos determinísticos integradas en el mismo “toolbox” e inclusive arquitecturas de simulación adicionales para el desarrollo de modelos estocásticos.
- Capacidad de ejecución del “toolbox” inmediata, digitando en el “prompt” de Matlab el comando “>>pntool” previa descarga e inclusión del “toolbox” en Matlab

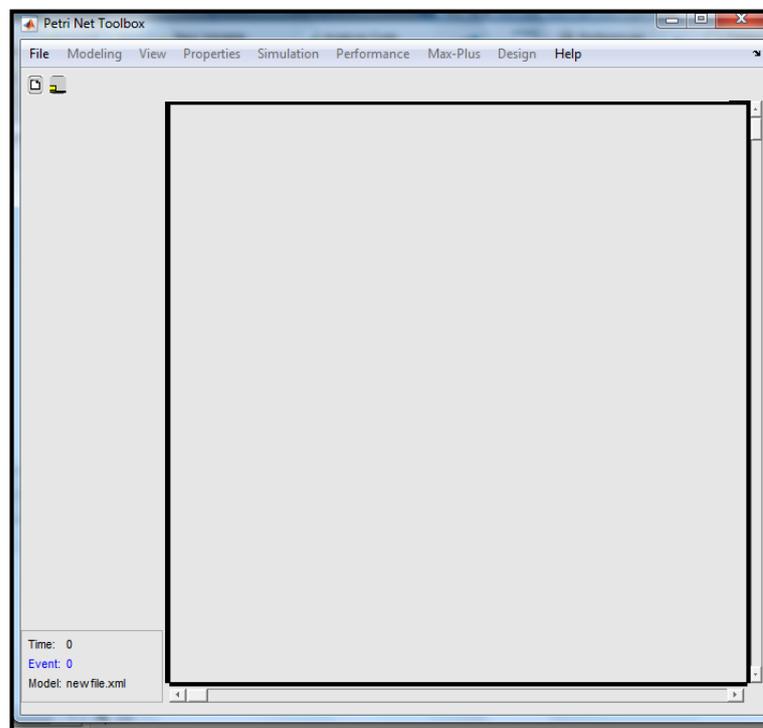


Figura 12-4: Entorno del toolbox “Petri Net Toolbox”

Fuente: (Matlab, 2016)

4.3 Validación y simulación del modelo conceptual mitigante propuesto, mediante redes de Petri

4.3.1 Validación del modelo conceptual generalizado en Matlab

Para la total validación del modelo conceptual propuesto, en la herramienta computacional Matlab, es necesario enunciar las diferentes etapas dadas en la concepción del modelo, por lo que se simulará mediante redes de Petri desde la constitución del modelo, hasta la descripción de cada una de las etapas del mismo desarrolladas mediante las redes de Petri.

Tal y como se había mencionado en capítulos anteriores, la herramienta informática utilizada para validación y simulación del modelo mediante redes de Petri será Matlab, esto es posible mediante la integración del “toolbox” independiente denominado “Petri Net Toolbox”, el cual se inicializa digitando en el “prompt” de Matlab con el comando “pntool”, tal y como se indica en la “Figura 13-4”.



Figura 13-4: Inicialización del toolbox “Petri Net Toolbox”

Fuente: (Matlab, 2016)

Una vez inicializado el entorno de desarrollo mediante redes de Petri (Ver “Figura 14-4”), se procede a seleccionar el tipo de “red de Petri” necesaria para la simulación del modelo seleccionado, este “toolbox” permite la generación de los siguientes tipos de modelos los cuales se enuncian y se describen a continuación:

- “Untimed PN” este tipo de “red de Petri” no incorpora tiempos entre transiciones, es decir la simulación genera un tiempo simulado de salto entre transiciones, esta opción se aplica para procesos netamente determinísticos e uniformes en tiempo en cada etapa del modelo enfocado al proceso.

- “T-timed PN”, este tipo de “red de Petri” incorporada en el “toolbox”, permite añadir tiempos predefinidos a los disparos de las transiciones del modelo a desarrollar, esto es útil si en un proceso o sistema, cada sección del proceso o evento dispone de tiempos establecidos entre el paso de una fase a otra.
- “P-timed PN”, este tipo de “red de Petri” permite incorporar tiempos de disparos a las plazas que forman parte del modelo a desarrollar, esto puede ser útil si es que en un proceso en específico una plaza requiere más tiempo de desarrollo que otra plaza perteneciente al mismo, por algún factor implícito en el proceso.
- “Stochastic Petri Nets”, este tipo de “red de Petri” permite incorporar modelos estocásticos únicamente exponenciales para este “toolbox” en sus dos denominaciones “Stochastic PN” O “Generalized Stochastic PN” mediante la interfaz prediseñada para el efecto, estos modelos sirven para procesos en los que no se tiene tiempos definidos O determinados para una etapa establecida, siempre en referencia al desarrollo del modelo.

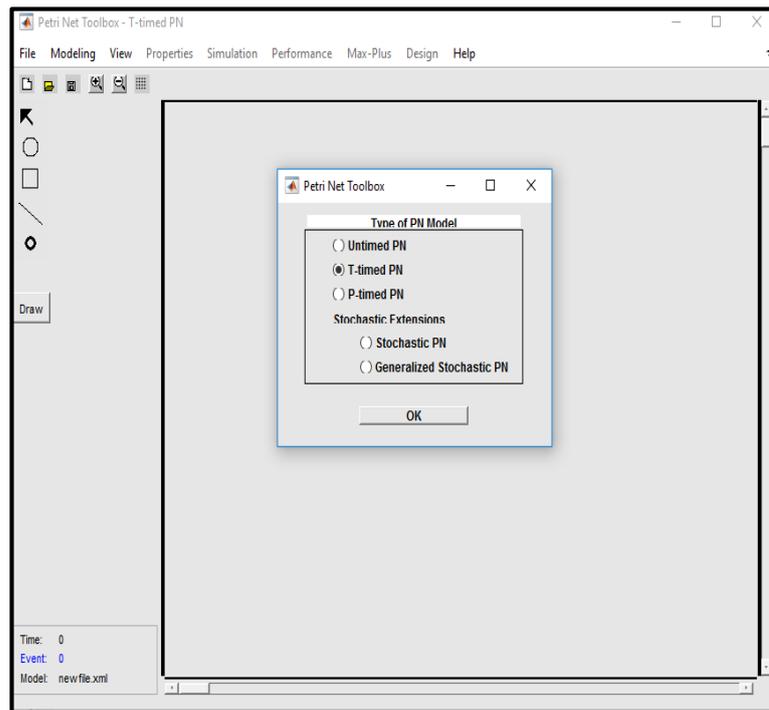


Figura 14-4: Entorno del toolbox “Petri Net Toolbox”

Fuente: (Matlab, 2016)

Para el desarrollo del presente proyecto se consideró utilizar el tipo de red denominada “T-timed PN”, debido a que el modelo no necesita de tiempos preestablecidos para las plazas, de igual manera no es necesario asignar tiempos predefinidos al disparo de las transiciones, pero debido a que el tiempo de procesamiento de cada etapa es variable ya que va en función de la capacidad

de procesamiento del software o herramienta computacional y el procesador escogido si es que se analiza la posibilidad de una implementación física del modelo desarrollado.

En el entorno del “toolbox”, una vez seleccionada el tipo de “red de Petri” a implementar, el panel de funcionalidades para el desarrollo gráfico del modelo se despliega en la sección izquierda del entorno gráfico (“Ver Figura 15-4”), de estas funciones se destacan las siguientes a continuación:

- “Edit” o edición, que se representa con una flecha a la izquierda coloreada en la sección izquierda del “toolbox”
- “Place” o plaza, que se representa con un círculo, en términos generales una plaza es un evento o estado del modelo a desarrollar.
- “Transition” o transición, que se representa con un cuadrado o rectángulo, en términos generales las transiciones permiten el paso de una plaza a otra, si es que el tipo de la red es “T-timed”, se puede asignar un tiempo de disparo para la transición de acuerdo al requerimiento del modelo.
- “Arc”, o arco, se representan con una línea, los arcos permiten unir las plazas con las transiciones y viceversa, en general son nexos entre estados, entre sus características principales integradas en el “toolbox” se destaca la capacidad de asignar varias capacidades de peso de acuerdo a los parámetros de diseño del modelo.
- “Token”, o marca inicial, las marcas iniciales, son el producto o el requerimiento, que se desarrolla en cada etapa o plaza de un modelo, estas son el inicio para una línea de producción, o el punto de partida para que comience el funcionamiento de un modelo.

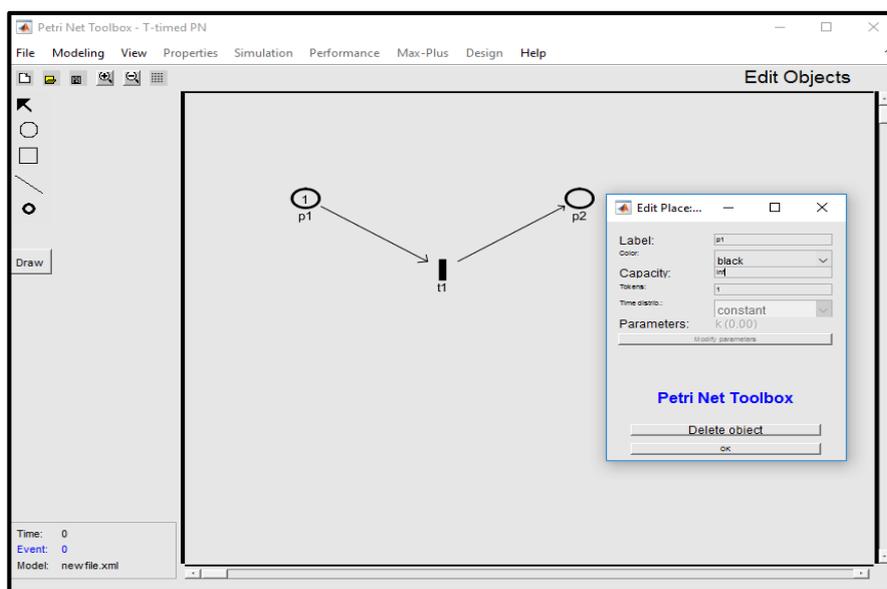


Figura 15-4: Funcionalidades del entorno gráfico de “Petri Net Toolbox”

Fuente: (Matlab, 2016)

En el desarrollo de la validación del modelo conceptual generalizado utilizando redes de Petri, se utilizó un total de:

- Plazas: 7
- Transiciones: 4
- Marcas iniciales: 2 (Debido a los dos tipos de datos de entrada para la red)

El desarrollo final de la validación modelo se presenta en la “Figura 16-4” en donde se detallan las distintas fases del modelo, estas fases fueron analizadas en capítulos anteriores y en esta fase de la investigación son implementadas a través del “toolbox” de Matlab mediante la utilización de redes de Petri, el cual es denominado “Petri Net Toolbox”.

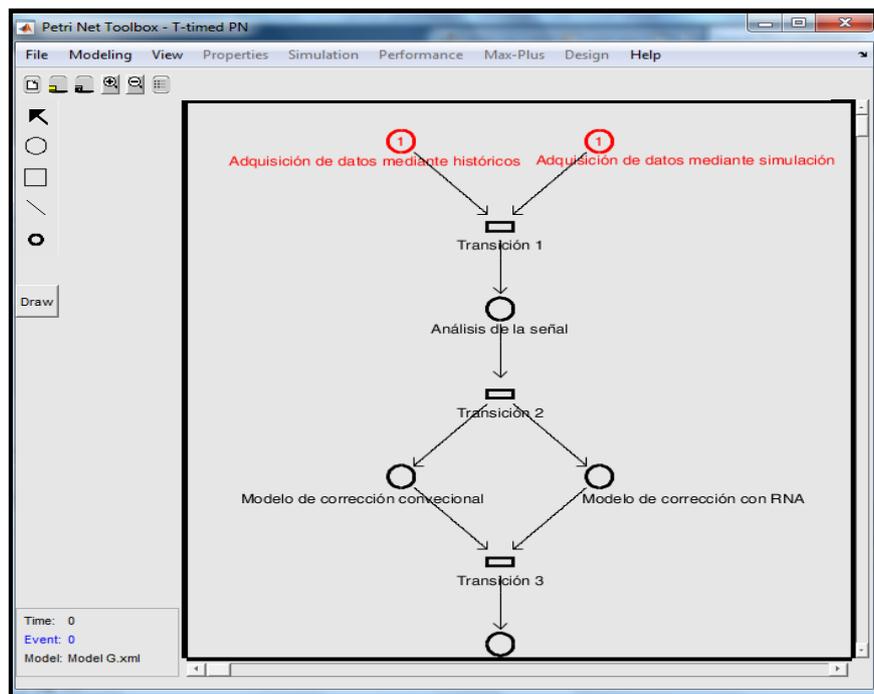


Figura 16-4: Desarrollo de la validación del modelo en Matlab

Fuente: (Matlab, 2016)

El modelo validado, fue analizado y testeado mediante la herramienta integrada de simulación del “toolbox” en Matlab, los resultados finales se detallan en la “Figura 17-4”, de manera integral los resultados obtenidos permiten tener una perspectiva del modelo validado en una perspectiva general y conceptual, en la “Figura 18-4” se presentan datos generales del tiempo de duración de las transiciones y plazas de la simulación mediante redes de Petri, para este análisis

se consideró la última transición del modelo general, en donde el tiempo registrado es asignado de forma arbitraria, para la simulación por etapas de la arquitectura propuesta.

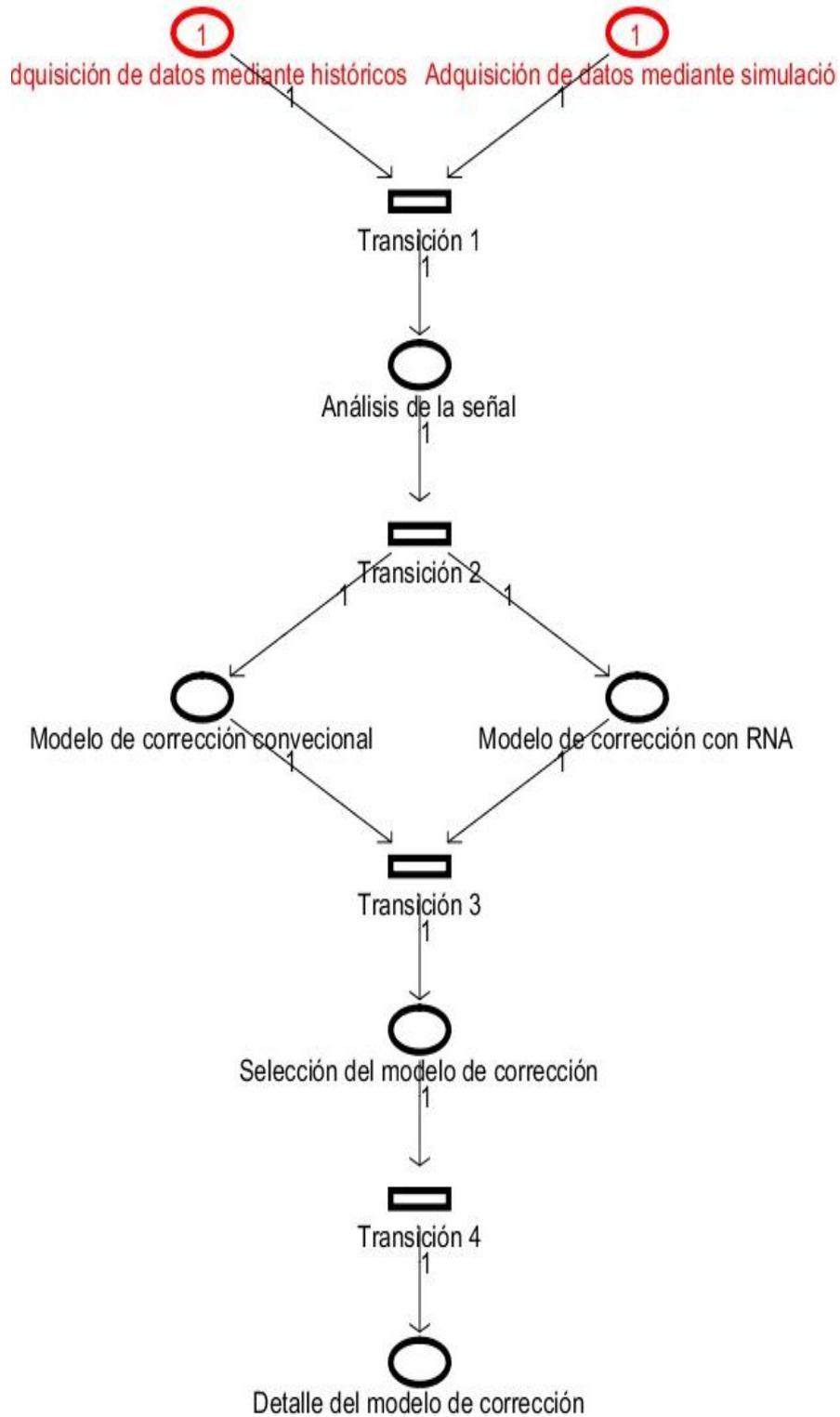


Figura 17-4: Modelo conceptual generalizado validado mediante redes de Petri en Matlab

Fuente: (Matlab, 2016)

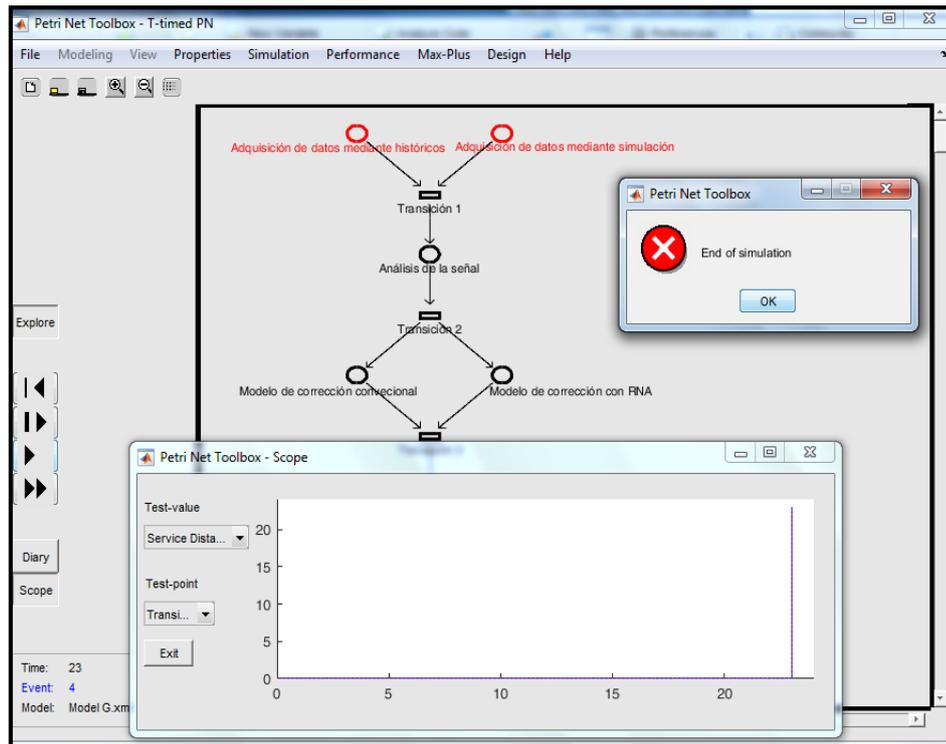


Figura 18-4: Datos y simulación del modelo conceptual generalizado en Matlab

Fuente: (Matlab, 2016)

De la “Figura 17-4” se destacan las etapas principales analizadas, detalladas y mencionadas en la propuesta del modelo mitigante en secciones anteriores del presente trabajo investigativo, sin embargo, a continuación, se presenta un resumen secuencial de las etapas principales desarrolladas y presentadas mediante el “toolbox” “Petri Net Toolbox” de la herramienta computacional Matlab para la comprensión generalizada y validada del modelo propuesto:

1. La primera etapa especificada en el modelo desarrollado mediante redes de Petri (Ver “Figura 17-4”), es la etapa de adquisición de datos, esta etapa tiene dos tipos de modalidades de ingreso de información, la primera modalidad hace referencia al ingreso de datos mediante históricos registrados por medio de sistemas eléctricos que incorporen componentes armónicas en la señal, la segunda modalidad hace referencia a la simulación de datos para representar cualquier caso de estudio en la que se registren niveles de distorsión armónica considerables
2. La segunda etapa especificada en el modelo desarrollado mediante redes de Petri (Ver “Figura 17-4”), es la etapa de análisis de la señal, en esta etapa posterior al disparo de la transición por medio del ingreso de datos en todas sus modalidades habilitantes trata de

depurar y seleccionar la información de entrada para preparar la señal para la correcta aplicación de los modelos de corrección (“filtros”).

3. La tercera etapa especificada en el modelo desarrollado mediante redes de Petri (Ver “Figura 17-4”), es la etapa de análisis de los modelos de corrección, en esta etapa a través de los datos de entrada se procede a ejecutar los modelos de corrección en simultaneo (“filtros”), con la finalidad de determinar los datos de entrada para que mediante un algoritmo de toma de decisiones se seleccione la mejor respuesta mitigante de la señal adquirida en función de las exigencias del desarrollador, tomando en cuenta las regulaciones de calidad de energía detalladas en capítulos anteriores del presente trabajo de investigación.
4. La cuarta etapa especificada en el modelo desarrollado mediante redes de Petri (Ver “Figura 17-4”), es la etapa de selección del modelo de corrección, en esta etapa se ejecuta el algoritmo de toma de decisiones, el cual permite determinar la mejor respuesta mitigante para el caso analizado mediante el modelo general propuesto.
5. La quinta etapa especificada en el modelo desarrollado mediante redes de Petri (Ver “Figura 17-4”), es la etapa de breve descripción del modelo de corrección, esto se referencia en el modelo, para que de manera general se indiquen detalles recurrentes del modelo seleccionado para la mitigación de la distorsión armónica, en aras de realizar una futura implementación física del modelo propuesto.

Finalmente, para la comprensión detallada por etapas del modelo propuesto, se consideró simular “subrutinas” de cada una de las plazas asignadas al modelo desarrollado mediante redes de Petri, todo esto con la finalidad de detallar de forma minuciosa cada etapa interviniente en el concepto generalizado del modelo. Cabe destacar que cada etapa del modelo generalizado se simuló en el “toolbox” “Petri Net Toolbox” propuesto en Matlab, permitiendo exponer a detalle cada una de los segmentos y partes, formando “subrutinas” (Detalle por etapa, mediante la simulación de las mismas) las cuales son expuestas y detalladas de manera secuencial en el siguiente apartado del presente trabajo investigativo.

4.3.1.1 Detalle de la etapa de adquisiciones de señales, parte del modelo conceptual generalizado simulado mediante redes de Petri en Matlab

Para una mayor comprensión del modelo mitigante propuesto, se consideró analizar cada etapa en específico del mismo, con la finalidad de detallar las particularidades de cada fase y con el respaldo de la simulación del “toolbox” enfocado a las redes de Petri que integra la herramienta computacional de Matlab. A continuación, en la “Figura 19-4” se expone el detalle de esta fase

del modelo general (Adquisición de señales), y un detalle secuencial de cada una de las etapas que corresponden esta fase, se exponen a continuación para la comprensión particularizada del modelo:

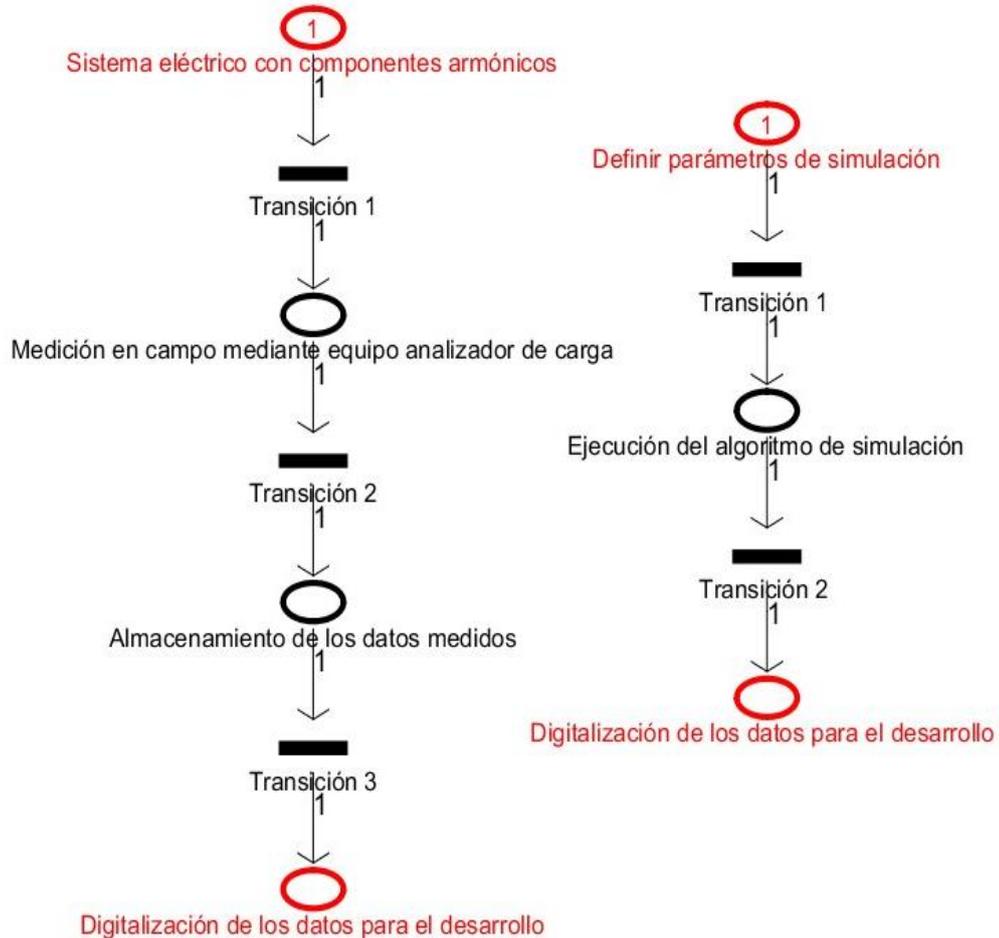


Figura 19-4: Adquisición de datos parte del modelo conceptual generalizado mediante redes de Petri en Matlab

Fuente: (Matlab, 2016)

De la “Figura 19-4” se destaca la etapa de adquisiciones de datos en sus dos denominaciones (datos históricos y simulación de señales), esta sección es parte del modelo mitigante presentado en capítulos anteriores del presente trabajo investigativo, a continuación se presenta un resumen secuencial de las etapas principales desarrolladas y presentadas en esta sección del modelo mediante el “toolbox” “Petri Net Toolbox” de la herramienta computacional Matlab para la comprensión y validación particular por etapas del modelo:

1. En la primera etapa detallada en la sección de adquisiciones de datos, se referencia con color rojo las marcas de entrada de esta etapa del modelo desarrollada mediante redes de Petri, en esta etapa se recepta el tipo de dato que tal y como se a especificado en capítulos anteriores puede ser simulado o adquirido mediante datos históricos, en la parte izquierda de la “Figura 19-4” se presenta el proceso para la adquisición de datos mediante históricos, y en la parte derecha de la misma figura se presenta el proceso para adquisición de datos por simulación.
2. En la segunda etapa detallada en la sección de adquisiciones de datos, para la adquisición de datos mediante históricos se dispara la transición para proceder a realizar mediciones en campo para un posterior almacenamiento en históricos (sección izquierda de la “Figura 19-4”), en tanto que para la adquisición de datos por simulación la segunda etapa representa la ejecución de los algoritmos que permiten la simulación. (sección derecha de la “Figura 19-4”)
3. En la tercera etapa detallada en la sección de adquisiciones de datos, para la adquisición de datos mediante históricos luego del disparo de la transición los datos se almacenan tal y como se había descrito en la etapa anterior (sección izquierda de la “Figura 19-4”), en tanto que en la adquisición de datos mediante simulación los datos se digitalizan para un posterior análisis de la señal (sección derecha de la “Figura 19-4”).
4. En la cuarta etapa detallada en la sección de adquisiciones de datos, se hace mención solamente por la modalidad de adquisición de datos mediante históricos (sección izquierda de la “Figura 19-4”), debido a que para la modalidad simulada, las plazas de la misma ya fueron finalizadas, en la modalidad por históricos en esta etapa del detalle de la sección, se digitalizan los datos al igual que la etapa simulada para la posterior utilización de los mismos en el análisis de la señal por medio de la herramienta computacional seleccionada.

4.3.1.2 Detalle de la etapa de análisis de la señal de entrada, parte del modelo conceptual generalizado mediante redes de Petri en Matlab

Para una mayor comprensión del modelo mitigante propuesto, se consideró analizar cada etapa en específico del mismo, con la finalidad de detallar las particularidades de cada fase y con el respaldo de la simulación del “toolbox” enfocado a las redes de Petri que integra la herramienta computacional de Matlab. A continuación, en la “Figura 20-4” se expone el detalle de esta fase del modelo general (Análisis de la señal de entrada), y un detalle secuencial de cada una de las etapas que corresponden esta fase, se exponen a continuación para la comprensión particularizada del modelo:

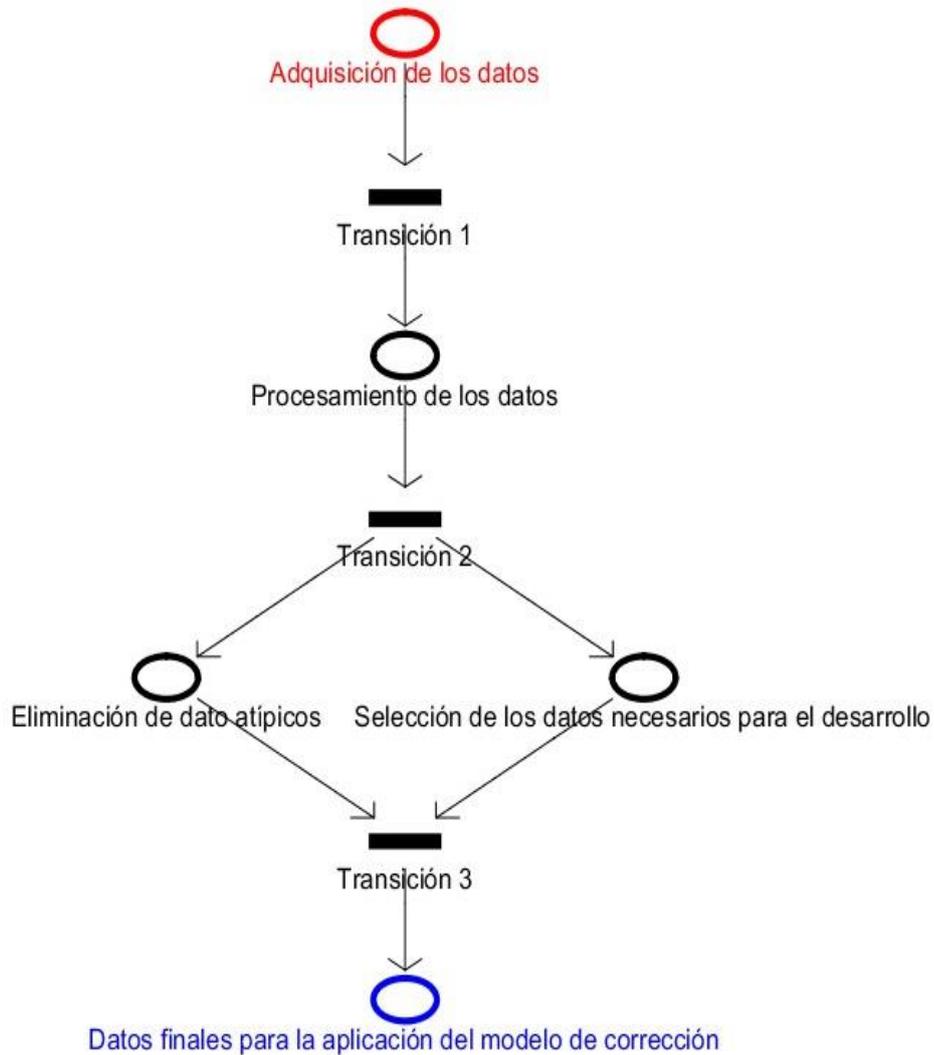


Figura 20-4: Análisis de la señal de entrada parte del modelo conceptual generalizado mediante redes de Petri en Matlab

Fuente: (Matlab, 2016)

De la “Figura 20-4” se destaca la etapa de análisis de la señal, siendo esta sección parte fundamental del modelo mitigante presentado en capítulos anteriores del presente trabajo investigativo, a continuación, se presenta un resumen secuencial de las etapas principales desarrolladas y presentadas en esta sección del modelo mediante el “toolbox” “Petri Net Toolbox” de la herramienta computacional Matlab para la comprensión y validación particular por etapas del modelo:

1. En la primera etapa detallada, referente a la sección de análisis de la señal, se destaca la adquisición de datos como etapa predecesora y precursora de información, esta etapa se detalla con color rojo como inicio de la fase de análisis de la señal, haciendo referencia a la “Figura 20-4”.
2. En la segunda etapa detallada, referente a la sección de análisis de la señal, se destaca el procesamiento de datos, los cuales son necesarios para recopilar la información por los dos métodos mencionados en etapas anteriores (históricos y simulación) para una posterior selección de los mismos.
3. En la tercera etapa detallada, referente a la sección de análisis de la señal, se destaca la eliminación de datos atípicos y la selección de datos necesarios para el desarrollo del modelo, estas etapas son ejecutadas en simultáneo dentro de esta fase, debido a que se necesita recopilar los datos correctos sin incluir ruido, para una correcta aplicación de los modelos de corrección (filtros)
4. En la cuarta etapa detallada, referente a la sección de análisis de la señal, se destaca el registro de los datos finales para el correcto uso y aplicación de los modelos de corrección a ser revisados en una etapa posterior, cabe destacar que el proceso de análisis de la señal es crucial para garantizar la calidad de la mitigación.

4.3.1.3 Detalle de la etapa de análisis de los modelos de corrección, parte del modelo conceptual generalizado mediante redes de Petri en Matlab

Para una mayor comprensión del modelo mitigante propuesto, se consideró analizar cada etapa en específico del mismo, con la finalidad de detallar las particularidades de cada fase y con el respaldo de la simulación del “toolbox” enfocado a las “redes de Petri que integra la herramienta computacional de Matlab. A continuación, en la “Figura 21-4” se expone el detalle de esta fase del modelo general (Análisis de los modelos de corrección), y un detalle secuencial de cada una de las etapas que corresponden esta fase, se exponen a continuación para la comprensión y validación particularizada del modelo:

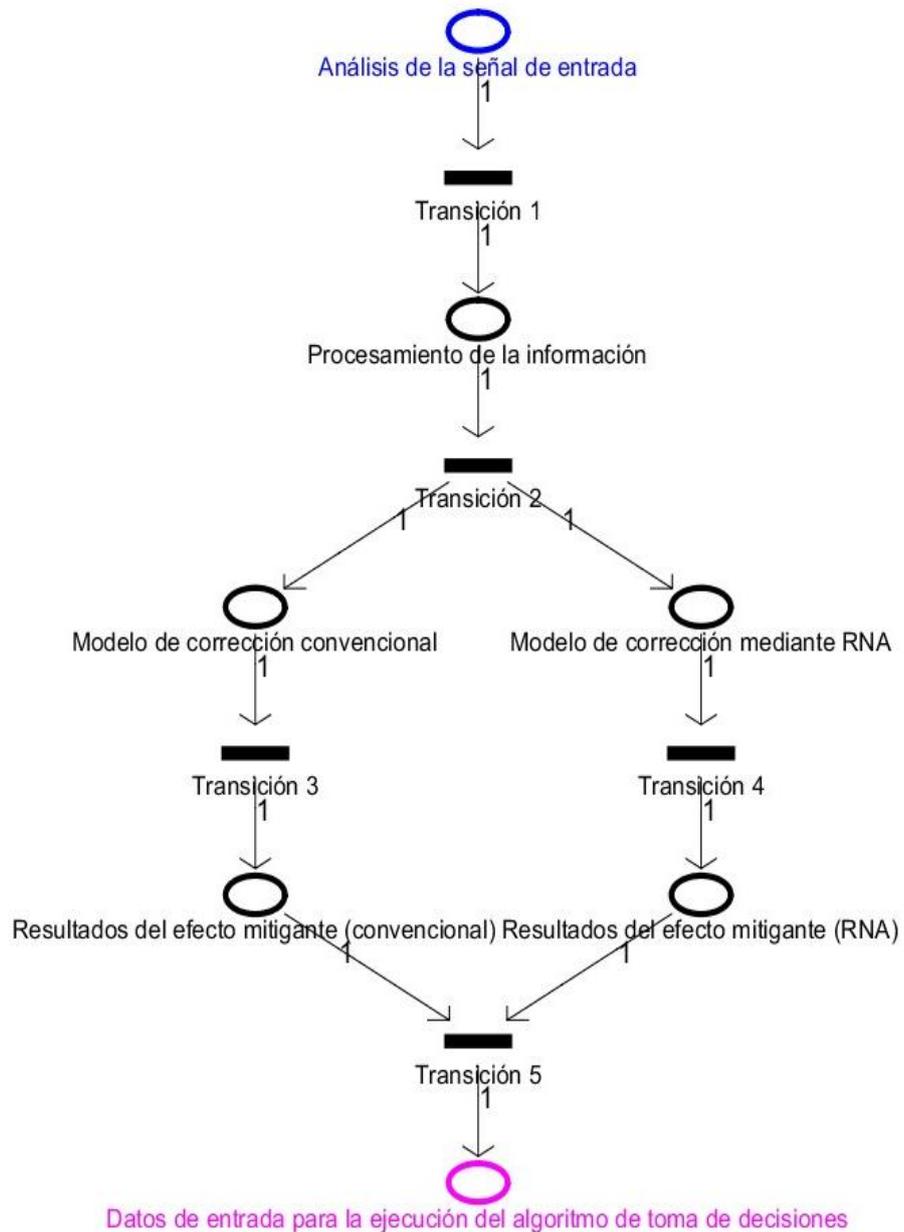


Figura 21-4: Análisis de los modelos de corrección parte del modelo conceptual generalizado mediante redes de Petri en Matlab

Fuente: (Matlab, 2016)

De la “Figura 21-4” se destaca la etapa de análisis de los modelos de corrección, esta sección es parte del modelo mitigante presentado en capítulos anteriores del presente trabajo investigativo, a continuación, se presenta un resumen secuencial de las etapas principales desarrolladas y

presentadas en esta sección del modelo mediante el “toolbox” “Petri Net Toolbox” de la herramienta computacional Matlab para la comprensión particular por etapas del modelo:

1. En la primera etapa detallada, referente a la sección de análisis de los modelos de corrección, se destaca el análisis de la señal como etapa predecesora y precursora de información, esta etapa se detalla con color azul como inicio de la fase de análisis de los modelos de corrección, haciendo referencia a la “Figura 21-4”.
2. En la segunda etapa detallada, referente a la sección de análisis de los modelos de corrección, se destaca el procesamiento de la información, la cual es necesaria para revisar los datos previos al ingreso de los modelos de corrección, el tiempo es variable y va en función del tiempo de procesamiento del algoritmo.
3. En la tercera etapa detallada, referente a la sección de análisis de los modelos de corrección, se destaca la ejecución de los dos modelos de corrección (modelo de corrección convencional y modelo de corrección mediante RNA) en simultáneo, esto es debido a que se quiere obtener resultados comparativos para una posterior selección del modelo de acuerdo a parámetros técnicos otorgados por el desarrollador que van en función de las normativas reguladoras de calidad energética.
4. En la cuarta etapa detallada, referente a la sección de análisis de los modelos de corrección, se destaca el almacenamiento y preparación de la información de los resultados obtenidos por los modelos de corrección, estos resultados permitirán decidir por medio de un algoritmo de toma de decisiones, cuál será el modelo de corrección que más se acople a las necesidades de mitigación del modelo propuesto.
5. En la quinta etapa detallada, referente a la selección de análisis de los modelos de corrección, se destaca la información recopilada a lo largo del modelo, que serán las variables de entrada para la ejecución de un algoritmo de decisiones que brinde la respuesta mitigante adecuada para el caso de estudio propuesto, de acuerdo a las exigencias estandarizadas, de las normas locales o internacionales.

4.3.1.4 Detalle de la etapa de selección del modelo de corrección, parte del modelo conceptual generalizado mediante redes de Petri en Matlab

Para una mayor comprensión del modelo mitigante propuesto, se consideró analizar cada etapa en específico del mismo, con la finalidad de detallar las particularidades de cada fase y con el respaldo de la simulación del “toolbox” enfocado a las redes de Petri que integra la herramienta computacional de Matlab. A continuación, en la “Figura 22-4” se expone el detalle de esta fase del modelo general (Selección del modelo de corrección), y un detalle secuencial de cada una de

las etapas que corresponden esta fase, se exponen a continuación para la comprensión y validación particularizada del modelo:

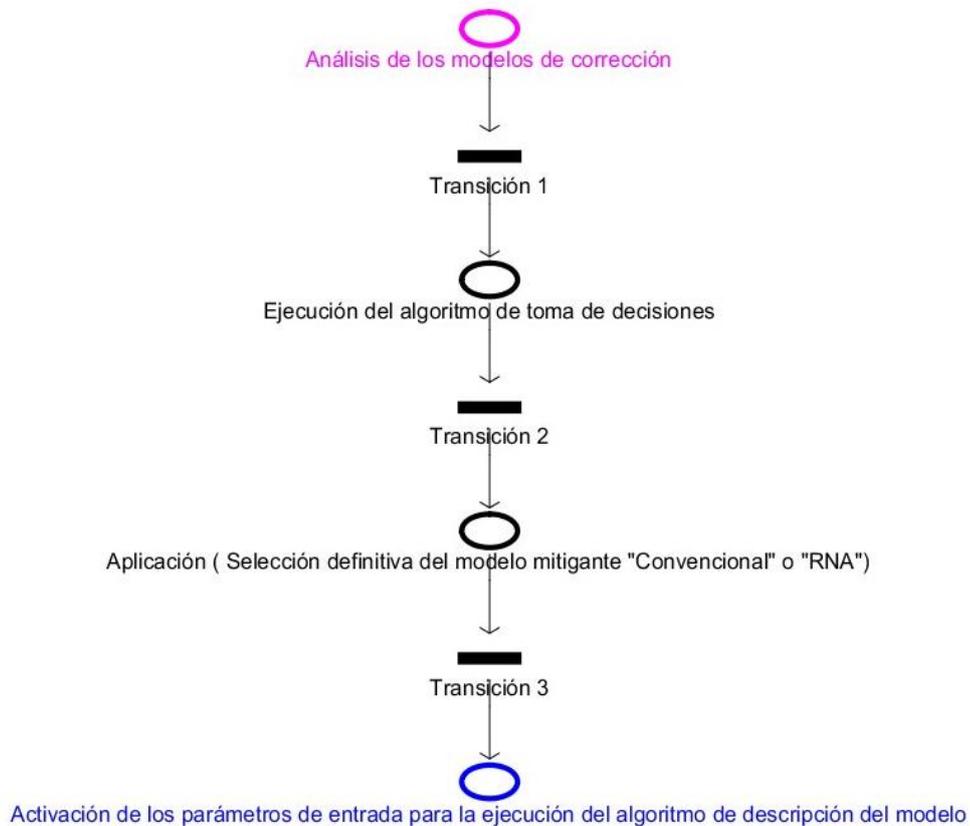


Figura 22-4: Selección del modelo de corrección parte del modelo conceptual generalizado mediante redes de Petri en Matlab

Fuente: (Matlab, 2016)

De la “Figura 22-4” se destaca la etapa de análisis de selección del modelo de corrección, esta sección es parte del modelo mitigante presentado en capítulos anteriores del presente trabajo investigativo, a continuación, se presenta un resumen secuencial de las etapas principales desarrolladas y presentadas en esta sección del modelo mediante el “toolbox” “Petri Net Toolbox” de la herramienta computacional Matlab para la comprensión y validación particular por etapas del modelo:

1. En la primera etapa detallada, referente a la sección de la selección del modelo de corrección, se destaca el análisis de los modelos de corrección como etapa predecesora

y precursora de información, esta etapa se detalla con color magenta como inicio de la fase de selección del modelo de corrección, haciendo referencia a la “Figura 22-4”.

2. En la segunda etapa detallada, referente a la selección del modelo de corrección, se destaca la ejecución del algoritmo de toma de decisiones, este algoritmo es crucial para la inclinación de los resultados hacia un modelo que se adapte de una forma consistente con la solución esperada, por el desarrollador en base a lineamientos y normas de calidad energética en materia de distorsión armónica eléctrica.
3. En la tercera etapa detallada, referente a la selección del modelo de corrección, se destaca la aplicación definitiva del algoritmo, es decir se selecciona el modelo haciendo una comparativa con los anteriores valores de distorsión armónica, presentado una solución mitigante para cualquiera que sea la entrada de los datos recopilados en el modelo.
4. En la cuarta etapa detallada, referente a la selección del modelo de corrección, se destacan la activación de los parámetros de la selección del algoritmo que permitirá ejecutar la descripción breve del modelo de corrección propuesto, esto se realiza con la finalidad de darle al investigador, operador o usuario del modelo mitigante, una referencia o indicación en términos generales de la selección de modelo de corrección focalizado únicamente para la mitigación de la distorsión armónica total, en aras de una futura implementación física mediante componentes electrónicos, para este propósito con connotaciones netamente prácticas enfocadas en la construcción de la presente propuesta de modelo mitigante implementado mediante técnicas de inteligencia artificial para el desarrollo de soluciones de mitigación, al final de este trabajo investigativo, específicamente en la sección de “recomendaciones”, se detallan algunas impresiones para la materialización de lo detallado anteriormente.

4.3.1.5 Detalle de la etapa de análisis de los modelos de corrección, parte del modelo conceptual generalizado mediante redes de Petri en Matlab

Para una mayor comprensión del modelo mitigante propuesto, se consideró analizar cada etapa en específico del mismo, con la finalidad de detallar las particularidades de cada fase y con el respaldo de la simulación del “toolbox” enfocado a las redes de Petri que integra la herramienta computacional de Matlab. A continuación, en la “Figura 23-4” se expone el detalle de esta fase del modelo general (Breve descripción del modelo de corrección) y un detalle secuencial de cada una de las etapas que corresponden esta fase, se exponen a continuación para la comprensión y validación particularizada del modelo:

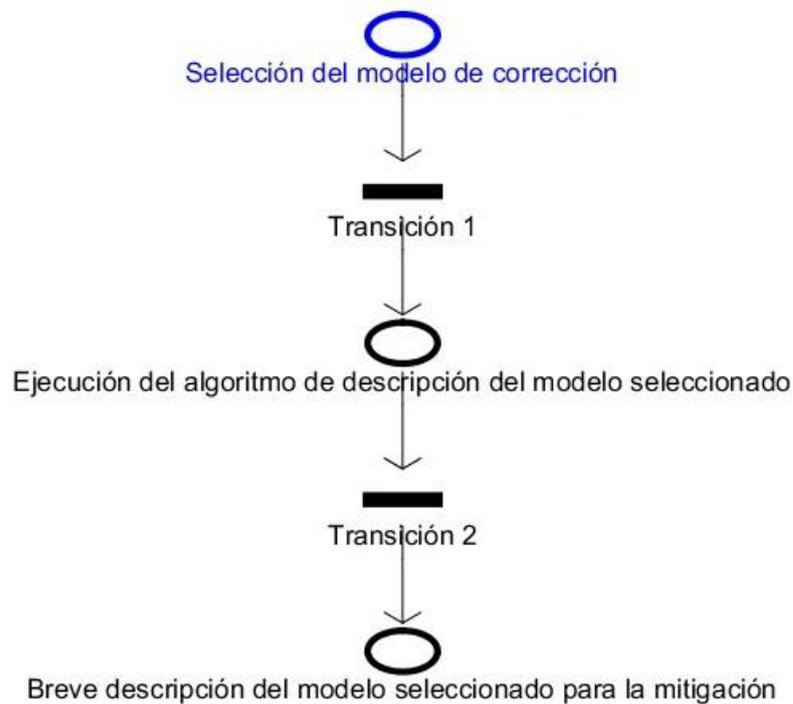


Figura 23-4: Breve descripción del modelo de corrección parte del modelo conceptual generalizado mediante redes de Petri en Matlab

Fuente: (Matlab, 2016)

De la “Figura 23-4” se destaca la etapa de descripción del modelo de corrección, esta sección es parte del modelo mitigante presentado en capítulos anteriores del presente trabajo investigativo, a continuación, se presenta un resumen secuencial de las etapas principales desarrolladas y presentadas en esta sección del modelo mediante el “toolbox” “Petri Net Toolbox” de la herramienta computacional Matlab para la comprensión particular por etapas del modelo:

1. En la primera etapa detallada, referente a la sección de la selección del modelo de corrección, se destaca la selección del modelo de corrección como etapa predecesora y precursora de información, esta etapa se detalla con color azul como inicio de la fase de selección del modelo de corrección, haciendo referencia a la “Figura 23-4”.
2. En la segunda etapa detallada, referente a la breve descripción del modelo de corrección, se destaca la ejecución del algoritmo de descripción del modelo seleccionado, este algoritmo embebido en la programación general del modelo permite reconocer algunas generalidades básicas del modelo seleccionado, avizorando una futura implementación con connotaciones de campo en el ámbito de la calidad de energía eléctrica

3. En la tercera etapa detallada, referente a la breve descripción del modelo, se termina la inicialización del algoritmo, permitiendo revisar el tiempo necesario las generalidades del modelo seleccionado, debido a que la información será desplegada por medio de un “pop-up” (ventana de información) con finalidades netamente informativas.

4.4 Implementación del modelo propuesto para el análisis de casos de estudio en Matlab

4.4.1 Implementación del modelo enfocado al análisis de casos de estudio para la mitigación

Para la implementación del modelo enfocado al análisis de casos de estudio aplicando lenguaje informático para el efecto, se consideró integrar un algoritmo completamente enfocado a la mitigación de armónicos en redes de energía eléctrica con una vinculación directa a una G.U.I (Interfaz gráfica de usuario), con la finalidad de realizar un módulo que se sea de fácil interacción entre usuarios y que permita visualizar los casos de solución y las diversas etapas planteadas para el modelo en una sola pantalla, permitiendo de esta manera analizar el modelo generalizado propuesto, donde los resultados del módulo no son solamente aplicables para aspectos académicos sino que además, brinda espectros de solución diversos para una vinculación directa a casos enrolados con la industria energética eléctrica, tal y como se planteó en los objetivos del presente trabajo de investigación.

A continuación, se detallan secciones del algoritmo propuesto, donde se destaca la estructura del modelo de mitigación armónica y además se aprecia el entorno de programación del software escogido para el desarrollo del modelo mitigante propuesto (Matlab), debido a que la estructura del algoritmo es extensa, se pretenderá indicar las partes más significativas del mismo, es importante destacar que este algoritmo caracterizador del modelo conceptual propuesto, se desarrolló siguiendo las fases de constitución y los lineamientos conceptuales analizados en capítulos anteriores del presente trabajo de titulación.

Las fases de constitución del modelo se enumeran nuevamente a continuación, detallando en cada fase, la figura correspondiente que permite hacer una referencia directa del algoritmo propuesto en el entorno de programación Matlab y la fase pertinente en el modelo mitigante, con la finalidad de detallar las secciones del modelo enfocado en este tipo de implementación para el análisis de casos de estudio.

- Adquisición de los datos (Adquisiciones de señales por medio de datos históricos y Adquisición de datos por medio de la simulación de señales). (Ver Figura 24-4 y 25-4)
- Análisis de la señal de entrada (Ver Figura 26-4)
- Análisis de los modelos de corrección (Ver Figura 27-4)
- Selección del modelo de corrección (Ver Figura 28-4)
- Breve detalle del modelo de corrección seleccionado (Ver Figura 29-4)

```

1  % MODELO PARA EL ANÁLISIS Y TOMA DE DECISIONES PARA LA REDUCCIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA
2  % ERIK FERNANDO MÉNDEZ
3  % TRABAJO DE TITULACIÓN DE MAESTRÍA EN SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL
4  % ESPOCH-2017
5
6  %% Adquisición de datos
7
8  %Adquisición de datos por medio de historicos
9  clc;
10 clear all;
11 filename = 'Ejemplo1.xls'
12 E = xlsread(filename)
13 t=0:0.001:360;
14 f=0;
15
16 %Arreglo de la matriz para el calculo de las Series de Fourier
17 %Representación del orden de los armónicos con STEM
18
19 An=[1];
20 e=[An;E]
21 A=length(e)
22
23 %sum(m(:) == 4)
24

```

Figura 24-4: Algoritmo de adquisición de datos, destacando sección de históricos

Fuente: (Matlab, 2016)

```

1  %Adquisición de la señal por medio de simulación
2  %Caso 1 de estudio
3  clc;clear all;
4  t=0:0.001:360;
5  f=0;
6  nA=3
7  for n=1:2:nA
8      x=[0,30,30,150,150,210,210,330,330,360];
9      y=[0,0,1,1,0,0,-1,-1,0,0];
10     subplot(2,1,1)
11     line(x,y,'color','r','linewidth',2);
12     f=f+(-4/(n*pi))*cos(n*pi/6)*sin(n*(t*pi/180-pi));
13     hold on;
14     axis([-10 370, -1.5 1.5]);
15     plot(t,f,'b','linewidth',2);
16     title('\bfDISTORSIÓN ARMÓNICA ELÉCTRICA');
17     xlabel('\bfTIEMPO');ylabel('\bfAMPLITUD');
18     grid on
19 end

```

Figura 25-4: Algoritmo de adquisición de datos, destacando sección de simulación

Fuente: (Matlab, 2016)

```

37 - stem(h,'fill','LineStyle','-','...',...
38 -     'MarkerFaceColor','red',...
39 -     'MarkerEdgeColor','green');
40 - grid on
41 - xlim([1,A]);
42 - xlabel('\bfARMONICO');ylabel('\bfAMPLITUD');
43 - title(['\bfESPECTRO DE FRECUENCIA']);
44 - pause(0.5)
45 -
46 - end
47 -
48 - %Calculo de THD
49 -
50 - a1=length(E)
51 - for n=1:a1
52 -
53 -     H(n)= E(n)*E(n)
54 -
55 - end
56 -
57 - % Operaciones referentes al THD
58 -
59 - b1=sum(H) %Tambien podia ser (H-1)
60 - THD=(sqrt(b1))/1 %THD de voltaje

```

Figura 26-4: Algoritmo de análisis de la señal

Fuente: (Matlab, 2016)

```

62 - %% Análisis de los modelos de corrección
63 -
64 - %Filtro de armónicos activo
65 -
66 - fs_Hz = 1; %Sample rate /Frecuencia de muestreo
67 - fund_Hz = 1/60; %Fundamental
68 - [b,a] = butter(3,fund_Hz/(fs_Hz/2)); %Configurando el Filtro activo por defecto
69 - y = filter(b,a,H); %Aplicando el filtro
70 -
71 - y1=[1,y]
72 - % y=
73 - % y(1,1)=[1]
74 - % hfilter=y
75 -
76 -
77 - hold on
78 - stem(y1)
79 -
80 - subplot (4,1,3)
81 - xlabel('\bfARMONICO');ylabel('\bfAMPLITUD');
82 - title(['\bfFILTRO PASA BAJO']);
83 - hold on
84 - stem(y1)

```

Figura 27-4: Algoritmo de análisis de los modelos de corrección

Fuente: (Matlab, 2016)

```

181 %% Algoritmo de toma de decisiones
182
183
184 - if THD >= THDF
185     disp('Filtro convencional dentro del rango de mitigación')
186 - end
187
188 - if THDF <= 5 && THD >= THDF
189     disp('Se cumple con la normativa nacional y extranjera (CONELEC 004/01 y la IEEE 519-2014)')
190 - end
191
192
193 - if THD >= THDFR
194     disp('Filtro mediante RNA dentro del rango de mitigación')
195 - end
196
197
198 - if THDFR <= 5 && THD >= THDFR
199     disp('Se cumple con la normativa nacional y extranjera (CONELEC 004/01 y la IEEE 519-2014)')
200 - end
201 - end
202

```

Figura 28-4: Selección del modelo de corrección

Fuente: (Matlab, 2016)

```

192
193 - if THD >= THDFR
194     disp('Filtro mediante RNA dentro del rango de mitigación')
195 - end
196
197
198 - if THDFR <= 5 && THD >= THDFR
199     disp('Se cumple con la normativa nacional y extranjera (CONELEC 004/01 y la IEEE 519-2014)')
200 - end
201 - end
202
203 - if (THD >= THDF) && (THDF <= THDFR)
204
205     disp('Filtro convencional seleccionado')
206     THDF
207 - elseif (THD >= THDFR) && (THDFR <= THDF)
208     disp('Filtro RNA seleccionado')
209     THDFR
210 - end
211 - end
212
213

```

Figura 29-4: Breve descripción del modelo de corrección seleccionado

Fuente: (Matlab, 2016)

Finalmente, todo el modelo implementado en el algoritmo anteriormente descrito, fue incluido en un lenguaje de programación enfocado a objetos, para dinamizar esta implementación del modelo con connotaciones enfocadas al análisis de casos de estudio, esto fue posible nuevamente, a través de la herramienta informática seleccionada para el tratamiento del modelo (Matlab) en uno de sus aplicativos más distintivos denominado “GUIDE” el cual fue detallado en secciones anteriores del presente trabajo de titulación, por medio de “GUIDE” se pudo desarrollar una interfaz gráfica de usuario aplicando todos los conceptos desarrollados a lo largo del presente trabajo investigativo, para de esta manera disponer de un módulo informático basado en el modelo mitigante propuesto con características visualmente amigables para la operatividad de cualquier usuario.

A continuación, en la “Tabla 1-4” se detallan los componentes utilizados para el desarrollo de la GUI (Interfaz gráfica de usuario) en Matlab.

Tabla 1-4: Detalle de los componentes utilizados del entorno “GUIDE” de Matlab

Control	Nombre de estilo	Descripción	Funcionalidad en el sistema
Figure	“figure”	Es el entorno que contiene todo el diseño de la interface gráfica de usuario	Contiene toda la interface gráfica de usuario del modelo mitigante de armónicos.
Panel	“uipanel”	Contiene varios botones agrupándolos de una forma más simple para el manejo del usuario	Tiene las siguientes funcionalidades en el módulo del modelo propuesto: <ul style="list-style-type: none"> • Adquisición de datos mediante históricos, permite abrir un archivo de “Excel” en donde se encuentran los datos medidos de campo con los espectros armónicos • Adquisición de señales simuladas, permite simular armónicos de acuerdo a su orden, con la finalidad de disponer casos extremos en los que la distorsión armónica y los armónicos estén latentes • Modelo de corrección, dispone de un botón de ejecutar el cual se ejecuta siempre y cuando se seleccione el tipo de adquisición de datos del modelo. • Aplicación y análisis de los modelos de corrección, esta sección de panel permite visualizar las distintas gráficas con la respectiva aplicación del modelo de corrección. • Selección del modelo de corrección, esta sección tiene embebido el algoritmo de toma decisiones el cual indica el modelo de corrección seleccionado en base a la distorsión armónica más baja • Análisis de los modelos de corrección, en esta sección se muestran los resultados antes de ser intervenidos y después de ser intervenidos por los modelos de corrección, permitiendo hacer comparativas de los datos. • Detalle del modelo seleccionado, en esta sección del panel se indica el gráfico del modelo con los componentes electrónicos sugeridos para una implementación física, además de desplegar una ventana informativa del modelo seleccionado. • Herramientas, en la correspondiente sección del

			panel se indican botones que permiten activar y desactivar las cuadrículas (detalladas y normales) del módulo además de disponer de un botón salir que permite finalizar la interface.
Buttons	'pushbutton'	Son botones de selección que desarrollan un código de programación en el instante que son presionados	En el módulo basado en el modelo mitigante propuesto realizan las siguientes funciones: <ul style="list-style-type: none"> • Permite abrir y graficar casos de estudio mediante históricos • Permite simular armónicos siempre y cuando se estipule su orden • Permite ejecutar los modelos de corrección para su posterior análisis • Salir del sistema por medio del botón "Salir"
Radio Button	"radiobutton"	Son botones que permiten marcar una opción de preferencia de usuario	En la presente interface realiza la siguiente función: <ul style="list-style-type: none"> • Seleccionar entre el tipo de adquisición de datos propuesto para el modelo (simulada-históricos)
Static Text	"text"	Permiten visualizar texto que no puede ser editado	En la interface se utilizaron para indicar texto informativo como títulos, nombres, etc., referente a cada selección, y también hicieron posible la visualización de los resultados de distorsiones totales de armónicos antes y después de los modelos de corrección.
Toggle Button	"togglebutton"	Permite seleccionar dos estados "on", "off", "1", "0"	En la interface se utilizaron para las herramientas de cuadrícula que asisten a los diferentes gráficos de resultados, cabe recalcar que para hacer la GUI más amigable con el usuario se utilizaron imágenes que detallaban la herramienta antes mencionada.
Axes	"axes"	Permiten la visualización de imágenes, gráficas de datos, etc.	En el sistema se utilizaron varios "axes" que permitieron graficar los órdenes y las señales afectadas por armónicos, en inclusión de las respuestas mitigantes de los filtros, los cuales son necesarios para el análisis externo de los usuarios.
Menu bar	"uimenu"	Son "menús" de asistencia fuera del entorno de la figura de programación.	En el sistema se programaron 4 "menús", estos son: <ul style="list-style-type: none"> • "Archivo", que tiene las siguientes opciones: "Nuevo cálculo" que permite iniciar un nuevo cálculo en la interfaz, "Guardar gráfica" permite guardar y exportar las gráficas generadas por los modelos de corrección o filtros., "Salir" permite salir de la interface. • "Imprimir" que cuenta con las opciones de "Imprimir Todo", la cual imprime toda la interface con resultados del sistema y "Opciones de impresión" que son ajustes relacionados a la impresión.

			<ul style="list-style-type: none"> Herramientas, la cual dispone de las secciones llamadas “Cuadrícula” y “Cuadrícula detallada” que asisten a las gráficas “Ayuda”, que dispone de las secciones, “Acerca de” que da referencias del modelo mitigante, de su desarrollador y el propósito, y “Versión del programa” que siendo la primera interface de su tipo se le asignó la versión 1.0
--	--	--	---

Fuente: (Matlab, 2016), Detalle de los componentes usados en el desarrollo de la “GUI” del modelo mitigante en Matlab

Realizado por: Méndez, Erik, 2017

Finalmente, y en concordancia con la tabla anterior “Tabla 1-4” se expone en las siguientes gráficas (“Figura 30-4”, “Figura 31-4” y “Figura 32-4”), la interface del modelo mitigante de distorsión armónica haciendo un énfasis principal al carácter sistemático, de la presente connotación desarrollada para el análisis de casos de estudio, donde el modelo propuesto y la implementación del algoritmo por medio del entorno informático Matlab, es el pilar de la interfaz gráfica de usuario expuesta y utilizada para el análisis y evaluación de casos de estudio simulados y recabados mediante datos históricos en redes de energía eléctrica, siendo posible este análisis dados los datos facilitados por la “Corporación Eléctrica Nacional” (CNEL EP) y su división de calidad de energía eléctrica.

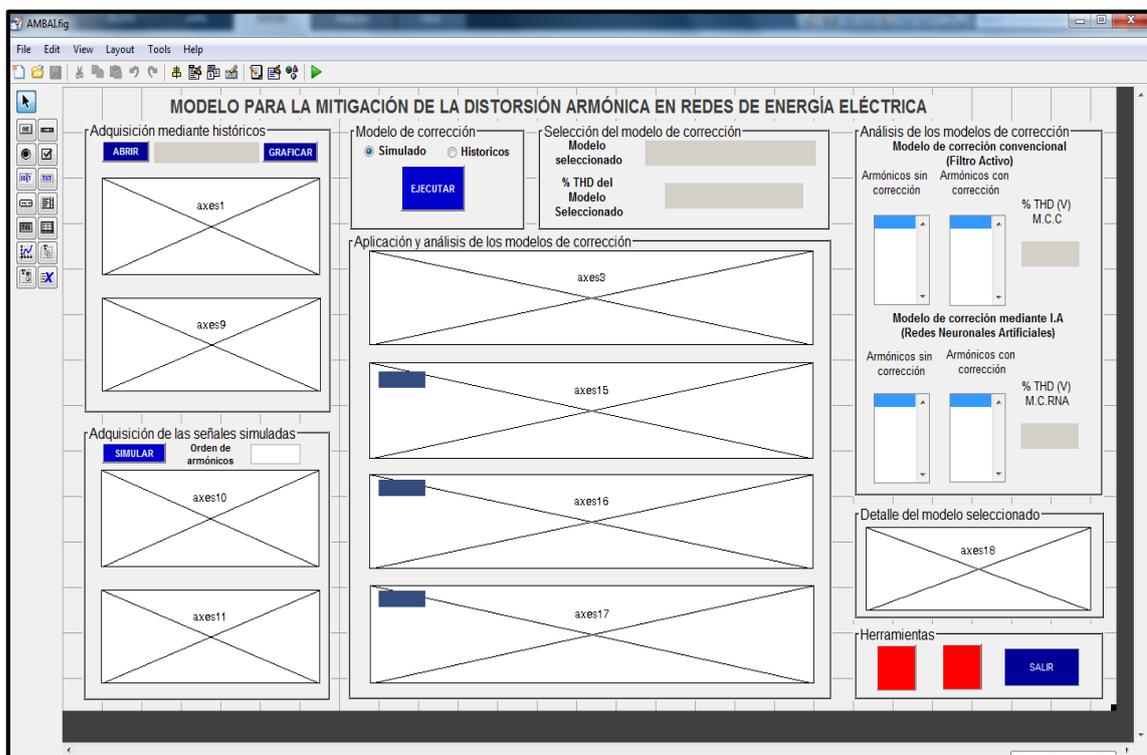


Figura 30-4: Desarrollo de la GUI en la herramienta informática Matlab

Fuente: (Matlab, 2016)

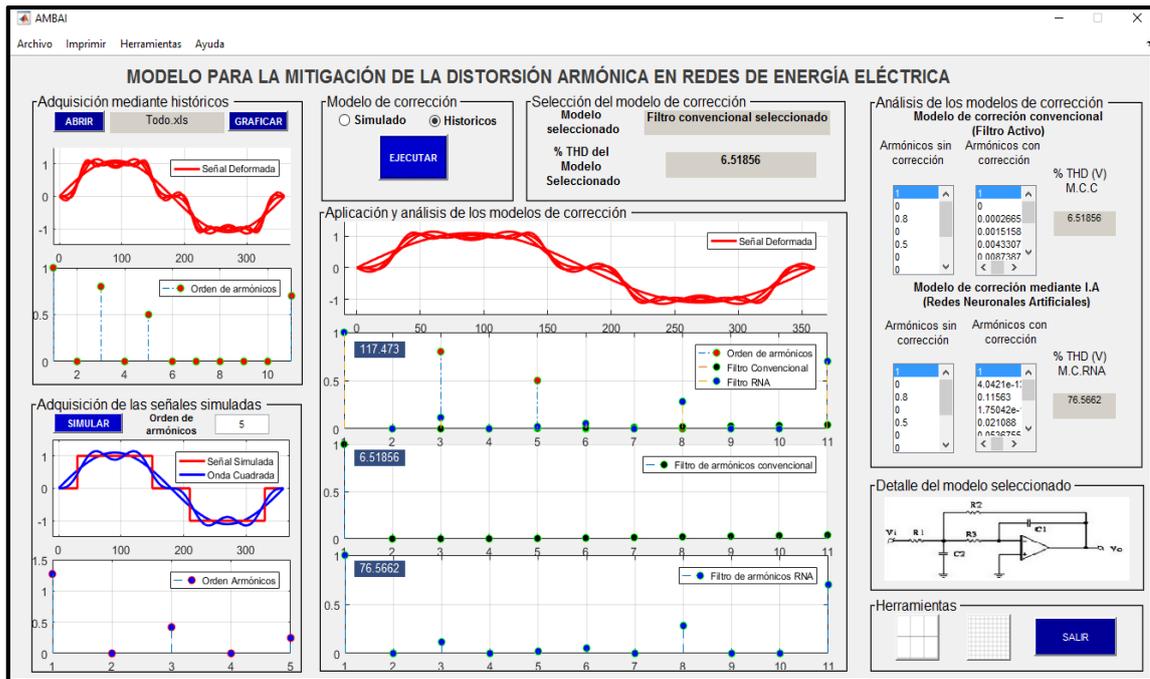


Figura 31-4: Funcionamiento de la GUI del sistema automatizado de predicción en Matlab

Fuente: (Matlab, 2016)

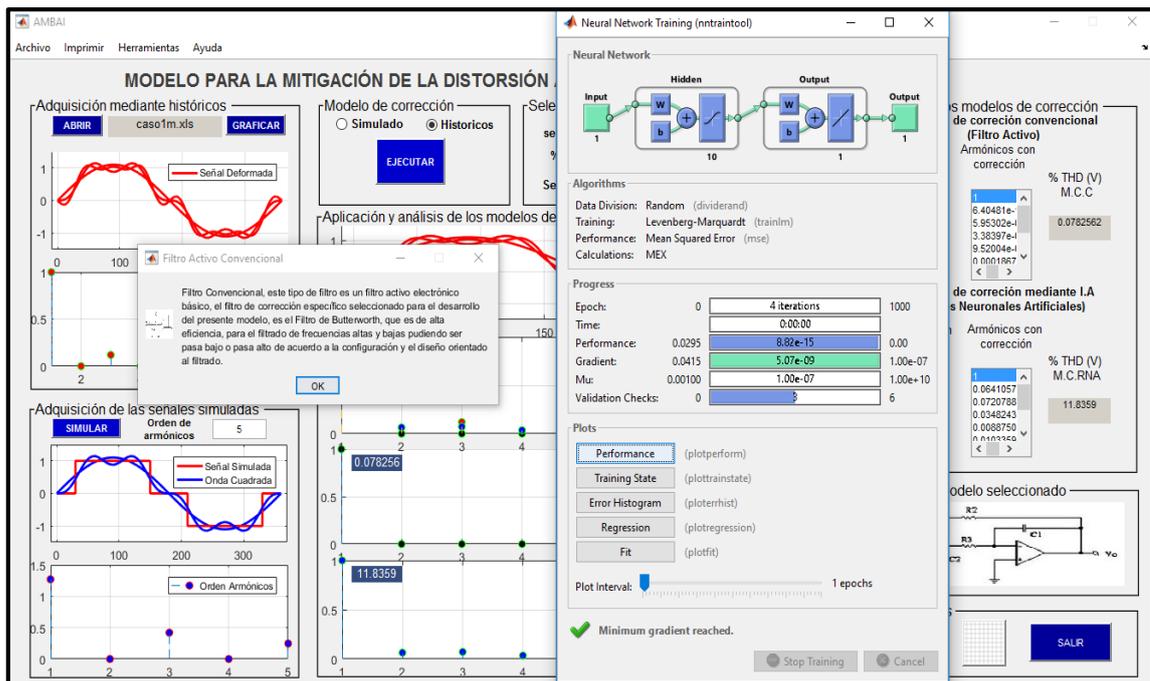


Figura 32-4: Visualización del training del modelo de corrección por RNA, diálogos del modelo seleccionado y el menú “Acerca de” de la interface.

Fuente: (Matlab, 2016)

CAPÍTULO V

5. PROPUESTA MITIGANTE, Y ANÁLISIS DE CASOS DE ESTUDIO, SIMULADOS Y DE CAMPO EN ARAS DE MITIGAR LA DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL DE VOLTAJE EN REDES DE ENERGÍA ELÉCTRICA

5.1 Evaluación de casos de estudio a procesar con el modelo mitigante implementado, con una connotación analítica, en aras de reducir la distorsión armónica total.

Para el análisis de casos de estudio se consideró la simulación y la adquisición de datos como entradas para el sistema desarrollado en la herramienta computacional Matlab, tal y como se especificó en capítulos anteriores, el desarrollo del algoritmo que implementa el modelo mitigante propuesto a una connotación enfocada al análisis de casos de estudio, en adición del desarrollo de la interfaz gráfica de usuario para disponer de un entorno amigable para la operación del modelo, fue completamente diseñado e implementado en la herramienta computacional Matlab, debido a sus características técnicas y de entorno, enfocado al desarrollo de algoritmos con alto contenido práctico, ingenieril y matemático.

Para el análisis de casos de estudio, los cuales, por medio de la aplicación desarrollada, obtendrán una respuesta mitigante a las perturbaciones de distorsiones armónicas totales, tanto para los casos simulados como para los casos con datos adquiridos de la red, se propone dividir los casos y respuestas del modelo dos tipos de connotaciones para el análisis, con el siguiente detalle mencionado a continuación:

- **Para casos de estudio simulados**, se propone el análisis de dos casos de estudio, los cuales incorporan una onda completamente cuadrada, como caso extremo de estudio, haciendo referencia a una carga no lineal conectada al sistema eléctrico, de este apartado se pretende obtener dos análisis mediante el modelo, uno con orden de armónicos simulados de hasta el séptimo armónico, y el otro pretende analizar hasta el onceavo armónico, esto como caso atípico ya que cargas que emitan ondas senoidales completamente cuadradas, solo son viables a nivel experimental por medio de equipos convertidores aplicando los conceptos de electrónica de potencia, finalmente este caso fue propuesto como un caso extremo para probar la eficiencia del modelo mitigante en condiciones atípicas, y ver la capacidad de corrección de los modelos o filtros implícitos en el modelo general conceptual propuesto para el presente trabajo de titulación.

- **Para casos de estudio que incorporan la adquisición de datos de campo medidos**, se consideraron las mediciones de los equipos analizadores (AEMC INSTRUMENTS-modelo 3945-B PowerPad) , y los reportes generados por el “Departamento de calidad de energía” de la CNEL EP UN STD, siendo una empresa de distribución eléctrica, esta empresa eléctrica, al igual que varias empresas del mercado de distribución nacional incorpora una alta densidad de perturbaciones armónicas que derivan en una distorsión armónica total de varios de sus alimentadores o circuitos principales que parten de las subestaciones de distribución de energía, del sistema eléctrico antes mencionado. La empresa CNEL EP en adición de otras empresas del mercado eléctrico nacional, pretenden buscar una solución definitiva a las altas componentes armónicas que derivan en THD’s de alto nivel, lo cual repercute en ciertas cargas eléctricas de sus sistemas.

Con la finalidad de presentar un análisis detallado, en aras de incorporar el modelo mitigante propuesto en su connotación enfocada al análisis de casos de estudio en aras de reducir las perturbaciones armónicas, que se derivan en un alto índice de distorsión armónica total en redes de energía eléctrica se exponen dos casos para el análisis, recabados de algunos de los alimentadores que incorporan índices considerables de perturbaciones armónicas de la CNEL EP, estos dos casos se analizan a detalle, destacando la capacidad de mitigación del modelo desarrollado en su carácter de análisis por medio de la herramienta computacional Matlab, al momento de incorporar la implementación en algoritmo y en interfaz gráfica de usuario para la operación del modelo mitigante, en aras de realizar un análisis y toma de decisiones integral de esta problemática que afecta el campo de la distribución eléctrica nacional y mundial.

A continuación se exponen los diferentes análisis y resultados procesados a través de la herramienta computacional Matlab tanto para casos simulados y para casos desarrollados a través de históricos de datos (adquisición de datos medidos en campo), permitiendo la implementación del modelo de análisis y toma de decisiones, enfocado a la mitigación de armónicos en redes de energía eléctrica, con el empleo de técnicas de inteligencia artificial, tanto para la constitución como para los modelos de corrección del modelo general desarrollado propuesto, cabe destacar que los resultados, se presentan de una forma ordenada y concisa para la comprensión final de los casos de estudio enrolados a perturbaciones armónicas con componentes mitigantes, siendo la calidad de energía fundamental para un eficiente uso de la energía, considerando siempre las exigencias, y regulaciones necesarias para que el usuario final obtenga un servicio fiable y confiable del suministro eléctrico asociado.

5.2 Análisis de casos propuestos simulados mediante el modelo mitigante implementado para el análisis de casos de estudio en aras de reducir la distorsión armónica total en Matlab

5.2.1 “Caso de estudio simulado 1”, mediante una forma de onda cuadrada correspondiente a un sistema eléctrico, simulando armónicos de un orden séptimo

Para el presente caso de estudio se analizó un espectro armónico de orden séptimo, de una forma de onda completamente cuadrada, correspondiente a una carga no lineal, este tipo de cargas eléctricas en el campo práctico dada su composición y constitución debido a la estructura de la forma de onda, es un homólogo de equipos de conversión de energía bajo los lineamientos de la electrónica de potencia, ya que este tipo de dispositivos incorporan componentes electrónicos, tales como transistores, transductores, diodos, etc.

A continuación se presentan los resultados obtenidos a través del modelo mitigante propuesto en su connotación desarrollada para el análisis de casos de estudio, adicionalmente en las figuras anexas (Ver “Figura 1-5”, “Figura 2-5” y “Figura 3-5”), se detalla la ejecución del modelo en todas sus etapas propuestas y la obtención de la respuesta mitigante por parte de los modelos de corrección (Convencional – RNA) que integran el modelo general propuesto para la mitigación de armónicos en redes eléctricas.



Figura 1-5: Aplicación del modelo mitigante para la reducción armónica, “Caso simulado 1”

Fuente: (Matlab, 2016)

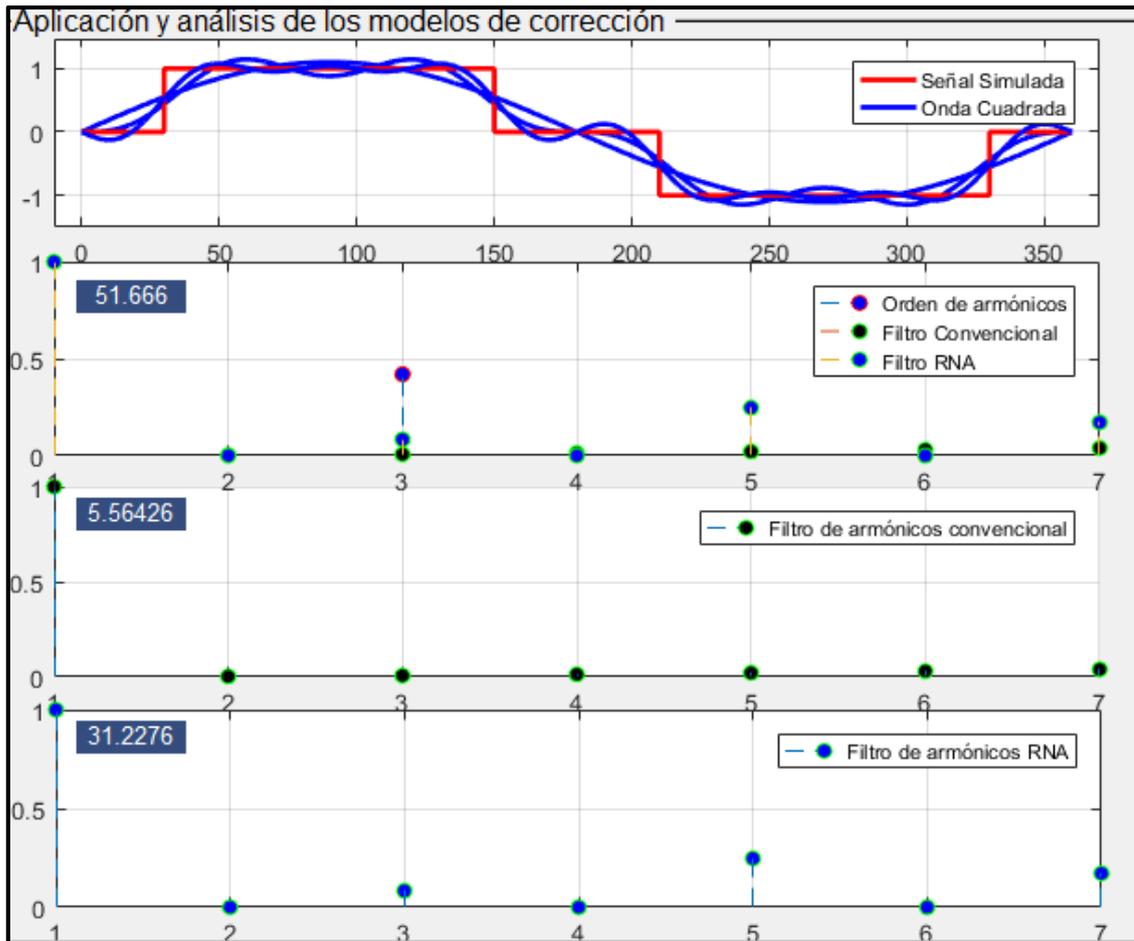


Figura 2-5: Detalle de la señal simulada y respuesta mitigante del “Caso simulado 1”

Fuente: (Matlab, 2016)

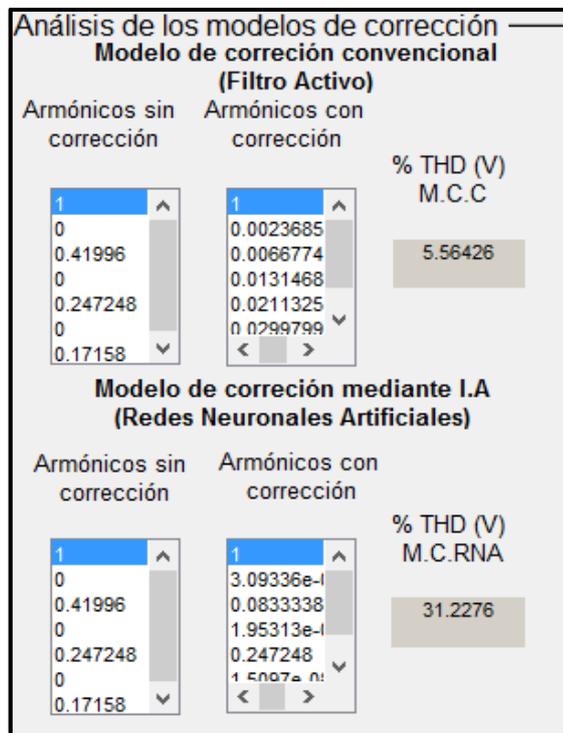


Figura 3-5. Datos obtenidos del “Caso simulado 1”

Fuente: (Matlab, 2016)

De los datos obtenidos, se expone de manera detallada las respuestas mitigantes resultantes del procesamiento del modelo propuesto, los resultados se mencionan a continuación:

- La respuesta mitigante definitiva del filtro activo (modelo de corrección convencional) fue **5,56426%** de distorsión armónica total, considerando que la distorsión armónica del caso propuesto es de 51,666% sin ninguna corrección, la reducción del modelo de corrección antes mencionada es altamente considerable, ya que además de lo mencionado cumple con los límites mencionados en los estándares y recomendaciones de las normativas nacionales (“CONELEC” 004/01”) e internacionales (“IEEE-519-2014”).
- La respuesta mitigante definitiva del filtro mediante RNA (modelo de corrección mediante I.A) fue **31,2276%** de distorsión armónica total, considerando que la distorsión armónica del caso propuesto es de 51,666% sin ninguna corrección, la reducción del modelo de corrección antes mencionada es considerable.

La solución planteada por el filtro activo (modelo de corrección convencional), con una reducción de la distorsión armónica total a un valor de **5,56426 %** es ideal para este caso de estudio con altos niveles de distorsión armónica producidas por cargas no lineales, destacando la caracterización simulada del presente caso.

Las particularidades de los resultados obtenidos (Ver “Tabla 1-5”), el entrenamiento de la RNA para la reducción de la distorsión armónica (Ver “Figura 4-5”) y la descripción del modelo seleccionado (Ver “Figura 5-5”) se exponen a continuación:

Tabla 1-5: Particularidades de la distorsión armónica total del modelo “Caso 1”

% THD (V) Caso de estudio (Sin aplicar los modelos de corrección)	% THD (V) Modelo de corrección convencional “Filtro Activo”	% THD (V) Modelo de corrección mediante I.A “Filtro RNA”
51,666 %	5,56426 %	31,2276 %

Fuente: (Matlab, 2016), Resultados obtenidos por el modelo mitigante propuesto

Realizado por: Méndez, Erik, 2017

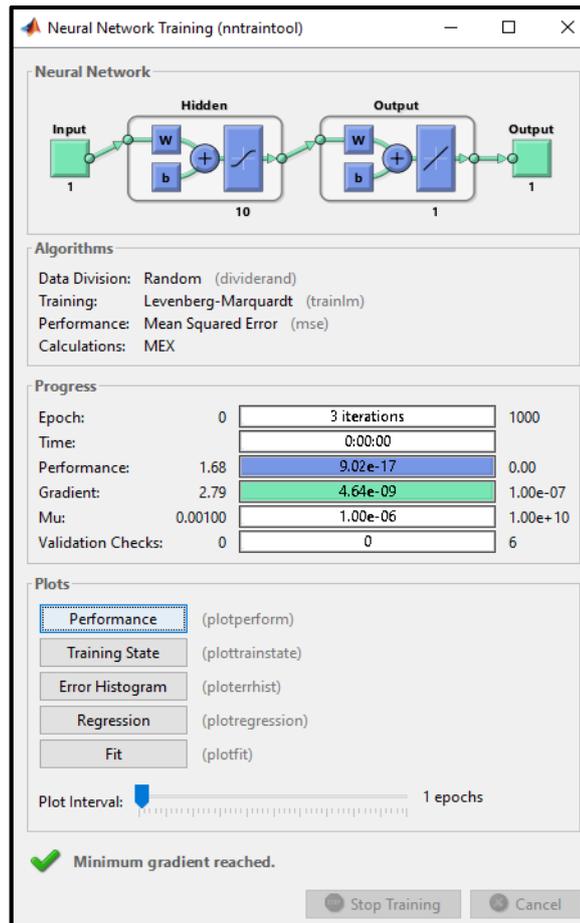


Figura 4-5: Entrenamiento de la RNA, “Caso 1”

Fuente: (Matlab, 2016)

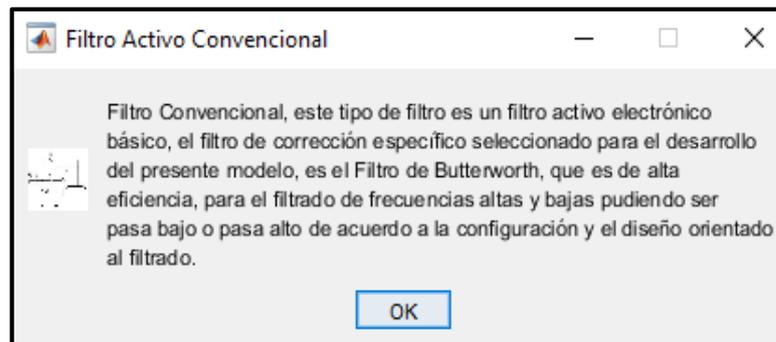


Figura 5-5: Detalle del modelo de corrección, “Caso simulado 1”

Fuente: (Matlab, 2016)

5.2.2 “Caso de estudio simulado 2”, mediante una forma de onda cuadrada correspondiente a un sistema eléctrico, simulando armónicos de un orden onceavo

Para el presente caso de estudio se analizó un espectro armónico de onceavo orden, de una forma de onda completamente cuadrada, correspondiente a una carga no lineal, este tipo de cargas eléctricas en el campo práctico dada su composición y constitución debido a la estructura de la forma de onda, es un homólogo de equipos de conversión de energía bajo los lineamientos de la electrónica de potencia, ya que este tipo de dispositivos incorporan componentes electrónicos, tales como transistores, transductores, diodos, etc.

A continuación se presentan los resultados obtenidos a través del modelo mitigante propuesto en su connotación desarrollada para el análisis de casos de estudio, adicionalmente en las figuras anexas (Ver “Figura 6-5”, “Figura 7-5” y “Figura 8-5”), se detalla la ejecución del modelo en todas sus etapas propuestas y la obtención de la respuesta mitigante por parte de los modelos de corrección (Convencional – RNA) que integran el modelo general propuesto para la mitigación de armónicos en redes eléctricas.

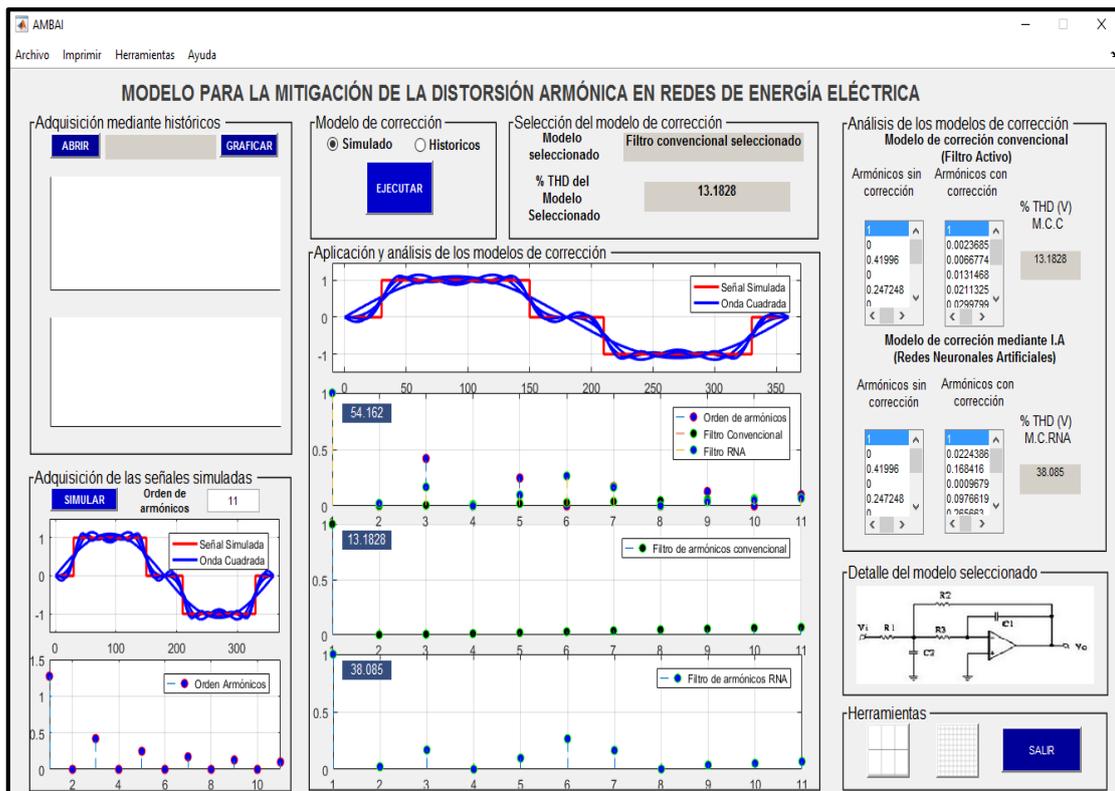


Figura 6-5: Aplicación del modelo mitigante para la reducción armónica, “Caso simulado 2”

Fuente: (Matlab, 2016)

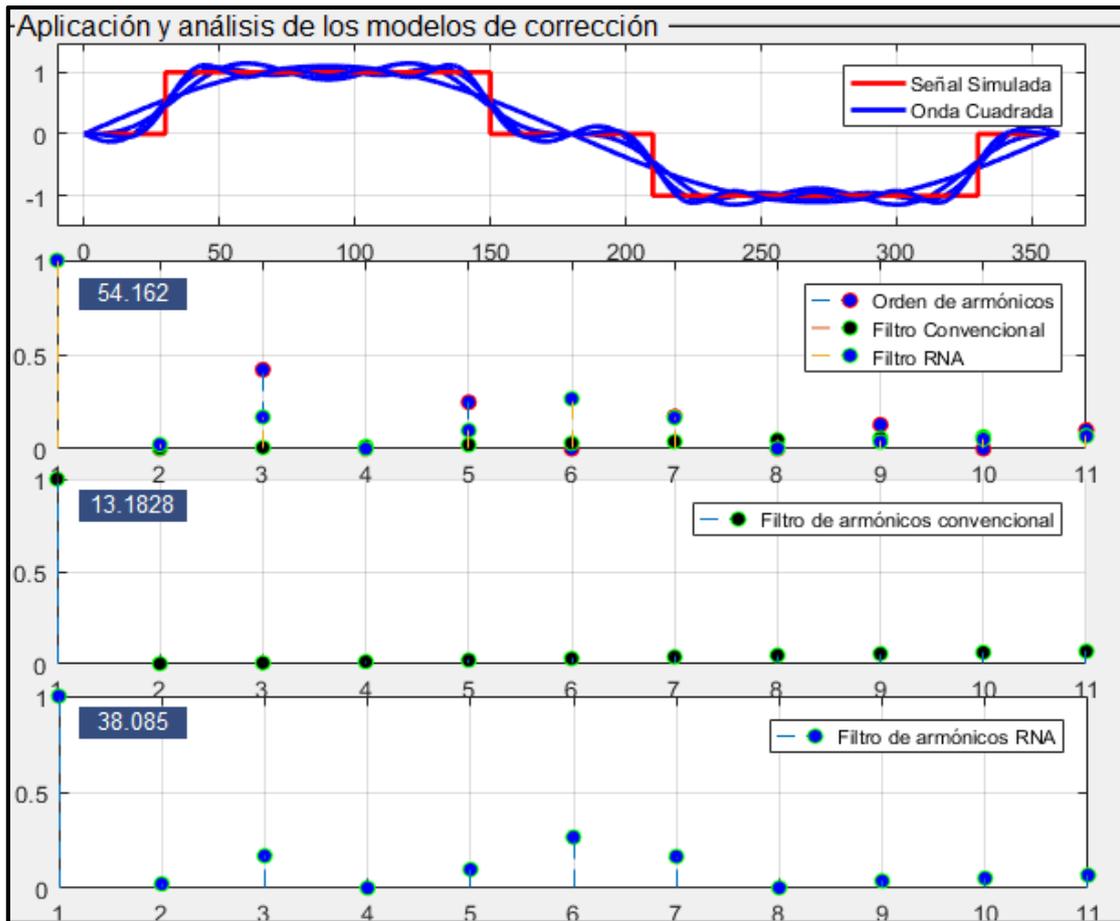


Figura 7-5: Detalle de la señal simulada y respuesta mitigante del “Caso simulado 2”

Fuente: (Matlab, 2016)

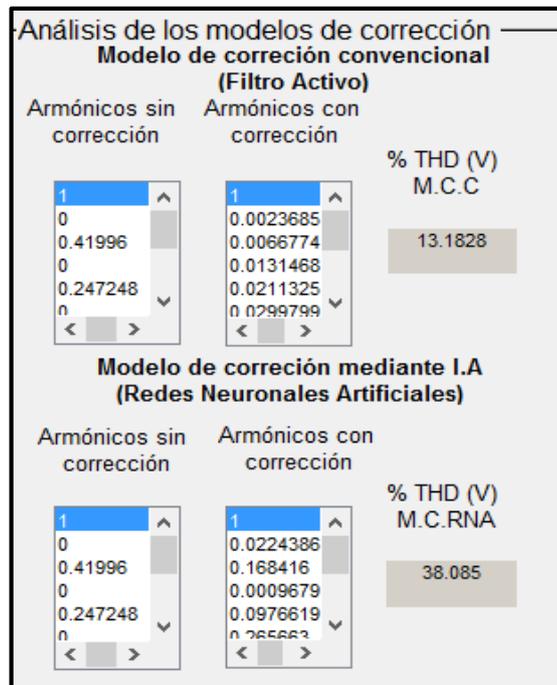


Figura 8-5: Datos obtenidos del “Caso simulado2”

Fuente: (Matlab, 2016)

De los datos obtenidos, se expone de manera detallada las respuestas mitigantes resultantes del procesamiento del modelo propuesto, los resultados se mencionan a continuación:

- La respuesta mitigante definitiva del filtro activo (modelo de corrección convencional) fue **13,1828%** de distorsión armónica total, considerando que la distorsión armónica del caso propuesto es de 54,162% sin ninguna corrección y con picos en los órdenes armónicos variados, la reducción del modelo de corrección antes mencionada es altamente considerable para un caso de estudio que incorpore este tipo de ordenes dispersos y de gran amplitud.
- La respuesta mitigante definitiva del filtro mediante RNA (modelo de corrección mediante I.A) fue **38,085%** de distorsión armónica total, considerando que la distorsión armónica del caso propuesto es de 54,162% sin ninguna corrección y con picos en los órdenes armónicos variados, la reducción propuesta por el modelo de corrección antes mencionado es considerable.

La solución planteada por el filtro activo (modelo de corrección convencional), con una reducción de la distorsión armónica total, a un valor de **13,1828 %** es ideal para este caso de estudio con altos niveles de distorsión armónica producidas por cargas no lineales, destacando la caracterización simulada del presente caso.

Las particularidades de los resultados obtenidos (Ver “Tabla 2-5”), el entrenamiento de la RNA para la reducción de la distorsión armónica (Ver “Figura 9-5”) y la descripción del modelo seleccionado (Ver “Figura 10-5”) se exponen a continuación:

Tabla 2-5: Particularidades de la distorsión armónica total del modelo “Caso 2”

% THD (V) Caso de estudio (Sin aplicar los modelos de corrección)	% THD (V) Modelo de corrección convencional “Filtro Activo”	% THD (V) Modelo de corrección mediante I.A “Filtro RNA”
54,162 %	13,1828 %	38,085 %

Fuente: (Matlab, 2016), Resultados obtenidos por el modelo mitigante propuesto

Realizado por: Méndez, Erik, 2017



Figura 9-5: Entrenamiento de la RNA, “Caso 2”

Fuente: (Matlab, 2016)

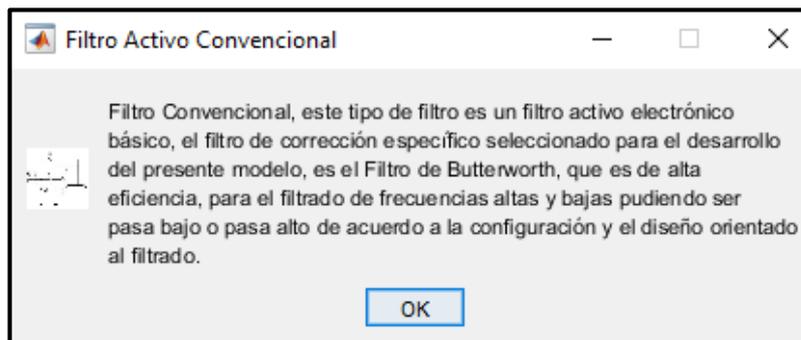


Figura 10-5: Detalle del modelo de corrección aplicado, “Caso 2”

Fuente: (Matlab, 2016)

5.3 Análisis de casos propuestos mediante la adquisición de datos a través del modelo mitigante implementado para el análisis de casos de estudio en aras de reducir la distorsión armónica total en Matlab

5.3.1 “Caso de estudio 1”, obtenido mediante la adquisición de datos históricos, en el transformador de distribución No. 114728, “Alimentador Nuevo Israel”, de la “Subestación de distribución El Carmen”, de la Corporación Eléctrica Nacional (CNEL EP)

Para el presente caso de estudio considerado para el análisis de armónicos en redes de energía eléctrica, en primera instancia se procede a organizar los datos recabados en campo a través del equipo “AEMC INSTRUMENTS- modelo 3945-B PowerPad”, el cual es un equipo analizador de datos, que capta armónicos hasta el orden cuarenta. Para la caracterización de un sistema que dispone de armónicos eléctricos, y para el análisis de los mayores impactos en el orden de los mismo, los “Departamentos de calidad de energía”, relacionados al ámbito de las empresas de distribución, consideran generalmente el análisis de los primeros nueve armónicos que perturban la señal eléctrica generada, esto es debido a que, dada la generalidad de las empresas eléctricas de distribución, las cuales entregan energía mayoritariamente a consumidores residenciales, caracterizan una espectro armónico, en el que a partir del segundo armónico hasta el armónico “n”, existe una disminución no lineal inversa en términos de amplitud, adicionalmente se considera que la mayoría de cargas de un sistema eléctrico de distribución son inductivas-resistivas, lo cual permite marcar una tendencia impar significativa de la amplitud armónica en redes o sistemas de energía eléctrica.

Para los datos obtenidos en el presente caso de estudio, se analizaron registros a través del equipo analizador de calidad de energía antes mencionado (AEMC INSTRUMENTS- modelo 3945-B PowerPad), por un periodo de una semana, una muestra de los registros obtenidos por el instrumento de medición se evidencian en la “Tabla 3-5”, de donde se destaca la medición de las perturbaciones armónicas en fases del secundario del equipo de transformación de distribución analizado (Transformador monofásico auto protegido de 25KVA), cabe destacar que para la preparación de los datos previo el análisis del modelo, se realizaron las siguientes consideraciones:

- Se utilizaron los valores máximos por “Fase” (Considerando las dos fases “Fase A” y “Fase B”, disponibles del transformador analizado), registrados cada 10 minutos en los equipos analizadores de carga AEMC INSTRUMENTS- modelo 3945-B PowerPad,

- De los valores máximos por “Fase” obtenidos, se obtuvieron los valores máximos globales entre fases, es decir de la “Fase A” y de la “Fase B”, se obtuvieron los valores máximos entre cada una de ellas, obteniendo una tabla con los valores máximos generales del sistema analizado (transformador) “Fase Máx THD”, esta metodología es usada para el desarrollo de filtros mitigantes en sistemas eléctricos, y es replicada para el análisis de casos de estudio mediante la adquisición de datos históricos, debido a que el modelo propuesto en su implementación mediante la herramienta computacional Matlab debe ser capaz de brindar una respuesta de mitigación en las peores condiciones posibles habilitantes de un sistema eléctrico en redes de energía eléctrica.

Los resultados finales a ser considerados por el modelo mitigante, del presente caso de estudio se indican en la “Tabla 4-5”, los cuales brindan el punto de partida para el procesamiento, análisis y corrección (filtrado) de los mismos, mediante el modelo propuesto.

Tabla 3-5: Registros obtenidos para el análisis del “Caso 1”, mediante históricos

CNEL EP UN STD										
		Equipo Med	AEMC INSTRUMENTS- modelo 3945-B PowerPad							
		Transfor	25 KVA							
		S/E	EL CARMEN							
		Alimentador	NUEVO ISRAEL							
Fecha	Hora	Armónicos Tensión2 L1	Armónicos Tensión3 L1	Armónicos Tensión4 L1	Armónicos Tensión5 L1	Armónicos Tensión6 L1	Armónicos Tensión7 L1	Armónicos Tensión8 L1	Armónicos Tensión9 L1	
14/11/2016	9:40:00	0,046	3,022	0,031	4,047	0,031	0,258	0,014	0,391	
14/11/2016	9:50:00	0,064	2,887	0,031	4,126	0,031	0,278	0,014	0,391	
14/11/2016	10:00:00	0,064	2,887	0,031	3,969	0,031	0,367	0,014	0,391	
14/11/2016	10:10:00	0,064	2,887	0,031	4,126	0,031	0,343	0,014	0,415	
14/11/2016	10:20:00	0,046	2,954	0,031	4,126	0,031	0,367	0,014	0,441	
14/11/2016	10:30:00	0,064	2,887	0,031	4,126	0,031	0,367	0,014	0,415	
14/11/2016	10:40:00	0,064	2,887	0,031	4,126	0,031	0,391	0,014	0,415	
14/11/2016	10:50:00	0,064	2,887	0,031	4,047	0,031	0,391	0,014	0,415	
14/11/2016	11:00:00	0,046	2,954	0,031	4,126	0,031	0,391	0,014	0,415	
14/11/2016	11:10:00	0,064	2,887	0,031	3,969	0,031	0,367	0,014	0,415	
14/11/2016	11:20:00	0,046	2,821	0,031	4,126	0,031	0,321	0,014	0,391	
14/11/2016	11:30:00	0,064	2,887	0,031	3,969	0,031	0,391	0,014	0,415	
14/11/2016	11:40:00	0,064	2,887	0,031	4,047	0,031	0,415	0,014	0,441	
14/11/2016	11:50:00	0,046	2,887	0,031	4,206	0,031	0,367	0,014	0,415	
14/11/2016	12:00:00	0,046	2,954	0,031	4,047	0,014	0,367	0,014	0,391	
14/11/2016	12:10:00	0,046	2,954	0,031	3,891	0,014	0,415	0,014	0,367	
14/11/2016	12:20:00	0,064	2,954	0,031	4,047	0,014	0,441	0,014	0,391	
14/11/2016	12:30:00	0,046	3,022	0,031	4,047	0,014	0,467	0,014	0,391	
14/11/2016	12:40:00	0,064	3,159	0,031	3,891	0,014	0,522	0,014	0,391	

Fuente: (CNEL, 2016), Resultados obtenidos mediante analizador AEMC INSTRUMENTS- modelo 3945-B PowerPad

Realizado por: Méndez, Erik, 2017

Tabla 4-5. Datos de entrada “Caso 1” (Históricos)

Armónico	Valores Máximos de % THD(V) entre fases
2	0,124
3	11,951
4	0,098
5	4,532
6	0,11
7	2,628
8	0,046
9	1,196

Fuente: (CNEL, 2016), Datos máximos para el análisis “Caso 1”

Realizado por: Méndez, Erik, 2017

De los datos máximos de la tabla anterior, se procede con la aplicación del modelo propuesto, de donde se destacan las respuestas mitigantes para lo cual las figuras anexas (Ver “Figura 11-5”, “Figura 12-5” y “Figura 13-5”), permiten exponer el funcionamiento y la ejecución del modelo en todas las etapas propuestas, haciendo énfasis en los modelos corrección (Convencional – RNA) que integran el modelo general propuesto para la mitigación de armónicos en redes eléctricas.



Figura 11-5. Modelo mitigante para la reducción armónica, “Caso mediante históricos 1”

Fuente: (Matlab, 2016)

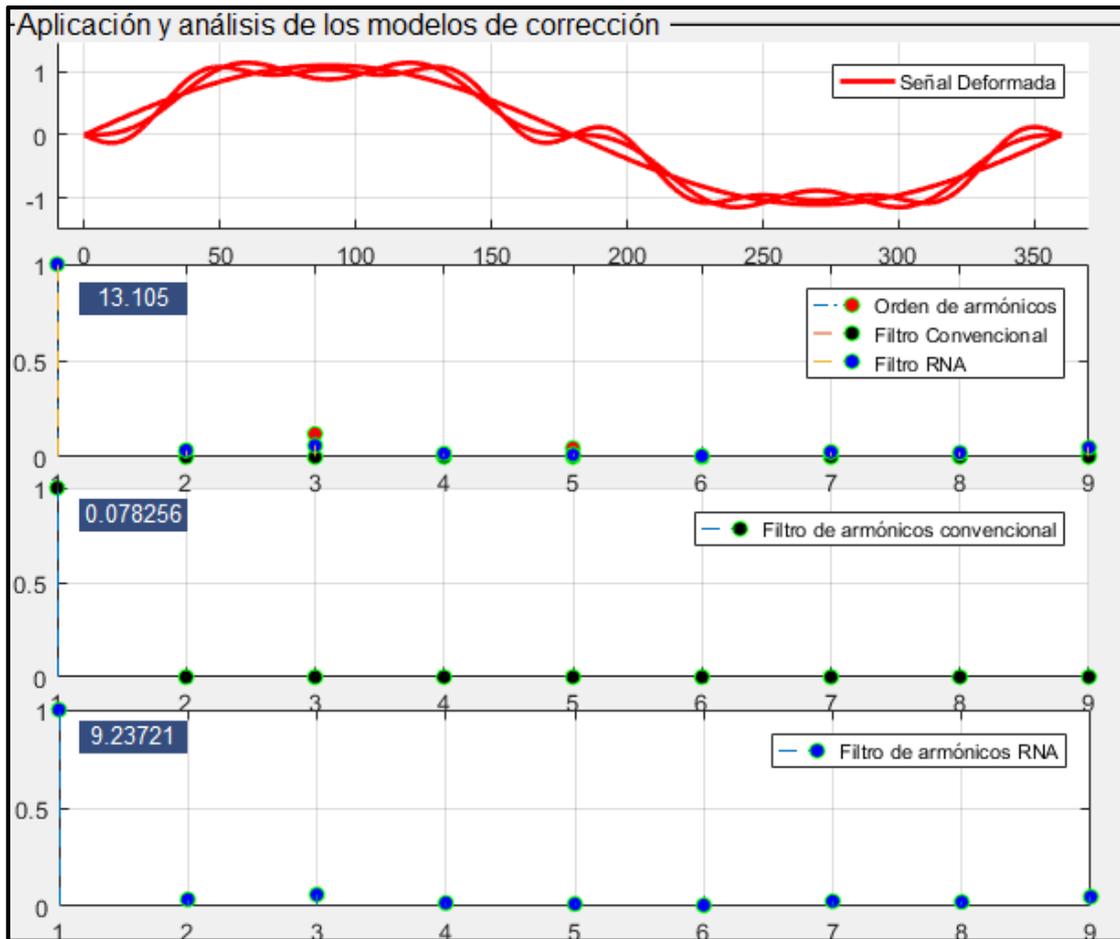


Figura 12-5. Detalle de la señal mitigada “Caso 1”, análisis mediante históricos

Fuente: (Matlab, 2016)

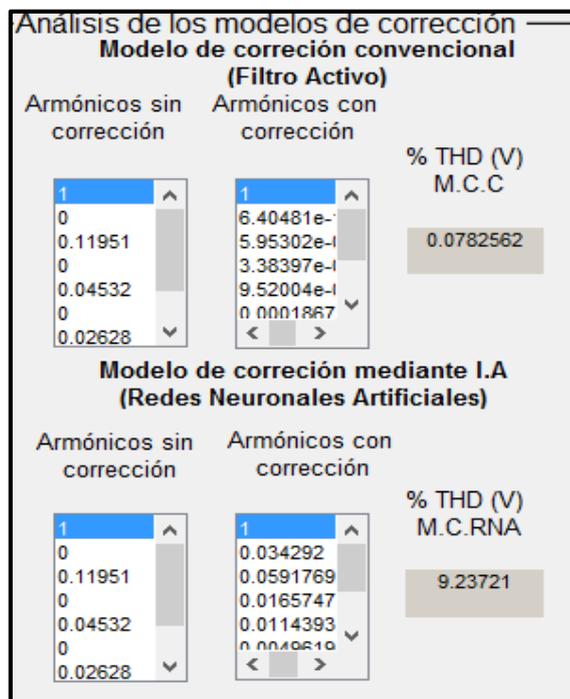


Figura 13-5. Datos obtenidos “Caso históricos 1”

Fuente: (Matlab, 2016)

De los datos obtenidos, se expone de manera detallada las respuestas mitigantes resultantes del procesamiento del modelo propuesto, los resultados se mencionan a continuación:

- La respuesta mitigante definitiva del filtro activo (modelo de corrección convencional) fue **0,07825%** de distorsión armónica total, considerando que la distorsión armónica del caso propuesto es de 13,105% sin ninguna corrección y con picos en los órdenes armónicos variados, la reducción del modelo de corrección antes mencionada es altamente considerable, ya que además de lo mencionado cumple con los límites dados por los estándares y recomendaciones de las normativas nacionales (“CONELEC” 004/01”) y extranjeras (“IEEE-519-2014”).
- La respuesta mitigante definitiva del filtro mediante RNA (modelo de corrección mediante I.A) fue **9,23721%** de distorsión armónica total, considerando que la distorsión armónica del caso propuesto es de 13,105% sin ninguna corrección y con picos en los órdenes armónicos variados, la reducción propuesta por el modelo de corrección antes mencionado es considerable.

La solución planteada por el filtro activo (modelo de corrección convencional), con una reducción de la distorsión armónica total, a un valor de **0,07825 %** es ideal para este caso de estudio con altos niveles de distorsión armónica producidas por cargas no lineales, destacando la caracterización mediante datos históricos medidos en campo del presente caso.

Las particularidades de los resultados obtenidos (Ver “Tabla 5-5”), el entrenamiento de la RNA para la reducción de la distorsión armónica (Ver “Figura 14-5”) y la descripción del modelo seleccionado (Ver “Figura 15-5”) se exponen a continuación:

Tabla 5-5: Resultados del modelo mitigante “Caso mediante históricos 1”

% THD (V) Caso de estudio (Sin aplicar los modelos de corrección)	% THD (V) Modelo de corrección convencional “Filtro Activo”	% THD (V) Modelo de corrección mediante I.A “Filtro RNA”
13,105 %	0,07825 %	9,23721 %

Fuente: (Matlab, 2016), Resultados obtenidos por el modelo mitigante propuesto

Realizado por: Méndez, Erik, 2017

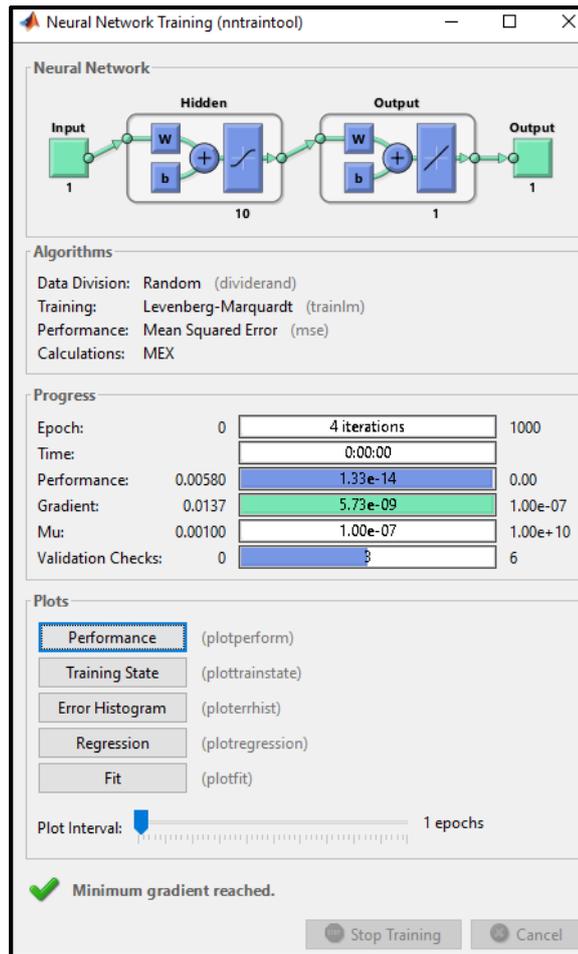


Figura 14-5: “Caso históricos 1”, resultados RNA

Fuente: (Matlab, 2016)

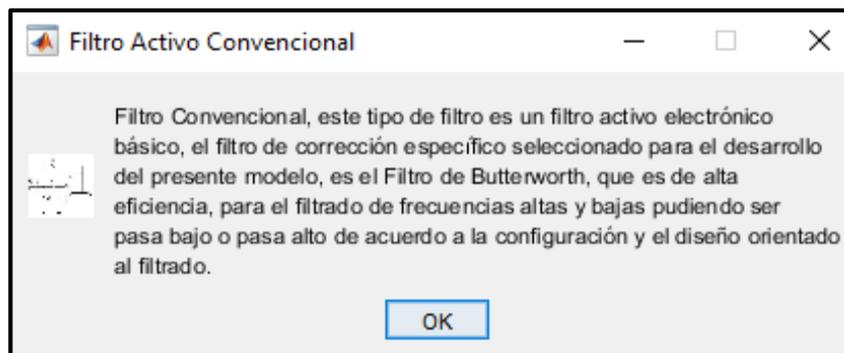


Figura 15-5: “Caso mediante históricos 1”, detalle del modelo aplicado

Fuente: (Matlab, 2016)

5.3.2 “Caso de estudio 2”, obtenido mediante la adquisición de datos históricos, en el transformador de distribución-comercial No. 125135, “Alimentador Flavio Alfaro”, de la “Subestación de distribución SESME”, de la Corporación Eléctrica Nacional (CNEL EP)

Para el presente caso de estudio considerado para el análisis de armónicos en redes de energía eléctrica, en primera instancia se procede a organizar los datos recabados en campo a través del equipo “AEMC INSTRUMENTS- modelo 3945-B PowerPad”, el cual es un equipo analizador de datos, que capta armónicos hasta el orden cuarenta. Para la caracterización de un sistema que dispone de armónicos eléctricos, y para el análisis de los mayores impactos en el orden de los mismo, los “Departamentos de calidad de energía”, relacionados al ámbito de las empresas de distribución, consideran generalmente el análisis de los primeros nueve armónicos que perturban la señal eléctrica generada, esto es debido a que, dada la generalidad de las empresas eléctricas de distribución, las cuales entregan energía mayoritariamente a consumidores residenciales, caracterizan una espectro armónico, en el que a partir del segundo armónico hasta el armónico “n”, existe una disminución no lineal inversa en términos de amplitud, adicionalmente se considera que la mayoría de cargas de un sistema eléctrico de distribución son inductivas-resistivas, lo cual permite marcar una tendencia impar significativa de la amplitud armónica en redes o sistemas de energía eléctrica.

Para los datos obtenidos en el presente caso de estudio, se analizaron registros a través del equipo analizador de calidad de energía antes mencionado (AEMC INSTRUMENTS- modelo 3945-B PowerPad), por un periodo de una semana, una muestra de los registros obtenidos por el instrumento de medición se evidencian en la “Tabla 6-5”, de donde se destaca la medición de las perturbaciones armónicas en fases del secundario del equipo de transformación de distribución analizado (Transformador monofásico auto protegido de 5 KVA), cabe destacar que para la preparación de los datos previo el análisis del modelo, se realizaron las siguientes consideraciones:

- Se utilizaron los valores máximos por “Fase” (Considerando las dos fases “Fase A” y “Fase B”, disponibles del transformador analizado), registrados cada 10 minutos en los equipos analizadores de carga AEMC INSTRUMENTS- modelo 3945-B PowerPad,
- De los valores máximos por “Fase” obtenidos, se obtuvieron los valores máximos globales entre fases, es decir de la “Fase A” y de la “Fase B”, se obtuvieron los valores máximos entre cada una de ellas, obteniendo una tabla con los valores máximos generales del sistema analizado (transformador) “Fase Máx THD”, esta metodología es

usada para el desarrollo de filtros mitigantes en sistemas eléctricos, y es replicada para el análisis de casos de estudio mediante la adquisición de datos históricos, debido a que el modelo propuesto en su implementación mediante la herramienta computacional Matlab debe ser capaz de brindar una respuesta de mitigación en las peores condiciones posibles habilitantes de un sistema eléctrico en redes de energía eléctrica.

Los resultados finales a ser considerados por el modelo mitigante, del presente caso de estudio se indican en la “Tabla 7-5”, los cuales brindan el punto de partida para el procesamiento, análisis y corrección (filtrado) de los mismos, mediante el modelo propuesto.

Tabla 6-5: Registros obtenidos para el análisis del “Caso 2”, mediante históricos

CNEL EP UN STD									
		Equipo Med	AEMC INSTRUMENTS- modelo 3945-B PowerPad						
		Transfor	5 KVA						
		S/E	SESME						
		Alimentador	FLAVIO ALFARO						
Fecha	Hora	Armónicos Tensión2 L1	Armónicos Tensión3 L1	Armónicos Tensión4 L1	Armónicos Tensión5 L1	Armónicos Tensión6 L1	Armónicos Tensión7 L1	Armónicos Tensión8 L1	Armónicos Tensión9 L1
30/08/2016	11:00:00	0,075	7,265	0,046	4,206	0,031	0,367	0,014	0,522
30/08/2016	11:10:00	0,064	7,477	0,064	4,367	0,031	0,441	0,014	0,551
30/08/2016	11:20:00	0,075	7,265	0,046	4,286	0,031	0,391	0,031	0,494
30/08/2016	11:30:00	0,075	7,265	0,046	4,449	0,031	0,367	0,014	0,467
30/08/2016	11:40:00	0,064	7,056	0,046	4,286	0,031	0,367	0,014	0,467
30/08/2016	11:50:00	0,075	7,265	0,064	4,367	0,031	0,321	0,014	0,441
30/08/2016	12:00:00	0,075	7,37	0,064	4,449	0,031	0,258	0,031	0,367
30/08/2016	12:10:00	0,098	7,584	0,075	4,449	0,031	0,299	0,031	0,367
30/08/2016	12:20:00	0,064	7,584	0,046	4,367	0,031	0,367	0,014	0,343
30/08/2016	12:30:00	0,075	8,02	0,064	4,7	0,031	0,278	0,031	0,321
30/08/2016	12:40:00	0,075	8,356	0,064	5,045	0,031	0,22	0,014	0,321
30/08/2016	12:50:00	0,075	8,243	0,075	5,045	0,031	0,238	0,014	0,278
30/08/2016	13:00:00	0,075	8,131	0,064	5,045	0,031	0,278	0,031	0,278
30/08/2016	13:10:00	0,064	8,02	0,046	4,958	0,031	0,299	0,014	0,299
30/08/2016	13:20:00	0,075	7,477	0,064	4,616	0,031	0,367	0,031	0,343
30/08/2016	13:30:00	0,098	7,477	0,075	4,7	0,031	0,343	0,031	0,343
30/08/2016	13:40:00	0,098	7,477	0,064	4,785	0,031	0,367	0,031	0,321
30/08/2016	13:50:00	0,075	7,477	0,064	4,871	0,031	0,367	0,031	0,321
30/08/2016	14:00:00	0,086	7,37	0,064	4,785	0,031	0,321	0,014	0,299
30/08/2016	14:10:00	0,075	7,056	0,064	4,532	0,031	0,299	0,014	0,185
30/08/2016	14:20:00	0,064	7,16	0,046	4,785	0,031	0,299	0,014	0,202
30/08/2016	14:30:00	0,064	7,265	0,046	4,7	0,031	0,278	0,014	0,238
30/08/2016	14:40:00	0,075	7,265	0,046	4,785	0,031	0,258	0,014	0,185
30/08/2016	14:50:00	0,064	7,477	0,064	4,871	0,031	0,278	0,014	0,185

Fuente: (CNEL, 2016), Resultados obtenidos mediante analizador AEMC INSTRUMENTS- modelo 3945-B PowerPad

Realizado por: Méndez, Erik, 2017

Tabla 7-5: Datos de entrada “Caso 2” (Históricos)

Armónico	Valores Máximos de % THD(V) entre fases
2	4,200
3	18,246
4	2,810
5	11,283
6	0,705
7	2,146
8	0,22
9	0,900

Fuente: (CNEL, 2016), Datos máximos para el análisis “Caso 2”

Realizado por: Méndez, Erik, 2017

De los datos máximos de la tabla anterior, se procede con la aplicación del modelo propuesto, de donde se destacan las respuestas mitigantes para lo cual las figuras anexas (Ver “Figura 16-5”, “Figura 17-5” y “Figura 18-5”), permiten exponer el funcionamiento y la ejecución del modelo en todas las etapas propuestas, haciendo énfasis en los modelos corrección (Convencional – RNA) que integran el modelo general propuesto para la mitigación de armónicos en redes eléctricas.



Figura 16-5: Modelo mitigante para la reducción armónica, “Caso mediante históricos 2”

Fuente: (Matlab, 2016)

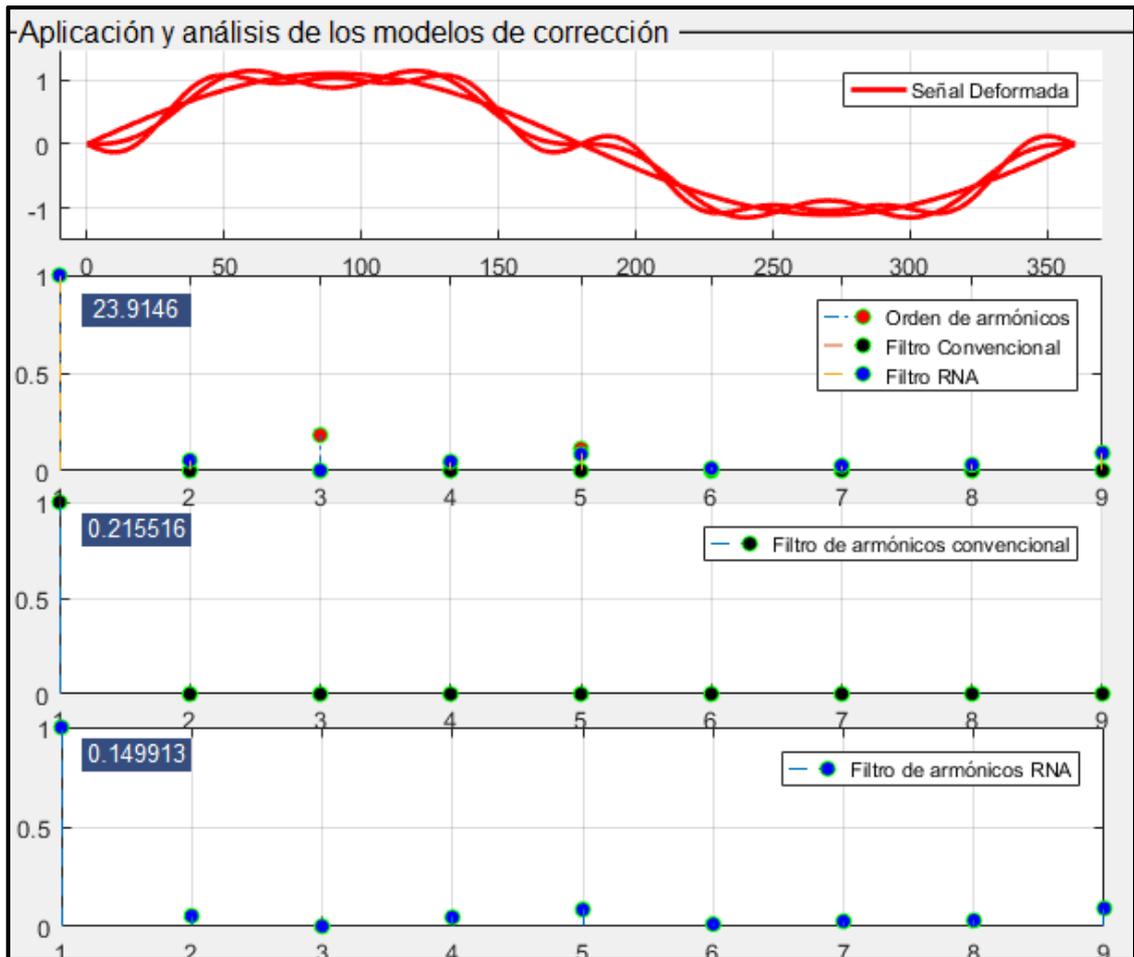


Figura 17-5: Detalle de la señal mitigada "Caso 2", análisis mediante históricos

Fuente: (Matlab, 2016)

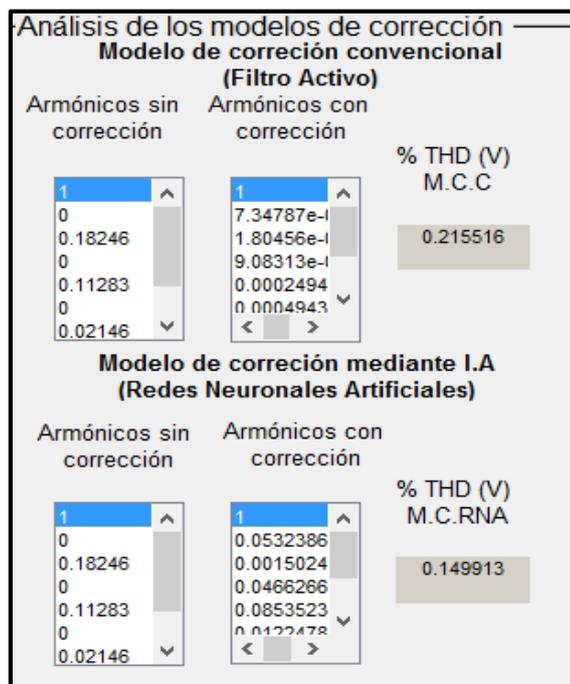


Figura 18-5: Datos obtenidos "Caso históricos 2"

Fuente: (Matlab, 2016)

De los datos obtenidos, se expone de manera detallada las respuestas mitigantes resultantes del procesamiento del modelo propuesto, los resultados se mencionan a continuación:

- La respuesta mitigante definitiva del filtro activo (modelo de corrección convencional) fue **0,215516%** de distorsión armónica total, considerando que la distorsión armónica del caso propuesto es de 23,9146% sin ninguna corrección y con picos en los órdenes armónicos variados, la reducción plateada por el modelo de corrección antes mencionado, es en extremo considerable, ya que además de su efecto mitigante cumple con los límites dados por los estándares y recomendaciones de las normativas nacionales (“CONELEC” 004/01”) y extranjeras (“IEEE-519-2014”).
- La respuesta mitigante definitiva del filtro mediante RNA (modelo de corrección mediante I.A) fue **0,149913%** de distorsión armónica total, considerando que la distorsión armónica del caso propuesto es de 23,9146% sin ninguna corrección y con picos en los órdenes armónicos variados, la reducción plateada por el modelo de corrección antes mencionado, es en extremo considerable, ya que además de su efecto mitigante cumple con los límites dados por los estándares y recomendaciones de las normativas nacionales (“CONELEC” 004/01”) y extranjeras (“IEEE-519-2014”).

La solución planteada por el filtro mediante RNA’s (modelo de corrección mediante I.A), con una reducción de la distorsión armónica total, a un valor de **0,149913 %** es ideal para este caso de estudio con altos niveles de distorsión armónica, con un comportamiento atípico variado, ya que incorpora altos porcentajes armónicos en ciertos ordenes de carácter no usual en alimentadores residenciales, para lo cual se concluye que el usuario debe incorporar a la red, cargas no lineales donde los equipos electrónicos son predominantes (fábrica).

Las particularidades de los resultados obtenidos (Ver “Tabla 8-5”), el entrenamiento de la RNA para la reducción de la distorsión armónica (Ver “Figura 19-5”) y la descripción del modelo seleccionado (Ver “Figura 20-5”) se exponen a continuación:

Tabla 8-5: Resultados del modelo mitigante “Caso mediante históricos 2”

% THD (V) Caso de estudio (Sin los modelos de corrección)	% THD (V) Modelo de corrección convencional “Filtro Activo”	% THD (V) Modelo de corrección mediante I.A “Filtro RNA”
23,9146 %	0,215516 %	0,149913 %

Fuente: (Matlab, 2016), Resultados obtenidos por el modelo mitigante propuesto

Realizado por: Méndez, Erik, 2017

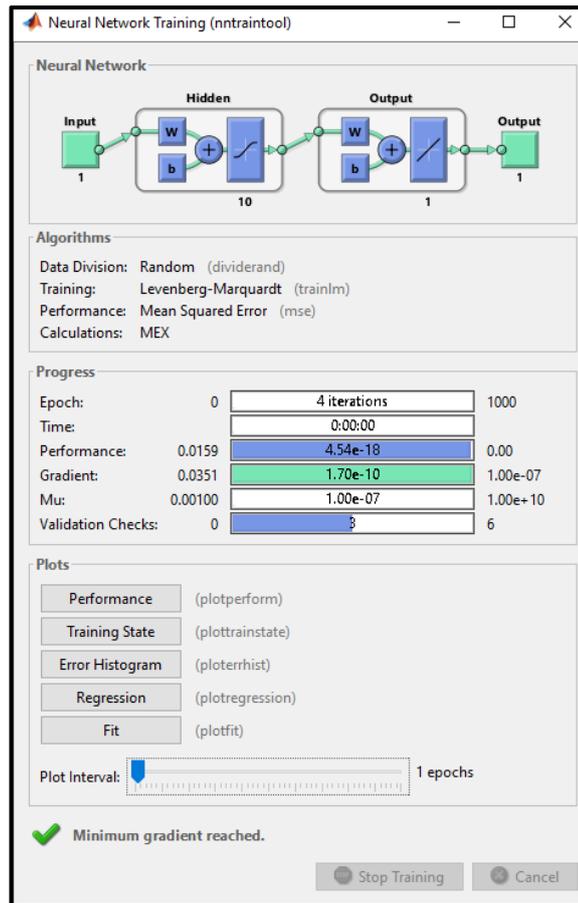


Figura 19-5: “Caso históricos 2”, resultados RNA

Fuente: (Matlab, 2016)

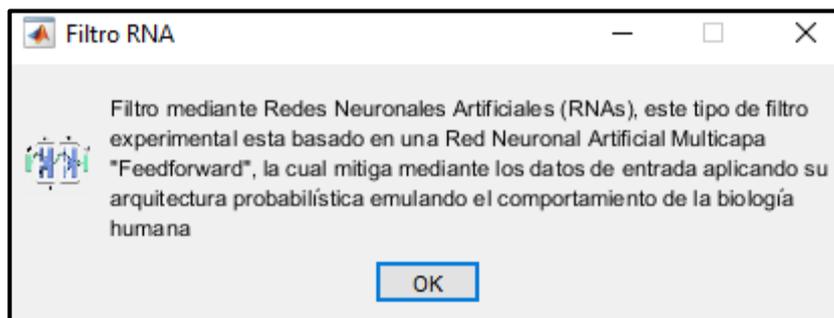


Figura 20-5: “Caso mediante históricos 2”, detalle del modelo aplicado

Fuente: (Matlab, 2016)

CONCLUSIONES

- De la presente investigación se concluye, que el modelo mitigante propuesto, validado e implementado mediante técnicas de inteligencia artificial en Matlab, es único en su tipo, de los precedentes de investigaciones anteriores, se destacan modelos de corrección aislados, sin la incorporación de módulos de análisis y toma de decisiones, la asistencia de técnicas de inteligencia artificial tanto para la validación como para la implementación del modelo enfocado al análisis de casos de estudio, brinda un carácter investigativo, que puede ser fácilmente aplicable e integrable a la industria, tal y como se evidenció con los casos de estudio analizados para la presente investigación, brindados por la “Corporación Eléctrica Nacional CNEL EP”.
- La integración de las redes de Petri y “Redes Neuronales Artificiales”, brindan aspectos teóricos innovadores al presente trabajo de titulación, este tipo de técnicas de inteligencia artificial (I.A), enfocadas al desarrollo, validación e implementación de una medida mitigante de armónicos en redes eléctricas (modelo propuesto), representan un verdadero aporte a la búsqueda de soluciones de problemas relacionados con la calidad de energía eléctrica, siendo este, un problema arraigado en la industria eléctrica, y de gran incremento en los últimos años, debido al creciente aumento de cargas no lineales, de los sectores de la industria eléctrica que están ligados a la comercialización de la energía eléctrica, de donde se destacan las empresas de distribución de energía.
- El modelo mitigante propuesto, presenta una verdadera alternativa de solución, para la problemática de armónicos eléctricos en redes de energía, esta alternativa puede ser considerada de manera integral en materia de mitigación de perturbaciones armónicas para sistemas eléctricos en general, en adición a lo mencionado, la implementación del modelo por medio de la herramienta computacional Matlab, permite esquematizar de manera algorítmica el modelo mitigante, obteniendo resultados variados, de donde en la mayoría de casos los modelos de corrección convencionales predominaban en la respuesta mitigante, pero para ciertos casos atípicos, en los que los órdenes de armónicos eléctricos tenían incrementos variados, el modelo mediante RNA, era bastante efectivo, concluyendo su capacidad de mitigación para casos atípicos y que se encuentran fuera de una tendencia definida, siendo lo contrario para el modelo convencional, de donde la mayoría de soluciones fiables propuestas fueron para casos dentro de una tendencia establecida, cabe destacar que todas las respuestas mitigantes tendían a considerar los límites, recomendaciones y normativas de organismos enfocados a la calidad energética, del ámbito local (CONELEC) y extranjero (IEEE).

- Del presente modelo se reconoce la vinculación con problemáticas relacionadas a perturbaciones armónicas en empresas de distribución del medio, en el Ecuador, la empresa CNEL EP, encargada de la distribución de la energía de gran parte del Ecuador, brindó casos de estudio específicos para el análisis y posterior mitigación por parte del modelo propuesto, los resultados obtenidos son revisados a detalle en la presente investigación, los cuales pretenden ser un referente en aras de promover la vinculación del sector académico con el ámbito industrial, siendo los mencionados, sectores estratégicos de la matriz productiva de un país.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda para una futura investigación integrar nuevas técnicas de inteligencia artificial (algoritmos genéticos, algoritmos neuro-difusos, etc.), en aras de vincular el campo de la automática e informática aplicada a sectores de la industria energética, mediante la presente investigación se pretende sentar un precedente en el ámbito de la calidad de energía, para con lo mencionado en inclusión del desarrollo de investigaciones futuras, se puedan disponer de nuevas y variadas propuestas de solución y teorías enfocadas a la mitigación de armónicos eléctricos, considerando siempre la disminución de la distorsión armónica en redes eléctricas.
- Se recomienda, continuar con el desarrollo de la presente investigación, implementando el modelo en una connotación práctica, es decir, poner a prueba el desarrollo del modelo propuesto, mediante la construcción de un prototipo, para poder mitigar en sitio y a las cargas no lineales, que originan la problemática de la distorsión armónica en redes de eléctricas.
- Se recomienda a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), asistir y potenciar investigaciones de esta índole, ya que el desarrollo del presente trabajo de titulación de maestría se vio complicado por la carencia de investigaciones locales, que traten la problemática de armónicos eléctricos, centros académicos superiores especializados, en adición de programas de postgrado, brindan herramientas para nuevos investigadores, en aras de obtener nuevas alternativas de solución para esta y otras problemáticas del sector eléctrico nacional y extranjero.
- Se recomienda a las empresas de distribución de energía eléctrica nacionales, apostar por la vinculación “académica-industrial”, para lo cual es necesario incluir, por parte del sector académico, a centros de formación, universidades y escuelas politécnicas del medio, y relacionarlos directamente a base de colaboraciones con el ámbito industrial, ya que ciertos problemas de este sector, podrían ser solventados con el apoyo de la academia mediante el desarrollo de nuevas investigaciones e innovaciones con conceptos básico-teóricos renovados, incluyendo técnicas basadas en nuevos paradigmas investigativos tales como la inteligencia artificial, con el propósito de dar nuevas aristas a los problemas ingenieriles de la industria.

BIBLIOGRAFÍA

- ALLA, H., & DAVID, R.** (1998). Continuous and hybrid Petri nets. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, pp. 159-188.
- ANUMAKA, M. C.** (2012). Analysis of Electric Circuits Using Fourier Series. *International Journal of Engineering and Innovative Technology, Volume 1, Issue 5*, pp. 125-128.
- ARCILLA, J. D.** (2010). Armónicos en sistemas eléctricos. *IEB S.A*, pp. 1-26.
- BAKER, D., BRIDGES, D., HUNTER, R., JOHNSON, G., & KRUPA, J.** (2001). *Guidebook to Decision-Making Methods*. USA: Department of energy, pp. 2-20.
- BARRAGAN, D.** (2008). *Manual de interfaz gráfica de usuario PARTE I*, ESPOL, Guayaquil-Ecuador, pp 1-5.
- BERMÚDEZ, V.** (2000). *Tecnología Energética.*, Reproval, Valencia-España, p. 119.
- CARVAJAL, W., ORDOÑEZ, G., MORENO, A., & DUARTE, C.** (2011). Simulación de sistemas eléctricos con cargas no lineales y variantes en el tiempo. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, Vol. 19 N° 1*, pp. 76-92.
- CERVANTES, J.** (2005). Representación y aprendizaje de conocimiento con redes de Petri difusas. Centro de investigación y de estudios avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México- México, pp. 12-39
- ECUADOR, CORPORACIÓN NACIONAL DE ELECTRICIDAD DEL ECUADOR, (CNEL).** (2016). *Mediciones de calidad de energía 2016*. Santo Domingo de los Colorados: Ministerio de Electricidad y Energías Renovables, pp. 1-15.
- ECUADOR, CONSEJO NACIONAL DE ELECTRICIDAD, (CONELEC).** (2001). Regulación 004/001 "Calidad del servicio eléctrico de distribución". Quito-Ecuador, pp. 1-20.

- DE LA ROSA, F.** (2015). *Harmonics, Power Systems and Smart Grids*. Boca Raton: Taylor & Francis Group, pp. 1-252.
- ESPERANZA, E., & LÓPEZ, P.** (2004). *Análisis de armónicos en sistemas de distribución*. Bogotá: Colección Textos, pp. 1-84.
- FLORES LOPEZ, R., & FERNANDEZ, J. M.** (2008). *Las Redes Neuronales*. Coruña: NETBIBLO. pp. 4-11.
- GIL, C.** (2014). Aplicación de herramientas de inteligencia artificial en armónicos de corriente y voltajes en sistemas y máquinas eléctricas: su importancia y trabajos relacionados. *REVECITEC URBE, Vol 5, No 1*, pp. 49-64.
- GILAT, A.** (2005). *Matlab una introduccion con ejemplos practicos*. Barcelona: REVERTE, p.1.
- HANZELKA, Z., & BIEN, A.** (2004). *Guía de la calidad de la energía eléctrica*. Madrid: AGH University Of Science and Technology, pp 5-24.
- HARRIS, R.** (1998). Introduction to Decision Making. VirtualSalt. [Web]
[Consulta: 15 de Marzo de 2017]
Recuperado de: <http://www.virtualsalt.com/crebook5.html>
- HILERA, J. R., & MARTÍNEZ, V. J.** (1995). *Redes neuronales artificiales: fundamentos, modelos y aplicaciones*. Madrid: Addison-Wesley Iberoamericana, pp 15-19.
- ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA, INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS, (IEEE),** (2014). Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE Standards Association., p.15.
- KRÖSE, B.** (2006). *An Introduction to Neural Networks*. Amsterdam: The University of Amsterdam., pp.14-20.
- LAHOZ-BELTRA, R.** (2004). *Bioinformatica, Simulación, vida artificial e inteligencia artificial*. Madrid: Diaz de Santos. pp. 3-30.

- LOYOLA.** (1995). *Sistemas automatizados en la ingeniería*. [Web]
[Consulta: 15 de Febrero de 2017]
Recuperado de: <https://es.scribd.com/doc/60221089/CAPITULO-II-Sistema-Automatizado>
- LOZADA, M., & VELASCO, J. M.** (2010). Modelado dinámico basado en redes de petri para el modelo de integración empresarial actor de empresa. *Scientia et Technica Año XVI, No 44, Abril de 2010. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701*, pp. 140-145.
- MATHWORKS.** (2015). *MathWorks*. [Web]
[Consulta: 15 de Febrero de 2017]
Recuperado de: <https://www.mathworks.com/products/matlab>
- MATLAB.** (2016). *RNA's Toolboxes*. MathWorks Inc. [Web]
[Consulta: 10 de Marzo de 2017]
Recuperado de: <https://www.mathworks.com/>
- MCCARTHY, J.** (2007). What is artificial intelligence? Stanford, California - Estados Unidos, pp. 7-15
- MCGRAW-HILL.** (2010). *Conceptos eléctricos básicos*. Madrid: Mcgraw-Hill, pp. 2-10.
- MECFI.** (2017). Energía reactiva portal, [Web]
[Consulta: 10 de Febrero de 2017]
Recuperado de: <http://mecfi.es/energia-reactiva-1>
- MENDEZ, E.** (2015). Sistema automatizado para la predicción de flujo de carga en subestaciones eléctricas con empleo de redes neuronales artificiales. Santo Domingo: Universidad Tecnológica Equinoccial, pp. 15-45.
- MICHOACANA, U.** (2003). Modelado y Análisis de Sistemas Eléctricos bajo Condiciones de Operación no Senoidales. Hidalgo: Facultad de Ingeniería Eléctrica Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- MITCHEL, T.** (1997). *Machine Learning*. McGraw Hill, pp 15-35.

- MORA BARAJAS, M., & BAÑUELOS SANCHEZ, P.** (2010). Contaminación armónica producida por cargas no lineales de baja potencia: modelo matemático y casos prácticos. *Ingeniería, Investigación y Tecnología. Vol.11 No.2*, pp. 189-198.
- MORENO, A.** (2009). *Desarrollo de una interfaz gráfica de redes neuronales usando Matlab*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid. pp. 8-20.
- MURATA, T.** (1999). Petri Nets: Propertis, Analisis and Aplications. *IEEE PROCEEDINGS VOL 77. N°4*, pp. 541-580.
- MURILLO, L. D.** (2008). Redes de Petri: Modelado e implementación de algoritmos para autómatas programables. *Tecnología en Marcha, Vol. 21, N.º 4*, pp. 102-125.
- PASTOR GUTIERREZ, A., & ORTEGA JIMÉNEZ, J.** (2014). *Circuitos Eléctricos Volumen II*. UNED. Madrid-España, pp. 1-5.
- PAULINO, L., & RANGEL, F.** (2013). Mitigación de armónicos en la red de alimentación de un accionamiento de corriente continua. Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México-México, p.p. 1-7.
- PEDRICZ, W., & GOMIDE, F.** (1994). A Generalized Fuzzy Petri Net Mode. *IEEE Trans, Fuzzy, Systems, Vol. 2, No 4*, pp. 295-301.
- PÉREZ, A., SALMERÓN, P., & VÁSQUEZ, J.** (2002). *Diseño y realización de un acondicionador activo de potencia para compensación estática de cargas no lineales*. Madrid: XII reunión de grupos de investigación en ingeniería eléctrica. p. 15.
- PEREZ, I.** (2012). *Cálculo de parámetros de filtros pasivos de armónicos*. Ingeniería eléctrica VOL XXXIII, pp. 134-143.
- PETIT SUÁREZ, J.** (2005). *Topologías y algoritmos de control para filtros activos aplicados a la mejora de la calidad del suministro eléctrico*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid. pp. 1-220.
- RAMIREZ, S.** (2004). *Redes de distribución de energía*. Manizales : Universidad Nacional de Colombia. Bogotá-Colombia, p. 2

- RUKONUZZAMA, M., & NAKAOKA, M.** (2001). An advanced active power filter with adaptative neural network based harmonic detection scheme. *Powers Electronics Specialists Conference. Volumen 3*, pp. 1602-1607.
- SALAZAR, J.** (2012). Diseño y análisis de desempeño de un inversor de voltaje utilizando controladores inteligentes. *Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica del Ejército* .
- SÁNCHEZ-PASCUALA, D.** (2015). Desarrollo de algoritmos de toma de decisión aplicados a las ciudades inteligentes . Madrid-España: Universidad Politécnica de Madrid, pp 29-43
- SCHNEIDER, E.** (2016). AccuSine Filtro activo de Armónicos. [Web]
[Consulta: 20 de Febrero de 2017]
Recuperado de: <http://www.schneider-electric.com.co/documents/eventos/memorias-jornadas-tecnicas-ecoestructura/AccuSine/Accusine-Filtro-activo-de-armonicos.pdf>
- SEGUI, S., SANCHEZ, C., & ORTS, S.** (2002). *Fundamentos básicos de la electrónica de potencia*. Valencia: Reproval, S.L, pp. 10-20
- SHAH, N.** (2013). Harmonics in power systems. Alpharetta : Siemens Industry Inc, pp- 1-24
- SILVA, M.** (1985). *Las Redes de Petri en la Automatica y la Informatica*. Editorial AC.
- SUAREZ, J., DI MAURO, F., ANAUT, D., & AGUERO, C.** (2005). Análisis de la distorsión armónica y los efectos de atenuación y diversidad en áreas residenciales. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, pp. 429-435.
- WILDI, T.** (2007). *Maquinas Electricas y Sistemas de potencia*. Mexico: Pearson Education, pp. 9- 109
- ZHOU, M., & KURAPATI, V.** (2000). *Modeling, Simulation and Control of Manufacturing Systems*. New Jersey: World Scientific, pp. 1-252.

ANEXOS

ANEXO A. Carta de CNEL EP UN STD manifestando la importancia del desarrollo del presente proyecto de titulación



UNIDAD DE NEGOCIO SANTO DOMINGO

A quien corresponda,

Yo EDISON PATRICIO MENDOZA MENDOZA en calidad de Director Técnico de CNEL EP UN STD certifico y autorizo la total apertura para el desarrollo del proyecto de titulación de maestría del Sr. /Ing. ERIK FERNANDO MENDEZ GARCÉS con C.I 172323649-1, siendo el desarrollo del tema que el ingeniero propone "MODELO PARA EL ANÁLISIS Y TOMA DE DECISIONES MEDIANTE EL EMPLEO DE TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA REDUCCIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN REDES DE ENERGÍA ELÉCTRICA" de vital importancia para la reducción de las pérdidas técnicas en las redes de distribución de energía eléctrica, vinculando el sector académico con el sector industrial para el propósito.



Ing. Edison P. Mendoza, MSc.
Director Técnico
CNEL EP UN STD

**ANEXO B. Requerimientos de sistema del modelo mitigante propuesto implementado en
Matlab**

WINDOWS			
32-Bit and 64-Bit MATLAB			
Versiones	Procesadores	Espacio de disco	RAM
Windows 10	Cualquier Intel o AMD x86	1 GB al menos	1024 MB (Se recomienda 2048 MB para mejorar el tiempo de respuesta)
Windows 8			
Windows 7 Service Pack 1			
Windows Vista Service Pack 2			
Windows XP Service Pack 3			
Windows XP x64 Edition Service Pack 2			
Windows Server 2012			
Windows Server 2008 R2 Service Pack 1			
Windows Server 2008 Service Pack 2			
Windows Server 2003 R2 Service Pack 2			
MAC			
64-Bit MATLAB			
Versión	Procesadores	Espacio de disco	RAM
Mac OS X 10.9 (Mavericks) o superior	Todos los sistemas que integran Intel	1 GB al menos	1024 MB (Se recomienda 2048 MB para mejorar el tiempo de respuesta)

ANEXO C. Breve manual operativo del sistema



1. Selección de la opción de adquisición de datos mediante históricos, en esta opción el usuario puede abrir archivos “.xls” de “Excel”, para cargarlos al modelo para el posterior análisis de casos de estudio.
2. Selección de la opción de adquisición de datos al modelo mediante la simulación, en esta opción se puede digitar el orden del armónico a simular.
3. Ejecución de los modelos de corrección, en base a la selección de datos predefinida
4. Selección del modelo de corrección, en esta opción se despliega información sobre el modelo seleccionado y el % THD(V) reducido del modelo seleccionado
5. Aplicación y análisis de los modelos de corrección, en estas gráficas, se indican de manera general, las perturbaciones en la onda senoidal, los órdenes y tipos de armónicos de la señal corregida, y finalmente las señales corregidas mediante los modelos convencionales y mediante I.A.
6. Análisis de los modelos de corrección, en esta sección se indican los órdenes y tipos de armónicos, con los valores corregidos propuestos por los modelos de corrección mitigantes (Convencional-RNA)

7. Descripción del modelo, en esta sección de la G.U.I se indica un esquema del modelo de corrección (filtro) seleccionado, esta etapa se vincula directamente con una ventana informativa del modelo seleccionado, que se despliega cada vez que se ejecuta el modelo.
8. Herramientas varias, en esta sección se destacan las herramientas de “Cuadrícula” , “Cuadrícula mínima”, y “Salir”, las cuales brindan apoyo y permiten salir del entorno desarrollado en base al modelo mitigante.
9. En esta sección se destaca, los varios menús de selección que dispone el modelo mitigante, los cuales permiten tener opciones adicionales para soporte del modelo implementado a través de la G.U.I.

**ANEXO E. Carta de aceptación de una sección de la presente investigación en la
“International Conference on Applied Mathematics and Computer Science”
(ICAMCS 2017)**

***2017 International Conference on
Applied Mathematics and Computer Science
(ICAMCS 2017)***

Monday, 05 December 2016

Dear Dr. Ives Torriente,

We are pleased to inform you that your paper submitted to the **2017 International Conference on Applied Mathematics and Computer Science (ICAMCS 2017)** is accepted and will be included in a regular session.

The conference will be held at **Rome, Italy, January 27-29, 2017**. All papers were rigorously peer reviewed. The proceedings will be published by **AIP (American Institute of Physics)** with perpetual Open Access on the web site:
<http://scitation.aip.org/content/aip/proceeding/aipcp> .

The American Institute of Physics (AIP) Conference Series is a reputable series of Proceedings indexed in the major citation indexes: ISI, SCOPUS, EI Compendex, Inspec (IET) , MathSciNet, Scirus, Google Scholar etc.

Please note that papers need to be registered and prepared in accordance guidelines available at:

<http://scitation.aip.org/content/aip/proceeding/aipcp/info/authors>

ID number: 11164600006607003

Title: Conceptual Model of a logical system processor of selection to electrical filters for correction of harmonics in low voltage lines.

Authors: Arlys Lastre, Ives Torriente, Erik F. Méndez, Alexis Cordovés

Your presence at the event would be an honour for us. The **2017 International Conference on Applied Mathematics and Computer Science (ICAMCS 2017)** offers to the researchers and university faculty members from around the world, the opportunity to rendezvous with colleagues, share new research advances and ideas, and set up new collaborations and research projects.

The authors of the best papers of the conference will be invited to submit an extended and enhanced version of their paper for possible journal publication in reputable international journals after additional peer review. Updated information about the conference can be found at: <http://www.icamcs.net>

This letter is being sent to you for possible financial support from your department, as well as for VISA grant.

Best Regards



Professor Klimis Ntalianis
Technological Educational Institute
of Athens, Greece
<http://www.teiath.gr/?lang=en>