

**EVALUACIÓN DE MODELOS DE CARGA PARA LA ESTIMACIÓN DE ESTADO
DE LA CALIDAD DE LA POTENCIA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE
ENERGÍA ELÉCTRICA**

**DIEGO ARMANDO PINTO ARGÜELLO
LUIS ANTONIO RIVERA PINZÓN**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2015**

**EVALUACIÓN DE MODELOS DE CARGA PARA LA ESTIMACIÓN DE ESTADO
DE LA CALIDAD DE LA POTENCIA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE
ENERGÍA ELÉCTRICA**

DIEGO ARMANDO PINTO ARGÜELLO

LUIS ANTONIO RIVERA PINZÓN

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electricista

Director:

JAIRO BLANCO SOLANO

Magíster en Ingeniería Eléctrica

Co-director:

GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA

Dr. Ingeniero Industrial

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2015

*Doy gracias a Dios por apostarle
cada mañana a mi vida y permitirme
culminar metas para junto a él realizar sueños.*

*A mis padres por que junto al flaco (Jesucristo) han creído
en mí como persona y profesional.
A mi hermanos Carlos y Adriana,
los cuales han sido un apoyo en todos los sentidos.*

*A Silvia mi novia, con quien inicie este proceso
y hoy después de grandes historias lo
culminamos juntos.*

*A Luis Rivera (Luchito) mi compañero de proyecto
de grado, donde a pesar de los inconvenientes
todo se pudo sacar adelante. "Ahora si ya luchito".*

*A la familia Salazar Sarmiento por su cariño y acogida,
especialmente a Luis Felipe quien se convirtió en mí
compañero, parcerero y hermano en mi estadía por la
Ciudad Bonita.*

*A la Pastoral Juvenil De Juan Pablo II,
donde me dieron la oportunidad de formarme
como persona y colaborar en la construcción
de nuevos pensamientos.*

*A mis compañeros de la universidad,
donde gracias a ellos el paso por el
alma mater se llevó con alegría:
SERGIO-CALA-BETICO-NIXON-ALMEIDA
EXPITO-TATIS (COCO)-MARIO
GARCÍA-HENRY GALVIS.*

Diego Pinto

*A mi madre, a quien le debo todo.
Gracias a su esfuerzo he cumplido mis metas,
este triunfo es todo suyo.*

*A mis hermanos Johann y Ricardo,
han sido mi modelo a seguir.
Su ejemplo, consejos y apoyo
me han permitido llegar hasta este punto.*

*A Silvia, que ha hecho de mi vida algo maravilloso.
Gracias por compartir tantos momentos conmigo.*

*A Diego, mi compañero en este proyecto
y a mis amigos de la UIS,
con quienes compartí momentos inolvidables.*

Luis

AGRADECIMIENTOS

Manifestamos profundo agradecimiento a quienes colaboraron en la realización de este proyecto:

Al profesor Jairo Blanco Solano por su continua orientación, buena disposición y apoyo, durante el desarrollo del trabajo.

Al profesor Gabriel Ordoñez Plata por el apoyo y la asesoría que nos brindó.

A los profesores María Alejandra Mantilla Villalobos e Iván David Serna Suárez, por sus recomendaciones y asesoría para enfrentar los problemas que se presentaron.

A la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, en donde nos formamos personal y profesionalmente.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	22
1. GENERALIDADES: EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LA POTENCIA (CPE)	24
1.1 ANTECEDENTES	24
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	25
1.3 MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN	27
1.4 OBJETIVOS DEL PROYECTO	28
1.5 DEFINICIÓN SOBRE CALIDAD DE POTENCIA ELÉCTRICA	29
1.5.1 calidad de potencia eléctrica	29
1.5.2 Estado transitorio en sistemas eléctricos	30
2. MODELADO DE CARGAS	37
2.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE MODELADO	37
2.2 MODELOS DE CARGA DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	39
2.3 MODELOS DE CARGA IMPLEMENTADOS EN EL DESARROLLO DEL PROYECTO	42
2.3.1 Modelo de inyección de corriente (I.C)	42
2.3.2 Modelo del circuito equivalente de norton (CEN)	44
2.3.3 Modelos basados en electrónica de potencia	46
2.3.4 Modelos lineales.	46
2.4 CARGAS IMPLEMENTADAS EN EL ESTUDIO	46
2.4.1 El convertidor trifásico de 6 pulsos.	49
2.4.2 El horno de arco	59

2.4.3 Variador de frecuencia.....	73
2.4.4 Varias cargas residenciales conectadas conjuntamente.	79
2.5 RESUMEN CAPÍTULO DOS	81
3. IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE CARGA.....	83
3.1 SISTEMA BASE PARA EL ANÁLISIS	83
3.2 PRUEBA PARA EVALUACIÓN DE MODELOS DE CARGA.....	84
3.3 UBICACIÓN DE LOS MODELOS DE CARGA Y MEDIDORES	86
3.4 ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE CARGA	89
3.4.1 Convertidor de seis pulsos.....	89
3.4.2 Variador de frecuencia.....	97
3.4.3 Horno de arco	104
3.5 IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE TRANSITORIO TIPO HUNDIMIENTO DE TENSIÓN	109
3.5.1 Convertidor trifásico de seis pulsos.	111
3.5.2 Variador de frecuencia.....	115
3.6 PROPUESTAS DE MEJORA DE IMPLEMENTACIÓN	118
3.7 RESUMEN CAPÍTULO TRES.....	119
4. CONCLUSIONES	121
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	123
BIBLIOGRAFÍA.....	127
ANEXOS.....	131

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Fenómenos que inciden en la calidad de potencia eléctrica.....	30
Figura 2. Transitorio tipo impulso (A) y oscilatorio (B)	31
Figura 3. Descripción del Hundimiento (SAG)	34
Figura 4. Distorsión armónica en la forma de onda de tensión	35
Figura 5. Proceso para el desarrollo de un modelo	38
Figura 6. Clasificación de modelos de carga	39
Figura 7. Clasificación de modelos de carga según el dominio	40
Figura 8. Modelo del circuito equivalente de Norton	44
Figura 9. Obtención de parámetros del C.E.N en condiciones de laboratorio	45
Figura 10. Sistema base para descripción de modelos	48
Figura 11. Señales de corriente y tensión del convertidor trifásico de 6 pulsos (I.C teórico).....	51
Figura 12. Señales de corriente y tensión del convertidor trifásico de 6 pulsos (I.C experimental)	51
Figura 13. Circuito en ATP convertidor trifásico de 6 pulsos	53
Figura 14. Señales de corriente y tensión del convertidor trifásico de 6 pulsos (modelo físicamente basado).....	53
Figura 15. Simulación de toma de datos para circuito equivalente de Norton con fuente sinusoidal	55
Figura 16. Simulación de toma de datos para circuito equivalente de Norton con fuente distorsionada.....	56
Figura 17. Señales de corriente y tensión del convertidor trifásico de 6 pulsos (C.E.N).....	58

Figura 18. Señales de corriente y tensión del horno de arco (I.C caso critico)	61
Figura 19. Señales de corriente y tensión del horno de arco (I.C caso promedio)	61
Figura 20. Señales de corriente y tensión del horno (I.C escenario1)	61
Figura 21. Señales de corriente y tensión del horno (I.C escenario 2)	62
Figura 22. Señales de corriente y tensión del horno (I.C escenario 3)	62
Figura 23. Circuito implementado para el modelo físicamente basado del horno de arco	66
Figura 24. Tensión de arco en el modelo de Cassie medido en el nodo ARC	67
Figura 25. Señales de corriente y tensión del horno de arco (Modelo de Cassie)	68
Figura 26. Puntos seleccionados para la toma de datos para la obtención de parámetros del modelo del circuito equivalente de Norton	70
Figura 27. Señales de corriente y tensión del horno de arco (C.E.N)	72
Figura 28. Señales de corriente y tensión del variador de frecuencia (I.C)	74
Figura 29. Circuito implementado para el modelo basado en electrónica de potencia del variador de frecuencia	75
Figura 30. Señales de corriente y tensión del variador de frecuencia (modelo físicamente basado)	76
Figura 31. Señales de corriente y tensión del variador de frecuencia (C.E.N)	78
Figura 32. Señales de corriente y tensión de varias cargas residenciales conectadas simultáneamente (I.C)	80
Figura 33. Diagrama unifilar del sistema de pruebas de 34 nodos	84
Figura 34. Ubicación de modelos y medidores de intensidad de corriente para la carga en el Sistema IEEE de 34 nodos	87
Figura 35. Sistema IEEE de 34 nodos, ubicación de la carga, el interruptor y los medidores para estudio de hundimiento de tensión	110
Figura 36. Ondas de corriente y tensión cuando se produce un hundimiento de tensión para el convertidor trifásico de seis pulsos modelo R-L (Nodo 812)	111
Figura 37. Ondas de corriente y tensión cuando se produce un hundimiento de tensión para el convertidor trifásico de seis pulsos modelo físicamente basado (Nodo 812)	112

Figura 38. Onda de corriente y tensión cuando se produce un hundimiento de tensión para el convertidor trifásico de seis pulsos modelo R-L (Nodo 842)	112
Figura 39. Onda de corriente y tensión cuando se produce un hundimiento de tensión para el convertidor trifásico de seis pulsos modelo físicamente basado (Nodo 842).....	113
Figura 40. Ondas de corriente y tensión cuando se produce un hundimiento de tensión para el variador de frecuencia modelo R-L (Nodo 812).....	115
Figura 41. Ondas de corriente y tensión cuando se produce un hundimiento de tensión para el variador de frecuencia modelo físicamente basado (Nodo 812) .	116
Figura 42. Onda de corriente y tensión cuando se produce un hundimiento de tensión para el variador de frecuencia modelo R-L (Nodo 842).....	116
Figura 43. Onda de corriente y tensión cuando se produce un hundimiento de tensión para el variador de frecuencia modelo físicamente basado (Nodo 842) .	117

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación según la IEEE - 1159 [1995] de los eventos sobre una onda de tensión	32
Tabla 2. Caracterización del convertidor trifásico de seis pulsos para el modelo de inyección de corriente [8]	50
Tabla 3. THD correspondiente al convertidor trifásico de 6 pulsos	52
Tabla 4. THD correspondiente al convertidor trifásico de 6 pulsos (modelo físicamente basado).....	54
Tabla 5. Caracterización del convertidor trifásico de seis pulsos para el modelo del circuito equivalente de Norton.....	57
Tabla 6. THD correspondiente al convertidor trifásico de 6 pulsos (C.E.N.)	58
Tabla 7. Caracterización del horno de arco medido modelo de inyección de corriente.....	60
Tabla 8. THD correspondiente al horno de arco (I.C. Caso Promedio y Crítico) ...	63
Tabla 9. THD correspondiente al horno de arco (I.C. Ref. 1,2 y 3).....	63
Tabla 10. THD correspondiente al horno de arco (Modelo de Cassie)	68
Tabla 11. Caracterización del horno de arco para el modelo del circuito equivalente de Norton.....	71
Tabla 12. THD correspondiente al horno de arco (C.E.N.)	72
Tabla 13. Caracterización del variador de frecuencia modelo de inyección de corriente.....	73
Tabla 14. THD correspondiente al variador de frecuencia (I.C.).....	74
Tabla 15. THD correspondiente al variador de frecuencia (modelo físicamente basado).....	76

Tabla 16. Caracterización del variador de frecuencia (CEN)	77
Tabla 17. THD correspondiente al variador de frecuencia (C.E.N.)	78
Tabla 18. Caracterización de varias cargas residenciales conectadas conjuntamente utilizando el modelo de inyección de corriente	80
Tabla 19. THD correspondiente a varias cargas residenciales conectadas simultáneamente.....	81
Tabla 20. Cargas implementadas en el estudio	82
Tabla 21. Caracterización del convertidor trifásico de seis pulsos para el sistema de 34 nodos	88
Tabla 22. Caracterización del variador de frecuencia para el sistema de 34 nodos	89
Tabla 23. Comportamiento de la distorsión armónica total en corriente (THD) de los modelos del convertidor trifásico de seis pulsos	90
Tabla 24. Error relativo porcentual del THD en corriente con respecto al escenario con fuente ideal para los modelos del convertidor trifásico de seis pulsos	91
Tabla 25. Error relativo porcentual del THD en corriente con respecto al modelo físicamente basado para los modelos del convertidor trifásico de seis pulsos	92
Tabla 26. Desviación estándar de los errores del THD en corriente con respecto al modelo físicamente basado del convertidor trifásico de seis pulsos.....	93
Tabla 27. Comportamiento de la distorsión armónica total en tensión (THD) de los modelos del convertidor trifásico de seis pulsos.....	94
Tabla 28. Error relativo porcentual del THD en tensión con respecto al escenario con fuente ideal para los modelos del convertidor trifásico de seis pulsos	95
Tabla 29. Error relativo porcentual del THD en tensión con respecto al modelo físicamente basado para los modelos del convertidor trifásico de seis pulsos	96
Tabla 30. Desviación estándar de los errores del THD en tensión con respecto al modelo físicamente basado del convertidor trifásico de seis pulsos.....	96
Tabla 31. Comportamiento de la distorsión armónica total en corriente (THD) de los modelos del variador de frecuencia.....	98

Tabla 32. Error relativo porcentual del THD en corriente con respecto al escenario con fuente ideal para los modelos del variador de frecuencia	99
Tabla 33. Error relativo porcentual del THD en corriente con respecto al modelo físicamente basado para los modelos del variador de frecuencia.....	100
Tabla 34. Desviación estándar de los errores del THD en corriente con respecto al modelo físicamente basado del variador de frecuencia	100
Tabla 35. Comportamiento de la distorsión armónica total en tensión (THD) de los modelos del variador de frecuencia	101
Tabla 36. Error relativo porcentual del THD en tensión con respecto al escenario con fuente ideal para los modelos del variador de frecuencia	102
Tabla 37. Error relativo porcentual del THD en tensión con respecto al modelo físicamente basado para los modelos del variador de frecuencia.....	103
Tabla 38. Desviación estándar de los errores del THD en tensión con respecto al modelo físicamente basado del variador de frecuencia	103
Tabla 39. Comportamiento de la distorsión armónica total en corriente (THD) de los modelos del horno de arco	105
Tabla 40. Error relativo porcentual del THD en corriente con respecto al escenario con fuente ideal para los modelos del horno de arco.....	105
Tabla 41. Error relativo porcentual del THD en corriente con respecto al modelo físicamente basado para los modelos del horno de arco	106
Tabla 42. Desviación estándar de los errores del THD en corriente con respecto al modelo físicamente basado del horno de arco	106
Tabla 43. Comportamiento de la distorsión armónica total en tensión (THD) de los modelos del horno de arco	107
Tabla 44. Error relativo porcentual del THD en tensión con respecto al escenario con fuente ideal para los modelos del horno de arco.....	107
Tabla 45. Error relativo porcentual del THD en tensión con respecto al modelo físicamente basado para los modelos del horno de arco	108
Tabla 46. Desviación estándar de los errores del THD en tensión con respecto al modelo físicamente basado del horno de arco	108

Tabla 47. Valor de Impedancia por nodo convertidor trifásico de seis pulsos	111
Tabla 48. Magnitud de tensión y corriente durante el hundimiento de tensión para el convertidor trifásico de seis pulsos	114
Tabla 49. Errores relativos de corriente del modelo R-L con respecto al modelo basado en electrónica de potencia durante el hundimiento de tensión para el convertidor trifásico de seis pulsos	114
Tabla 50. Valor de Impedancia por nodo. Variador de frecuencia	115
Tabla 51. Magnitud de tensión y corriente durante el hundimiento de tensión para el variador de frecuencia.....	117
Tabla 52. Errores relativos de corriente del modelo R-L con respecto al modelo basado en electrónica de potencia durante el hundimiento de tensión para el variador de frecuencia	118

LISTADO DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Código para la implementación del modelo de inyección de corriente con “models” [1].	131
ANEXO B. Código para la implementación del modelo del circuito equivalente de norton con “models”	134

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE MODELOS DE CARGA PARA LA ESTIMACIÓN DE ESTADO DE LA CALIDAD DE LA POTENCIA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA*

AUTORES: DIEGO ARMANDO PINTO ARGÜELLO**
LUIS ANTONIO RIVERA PINZÓN².

PALABRAS CLAVES: calidad de potencia eléctrica, modelos de carga armónica, hundimientos de tensión.

DESCRIPCIÓN:

En este trabajo se realiza la implementación de modelos de carga armónica en sistemas de distribución de energía eléctrica, realizando la evaluación de su desempeño en un sistema base. El desarrollo se hace alrededor de tres modelos de uso generalizado en los estudios de calidad de la energía, el modelo de inyección de corrientes, el modelo del circuito equivalente de Norton y el modelado con dispositivos electrónicos. Para el análisis se trabaja con tres cargas, el convertidor trifásico de seis pulsos, el variador de frecuencia y el horno de arco, que se destacan por el alto nivel de contaminación armónica que producen.

El desarrollo inicia con un análisis general del comportamiento de los modelos encontrados, en este fundamentalmente se compara el espectro de corriente que inyecta cada modelo a la red con valores teóricos. Con base en esto se seleccionan los modelos de carga más destacados. Posteriormente se procede a la evaluación de estos bajo tres escenarios diferentes para la tensión de alimentación del sistema, fuente sinusoidal sin distorsión, alimentación con tensión distorsionada y caída de tensión del 5% con respecto a la nominal. Por último se estudia el desempeño de los modelos cuando se presentan hundimientos de tensión.

Las implementaciones se realizan en ATP-EMTP, con el uso de la herramienta ATPDraw.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: MSc. Jairo Blanco Solano. Codirector: Dr. Gabriel Ordóñez Plata

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF LOADING PATTERNS FOR THE ESTIMATION OF THE QUALITY STATE OF POWER IN ELECTRICAL ENERGY DISTRIBUTION SYSTEMS*

AUTHORS: DIEGO ARMANDO PINTO ARGÜELLO**
LUIS ANTONIO RIVERA PINZÓN².

KEYWORDS: Power quality, harmonic modelling sources, voltage sags.

DESCRIPTION:

In this work the implementation of harmonic loading patterns is done in electrical power distribution systems, developing the assessment of their performance in a base system. The development is done around three models of widespread use in the studies of power quality, the model of injection of currents, the Norton's equivalent circuit model and modelling with electronic devices. Working with three loads, three-phase six-pulse converter, the frequency converter and the arc furnace, which stand out for the high level of harmonic pollution produced.

The development begins with a general analysis of the behavior of found models; this primarily compares the current spectrum of each model with theoretical values. Based on this top loading patterns are selected. Then proceed to the assessment of these under three different scenarios for the voltage of the system, sinusoidal source without distortion, power with distorted and voltage drop of 5% with respect to the nominal voltage. Finally examines the performance of the models when voltage collapses occur.

Implementations are made in ATP-EMTP, using the ATP Draw tool.

* Degree work.

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Electric, Electronic and Telecommunications School. Director: MSc. Jairo Blanco Solano. Co-director: Phd. Gabriel Ordóñez Plata

NOMENCLATURA

CPE	Calidad de Potencia Eléctrica
SDL	Sistemas de Distribución Local
SPT	Sistema de Puesta a Tierra
SAG	Hundimiento de tensión
ATP	Alternative Transients Program
GISEL	Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica
OP	Operador de Red
UPS	Uninterruptible power system
CEN	Circuito Equivalente de Norton
IC	Inyección de Corrientes

INTRODUCCIÓN

La calidad de potencia eléctrica ha venido tomando relevancia en los últimos años, ya que dejó de ser un tema exclusivamente académico, para convertirse en una preocupación de empresas operadoras de red, de diseñadores de sistemas de distribución e instalaciones eléctricas y de usuarios en general. Operar un sistema con bajos estándares de calidad de la potencia ocasiona, sobredimensionamiento de equipos, fallas reiteradas de operación, mayor necesidad de mantenimiento e incomodidades para los usuarios, lo que finalmente se traduce en pérdidas económicas para operadores de red y usuarios finales.

En un sistema eléctrico la calidad de la potencia se mide por la proximidad de ciertos parámetros como la frecuencia, balance de carga, magnitud, desfases y forma de onda de tensión y corriente, a valores que normativamente se fijan como referencia. En la práctica estos parámetros están lejos de presentar valores ideales, debido a eventos como conexión y desconexión de cargas de gran potencia, arranque de motores y al creciente uso de cargas no lineales, un factor que afecta significativamente la forma de onda de corriente y tensión. En algunos casos es necesario tomar medidas preventivas y correctivas sobre redes de distribución e instalaciones para mejorar los parámetros de operación y para ello se requiere de técnicas de modelado eficiente.

A su vez, la existencia de distorsión armónica en los sistemas de distribución obliga a que se establezca una normatividad cada vez más severa, para asegurar condiciones óptimas en la prestación del servicio de energía eléctrica y que los proyectos que se desarrollen en adelante contemplen aspectos que favorezcan la calidad del servicio para que operen de manera adecuada aún bajo escenarios críticos.

Predecir el comportamiento de un sistema bajo condiciones de interés, con un buen grado de aproximación, podría contribuir a que las decisiones que se tomen en situaciones como las descritas anteriormente, sean adecuadas y se necesite menos tiempo y recursos para su ejecución. Para lograrlo se hace necesario contar con modelos del sistema que sean confiables, prácticos y de fácil implementación.

Entre los fenómenos que se deben considerar en los sistemas de distribución, está el efecto de las cargas que distorsionan las señales de corriente que se inyecta a la red. Este trabajo se enfoca en la evaluación de modelos de carga no lineal y/o variantes en el tiempo, que se han venido usando de manera generalizada en publicaciones científicas desde hace algunos años. Estos modelos se han estudiado bajo condiciones normales de operación y en presencia de transitorios como los hundimientos de tensión (voltage sags).

La versatilidad y homogeneidad del comportamiento de los modelos respecto a las cargas a representar, se convierte en parte esencial en la estimación de estado de la calidad de la potencia. Puesto que se logra obtener un análisis armónico y transitorio de las cargas modeladas, bajo diferentes escenarios y con relativa facilidad, debido a la practicidad de este procedimiento.

Para el desarrollo de este trabajo de investigación, se toma información de artículos y trabajos técnicos previos que abordan el tema del modelado de cargas no lineales y con esta base se realizan simulaciones en ATPDraw, para analizar resultados que permitan generar conclusiones importantes en la temática.

1. GENERALIDADES: EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LA POTENCIA (CPE)

En este capítulo se presentan algunos conceptos importantes sobre calidad de potencia eléctrica. Se dan definiciones de interés para el desarrollo del trabajo y antecedentes investigativos. Las generalidades se desarrollan alrededor de los dos problemas importantes para el análisis que se realiza, las componentes armónicas y los fenómenos transitorios del tipo hundimientos de tensión.

1.1 ANTECEDENTES

El auge del estudio de la calidad de potencia eléctrica inició finalizando la década de 1980. Anteriormente los indicadores de calidad estaban concentrados en evaluar las interrupciones del servicio y su tiempo de duración. Sin embargo debido a la utilización cada vez más generalizada de cargas no lineales y/o variantes en el tiempo y a que los estándares de calidad requeridos por los usuarios son cada vez más exigentes, el tema ha venido cobrando mayor interés y abarcando cada vez más aspectos.

En la actualidad intervienen una gran cantidad de parámetros en la determinación de la calidad de potencia eléctrica. Algunos de ellos son, la distorsión armónica en las señales de tensión y corriente, la frecuencia a la que operan los sistemas y la magnitud de la tensión de alimentación. Estos fenómenos se presentan principalmente debido a la variedad de cargas que se conectan a la red (dispositivos de estado sólido, transformadores, cargas que producen arco eléctrico) [2] y a perturbaciones producto de transitorios por conexión y desconexión de cargas o cortes de suministro [3].

Se han hecho una gran cantidad de trabajos investigativos que abarcan el tema de calidad de potencia eléctrica a nivel mundial. Particularmente en la Universidad Industrial de Santander el grupo de investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL) ha entregado importantes contribuciones al tema como, *Metodología para el diagnóstico de la causa de huecos de tensión: Análisis de fallas* [4], *Método híbrido Tiempo-Frecuencia para el análisis de sistemas eléctricos con elementos no lineales* [5]. En el campo del modelado de cargas, “*Localización de fallas: Validación de modelos de fuentes de alimentación y cargas empleados en la simulación de sistemas de distribución de energía eléctrica*” [6], entre otros trabajos que han aportado al desarrollo de la línea de investigación.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La calidad de potencia eléctrica repercute directamente sobre los intereses de los operadores de red y los usuarios del servicio de energía eléctrica. Disponer de una mala calidad de potencia eléctrica influye en los siguientes factores [7][8].

- Pérdidas económicas.
- Fallas en el suministro de energía.
- Reducción de vida útil en los equipos.
- Disminución de productividad.

La distorsión armónica en las redes de distribución se han venido contrarrestando fundamentalmente con transformadores conectado en delta. Sin embargo esta no es una solución definitiva y ocasiona corrientes circulantes en los devanados, que finalmente producen otro tipo de dificultades.

Una solución para mitigar el efecto de las componentes armónicas es la instalación de filtros sobre los dispositivos que la producen, principalmente a baja tensión e implica una inversión por parte del usuario final. Sin embargo aún no existe ningún tipo de regulación que fije límites a la distorsión armónica de la corriente que se devuelve a la red. Esto sumado al desconocimiento generalizado de las ventajas de la buena calidad de potencia eléctrica, ocasiona que no exista interés por parte de los usuarios de contrarrestar el fenómeno, de forma que el problema se transfiere a los operadores de red.

El aumento vertiginoso de las cargas no lineales, bajo el escenario anteriormente expuesto, ha convertido a las componentes armónicas en un problema importante en los sistemas de distribución. A su vez los operadores de red deben manejar altos estándares de calidad de la potencia por razones económicas y de cuidado de equipos, ya que con esto aseguran no solo mayores dividendos, sino también un servicio continuo para los usuarios, un mejor funcionamiento del sistema eléctrico y un menor requerimiento de mantenimiento correctivo[8].

Debido a la configuración y topología de los sistemas de distribución, los hundimientos de tensión y sobretensiones están presentes continuamente, ya sea por conexión y desconexión de cargas o por maniobras de manteniendo. Estas perturbaciones afectan el funcionamiento de cargas electrónicas o dispositivos sensibles a las variaciones de tensión, generando una operación errónea de los mismos o llegando al deterioro total de la vida útil.

Bajo estas condiciones, ya sea para la elaboración de proyectos o ejecución de acciones correctivas o preventivas sobre las redes de distribución, los estudios de calidad de la potencia empiezan a tomar relevancia. En ese sentido contar con modelos de carga confiables, que permitan simular el comportamiento del sistema bajo distintos escenarios de manera precisa facilitando la toma de decisiones, representa una ventaja importante.

1.3 MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN

En la actualidad los estudios realizados por las empresas suministradoras del servicio de energía eléctrica están enfocados en incrementar su competitividad en el mercado. En esta tarea se enfrentan a múltiples problemas como paradas de procesos, pérdidas de datos, operación inadecuada y envejecimiento prematuro de equipos, reparaciones costosas y baja eficiencia en los procesos energéticos, todos ellos asociados a los problemas producidos por la deficiente calidad de potencia eléctrica.

La elaboración de este trabajo de grado se encamina a realizar un estudio y análisis de los modelos de carga eléctrica, orientados a la estimación de estado de la calidad de potencia en un sistema de distribución de energía eléctrica. Siendo el eje principal del mismo, el estudio del comportamiento armónico de las cargas y su respuesta en tensión y corriente frente a hundimientos y sobretensiones. Los modelos de carga objeto de estudio se evaluarán sobre el sistema de pruebas de 34 nodos del IEEE [9].

Contar con modelos de carga contribuye a la comprensión de problemas en la calidad de potencia eléctrica y a la determinación de soluciones viables.

Finalmente es importante resaltar que este trabajo de investigación hace parte del trabajo de investigación doctoral titulado *“Calidad de potencia eléctrica: Metodologías para la estimación de estado de las componentes armónicas y de las variaciones de tensión de corta duración en sistemas de distribución en el marco de las redes eléctricas inteligentes”*. Con estos nuevos proyectos se pretende seguir aportando en la línea de investigación de calidad de la potencia del Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica GISEL de la

Universidad Industrial de Santander que siempre se ha destacado por sus valiosos aportes en esta área.

1.4 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo general de este trabajo consiste en evaluar el desempeño de los modelos de carga con rendimientos óptimos en la estimación de estado de la calidad de la potencia, en sistemas de distribución de energía eléctrica.

Para cumplir con este objetivo se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Realizar una consulta bibliográfica para la identificación de los modelos de carga con rendimientos óptimos en la estimación de estado armónico y transitorio de la calidad de la potencia en sistemas de distribución de energía eléctrica.
- Implementar los modelos de carga seleccionados por su óptimo rendimiento en plataformas de simulación como ATP-EMTP y MATLAB.
- Generar propuestas de mejora en los modelos de carga para el estudio de calidad de la potencia enfocado en la estimación de estado de armónicos, hundimientos de tensión y sobretensiones.
- Validar los resultados de los modelos implementados a partir de simulación en un sistema de distribución de prueba IEEE [21].

1.5 DEFINICIÓN SOBRE CALIDAD DE POTENCIA ELÉCTRICA

A continuación se definen algunos conceptos importantes en el estudio de la calidad de potencia eléctrica.

1.5.1 calidad de potencia eléctrica. La calidad de potencia eléctrica es un tópico que actualmente es objeto de debate en cuanto a la naturaleza y descripción de los fenómenos electromagnéticos en cuestión. Existen múltiples trabajos investigativos a nivel mundial que abordan el tema y cada uno define a su manera el concepto de calidad de potencia. A continuación se presentan dos definiciones que tienen un alto grado de aceptación:

- IEC 61000-2-2/4 y CENELEC 50160

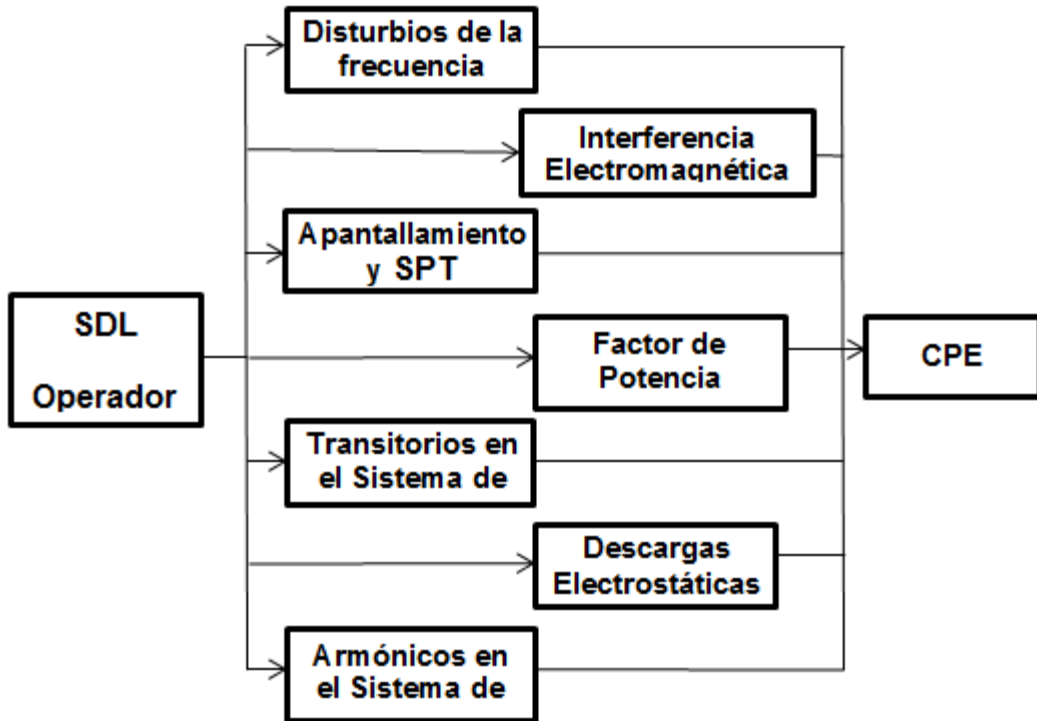
“La calidad de la energía eléctrica, es una característica física del suministro de electricidad, la cual se entrega en condiciones normales de funcionamiento sin producir perturbaciones en los procesos del cliente”.

- IEEE 1159 -1995

“El término se refiere a una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente en un tiempo dado y en una posición dada en el sistema de potencia”.

En la Figura 1 se discriminan los fenómenos que inciden en la calidad de la energía eléctrica en un sistema de distribución y que se deben tener en cuenta cuando se realiza un estudio al respecto.

Figura 1. Fenómenos que inciden en la calidad de potencia eléctrica

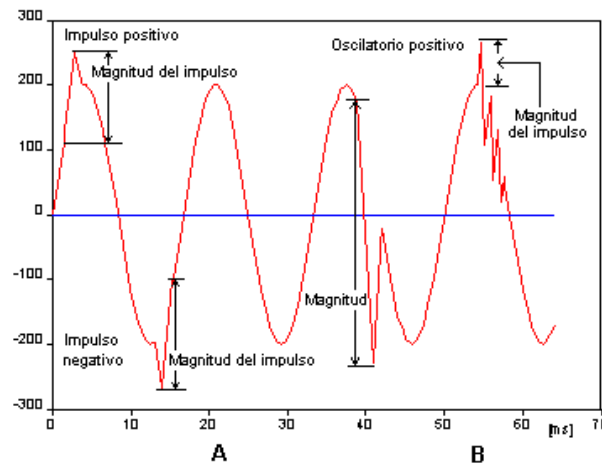


Fuente: Ramon Hector Ortiz Tamayo, *Evaluación de la Calidad de la Potencia Eléctrica (CPE) Ante Eventos de Corta Duración en un Sistema de Distribución*.

1.5.2 Estado transitorio en sistemas eléctricos. La normativa colombiana define los eventos transitorios, como perturbaciones en la onda de tensión o corriente de muy corta duración, (menos de medio ciclo aproximadamente), estos fenómenos pueden ser de impulso u oscilatorias[10].

En la Figura 2 se muestra la diferencia entre los transitorios tipo impulso y oscilatorio.

Figura 2. Transitorio tipo impulso (A) y oscilatorio (B)



Fuente: ICONTEC, NTC 5001. Calidad de la potencia eléctrica. Límites y metodología de evaluación en punto de conexión común

Cualquier cambio repentino en la intensidad o tensión de un circuito eléctrico típico, ocasionará transitorios, debido a la energía almacenada en la capacitancia e inductancias de los circuitos. Estos fenómenos se presentan en los siguientes casos[10]:

- Maniobras en líneas y equipos del sistema.
- Descargas atmosféricas.
- Alta frecuencia en disparos de tiristores.
- Cierres de relés y contactos
- Desconexión y arranque de cargas con alto consumo de energía.

Cuando se presentan, el sistema y la carga se encuentran expuestos a daños como:

- Degradación o falla de aislamiento en equipo y sistema eléctrico.
- Fallas en los componentes de las fuentes de potencia de los equipos electrónicos.

- Disparos en variadores de velocidad ajustables.
- Daños en discos duros, pérdida de información y errores de funcionamientos en computadores.

En este estudio se abordan disturbios transitorios a baja frecuencia y componentes armónicas en el sistema de potencia (fenómenos de baja frecuencia que caracterizan la distorsión de la forma de onda) [7]. En la Tabla 1 se presenta las clasificaciones de las perturbaciones de acuerdo a su contenido espectral, tiempo de duración y magnitud de tensión típica.

Tabla 1. Clasificación según la IEEE - 1159 [1995] de los eventos sobre una onda de tensión

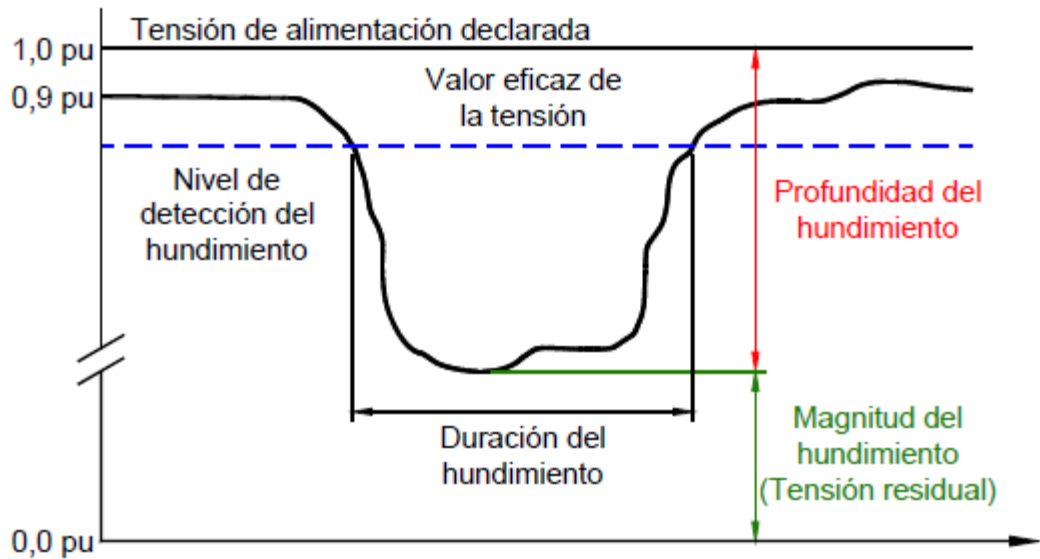
Categorías	Contenido Espectral Típico	Duración Típica	Magnitud de Voltaje Típico
1. Transitorios			
1.1. Impulso			
1.1.1. Nanosegundos	5ns de subida	<50 ns	
1.1.2. Microsegundos	1us de subida	50 ns-1 ms	
1.1.3. Milisegundos	0.1ms de subida	> 1 ms	
1.2. Oscilatorios			
1.2.1. Baja Frecuencia	< 5 KHz	0.3- 50 ms	0 - 4 p.u.
1.2.2. Media Frecuencia	5-500 KHz	20 s	0 - 8 p.u.
1.2.3. Alta Frecuencia	0.5-5 MHz	5 s	0 - 4 p.u.
2. Variaciones de corta duración			
2.1. Instantáneo			
2.1.1. Sag (Dip)		0.5 - 30 ciclos	0.1 - 0.9 p.u.
2.1.2. Swell		0.5 - 30 ciclos	1.1 - 1.8 p.u.
2.2 Momentánea			
2.2.1. Interrupción		0.5 ciclos a 3 s	< 0.1 p.u.
2.2.2. Sag (Dip)		30 ciclos a 3 s	0.1 - 0.9 p.u.
2.2.3. Swell		30 ciclos a 3s	1.1 - 1.4 p.u.
2.3. Temporal			
2.3.1. Interrupción		3 s -1 min	< 0.1 p.u.

Tabla 2. Clasificación según la IEEE - 1159 [1995] de los eventos sobre una onda de tensión (Continuación)

Categorías	Contenido Espectral Típico	Duración Típica	Magnitud de Voltaje Típico
2.3.2. Sag(Dip)		3 s -1 min	0.1 - 0.9 p.u.
2.3.3. Swell		3 s -1 min	1.1 - 1.2 p.u.
3. Variaciones de larga duración			
3.1. Interrupción sostenida		> 1 min	0.0 p.u.
3.2. Sub voltaje		> 1 min	0.8 a 0.9 p.u.
3.3. Sobre voltaje		> 1 min	1.1 - 1.2 p.u.
4. Desbalance de voltajes		Estado Estable	0.5 - 2%
5. Distorsión de la forma de onda			
5.1. Offset DC.		Estado Estable	0 - 0.1 %
5.2. Armónicos		Estado Estable	0- 20 %
5.3. Intearnónicos	0 - 100 Armónico	Estado Estable	0 - 2%
5.4. Muestras	0 -6 KHZ	Estado Estable	
5.5. Ruido		Estado Estable	0 - 1%
6. Fluctuaciones de voltaje	Banda Ancha	Intermitente	0.1- 7%
7. Variaciones de la frecuencia	< 50 HZ	< 10 s	

1.5.2.1 hundimientos de tensión (Voltage SAGS). Los hundimientos de tensión son disminuciones impredecibles del valor eficaz de la tensión por encima del 10% y por debajo del 90% de su valor nominal, las condiciones normales se deben restablecer después de mínimo unos cuantos milisegundos y máximo un minuto de ocurrido el evento, con un valor superior al 90% de la tensión de alimentación. La Figura 3 muestra los parámetros característicos de un hundimiento de tensión.

Figura 3. Descripción del Hundimiento (SAG)



Fuente: Computing and economics committee IEEE power engineering society. Power system analysis, "IEEE-34 Node Test Feeder."

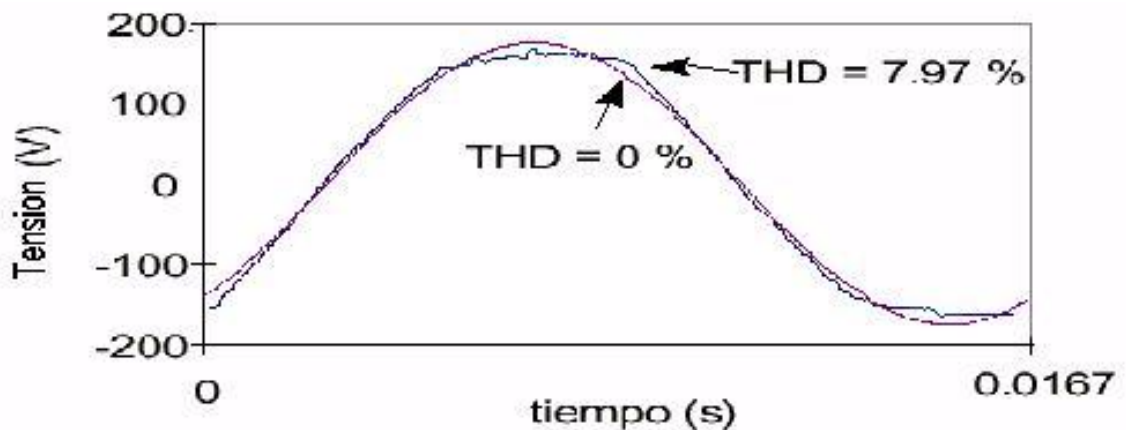
Los hundimientos de tensión principalmente son causados por corrientes elevadas en los sistemas de distribución, producidas por conexión y/o desconexión de cargas que demanden una elevada potencia, cortocircuitos, arranque de motores y descargas atmosféricas; este fenómeno se puede presentar con diferentes características dependiendo de la configuración del sistema, su mantenimiento, operación y los puntos donde se realice medición[10].

1.5.2.2 componentes armónicas en el sistema de potencia. Las componentes armónicas son representaciones matemáticas de señales periódicas distorsionadas de corriente y/o tensión presentes en un sistema eléctrico. Se caracterizan por ser de una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental. Así, en sistemas con frecuencia de 60 Hz y cargas monofásicas, las componentes características de la señal distorsionada armónica son por ejemplo, el tercero (180 Hz), quinto (300 Hz), y séptimo (420 Hz) por ejemplo.[11]

La mayoría de la contaminación armónica no es producida por la empresa operadora de red, sino por los usuarios finales del servicio de la energía eléctrica quienes la inyectan debido a la conexión de cargas no lineales y/o variante en el tiempo, pudiendo propagarse hacia el sistema de potencia y afectar a otros consumidores [8].

En la Figura 4 se muestra la diferencia entre una onda que solo tiene componente fundamental y otra que presenta distorsión armónica.

Figura 4. Distorsión armónica en la forma de onda de tensión



Fuente: S. Ramírez Castaño and E. A. Cano Plata, *Calidad del Servicio de Energía Eléctrica*,

A continuación se muestran posibles fuentes generadoras de componentes armónicas [10]:

- Conmutación a alta frecuencia en las fuentes de alimentación.
- Utilización de cargas controladas por tiristores.
- Grandes sistemas de UPS.
- Alta impedancia de las fuentes de alimentación.
- Alta impedancia en el cableado eléctrico

- Utilización de cargas que conmuten sobre la red (equipos de soldadura, Equipos de cómputo, UPS).

Se presenta los efectos causados por la distorsión armónica en el sistema de energía [10]:

- Corrientes excesivas en neutros.
- Operación de protecciones sin causa aparente.
- Ruido audible excesivo en centros de distribución.
- Fallas en equipos electrónicos, especialmente con THD en tensiones altas.
- Pérdida de datos en equipos de almacenamiento.
- Fallas en UPS en operaciones de transferencia.
- Aumento de pérdidas de energía en los equipos eléctricos.
- Riesgo de incendio y explosiones por existencia de resonancias eléctricas en el sistema eléctrico.

2. MODELADO DE CARGAS

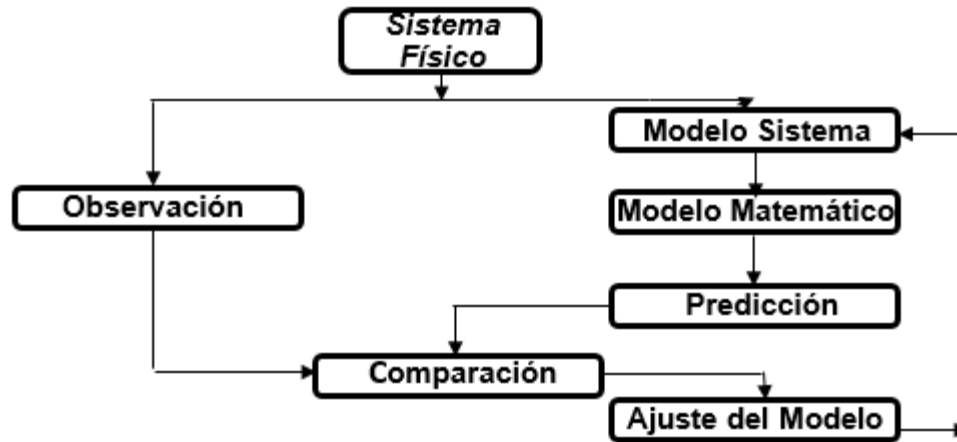
En esta sección se describen los modelos de cargas. Se inicia con definiciones generales y algunos criterios usados para la obtención de los mismos. Posteriormente se analiza el caso específico del modelado de cargas en sistemas de distribución de energía eléctrica y se finaliza con la presentación de los modelos que se implementarán en este trabajo, extraídos de la consulta bibliográfica que se realizó inicialmente.

2.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE MODELADO

El modelado de un fenómeno físico consiste en realizar representaciones reducidas de situaciones reales. Para cada propósito existen características que son indispensables y otras menos relevantes. Es posible sacrificar algunas cualidades menos importantes para minimizar la complejidad del modelo, lo que finalmente se traducirá en menores tiempos de cálculos y menor robustez de los sistemas de procesamiento que se utilicen para el estudio. El grado de simplificación tolerable depende del propósito de la representación y se convierte en una variable subjetiva.

Generalmente en el desarrollo de modelos (independientemente del evento en cuestión), se sigue el siguiente proceso:

Figura 5. Proceso para el desarrollo de un modelo



Fuente: K. Schipman and F. Delincé, "The importance of good record-keeping.," *Nurs. Times*

La Figura 5 muestra que la primera aproximación se debe hacer partiendo del conocimiento que se tenga sobre del sistema físico y las leyes que lo gobiernan. Este modelo debe ser puesto a prueba bajo el mismo escenario del sistema físico para determinar su error y de ser necesario aplicar correctivos. El proceso se repite tantas veces como lo exija el criterio de convergencia que se tenga.

Dentro del propósito del presente trabajo no está formular modelos de carga. Se limitará a la evaluación de los modelos que tengan cierto grado de difusión y aceptación entre las publicaciones científicas. De cualquier forma se consideró importante exponer el procedimiento que se sigue en el desarrollo de estos.

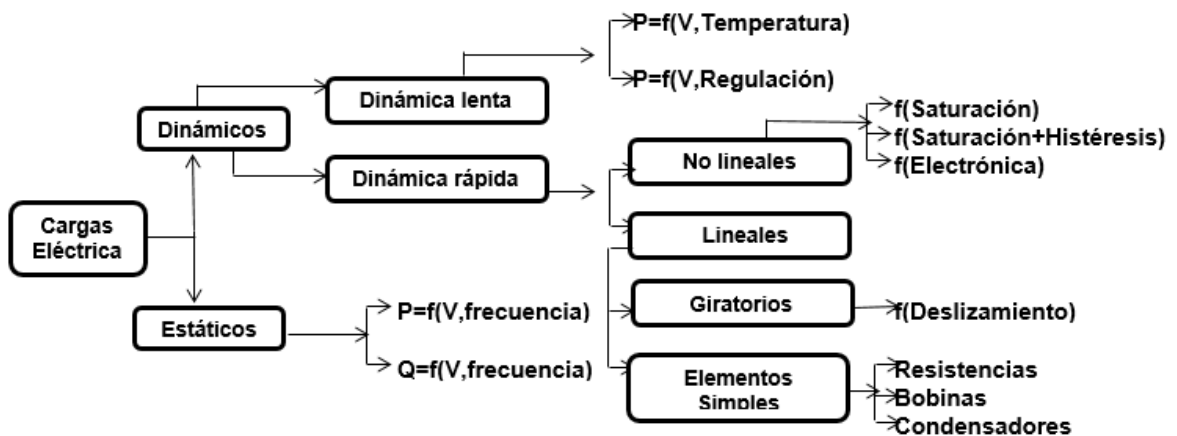
En este caso el desarrollo se hace alrededor de cargas eléctricas no lineales y/o variantes en el tiempo, en los sistemas de distribución de energía eléctrica y su interacción con otros elementos en las redes. En la siguiente sección se profundiza en este tema.

2.2 MODELOS DE CARGA DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

El término carga eléctrica tiene múltiples interpretaciones. Para este propósito se entenderá como, un dispositivo eléctrico conectado al sistema de distribución que consume potencia de este [12].

Los modelos de carga se clasifican en estáticos y dinámicos. En la Figura 6 se hace una descripción de los diferentes tipos de modelos que se han desarrollado para cargas eléctricas.

Figura 6. Clasificación de modelos de carga

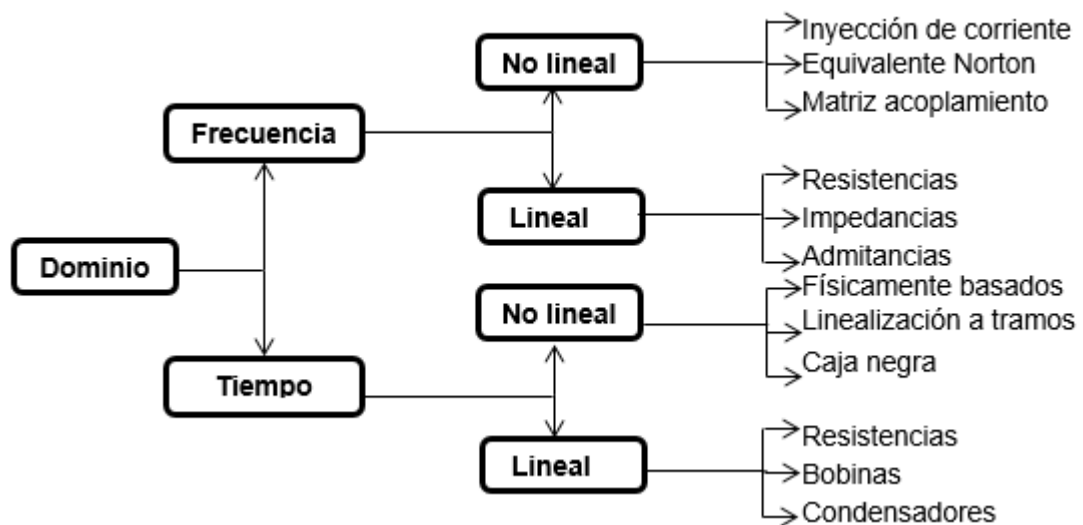


Fuente: IEEE Task force on load Representation for Dynamic Performance, "Load representation for dynamic performance analysis," *IEEE Trans. Power Syst.*

El término estático se refiere a los modelos que se caracterizan por usar valores instantáneos para determinar su respuesta, mientras los modelos dinámicos se valen de variables instantáneas e históricas para hacerlo [12] [13].

De acuerdo a la Figura anterior, para el desarrollo que se lleva a cabo se debe recurrir principalmente a modelos de dinámica rápida, debido a que se va a trabajar con cargas no lineales. Estos modelos se valen de la descomposición de la corriente de la carga objeto de estudio y se clasifican por el dominio en el que se trabajan, como lo muestra la Figura 7.

Figura 7. Clasificación de modelos de carga según el dominio



Fuente: IEEE Task force on load Representation for Dynamic Performance, "Load representation for dynamic performance analysis," *IEEE Trans. Power Syst*

Cuando se trabaja con cargas lineales e invariantes en el tiempo se usa la representación circuital de los fenómenos, valiéndose de resistencias, inductores y condensadores, independientemente de si se desarrolla en el dominio del tiempo o la frecuencia.

Para las cargas no lineales se encuentran diferencias marcadas entre los dos dominios.

En el dominio temporal, las representaciones físicamente basadas se hacen a partir de modelos matemáticos de las interacciones físicas dentro del dispositivo modelado, resultando frecuentemente en modelos con un grado de complejidad alto. Los modelos de linealización por tramos requieren de un número significativo de operaciones matemáticas, puesto que se transforma el problema no lineal en N sub problemas lineales. Los modelos de caja negra son sistemas que entregan la respuesta frente las entradas que se presenten con valores predeterminados, sin verse afectados por otras variables.

En el dominio de la frecuencia se tienen modelos matemáticamente más sencillos que en el tiempo. Por ejemplo el modelo de inyección de corrientes (I.C) se vale de los principios de ortogonalidad, análisis y síntesis de las Series de Fourier, por lo que inyecta cada componente de corriente armónica por separado. Y no tiene en cuenta la interacción entre armónicos.

Por otro lado el modelo equivalente Norton es una mejora del I.C., debido a que incluye una admitancia que representa el comportamiento de la carga frente las variaciones en la tensión de alimentación.

La matriz de acoplamiento armónico tiene en cuenta la interacción armónica, aunque es un modelo netamente matemático que carece de una representación circuital.

Para realizar las simulaciones, obtener los parámetros representativos del sistema y hacer el respectivo análisis, en este trabajo se usa el programa Alternative Transients Program (ATP-EMTP), trabajando en el dominio del tiempo. Sin embargo entre los modelos de carga estudiados están algunos que pertenecen al dominio de la frecuencia y para implementarlos se utiliza la función “models” en ATPDraw. De esta forma los modelos en el dominio de la frecuencia se convierten

en cajas negras, que trabajan internamente para cada frecuencia armónica por separado pero entregan la respuesta total al sistema en el dominio del tiempo.

Entre las publicaciones científicas se encuentran múltiples trabajos sobre modelado de cargas, siendo más recientes los que se enfocan en las no lineales. Esto se debe a que el tema de la calidad de la potencia se empezó a tratar finalizando el siglo XX. En “IEEE Task force on load Representation for Dynamic Performance, “Bibliography on load models for power flow and dynamic performance simulation,” [14] se encuentra una recopilación completa de los artículos que abordan el tema.

2.3 MODELOS DE CARGA IMPLEMENTADOS EN EL DESARROLLO DEL PROYECTO

En esta sección se describen detalladamente los modelos de carga de sistemas de distribución de energía eléctrica que se aplican en el presente estudio.

2.3.1 Modelo de inyección de corriente (I.C). El modelo de inyección de corriente consiste en representar la carga como una fuente de corriente constante que inyecta al sistema la intensidad correspondiente a cada frecuencia armónica, cuya magnitud está relacionada directamente con la carga. Se basa en el principios de ortogonalidad, análisis y síntesis de las Series de Fourier para trabajar con cada frecuencia de manera independiente y posteriormente entregar al sistema el efecto total de la carga como la suma de cada uno de los casos lineales, por lo que no considera la interacción armónica[15].

El valor de la corriente se representa matemáticamente de la siguiente forma

$$I_h = Y_h * V_h \quad (1)$$

Resolviendo la ecuación 1 para cada valor armónico se puede encontrar la corriente en cada barra k del sistema en el dominio del tiempo como se muestra en la Ecuación 2.

$$I_k t = \sum_h^H I_h^k \sin(h\omega_1 t + \delta_h^k) \quad (2)$$

Siendo H el número de armónicos que se consideran en el modelo.

La magnitud de los armónicos absorbidos por la carga, se pueden encontrar como porcentajes de la corriente fundamental u obtenerlos de la descomposición con la transformada de Fourier o Wavelet de una onda de intensidad medida. Independientemente del método aplicado, el modelo presenta la limitante de estar sujeto a las condiciones operativas en las que se determinaron dichas magnitudes.

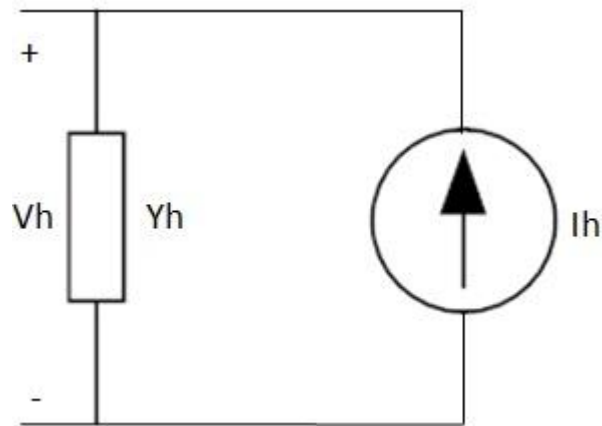
Este modelo suele ser el más usado debido a su simplicidad y a que durante su implementación no requiere de técnicas iterativas, lo que minimiza el esfuerzo computacional de las simulaciones.

El modelo de inyección de corrientes es abordado con frecuencia en trabajos de investigación, especialmente cuando se pretende modelar dispositivos electrónicos de gran potencia [8].

2.3.2 Modelo del circuito equivalente de norton (CEN). El modelo del circuito equivalente de Norton es una mejora del presentado anteriormente. En este caso se agrega una admitancia en paralelo a la fuente independiente de corriente que inyecta la distorsión armónica al sistema para cada frecuencia considerada. Esto hace que el modelo responda frente las variaciones armónicas en la tensiones de alimentación [16].

En la Figura 8 se muestra la representación circuital del modelo.

Figura 8. Modelo del circuito equivalente de Norton



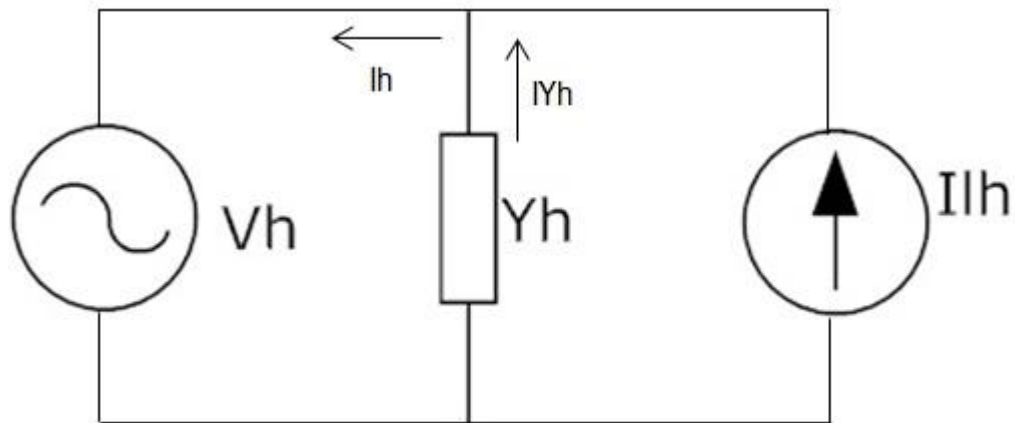
La admitancia para cada frecuencia armónica se da por medio de la ecuación:

$$I_h = Y_h * V_h \quad (3)$$

En los trabajos que se consultaron sobre modelado de cargas, se obtienen los parámetros del circuito equivalente de Norton, valiéndose de la monitorización de la carga estudiada en condiciones de laboratorio o prueba. Inicialmente se hace el trabajo de caracterización de carga con una alimentación completamente

sinusoidal. De esta forma se encuentran los valores para cada componente armónica de la fuente de corriente, ya que esta solo depende de la componente fundamental de la tensión. Posteriormente a la configuración se le desconecta la alimentación ideal y se implementa una fuente de alimentación con distorsión armónica a una frecuencia dada, para determinar el valor de la admitancia. En la Figura 9 se muestra el esquema del procedimiento descrito anteriormente[17].

Figura 9. Obtención de parámetros del C.E.N en condiciones de laboratorio



La impedancia en paralelo con la fuente de corriente se encuentra por medio de las expresiones 4 y 5.

$$I_h = I_{Yh} + I_{Lh} = \frac{V_h}{Y_h} + I_{Lh} \quad (4)$$

$$Y_h = \frac{V_h}{I_h - I_{Lh}} \quad (5)$$

Dónde:

I_h = Corriente total de la carga

I_{Yh} = Corriente de la admitancia

I_{Lh} = Corriente de la fuente independiente

V_h = Fuente de alimentación distorsionada

2.3.3 Modelos basados en electrónica de potencia. Los modelos basados en electrónica de potencia o físicamente basados se realizan a partir de los dispositivos disponibles en las librerías de ATPDraw, como resistencias no lineales, diodos, condensadores e inductores, entre otros.

En este caso el modelado de cargas basado en electrónica de potencia se realiza partiendo de las topologías que se encuentran en la literatura del tema [18]. En el estudio de otros tipos de cargas, como los que producen arco eléctrico, se usan modelos con bastante aceptación en publicaciones científicas, que tratan de emular la respuesta eléctrica frente los fenómenos físicos que se presentan durante la operación de estos dispositivos.

2.3.4 Modelos lineales. Los modelos lineales implementados en este trabajo por medio de ATP, consisten en una resistencia (R) e inductancia (L) en serie, cuyos valores son producto de la potencia consumida por los modelos físicamente basados. Estos modelos son utilizados para el estudio de estado transitorio, analizando su comportamiento frente hundimientos tensión.

2.4 CARGAS IMPLEMENTADAS EN EL ESTUDIO

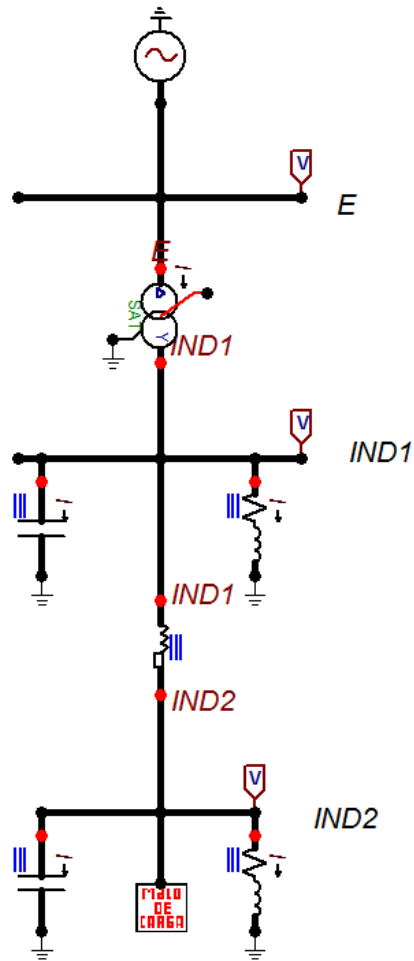
En esta sección se describen detalladamente las cargas que se modelan, con su caracterización armónica, con las gráficas de intensidad de corriente y tensión en el punto de conexión y se especifican los detalles relevantes para cada caso.

Inicialmente como sistema de prueba se usa un sistema de distribución de tres nodos [19]. En este sistema se estudia el comportamiento de 3 tipos de carga no lineales diferentes, de manera independiente. La implementación de las cargas lineales con su respectivo modelo, se llevaran a cabo en el capítulo 3, donde se realizara un análisis de comportamiento del estado transitorio. Estas cargas son, el convertidor trifásico de seis pulsos, el horno de arco y el variador de frecuencia usando los tres primeros modelos de carga expuestos anteriormente. El modelo de inyección de corrientes se implementa con distintos espectros armónicos, obtenidos de distintos trabajos técnicos, los cuales nos ofrecen un análisis de comportamiento de la carga, por lo que en total se trabaja con 16 simulaciones. El sistema de prueba tiene las siguientes características:

- Tensión de suministro: 69 [kV], barra infinita.
- Transformador: 69 [kV]- Δ /13,8 [kV]-Y-t, 20.000 [kVA], R = 0,5%, X = 8%.
- Línea: Línea de distribución corta trifásica con hilo a tierra:
Resistencia total de secuencia positiva R= 0.002 pu
Reactancia total de secuencia positiva X= 0.006 pu
- Carga en IND1: 10.000 [kW], 0,85 fp atr. , (en esta carga, el 60% es motriz).
- Carga en IND2: 3.000 [kW], 0,9 fp atr. (altamente resistiva y comercial).
- Corrección del factor de potencia: Capacitores en IND1 y IND2 (hacen una compensación total de la carga).

En la Figura 10 se muestra el sistema que se usa en el estudio implementado en ATP.

Figura 10. Sistema base para descripción de modelos



Para los casos de simulación la carga armónica se conecta a la barra IND2; el lugar específico se muestra en la figura 10, identificado como “mdlo de carga”. La simulación se realiza con una única carga armónica cada vez y de cada carga se obtiene la corriente que absorbe del sistema, así como la tensión en la barra IND2 (donde se conecta la carga objeto de estudio). La implementación de las diferentes cargas y sus respectivos modelos en el sistema de la figura 10, consiste en analizar y verificar el funcionamiento de cada modelo. Llevándolos a un rendimiento óptimo con base a la gráfica de tensión, respecto al comportamiento teórico expuesto en la literatura.

2.4.1 El convertidor trifásico de 6 pulsos. El convertidor trifásico de seis pulsos se ha venido convirtiendo en una carga de uso generalizado en la industria, debido a que cada vez son más frecuentes los dispositivos que se alimentan con corriente directa. La potencia instalada de estos elementos representa una carga significativa para la red y una fuente considerable de distorsión armónica, (producida en el paso de corriente alterna a corriente directa y viceversa).

2.4.1.1 Convertidor trifásico de seis pulsos modelado por inyección de corriente. El modelo de inyección de corrientes para el convertidor trifásico de seis pulsos se implementa con dos caracterizaciones de carga diferentes. Inicialmente se usa la aproximación teórica que define las componentes armónicas por medio de la relación $1/h$, donde h es el orden del armónico en cuestión [20]. La segunda caracterización que se usa es experimental, se obtuvo por medio de mediciones sobre un convertidor trifásico de seis pulsos real, encontrada en trabajos sobre el tema [8].

La implementación del modelo de inyección de corriente se hace por medio de “models” en ATPDraw, el código que se usó se presenta en el anexo A.

En la Tabla 2 se muestra la caracterización de la carga que se usa en la implementación del modelo, los valores mostrados para la amplitud de los armónicos corresponden a porcentajes de la corriente fundamental [8].

Tabla 3. Caracterización del convertidor trifásico de seis pulsos para el modelo de inyección de corriente [8]

Caracterización armónica para el convertidor trifásico de seis pulsos		
h	% I	
	Modelo teórico	Modelo experimental
5	20	17,5
7	14,286	11,1
11	9,091	4,5
13	7,692	2,9
17	5,882	1,5
19	5,263	1
23	4,348	0,9
25	4	0,8

Fuente: S. Ramírez Castaño and E. A. Cano Plata, *Calidad del Servicio de Energía Eléctrica*.

En la Figuras 11 y 12 se muestran las distorsiones armónicas en tensión y corriente para los dos casos expuestos. Debido a que la información encontrada solo suministraba la magnitud de las componentes armónicas, los ángulos se definieron teniendo en cuenta las componentes de secuencia, en donde a cada armónico se le asignó una secuencia por orden numérico iniciando con el primero en secuencia positiva, el segundo en secuencia negativa, el tercero en secuencia cero y continuando con ese ciclo hasta completar las componentes armónicas consideradas. Ángulos que en teoría debería tener cada componente armónica [20].

Figura 11. Señales de corriente y tensión del convertidor trifásico de 6 pulsos (I.C teórico)

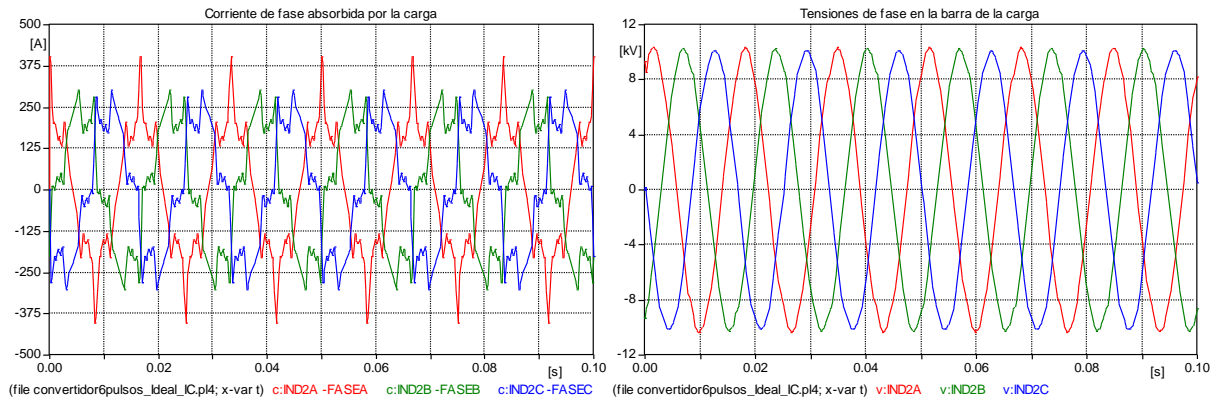
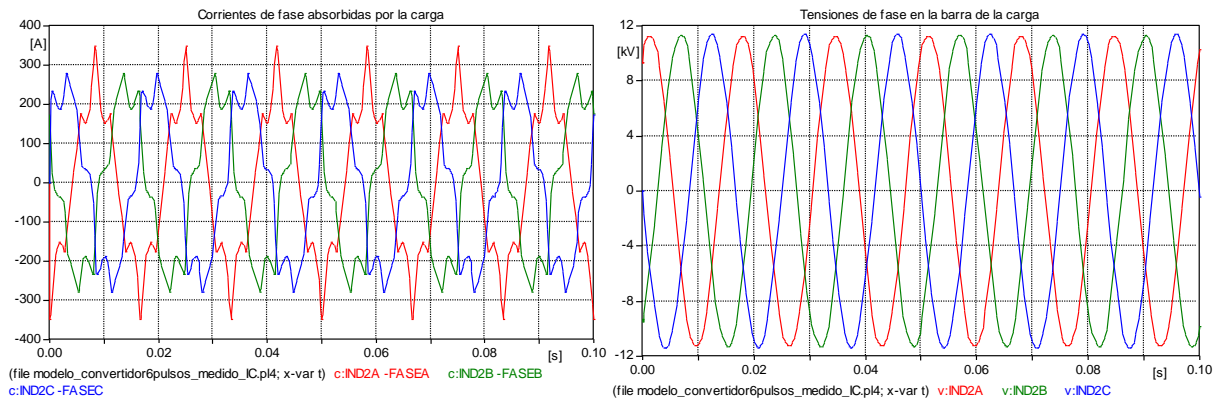


Figura 12. Señales de corriente y tensión del convertidor trifásico de 6 pulsos (I.C experimental)



La Tabla 3 muestra la distorsión armónica total (THD) para las tensiones y corrientes de la Figuras 11 y 12.

Tabla 4. THD correspondiente al convertidor trifásico de 6 pulsos

Distorsión Armónica Total (THD)				
	I.C teórico		I.C experimental	
Fase A	2,05%	28,43%	1,39%	21,51%
Fase B	2,04%	28,43%	1,39%	21,51%
Fase C	2,04%	28,43%	1,39%	21,51%
	Tensión	Intensidad de Corriente	Tensión	Intensidad de Corriente

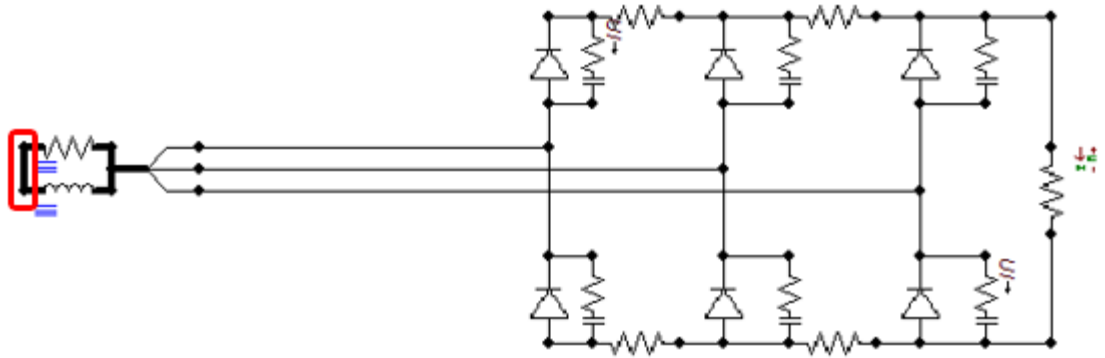
Los dos escenarios presentan un comportamiento similar y aproximado a la forma de onda teórica para los convertidores trifásicos de seis pulsos, sin embargo las corrientes de fase tienen algunos picos que deforman la onda. Este hecho se atribuye a la consideración que se hizo para los ángulos de las componentes armónicas, que les asigna el mismo desfase a todas las componentes de la fase a, mientras que para las fases b y c varían entre tres valores.

Las distorsiones armónicas presentan valores cercanos para los dos espectros de corriente implementados.

2.4.1.2 Convertidor trifásico de 6 pulsos modelado con componentes electrónicos: El modelo del convertidor trifásico de seis pulsos físicamente basado, se desarrolla a partir del conocimiento que se tiene de la topología del circuito del mismo, valiéndose de los componentes disponibles en las librerías de ATPDraw [18].

En la Figura 13 se muestra el circuito que se usó en la implementación en ATP.

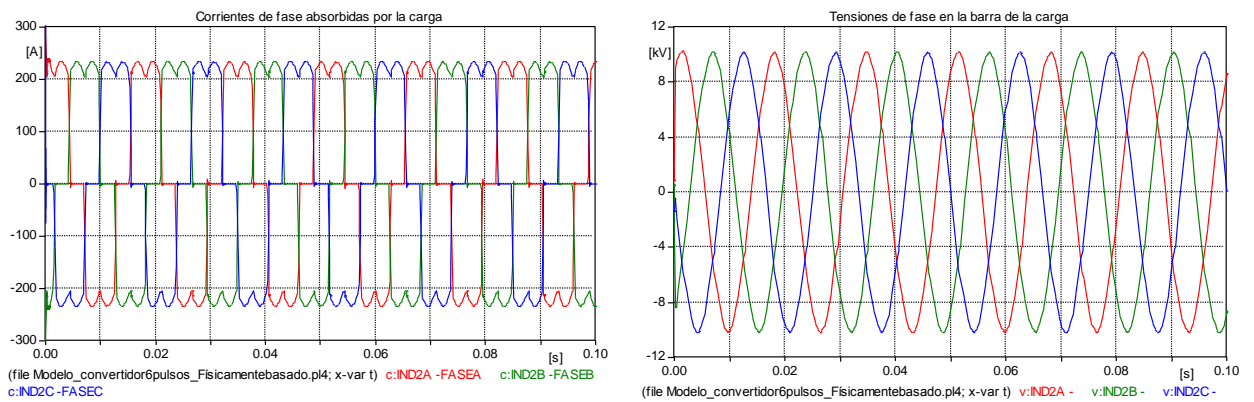
Figura 13. Circuito en ATP convertidor trifásico de 6 pulsos



La medición de tensión y corriente se realizó sobre el nodo trifásico que se encuentra encerrado en el recuadro rojo de la Figura 13.

En la Figura 14 se muestran las corrientes y tensiones correspondientes a la carga en el modelo implementado.

Figura 14. Señales de corriente y tensión del convertidor trifásico de 6 pulsos (modelo físicamente basado)



En la Tabla 4 se presentan las distorsiones armónicas correspondientes a las ondas de la Figura 14.

Tabla 5. THD correspondiente al convertidor trifásico de 6 pulsos (modelo físicamente basado)

Distorsión Armónica Total (THD)		
Fase A	1,99%	27,88%
Fase B	2,01%	27,87%
Fase C	1,99%	27,85%
	Tensión	Intensidad de Corriente

El modelo tiene un comportamiento bastante aproximado al teórico, mucho mejor que los modelos de inyección de corriente presentados anteriormente en cuanto a la forma de onda esperada, sin embargo la distorsión armónica total en corriente es muy similar a la que se obtuvo con el espectro teórico usando el modelo de inyección de corriente.

2.4.1.3 Convertidor trifásico de 6 pulsos modelado con el circuito equivalente de Norton: El procedimiento para obtener el modelo del circuito equivalente de Norton es experimental y se describió en la sección 2.3.2. Es necesario obtener la onda de intensidad de corriente cuando se alimenta la carga a modelar con una tensión sinusoidal pura. Esta señal es descompuesta en sus componentes armónicas se convierte en los datos de la fuente independiente de corriente. Posteriormente la carga se alimenta con tensión distorsionada y se obtienen las ondas de corriente y tensiones del dispositivo. De esta forma se encuentran las componentes armónicas correspondientes a estas señales para definir la admitancia a cada frecuencia.

Inicialmente para implementar el modelo del circuito equivalente de Norton en este estudio, se buscaron los datos necesarios en trabajos de investigación relacionados con el tema, pero no se encontró información suficiente para construir el modelo.

Debido a que dentro del alcance del presente trabajo no se contempla la toma de datos en condiciones de laboratorio y a que no se disponía de las cargas consideradas en esas condiciones, los parámetros se obtuvieron a partir de simulación con ATPDraw. Las simulaciones se hicieron con los modelos físicamente basados porque presentaban el funcionamiento más cercano a la realidad y responden frente las diferentes condiciones de alimentación distorsionada. En las Figuras 15 y 16 se muestran las simulaciones realizadas para obtener el modelo del circuito equivalente de Norton para el convertidor trifásico de seis pulsos.

Figura 15. Simulación de toma de datos para circuito equivalente de Norton con fuente sinusoidal

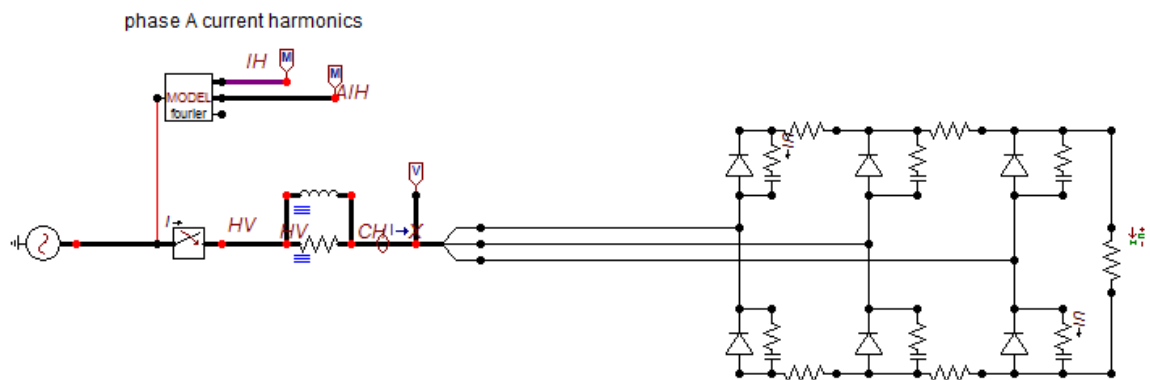
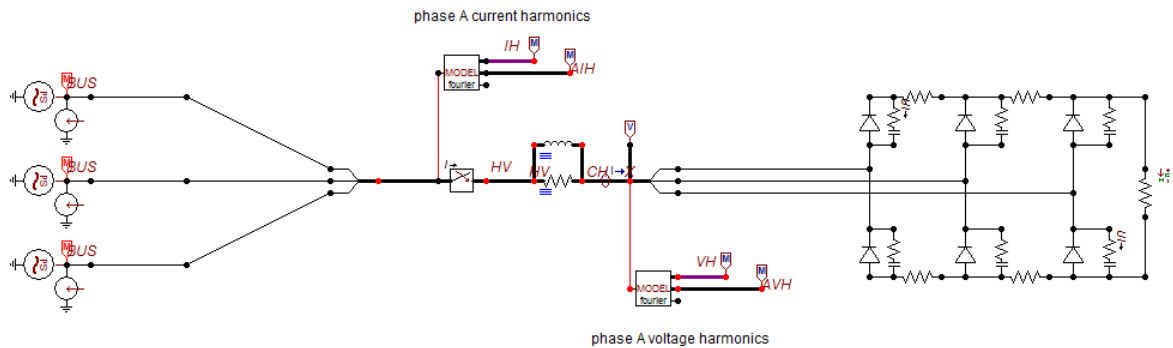


Figura 16. Simulación de toma de datos para circuito equivalente de Norton con fuente distorsionada



La fuente distorsionada que se usó en el experimento simulado inyectaba componente fundamental a una tensión de 11 [kV] de línea, tercer armónico a 30% de la fundamental, quinto armónico al 20% de la fundamental y séptimo armónico con una tensión del 10% de la fundamental.

De las simulaciones anteriores se obtienen los parámetros necesarios para implementar el circuito.

En la Tabla 5 se presentan los valores de corriente y admitancia del modelo del convertidor trifásico de seis pulsos, para cada fase y frecuencia considerada. Las componentes armónicas de la corriente se dan como porcentajes de la fundamental y las admitancias en Siemens.

Tabla 6. Caracterización del convertidor trifásico de seis pulsos para el modelo del circuito equivalente de Norton

Convertidor trifásico de 6 pulsos modelo del circuito equivalente de Norton				
Fase A				
h	Magnitud I _{h1}	Ángulo I _{h1}	Magnitud Y _h	Ángulo Y _h
1	I _{1A}	-18,961	0,00034	110,773
5	23,575	87,607	0,00002	-15,748
7	8,1006	33,749	0,00002	10,865
11	7,9684	146,61	0,00003	2,137
Fase B				
h	Magnitud I _{h1}	Ángulo I _{h1}	Magnitud Y _h	Ángulo Y _h
1	I _{1B}	-14,758	0,00028	-76,807
5	23,412	108,75	0,00002	150,129
7	8,8746	64,122	0,0001	8,78
11	8,2629	-167,07	0,0001	82,597
Fase C				
h	Magnitud I _{h1}	Ángulo I _{h1}	Magnitud Y _h	Ángulo Y _h
1	I _{1C}	-20,245	0,0005	-58,42
5	23,461	81,288	0,00003	97,986
7	8,7252	25,527	0,00001	41,119
11	8,2302	132,56	0,00002	132,798

Después de realizar el procedimiento anterior se implementa la simulación para el modelo del circuito equivalente de Norton.

Los modelos del circuito equivalente de Norton se realizan por medio de “models” en ATPDraw. En el anexo B se presenta el código que se usa en su implementación.

En la Figura 17 se muestran las corrientes armónicas que consume la carga y la tensión en la barra de la carga.

Figura 17. Señales de corriente y tensión del convertidor trifásico de 6 pulsos (C.E.N)

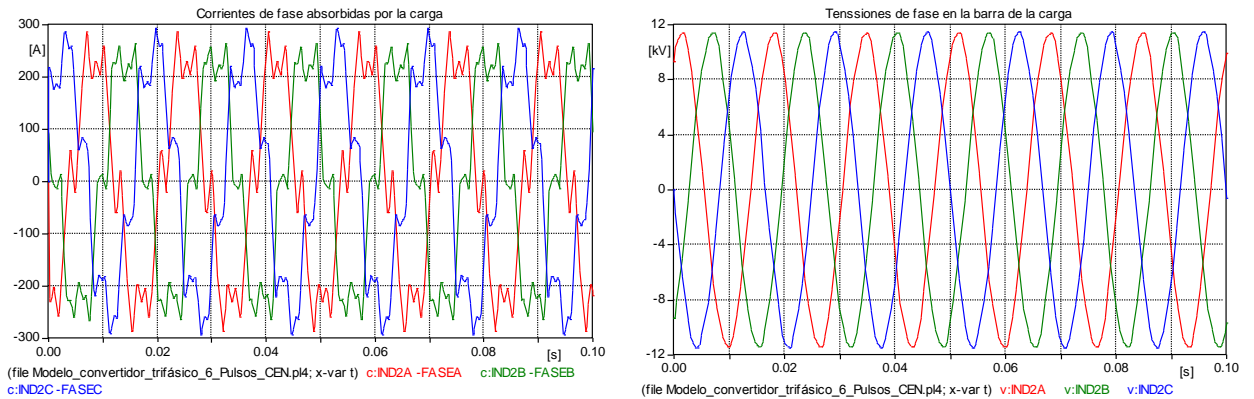


Tabla 7. THD correspondiente al convertidor trifásico de 6 pulsos (C.E.N.)

Distorsión Armónica Total (THD)		
Fase A	1,68%	26,05%
Fase B	1,71%	26,59%
Fase C	1,71%	25,76%
	Tensión	Intensidad de Corriente

El modelo del circuito equivalente de Norton para el convertidor trifásico de seis pulsos presenta ondas de corriente por fases similares a la del modelo basado en electrónica de potencia.

Las distorsiones armónicas (THD) se mantienen dentro de los rangos que presentaron los modelos de inyección de corriente y físicamente basado para el convertidor.

2.4.2 El horno de arco. El horno de arco no es una carga de uso generalizado, se requiere en ciertos procesos industriales y de explotación de recursos naturales. Sin embargo es una fuente muy importante de contaminación armónica y en algunos casos su impacto sobre los sistemas a los que se conecta es grande, ya que los hornos más robustos toman de la red corrientes bastante altas.

El horno de arco ha sido objeto de múltiples estudios. Sin embargo su caracterización y modelado es aún un tema que genera bastantes interrogantes, debido a su comportamiento altamente variable y a los fenómenos físicos complejos que ocurren durante su operación.

2.4.2.1 Horno de arco modelado por inyección de corriente (I.C): Debido a la naturaleza estocástica que presenta el horno de arco, es muy difícil definir con certeza unos valores para la caracterización armónica de la carga. En los trabajos realizados al respecto se encuentran múltiples aproximaciones al comportamiento del horno.

Para la implementación de esta carga con el modelo de inyección de corriente y debido a la variabilidad del comportamiento que presenta, se seleccionaron 5 diferentes caracterizaciones armónicas del horno de arco encontradas en dos trabajos diferentes. Inicialmente se eligieron dos espectros de corriente, tomadas del libro "*Calidad del Servicio de Energía Eléctrica*" [8]. Los dos espectros iniciales son el producto de varias mediciones sobre un horno, extrayendo el valor promedio de las corrientes por cada componente armónica y el caso mas crítico como valores de interés. Posteriormente se tomaron tres Tablas de caracterización armónica para esta misma carga del libro "*Power system harmonics*" [21], que destaca en esta publicación como valores aproximados al comportamiento.

En la Tabla 7 se muestra la caracterización armónica de la carga que se emplea, nuevamente las componentes armónicas se expresan como porcentajes de la fundamental. Los 5 espectros de corriente son casos extraídos de la literatura, totalmente independientes, sus nombres provienen de las fuentes de donde se obtuvieron.

Tabla 8. Caracterización del horno de arco medido modelo de inyección de corriente

Caracterización armónica del horno de arco					
	Promedio	Crítico	Escenario I	Escenario II	Escenario III
h	% I	% I	% I	% I	% I
2	5	17	3,2	4,1	4,5
3	20	29	4	4,5	4,7
4	3	7,5	1,1	1,8	2,8
5	10	10	3,2	2,1	4,5
6	1,5	3,5	0,6	No dado	1,7
7	6	8	1,3	1	1,6
8	1	2,5	0,4	1	1,1
9	3	5	0,5	0,6	1
10	0	0	> 0,5	> 0,5	> 1,0

Las Figuras 18 a la 22 muestran las corrientes y las tensiones en la barra de la carga para cada uno de los escenarios contemplados.

Figura 18. Señales de corriente y tensión del horno de arco (I.C caso crítico)

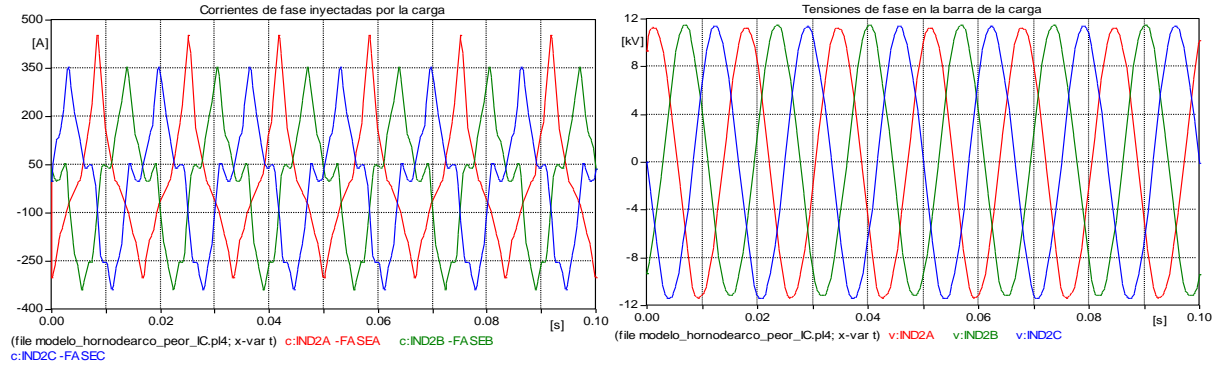


Figura 19. Señales de corriente y tensión del horno de arco (I.C caso promedio)

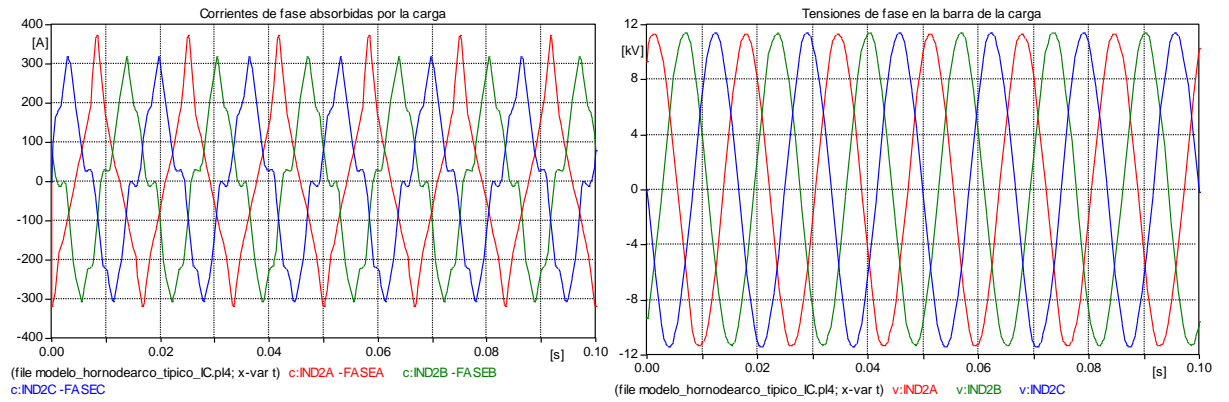


Figura 20. Señales de corriente y tensión del horno (I.C escenario1)

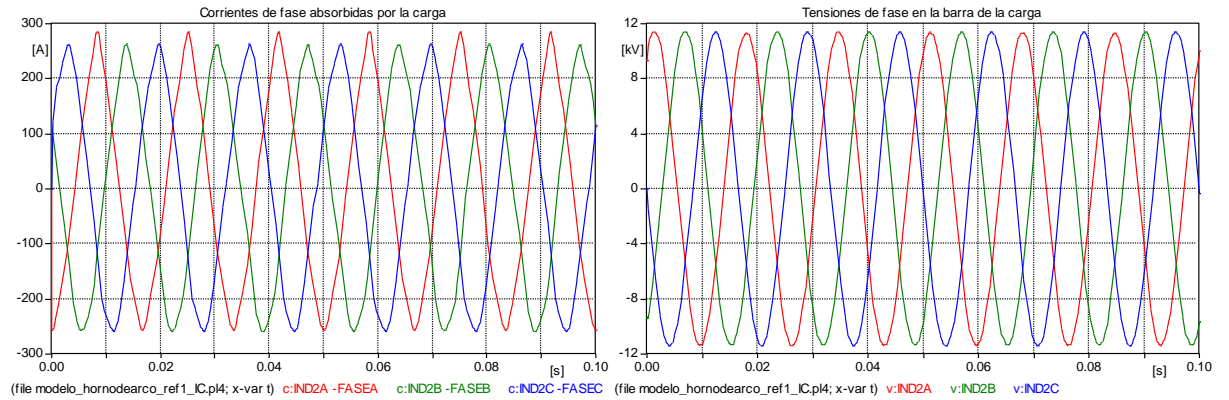


Figura 21. Señales de corriente y tensión del horno (I.C escenario 2)

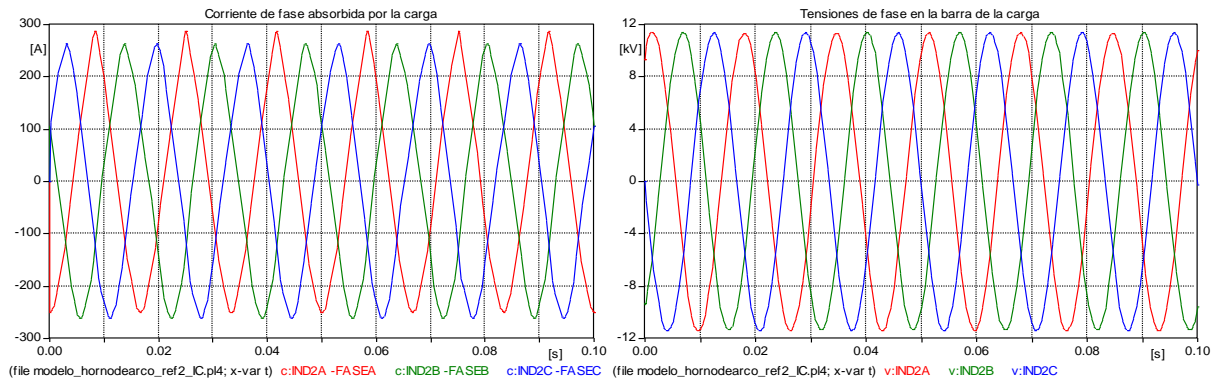
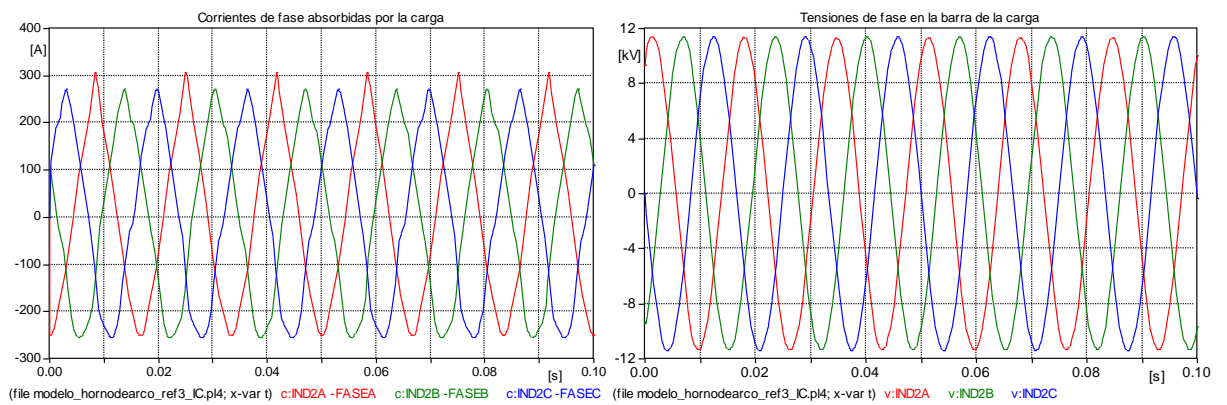


Figura 22. Señales de corriente y tensión del horno (I.C escenario 3)



En las Tablas 8 y 9 se presentan las distorsiones armónicas en tensión y corriente para los cinco espectros considerados para el horno de arco.

Tabla 9. THD correspondiente al horno de arco (I.C. Caso Promedio y Crítico)

Distorsión Armónica Total (THD)				
	Caso crítico		Caso promedio	
Fase A	2,38%	37,32%	1,54%	24,12%
Fase B	2,39%	37,32%	1,55%	24,12%
Fase C	2,39%	37,32%	1,56%	24,12%
	Tensión	Intensidad de Corriente	Tensión	Intensidad de Corriente

Tabla 10. THD correspondiente al horno de arco (I.C. Ref. 1,2 y 3)

Distorsión Armónica Total (THD)						
	Ref. I		Ref. II		Ref. III	
Fase A	0,39%	6,35%	0,43%	6,88%	0,56%	8,89%
Fase B	0,40%	6,35%	0,44%	6,88%	0,57%	8,89%
Fase C	0,41%	6,35%	0,44%	6,88%	0,57%	8,89%
	Tensión	Intensidad de Corriente	Tensión	Intensidad de Corriente	Tensión	Intensidad de Corriente

De las gráficas anteriores se resalta que la intensidad de corriente presenta una deformación en su forma de onda más marcada que la tensión. La corriente se aproxima a una onda triangular y esta característica es más fuerte en los casos “promedio” y “crítico”. Bajo todos los escenarios las tensiones en la barra de alimentación tienden a ser bastante sinusoidales con el modelo de inyección de corriente.

Vale la pena resaltar que el espectro armónico del horno de arco por lo general contiene armónicos pares y que no siempre los componentes armónicos de orden superior son de magnitud inferior a los que los preceden, características que muestran lo particular que es el comportamiento de esta carga.

2.4.2.2 Horno de arco modelo físicamente basado: El arco es una descarga en un gas producida a bajos niveles de tensión y grandes valores de corriente. En los textos especializados el fenómeno suele describirse de la siguiente forma.

“...Estrictamente hablando y desde el punto de vista fenomenológico, el arco eléctrico se puede representar a través de la ecuación del balance de energía. Esto es, el tensor de conductividad por el gradiente eléctrico E (Fenómeno de conducción) más el efecto de convección (tensor de conductividad térmica por el gradiente de temperatura) igualado a la radiación. La ecuación que muestra el balance de energía sería:

$$\gamma E^2 + \nabla k \nabla T = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

Solucionar ésta ecuación, obliga el planteamiento de las condiciones de contorno y frontera (geometría de los electrodos y del canal del plasma), un tratamiento numérico por variedades diferenciales y finalmente aplicar la técnica de Galerkin, método de los elementos finitos...” [8].

Como se puede apreciar en el extracto anterior, las leyes físicas que gobiernan este sistema tienen un grado de complejidad alto. Este fenómeno ha sido objeto de estudio de la Ingeniería Eléctrica desde hace mucho tiempo, por lo que se cuenta con múltiples soluciones para la Ecuación (6). Una de las primeras soluciones que surgió fue la que propuso Ayrton en su modelo. Este se basa en la simplificación de la relación V-i de la carga, considerando a la señal de tensión como una onda cuadrada, aunque con el paso del tiempo se ha demostrado que esta reducción presenta algunos inconvenientes. Existen modificaciones al modelo anterior como la de Mayr y la de Cassie [22].

El modelo físicamente basado del horno de arco se desarrolla a partir de una propuesta encontrada en los casos de la página web de ATPDraw [22], que está basada en el modelo de Cassie. En él se supone que la temperatura en todo el arco eléctrico es constante, al igual que la densidad de corriente, mientras que el campo eléctrico y el área de la sección transversal del arco los consideran variables a lo largo de su longitud. El modelo se desarrolla matemáticamente definiendo la conductancia del arco eléctrico, como proporcional a la sección transversal del arco, por lo que este valor también se considera variable [23].

La Ecuación 7 describe el modelo de Cassie para el arco eléctrico.

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_a} \frac{V_a^2}{U_o^2} - 1 \quad (7)$$

Dónde:

g es la conductancia del arco eléctrico.

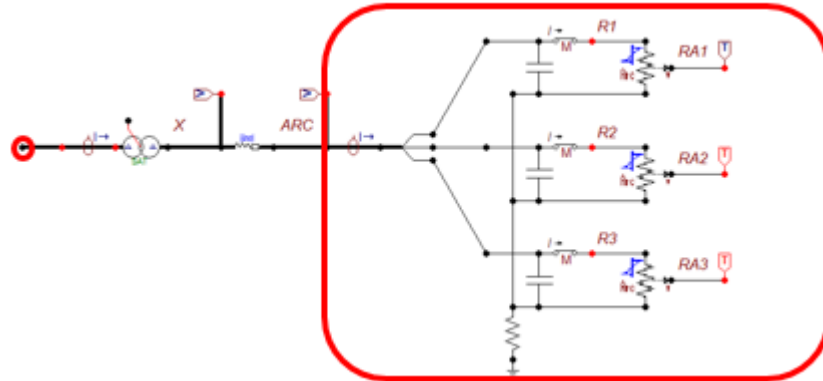
V_a es la tensión del arco eléctrico.

U_o es la tensión del arco en estado estático.

τ_a es la constante de tiempo del arco eléctrico.

En la Figura 23 se muestra la topología del circuito implementado para el modelo físicamente del horno de arco, siendo los elementos resaltados en el recuadro rojo los encargados de modelar el arco eléctrico.

Figura 23. Circuito implementado para el modelo físicamente basado del horno de arco

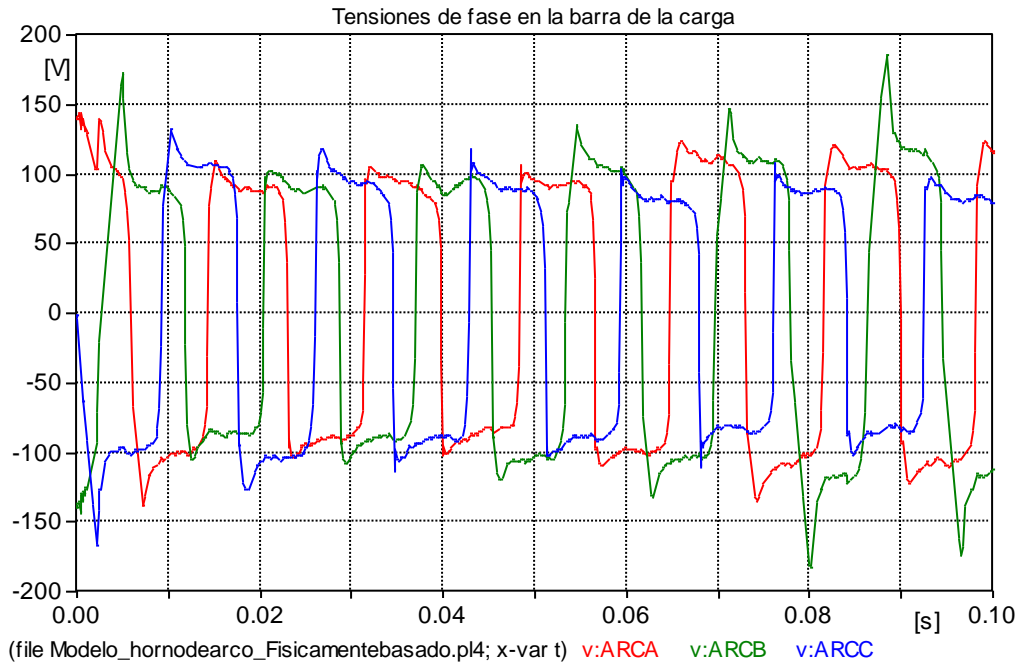


Fuente: F. J. Peñalosa, “ATPDraw Cases,” 2014. [Online]. Available: <http://www.atpdraw.net/showpost.php?id=19&kind=0>

La medición de tensión y corriente se realiza sobre el nodo trifásico que se encuentra encerrado en un círculo rojo de la Figura 23.

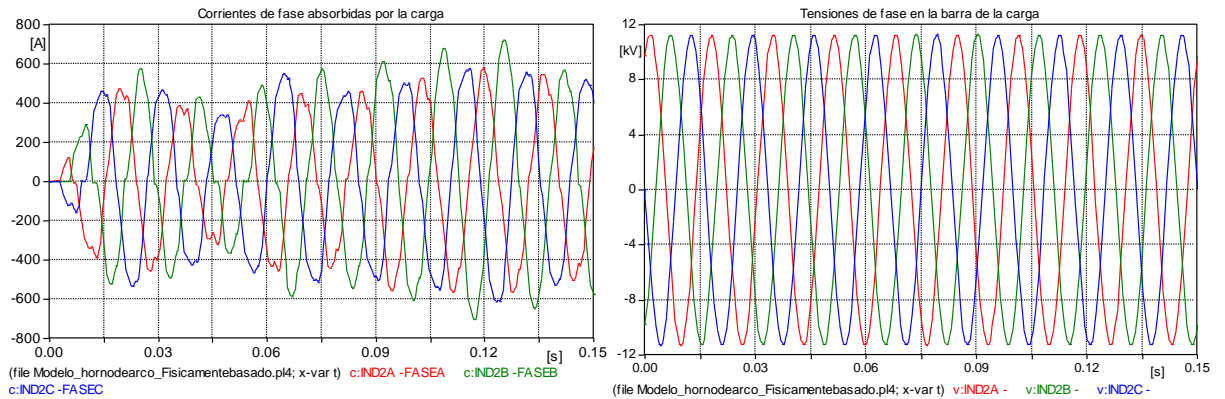
Antes de mostrar los resultados de la simulación se hace hincapié en que los modelos de arco eléctrico se caracterizan por tener una tensión de arco que se debe aproximar a una onda cuadrada [24]. En la Figura 24 se muestra la tensión de arco del modelo que se implementó.

Figura 24. Tensión de arco en el modelo de Cassie medido en el nodo ARC



La tensión que se muestra en la Figura 24 corresponde al nodo ARC del circuito de la Figura 23. La onda de tensión se aproxima bastante a una onda cuadrada, por lo que se considera que el modelo tiene una buena aproximación a la realidad. En la Figura 25 se muestra la corriente absorbida por la carga y la tensión en el nodo donde se conecta.

Figura 25. Señales de corriente y tensión del horno de arco (Modelo de Cassie)



La Tabla 10 contiene la distorsión armónica de la corriente y tensión correspondientes a las ondas de la Figura 25.

Tabla 11. THD correspondiente al horno de arco (Modelo de Cassie)

Distorsión Armónica Total (THD)		
Fase A	0,83%	11,46%
Fase B	0,42%	6,38%
Fase C	0,95%	10,53%
	Tensión	Intensidad de Corriente

La onda de intensidad de corriente presenta un comportamiento altamente variable, con una forma de onda similar a la sinusoidal pero un poco achatada en las puntas y con marcadas diferencias entre fases.

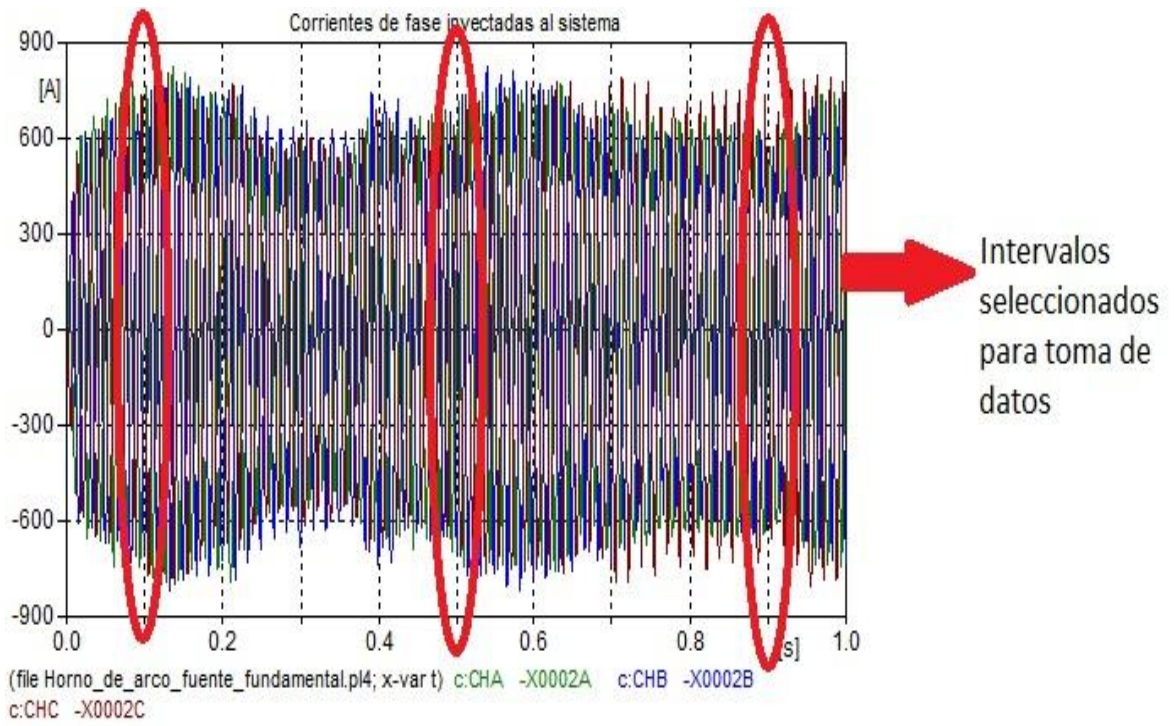
Por otra parte la distorsión armónica total presenta valores similares a los que se obtuvieron con el modelo de inyección de corriente (ver sección 2.4.2.1), especialmente con los espectros de corriente de la referencia III. Sin embargo se nota una marcada diferencia en la variabilidad de las ondas de corriente de los modelos de I.C y el modelo físicamente basado, este último presenta un comportamiento cambiante más cercano al de los hornos de arco.

2.4.2.3 Horno de arco modelo circuito equivalente de Norton: Los parámetros del modelo del circuito equivalente de Norton se definen con el mismo procedimiento que se siguió para el convertidor trifásico de seis pulsos y que se explicó anteriormente.

El modelo físicamente basado del horno de arco presenta una corriente variable, por lo que no existe claridad sobre el periodo de la onda que se debía tomar para descomponer en sus respectivas componentes armónicas y así obtener los parámetros del circuito equivalente de Norton. Para solucionar ese problema se seleccionaron aleatoriamente tres puntos en la ventana de simulación sobre los que se realizaría el proceso. Posteriormente se obtiene el promedio de los valores encontrados para obtener los parámetros del circuito que se implementan en el modelo equivalente de Norton para el horno de arco.

Los intervalos seleccionados fueron [0.092 [s] - 0.108 [s]], [0.492 [s] - 0.508 [s]] y [0.892 [s] - 0.908 [s]]. De esta forma se abarco toda la ventana de simulación con puntos equidistantes. En la Figura 26 se muestra la onda de corriente del horno de arco y se demarcan los puntos para el análisis.

Figura 26. Puntos seleccionados para la toma de datos para la obtención de parámetros del modelo del circuito equivalente de Norton



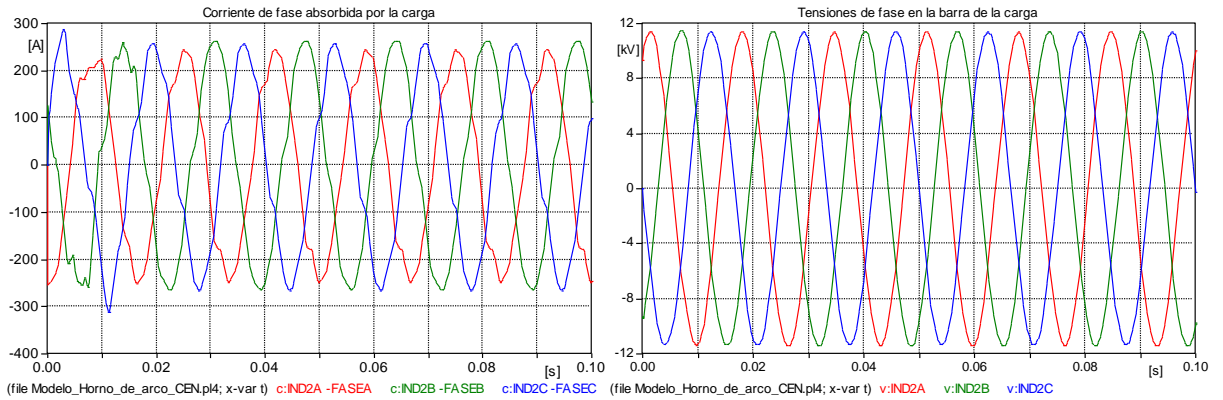
Después de realizar el procedimiento descrito anteriormente se obtuvieron los parámetros mostrados en la Tabla 11, usados en la implementación del modelo del circuito equivalente de Norton para el horno de arco.

Tabla 12. Caracterización del horno de arco para el modelo del circuito equivalente de Norton

Horno de arco modelo del circuito equivalente de Norton				
Fase A				
H	Magnitud lh1	Ángulo lh1	Magnitud Yh	Ángulo Yh
1	I1A	86,77	0,00117	5,67
2	2,24	-7,911	0,00819	32,19
3	3,45591	107,494	0,00877	25,348
4	0,54496	46,673	0,00685	65,181
5	5,46852	-148,647	0,00174	31,822
6	0,51841	-15,197	0,00528	-47,389
7	3,40622	35,883	0,00178	-58,08
8	0,18234	7,509	0,00826	114,354
9	1,03951	-83,396	0,00143	156,096
10	0,35507	-88,724	0,00242	0,522
Fase B				
H	Magnitud lh1	Ángulo lh1	Magnitud Yh	Ángulo Yh
1	I1B	95,72	0,0013	-43,222
2	1,41571	25,774	0,00796	-0,267
3	3,09509	-53,754	0,00375	64,179
4	0,52346	-6,427	0,01742	0,142
5	4,7687	-98,681	0,00388	-12,209
6	0,43621	-85,265	0,00465	-7,23
7	2,9747	-18,508	0,00941	109,457
8	0,25117	8,309	0,0013	7,946
9	0,73237	12,034	0,0086	74,863
10	0,26328	1,134	0,00071	37,266
Fase C				
H	Magnitud lh1	Ángulo lh1	Magnitud Yh	Ángulo Yh
1	I1B	93,998	0,00131	-69,423
2	1,83648	-12,107	0,00904	81,908
3	5,18788	33,694	0,00763	10,733
4	0,3779	-15,569	0,00374	-11,531
5	7,2496	-104,493	0,00536	32,359
6	0,38014	-79,58	0,00294	-52,436
7	2,50958	-15,699	0,0061	99,711
8	0,21595	51,408	0,00337	-0,78
9	1,15584	8,325	0,00956	-41,006
10	0,27952	-30,71	0,005	-39,714

En Figura 27 se muestran la corriente inyectada por la carga y la tensión en la barra en que se conecta.

Figura 27. Señales de corriente y tensión del horno de arco (C.E.N)



La Tabla 12 muestra las distorsiones armónicas correspondientes a las ondas de la Figura 27.

Tabla 13. THD correspondiente al horno de arco (C.E.N.)

Distorsión Armónica Total (THD)		
Fase A	0,51%	7,97%
Fase B	0,43%	6,33%
Fase C	0,60%	9,48%
	Tensión	Intensidad de Corriente

La forma de la onda de corriente es más aproximada a la esperada que las que se presentaron con el modelo de inyección de corriente. Sin embargo estos dos modelos presentan un comportamiento muy estable, una característica que no tienen los hornos de arco. De esta forma se corrobora que el modelo físicamente basado del horno de arco presenta el comportamiento más próximo a la realidad.

2.4.3 Variador de frecuencia. El variador de frecuencia es otra de las cargas de uso generalizado en la industria. Se implementa fundamentalmente en el control de velocidad en motores. Debido a su topología interna es una fuente significativa de distorsión armónica.

2.4.3.1 Variador de frecuencia modelado por inyección de corriente. La caracterización armónica del variador de frecuencia se desarrolla con base en el trabajo realizado en *“Análisis de comportamiento armónico en plantas húmedas”* [25].

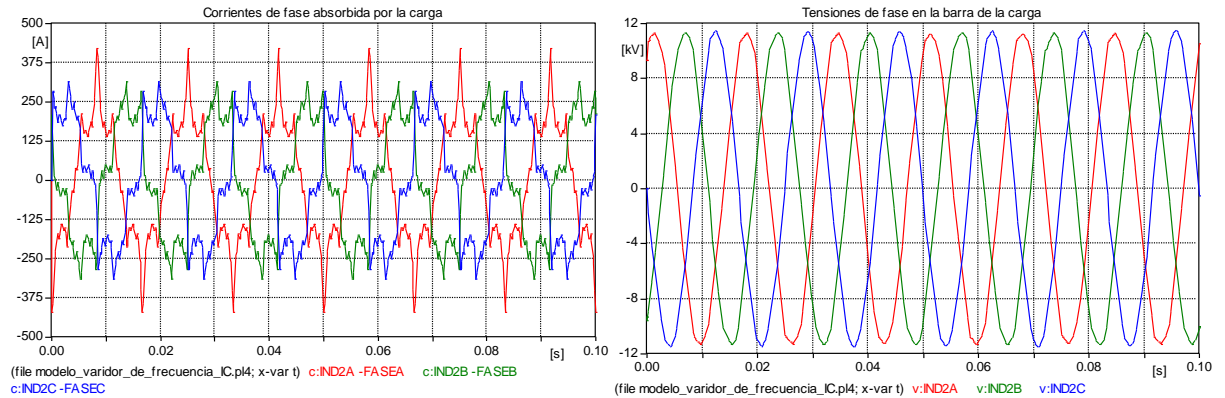
En la Tabla 13 se muestran las componentes armónicas descritas en el estudio citado anteriormente.

Tabla 14. Caracterización del variador de frecuencia modelo de inyección de corriente

Caracterización armónica del variador de frecuencia	
H	% I
5	20
7	14,3
11	9,1
13	7,7
17	5,9
23	4,3
25	4

En la Figura 28 se presenta la intensidad de corriente y tensión de la carga modelada por inyección de corrientes.

Figura 28. Señales de corriente y tensión del variador de frecuencia (I.C)



En la Tabla 14 se presentan las distorsiones armónicas en tensión y corriente que presenta el modelo de inyección de corriente del variador de frecuencia.

Tabla 15. THD correspondiente al variador de frecuencia (I.C.)

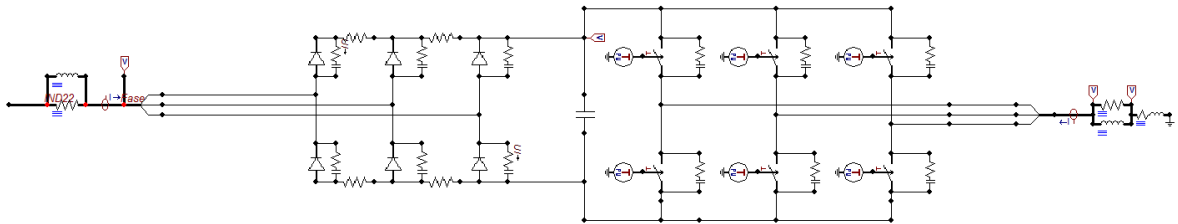
Distorsión Armónica Total (THD)		
Fase A	1,84%	28,56%
Fase B	1,84%	28,56%
Fase C	1,84%	28,56%
	Tensión	Intensidad de Corriente

En la Figura 28 la corriente de la fase A presenta valores pico que superan los 375 [A], mientras las fases restantes tiene comportamientos similares. Las formas de onda son bastantes cercanas a las esperadas.

2.4.3.2 Variador de frecuencia modelo basado en electrónica de potencia: El variador de frecuencia se implementa con base en la topología encontrada en la literatura de electrónica de potencia [18], con el uso de los componentes disponibles en las librerías de ATPDraw.

En la Figura 29 se muestra el circuito que se usó para el modelo.

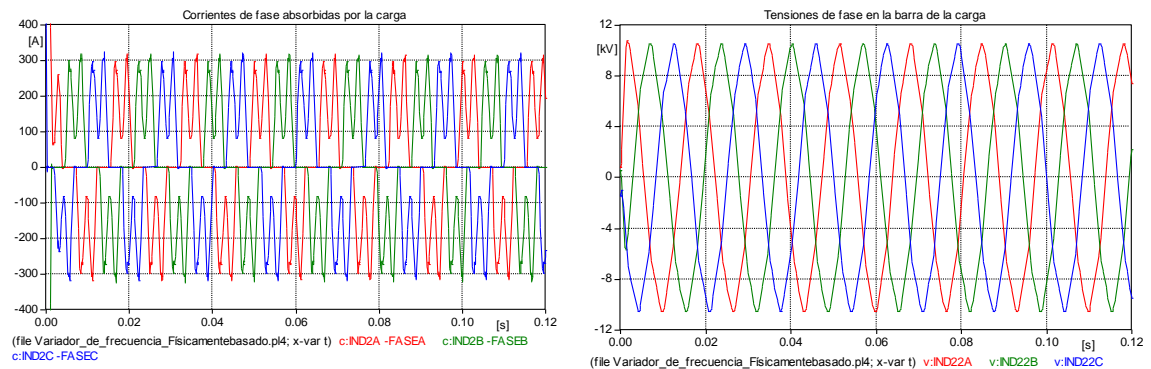
Figura 29. Circuito implementado para el modelo basado en electrónica de potencia del variador de frecuencia



La medición de corriente y tensión se realizó en el nodo que se encuentra en el extremo izquierdo del circuito mostrado en la Figura 29.

En la Figura 30 se presentan la corriente que consume la carga y la tensión en la barra en el que se conecta la carga.

Figura 30. Señales de corriente y tensión del variador de frecuencia (modelo físicamente basado)



La Tabla 15 contiene la distorsión de las ondas de la Figura 30.

Tabla 16. THD correspondiente al variador de frecuencia (modelo físicamente basado)

Distorsión Armónica Total (THD)		
Fase A	3,31%	57,61%
Fase B	3,33%	57,63%
Fase C	3,33%	57,66%
	Tensión	Intensidad de Corriente

La señal de corriente presenta una forma de onda aproximada a la teórica [26], con unos picos bastante pronunciados que son producidos por la conmutación de los elementos semiconductores que componen el circuito.

Se presentan valores de distorsión armónica total elevados que son típicos de este tipo de cargas.

2.4.3.3 Variador de frecuencia modelado con el circuito equivalente de Norton: El modelo del circuito equivalente de Norton para el variador de frecuencia se realizó siguiendo el mismo procedimiento descrito para el convertidor trifásico de seis pulsos.

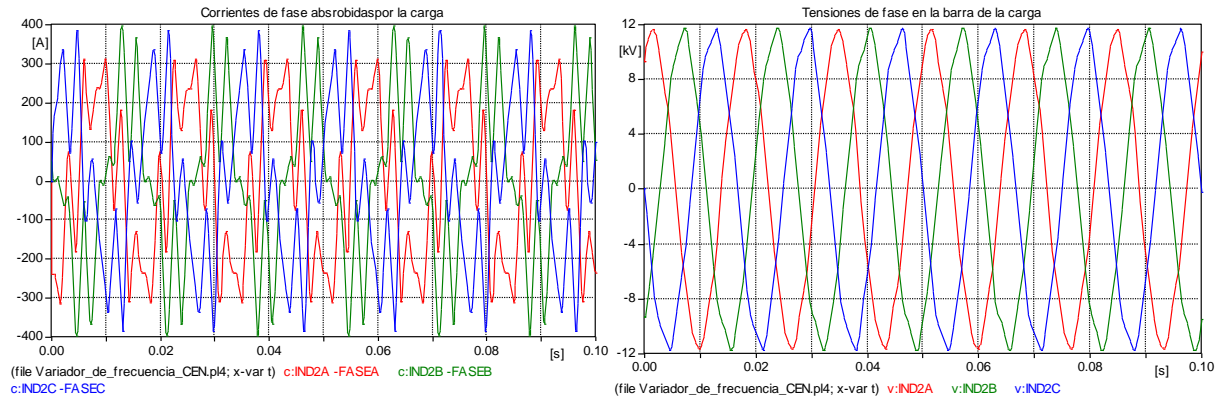
En la Tabla 16 se muestran los resultados del procedimiento. Las componentes armónicas de corrientes se dan como porcentajes de la componente fundamental, y las admitancias en Siemens.

Tabla 17. Caracterización del variador de frecuencia (CEN)

Variador de frecuencia modelo del circuito equivalente de Norton				
Fase A				
h	Magnitud I _{h1}	Ángulo I _{h1}	Magnitud Y _h	Ángulo Y _h
1	I _{1A}	-22,784	0,00024	69,684
5	46,441	45,102	0,00026	-27,484
7	33,092	173,84	0,00080	-116,219
Fase B				
h	Magnitud I _{h1}	Ángulo I _{h1}	Magnitud Y _h	Ángulo Y _h
1	I _{1B}	-19,99	0,00026	136,157
5	45,107	26,679	0,00073	113,637
7	33,109	147,98	0,00090	-116,671
Fase C				
h	Magnitud I _{h1}	Ángulo I _{h1}	Magnitud Y _h	Ángulo Y _h
1	I _{1C}	-25,953	0,00018	-94,584
5	47,264	28,798	0,00008	-32,133
7	32,701	150,88	0,00014	144,806

En la Figura 31 se muestra la corriente que consume la carga y la tensión en la barra a la que se conecta.

Figura 31. Señales de corriente y tensión del variador de frecuencia (C.E.N)



En la Tabla 17 se presenta la distorsión armónica total correspondiente a la tensión y corriente de la Figura 31.

Tabla 18. THD correspondiente al variador de frecuencia (C.E.N.)

Distorsión Armónica Total (THD)		
Fase A	3,68%	57,64%
Fase B	3,62%	56,65%
Fase C	3,71%	57,42%
	Tensión	Intensidad de Corriente

La intensidad de corriente presenta un alto grado de distorsión, con valores por encima del 50% que se deben a la conmutación del variador de frecuencia.

2.4.4 Varias cargas residenciales conectadas conjuntamente. Actualmente las cargas residenciales representan una parte importante de la contaminación armónica que se inyecta a la red. Cuando se consideran individualmente no son cargas significativas para un sistema de distribución, sin embargo la proliferación de cargas como computadores, televisores, lámparas fluorescentes entre otras, hacen que este tipo de fuentes de contaminación armónica sea significativa.

2.4.4.1 Varias cargas residenciales conectadas conjuntamente modeladas por inyección de corriente: El modelado de cargas que actúan conjuntamente es aún hoy en día materia de investigación. No se han establecido modelos que permitan predecir con fidelidad el comportamiento de un grupo de cargas bajo cualquier escenario.

Se han hecho trabajos de caracterización de cargas residenciales, en los que se incluyen varios dispositivos operando conjuntamente. Lo que permite el modelado de estas con el modelo de inyección de corrientes. Sin embargo con los desarrollos que se disponen en la actualidad no es posible usar otros modelos, como el del circuito equivalente de Norton o el modelo físicamente basado.

Bajo el escenario anteriormente expuesto se hace inviable realizar la validación de modelos con varias cargas residenciales actuando conjuntamente. En este trabajo se presenta el modelado de esta carga con el modelo de inyección de corriente, pero no se tiene en cuenta para el análisis posterior.

En la Tabla 18 se muestra la caracterización armónica usada en la implementación del modelo. Esta información se tomó de *“Contaminación armónica producida por cargas no lineales de baja potencia: modelo matemático y casos prácticos”* [2]. Para obtenerla el autor realizó trabajos de caracterización armónica de cargas con, un televisor a color de 20 pulgadas, una computador, tres

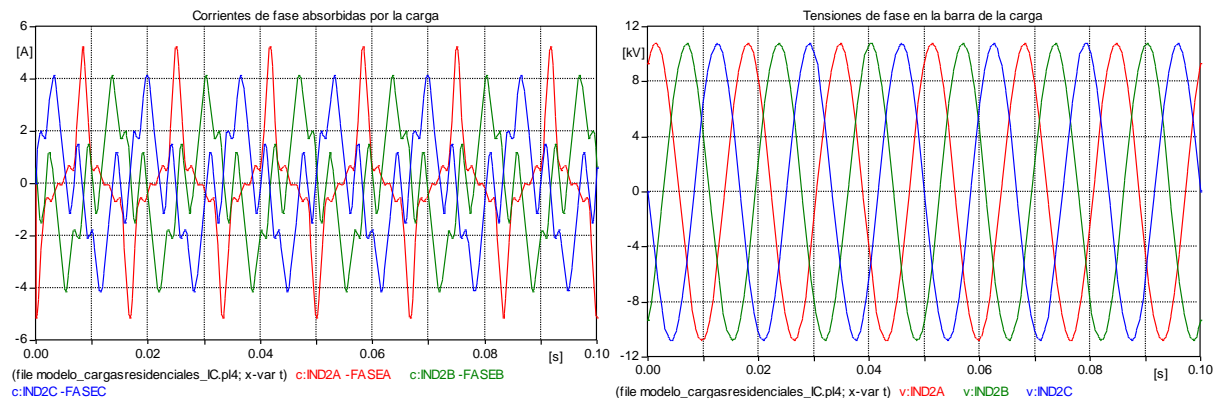
lámparas fluorescentes (con una potencia nominal de 22 [W] cada una) y un mini-componente, conectados conjuntamente.

Tabla 19. Caracterización de varias cargas residenciales conectadas conjuntamente utilizando el modelo de inyección de corriente

Caracterización armónica de varias cargas residenciales	
H	% I
2	1,190
3	52,380
4	0,400
5	34,920
6	0,400
7	19,050

En la Figura 32 se muestra la corriente inyectada al sistema por la carga y la tensión en el punto de conexión.

Figura 32. Señales de corriente y tensión de varias cargas residenciales conectadas simultáneamente (I.C)



En la Tabla 19 se presentan la distorsión armónica en tensión y corriente de varias cargas residenciales conectadas conjuntamente.

Tabla 20. THD correspondiente a varias cargas residenciales conectadas simultáneamente

Distorsión Armónica Total (THD)		
Fase A	0,04%	65,78%
Fase B	0,05%	65,78%
Fase C	0,04%	65,78%
	Tensión	Intensidad de Corriente

En la Figura 32 se aprecia que la carga es una fuente importante de contaminación armónica para el sistema. Teniendo en cuenta su masificación en las instalaciones residenciales actuales, se puede concluir que el estudio del efecto de cargas residenciales agregadas cada vez va a tener mayor relevancia en los sistemas de distribución.

2.5 RESUMEN CAPÍTULO DOS

En el Capítulo 2 se realizó el análisis individual de los modelos de inyección de corriente, circuito equivalente de Norton y físicamente basado, se destacaron algunos detalles relevantes. La Tabla 20 muestra los modelos de carga implementados y algunos datos de interés.

Tabla 21. Cargas implementadas en el estudio

Carga	Modelo	Referencia
Convertidor trifásico de 6 pulsos	I.C porcentual	[7]
Convertidor trifásico de 6 pulsos	I.C medido	[7]
Convertidor trifásico de 6 pulsos	Modelo físicamente basado	[17]
Convertidor trifásico de 6 pulsos	C.E.N	[Autores]
Horno de arco	I.C Medido peor caso	[7]
Horno de arco	I.C medido caso típico	[7]
Horno de arco	I.C porcentual caso 1	[20]
Horno de arco	I.C porcentual caso 2	[20]
Horno de arco	I.C porcentual caso 3	[20]
Horno de arco	Modelo físicamente basado	[21]
Horno de arco	C.E.N	[Autores]
Variador de frecuencia	I.C medido	[24]
Variador de frecuencia	C.E.N	[Autores]

Para el análisis posterior de este trabajo, se tomará como referente a los modelos físicamente basados. A partir éstos se obtendrán los modelos del circuito equivalente de Norton y el espectro para el modelo de inyección de corriente, con el objetivo de tener un marco comparativo entre los tres modelos.

3. IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE CARGA

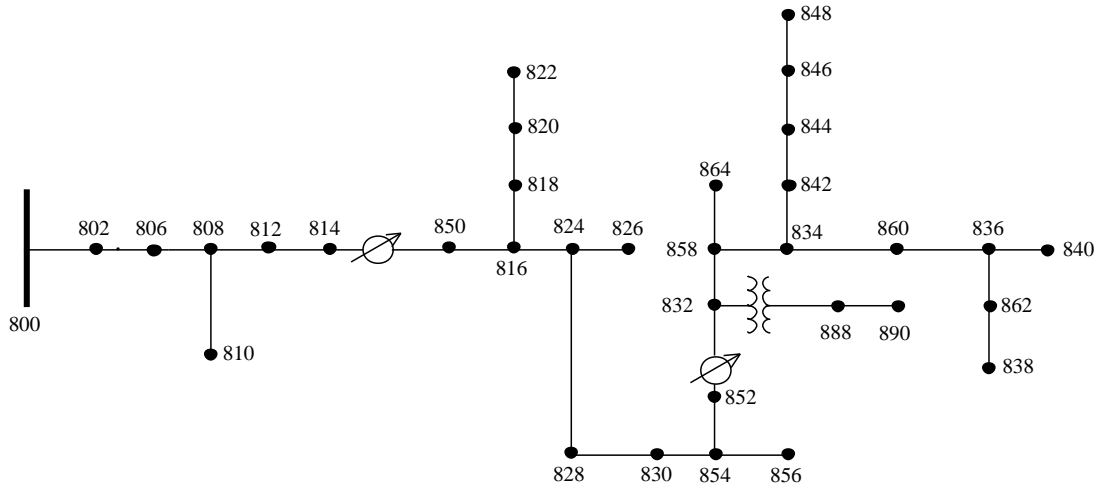
En este capítulo se analizan los modelos expuestos en el Capítulo 2 bajo las mismas condiciones de operación. El sistema base es mucho más robusto, cuenta con una cantidad importante de cargas lineales. Los modelos se estudian en condiciones normales de operación como con la presencia de hundimientos de tensión.

3.1 SISTEMA BASE PARA EL ANÁLISIS

A continuación se describe la topología del sistema 34 nodos del IEEE [9], que se usa para realizar la implementación de los diferentes modelos de carga: modelo de inyección de corrientes, circuito equivalente de Norton y el modelo físicamente basado.

En la Figura 33 se presenta el diagrama unifilar del sistema en el que se enumeran los nodos que lo componen y algunos detalles relevantes.

Figura 33. Diagrama unifilar del sistema de pruebas de 34 nodos



Fuente: Computing and economics committee IEEE power engineering society. Power system analysis, "IEEE-34 Node Test Feeder."

El sistema está compuesto por una fuente de tensión ideal, con una magnitud de 24.9 [KV] de línea, en el nodo 800. Un transformador reductor de tensión, con relación de transformación de 5.986, cuyo devanado primario se encuentra conectado al nodo 832 y el secundario al nodo 888. Además contiene 24 cargas de tipo R-L, en configuraciones monofásica, bifásica y trifásica, distribuidas a través de los 34 nodos.

3.2 PRUEBA PARA EVALUACIÓN DE MODELOS DE CARGA

Los modelos de cargas no lineales implementados en el sistema de 34 nodos se llevan a cuatro escenarios diferentes, en los cuales se estudia su comportamiento frente a variaciones en la tensión de alimentación. A continuación se describen las condiciones a las que se exponen los modelos.

- *Fuente de alimentación sinusoidal:* Se alimenta el sistema de 34 nodos a una tensión sinusoidal de 24.9 [kV] de línea sin distorsión armónica.
- *Fuente de alimentación distorsionada:* Se alimenta el sistema de prueba con una fuente de tensión con distorsión armónica. La fuente entrega una tensión de línea de 24.9 [kV] a 60 [Hz] e inyecta armónicas a frecuencias de 180 [Hz], 300 [Hz] y 420 [Hz] con tensiones de línea de 747 [V], 249 [V] y 124.5 [V] respectivamente.
- *Caída de tensión del 5%:* Se alimenta el sistema con una tensión de línea de 23.655 [kV] sin distorsión armónica.
- *Elevación de tensión del 5%:* Se alimenta el sistema con una tensión de línea de 26.145 [kV] sin distorsión armónica.

Se realiza comparación entre escenarios, tomando como base al de fuente de alimentación ideal y entre modelos, en donde se toma como referente a los modelos físicamente basados, debido a que en el análisis del capítulo anterior mostraron los resultados más próximos a los teóricos para cada tipo de carga. La comparación entre escenarios permite ver la variabilidad de la carga frente cambios en la tensión del sistema de alimentación, mientras que con el segundo análisis se verifica la diferencia en el comportamiento de los modelos bajo las mismas condiciones en el sistema de distribución base.

La comparación se realiza valiéndose de la distorsión armónica total (THD) en tensión y corriente. De esta forma se cuenta con indicadores tanto de la contaminación que genera la carga, como de la respuesta del sistema frente este fenómeno. La distorsión armónica total (THD) es un índice aceptado para evaluar la contaminación armónica de una forma bastante completa. La mayoría de las cargas no lineales presentan valores de THD en la corriente por debajo del 50%, sin embargo, algunas cargas como fuentes de potencia conmutadas, pueden llegar a presentar valores por encima del 100%[27].

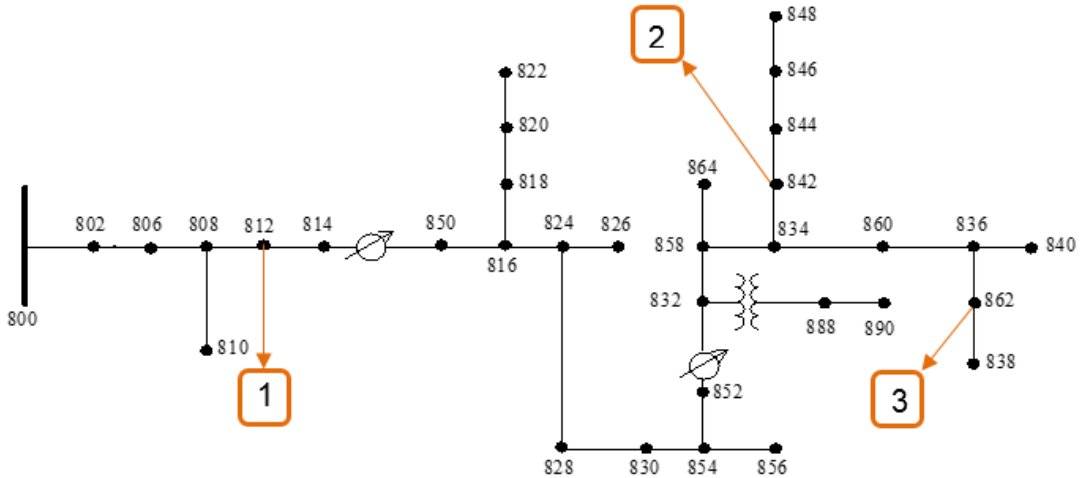
3.3 UBICACIÓN DE LOS MODELOS DE CARGA Y MEDIDORES

En cada una de los cuatro escenarios anteriormente expuestos se conecta una carga armónica al sistema de 34 nodos del IEEE, de la que se obtienen los valores de THD para la corriente absorbida y para la tensión en el punto de conexión. Este procedimiento se repite rotando la carga por los nodos 812, 842 y 862, con lo que se busca obtener datos sobre el efecto de contaminación armónica en la cabecera, centro y cola del sistema.

El estudio se realiza con los tres modelos de carga armónica considerados, (modelos de inyección de corriente, modelo del circuito equivalente de Norton y el modelo físicamente basado), que se implementan para modelar el convertidor trifásico de seis pulsos y el variador de frecuencia en el sistema de 34 nodos. Para el análisis con el horno de arco fue necesario recurrir al sistema de tres nodos que se usó en el capítulo 2, debido a que el modelo del horno de Cassie requiere de corrientes muy elevadas para el sistema de 34 nodos, sin embargo el procedimiento que se sigue es similar, la única diferencia es que en este caso la carga solo se conecta al nodo IND2.

En la Figura 34 se muestran los puntos de conexión de los modelos de carga en el sistema de 34 nodos del IEEE.

Figura 34. Ubicación de modelos y medidores de intensidad de corriente para la carga en el Sistema IEEE de 34 nodos



Con el fin de obtener argumentos para la comparación de los modelos fue necesario implementarlos bajo las mismas condiciones, por lo que los modelos de inyección de corrientes y del circuito equivalente de Norton se construyeron a partir del modelo físicamente basado para el análisis del Capítulo 3.

Esto se consiguió llevando los modelos físicamente basados de cada una de las cargas a la tensión normal de operación de los sistemas en los que se iban a estudiar, posteriormente se realizó la obtención de los modelos del circuito equivalente de Norton para cada carga con un procedimiento idéntico al especificado en el capítulo 2. El espectro armónico usado en la implementación del modelo de inyección de corrientes fue el mismo que se obtuvo para el circuito equivalente de Norton en cada caso.

En las Tabla 21 y 22 se muestran los resultados obtenidos para la implementación de los modelos de inyección de corriente y del circuito equivalente de Norton, para el convertidor trifásico de seis pulsos y el variador de frecuencia. Se hace hincapié en que el horno de arco se implementa con los datos de la Tabla 11 como se hizo en el capítulo 2, debido a que el sistema de prueba no se cambia para esta carga.

Tabla 22. Caracterización del convertidor trifásico de seis pulsos para el sistema de 34 nodos

Convertidor trifásico de 6 pulsos modelo del circuito equivalente de Norton				
Fase A				
H	Magnitud Ih1	Ángulo Ih1	Magnitud Yh	Ángulo Yh
1	3,922	-18,961	0,00010	22,583
5	23,688	75,384	0,00028	153,039
7	8,538	33,266	0,00084	-177,899
11	8,656	129,600	0,00014	-109,859
Fase B				
H	Magnitud Ih1	Ángulo Ih1	Magnitud Yh	Ángulo Yh
1	3,902	-20,438	0,00020	22,583
5	23,412	106,529	0,00023	150,129
7	7,782	70,287	0,00010	-188,781
11	8,262	140,734	0,00010	-105,112
Fase C				
H	Magnitud Ih1	Ángulo Ih1	Magnitud Yh	Ángulo Yh
1	3,849	-30,214	0,00020	20,845
5	23,582	70,376	0,00003	140,476
7	8,525	35,712	0,00001	-160,521
11	8,396	133,836	0,00002	-99,549

Tabla 23. Caracterización del variador de frecuencia para el sistema de 34 nodos

Variador de frecuencia modelo del circuito equivalente de Norton				
Fase A				
h	Magnitud Ih1	Ángulo Ih1	Magnitud Yh	Ángulo Yh
1	9,960	-18,961	0,00020	20,762
5	25,928	87,695	0,00030	101,08
7	6,160	162,84	0,00090	-179,84
Fase B				
h	Magnitud Ih1	Ángulo Ih1	Magnitud Yh	Ángulo Yh
1	10,530	-19,99	0,00026	23,152
5	33,754	77,336	0,00060	110,533
7	14,435	162,27	0,00090	-158,680
Fase C				
h	Magnitud Ih1	Ángulo Ih1	Magnitud Yh	Ángulo Yh
1	10,650	-24,863	0,00018	17,691
5	33,361	65,912	0,00049	1044,912
7	14,628	164,386	0,00075	-166,386

3.4 ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE CARGA

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en cada caso de estudio a partir de los cuales se extraen conclusiones importantes.

3.4.1 Convertidor de seis pulsos. El convertidor trifásico de seis pulsos se somete al procedimiento descrito en la sección 3.2. En la Tablas 23 se presenta el THD en corriente cada uno de los nodos por los que se rota la carga.

Tabla 24. Comportamiento de la distorsión armónica total en corriente (THD) de los modelos del convertidor trifásico de seis pulsos

					Escenarios			
					Fuente ideal	Fuente distorsionada	Tensión -5%	Tensión +5%
Modelos Implementados	Inyección de corriente	Puntos de medición	812	Fase A	26,39%	26,39%	26,39%	26,39%
				Fase B	26,26%	26,26%	26,26%	26,26%
				Fase C	26,62%	26,62%	26,62%	26,62%
			842	Fase A	26,39%	26,39%	26,39%	26,39%
				Fase B	26,26%	26,26%	26,26%	26,26%
				Fase C	26,62%	26,62%	26,62%	26,62%
			862	Fase A	26,39%	26,39%	26,39%	26,39%
				Fase B	26,26%	26,26%	26,26%	26,26%
				Fase C	26,62%	26,62%	26,62%	26,62%
	Equivalente de Norton	Puntos de medición	812	Fase A	26,89%	25,72%	27,08%	26,69%
				Fase B	25,05%	24,33%	26,45%	23,73%
				Fase C	25,27%	24,60%	25,32%	25,21%
			842	Fase A	24,39%	23,93%	24,47%	24,31%
				Fase B	26,73%	26,19%	28,09%	25,43%
				Fase C	19,58%	18,86%	19,88%	19,28%
			862	Fase A	28,08%	27,06%	28,25%	27,90%
				Fase B	27,08%	26,74%	28,46%	25,77%
				Fase C	25,27%	24,97%	25,31%	25,23%
	Físicamente basado	Puntos de medición	812	Fase A	25,45%	25,79%	25,45%	25,45%
				Fase B	25,84%	25,67%	25,84%	25,84%
				Fase C	26,34%	26,22%	26,34%	26,34%
			842	Fase A	25,03%	25,36%	25,03%	25,03%
				Fase B	25,33%	25,16%	25,33%	25,33%
				Fase C	26,68%	26,56%	26,68%	26,68%
862			Fase A	25,01%	25,35%	25,01%	25,01%	
			Fase B	25,31%	25,15%	25,31%	25,31%	
			Fase C	26,68%	26,56%	26,68%	26,68%	

En la Tabla 24 se muestran los errores relativos porcentuales de cada medición, con respecto a su equivalente en el escenario con fuente de alimentación sinusoidal. En la ecuación 8 se presenta la expresión para el cálculo que se usó para encontrar el error.

$$\varepsilon_i = \frac{THD_{i \text{ fuente ideal}} - THD_{i \text{ otro escenario}}}{THD_{i \text{ fuente ideal}}} * 100 \quad (8)$$

Tabla 25. Error relativo porcentual del THD en corriente con respecto al escenario con fuente ideal para los modelos del convertidor trifásico de seis pulsos

				Error relativo con respecto a la fuente ideal			
				Escenarios			
				Fuente distorsionada	Tensión -5%	Tensión -5%	
Modelos Implementados	Inyección de corrientes	Puntos de medición	802	Fase A	0,00%	0,00%	0,00%
				Fase B	0,00%	0,00%	0,00%
				Fase C	0,00%	0,00%	0,00%
			828	Fase A	0,00%	0,00%	0,00%
				Fase B	0,00%	0,00%	0,00%
				Fase C	0,00%	0,00%	0,00%
			836	Fase A	0,00%	0,00%	0,00%
				Fase B	0,00%	0,00%	0,00%
				Fase C	0,00%	0,00%	0,00%
	Equivalente de Norton	Puntos de medición	802	Fase A	4,35%	0,71%	0,75%
				Fase B	2,86%	5,60%	5,23%
				Fase C	2,65%	0,21%	0,21%
			828	Fase A	1,91%	0,32%	0,33%
				Fase B	2,01%	5,09%	4,86%
				Fase C	3,64%	1,57%	1,53%
			836	Fase A	3,62%	0,60%	0,65%
				Fase B	1,29%	5,06%	4,84%
				Fase C	1,18%	0,17%	0,17%
	físicamente basado	Puntos de medición	802	Fase A	1,35%	0,00%	0,00%
				Fase B	0,68%	0,00%	0,00%
				Fase C	0,44%	0,00%	0,00%
			828	Fase A	1,30%	0,00%	0,00%
				Fase B	0,65%	0,00%	0,00%
				Fase C	0,45%	0,00%	0,00%
			836	Fase A	1,33%	0,00%	0,00%
				Fase B	0,64%	0,00%	0,00%
				Fase C	0,45%	0,00%	0,00%

En la Tabla 25 se presentan los errores relativos porcentuales del THD en corriente con respecto al modelo físicamente basado y en la ecuación 9 la expresión para el cálculo que se usó para obtener estos errores.

$$\varepsilon_i = \frac{THD_{i\text{ modelo físico}} - THD_{i\text{ otro modelo}}}{THD_{i\text{ modelo físico}}} * 100 \quad (9)$$

Tabla 26. Error relativo porcentual del THD en corriente con respecto al modelo físicamente basado para los modelos del convertidor trifásico de seis pulsos

				Escenarios				
				Fuente ideal	Fuente distorsionada	Tensión -5%	Tensión +5%	
Modelos Implementados	Inyección decorriente	Puntos de Medición	812	Fase A	3,70%	2,32%	3,70%	3,70%
				Fase B	1,60%	2,30%	1,60%	1,60%
				Fase C	1,08%	1,53%	1,08%	1,08%
			842	Fase A	5,42%	4,07%	5,42%	5,42%
				Fase B	3,67%	4,35%	3,67%	3,67%
				Fase C	0,22%	0,23%	0,22%	0,22%
			862	Fase A	5,49%	4,11%	5,49%	5,49%
				Fase B	3,73%	4,40%	3,73%	3,73%
				Fase C	0,20%	0,25%	0,20%	0,20%
	Equivalente de Norton	Puntos de medición	812	Fase A	5,69%	0,26%	6,44%	4,90%
				Fase B	3,08%	5,21%	2,34%	8,16%
				Fase C	4,06%	6,19%	3,86%	4,27%
			842	Fase A	2,56%	5,65%	2,24%	2,88%
				Fase B	5,54%	4,09%	10,91%	0,41%
				Fase C	26,63%	28,98%	25,48%	27,75%
			862	Fase A	12,25%	6,77%	12,93%	11,53%
				Fase B	7,00%	6,31%	12,42%	1,82%
				Fase C	5,27%	5,96%	5,11%	5,44%

En la tabla 26 se presentan las desviaciones estándar de los errores de la tabla anterior. En la ecuación 10 su respectiva expresión para el cálculo.

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^9 (X_{i \text{ escenario } j} - X_{\text{escenario } j})^2}}{9} \quad (10)$$

Tabla 27. Desviación estándar de los errores del THD en corriente con respecto al modelo físicamente basado del convertidor trifásico de seis pulsos

		Desviación Estándar de los escenarios			
		Escenarios			
		Fuente Distorsionada	Tensión -5%	Tensión -5%	Tensión +5%
Modelos Implementados	Inyección de corrientes	2,07%	1,70%	2,07%	2,07%
	Equivalente de Norton	7,54%	8,21%	7,42%	8,31%

En las Tablas 27, 28, 29 y 30 se presentan resultados equivalentes de las cuatro Tablas anteriores ahora para el THD en tensión.

Tabla 28. Comportamiento de la distorsión armónica total en tensión (THD) de los modelos del convertidor trifásico de seis pulsos

				Escenarios				
				Fuente ideal	Fuente distorsionada	Tensión -5%	Tensión +5%	
Modelos Implementados	Inyección de corriente	Puntos de Medición	812	Fase A	1,78%	3,15%	1,80%	1,77%
				Fase B	0,99%	3,19%	1,02%	0,98%
				Fase C	1,17%	3,31%	1,18%	1,16%
			842	Fase A	2,40%	3,42%	2,47%	2,35%
				Fase B	1,67%	3,36%	1,74%	1,61%
				Fase C	1,72%	3,44%	1,78%	1,66%
			862	Fase A	2,36%	3,31%	2,42%	2,31%
				Fase B	1,74%	3,37%	1,81%	1,67%
				Fase C	1,75%	3,49%	1,82%	1,69%
	Equivalente de Norton	Puntos de medición	812	Fase A	1,67%	3,02%	1,69%	1,66%
				Fase B	1,12%	3,15%	1,15%	1,09%
				Fase C	1,27%	3,26%	1,29%	1,26%
			842	Fase A	2,44%	3,40%	2,51%	2,37%
				Fase B	1,95%	3,38%	2,03%	1,87%
				Fase C	2,01%	3,21%	2,09%	1,95%
			862	Fase A	2,27%	3,12%	2,34%	2,21%
				Fase B	1,97%	3,39%	2,05%	1,89%
				Fase C	2,00%	3,51%	2,08%	1,93%
	Físicamente basado	Puntos de medición	812	Fase A	1,62%	2,94%	1,62%	1,62%
				Fase B	0,99%	2,95%	0,99%	0,99%
				Fase C	1,19%	3,19%	1,19%	1,19%
			842	Fase A	1,88%	2,75%	1,88%	1,88%
				Fase B	1,42%	2,74%	1,42%	1,42%
				Fase C	1,53%	3,14%	1,53%	1,53%
862			Fase A	1,90%	2,76%	1,90%	1,90%	
			Fase B	1,45%	2,75%	1,45%	1,45%	
			Fase C	1,56%	3,16%	1,56%	1,56%	

Tabla 29. Error relativo porcentual del THD en tensión con respecto al escenario con fuente ideal para los modelos del convertidor trifásico de seis pulsos

				Error relativo con respecto a la fuente ideal			
				Escenarios			
				Fuente distorsionada	Tensión -5%	Tensión -5%	
Modelos Implementados	Inyección de corrientes	Puntos de medición	802	Fase A	0,77%	0,01%	0,01%
				Fase B	2,21%	0,02%	0,02%
				Fase C	1,84%	0,01%	0,01%
			828	Fase A	0,42%	0,03%	0,02%
				Fase B	1,01%	0,04%	0,04%
				Fase C	1,00%	0,04%	0,03%
			836	Fase A	0,40%	0,03%	0,02%
				Fase B	0,94%	0,04%	0,04%
				Fase C	0,99%	0,04%	0,03%
	Equivalente de Norton	Puntos de medición	802	Fase A	0,80%	0,01%	0,01%
				Fase B	1,82%	0,02%	0,02%
				Fase C	1,56%	0,02%	0,01%
			828	Fase A	0,39%	0,03%	0,03%
				Fase B	0,73%	0,04%	0,04%
				Fase C	0,60%	0,04%	0,03%
			836	Fase A	0,38%	0,03%	0,03%
				Fase B	0,72%	0,04%	0,04%
				Fase C	0,75%	0,04%	0,03%
	Físicamente basado	Puntos de medición	802	Fase A	0,81%	0,00%	0,00%
				Fase B	1,97%	0,00%	0,00%
				Fase C	1,69%	0,00%	0,00%
			828	Fase A	0,46%	0,00%	0,00%
				Fase B	0,92%	0,00%	0,00%
				Fase C	1,05%	0,00%	0,00%
836			Fase A	0,46%	0,00%	0,00%	
			Fase B	0,90%	0,00%	0,00%	
			Fase C	1,03%	0,00%	0,00%	

Tabla 30. Error relativo porcentual del THD en tensión con respecto al modelo físicamente basado para los modelos del convertidor trifásico de seis pulsos

				Escenarios					
				Fuente ideal	Fuente distorsionada	Tensión -5%	Tensión +5%		
Modelos Implementados	Inyección de corrientes	Puntos de Medición	812	Fase A	9,83%	7,25%	10,97%	8,83%	
				Fase B	0,16%	8,28%	2,29%	1,70%	
				Fase C	1,60%	3,68%	0,43%	2,60%	
			842	Fase A	27,84%	24,40%	31,31%	24,75%	
				Fase B	17,43%	22,88%	22,54%	12,88%	
				Fase C	11,99%	9,38%	16,10%	8,35%	
			862	Fase A	24,56%	19,90%	27,87%	21,61%	
				Fase B	19,82%	22,63%	25,11%	15,08%	
				Fase C	12,47%	10,55%	16,71%	8,72%	
	Equivalente de Norton	Puntos de medición	812	Fase A	3,15%	2,82%	4,07%	2,37%	
				Fase B	12,68%	6,91%	15,45%	10,24%	
				Fase C	7,34%	2,13%	9,09%	5,83%	
				842	Fase A	29,70%	23,52%	33,71%	26,13%
					Fase B	37,01%	23,27%	42,99%	31,64%
					Fase C	31,26%	2,17%	36,10%	26,95%
				862	Fase A	19,59%	13,00%	23,13%	16,46%
					Fase B	35,88%	23,49%	41,84%	30,53%
					Fase C	28,79%	11,05%	33,80%	24,32%

Tabla 31. Desviación estándar de los errores del THD en tensión con respecto al modelo físicamente basado del convertidor trifásico de seis pulsos

		Desviación Estándar de los escenarios			
		Escenarios			
		Fuente Distorsionada	Tensión -5%	Tensión -5%	Tensión +5%
Modelos Implementados	Inyección de corrientes	9,47%	8,01%	10,88%	7,85%
	Equivalente de Norton	12,58%	9,34%	14,33%	11,00%

Se ratifican la invariabilidad del modelo de inyección de corrientes frente cualquier cambio en el sistema.

En este caso el modelo del circuito equivalente de Norton presentó un comportamiento más sensible a los cambios en la tensión de alimentación que el modelo físicamente basado, como se puede ver en los errores relativos con respecto al escenario ideal de la Tabla 24.

Se evidencia que el modelo de inyección de corriente presenta un comportamiento más próximo al modelo físicamente basado comparado con el modelo del circuito equivalente de Norton. Esto se debe a que el modelo de inyección de corrientes y el modelo físicamente basado presentaron comportamientos prácticamente estáticos frente a cambios en el sistema de alimentación, mientras que el modelo del circuito equivalente de Norton es sensible a dichos cambios. Sin embargo se debe resaltar que los modelos físicamente basados no presentan un comportamiento invariable frente a las variaciones en la tensión de alimentación del sistema, (como los modelos de inyección de corriente). Las respuestas de los modelos físicamente basados varían en magnitud, sin embargo los THD en corriente no varían significativamente frente a estas variaciones.

3.4.2 Variador de frecuencia. Se repite el procedimiento anterior para los modelos que se tienen del variador de frecuencia.

Los resultados se presentan en las Tablas 31, 32, 33 y 34 para el THD en corriente y en las Tablas 35, 36, 37 y 38 para el THD en tensión.

Tabla 32. Comportamiento de la distorsión armónica total en corriente (THD) de los modelos del variador de frecuencia

				Escenarios						
				Fuente ideal	Fuente distorsionada	Tensión -5%	Tensión +5%			
Modelos implementados	Inyección de corriente	Puntos de Medición	812	Fase A	31,43%	31,43%	31,43%	31,43%		
				Fase B	36,26%	36,26%	36,26%	36,26%		
				Fase C	36,26%	36,26%	36,26%	36,26%		
			842	Fase A	31,43%	31,43%	31,43%	31,43%		
				Fase B	36,26%	36,26%	36,26%	36,26%		
				Fase C	36,26%	36,26%	36,26%	36,26%		
			862	Fase A	31,43%	31,43%	31,43%	31,43%		
				Fase B	36,26%	36,26%	36,26%	36,26%		
				Fase C	36,26%	36,26%	36,26%	36,26%		
	Equivalente de Norton	Puntos de medición	812	Fase A	31,76%	30,98%	31,63%	31,88%		
				Fase B	35,26%	35,80%	35,26%	35,26%		
				Fase C	35,72%	35,98%	35,81%	35,81%		
			842	Fase A	35,01%	34,95%	35,01%	35,01%		
				Fase B	34,48%	34,89%	34,48%	34,48%		
				Fase C	29,80%	29,05%	29,73%	29,85%		
			862	Fase A	31,25%	30,55%	31,11%	31,39%		
				Fase B	34,50%	34,88%	34,50%	34,50%		
				Fase C	34,98%	35,02%	34,99%	34,98%		
			Físicamente basado	Puntos de medición	812	Fase A	30,58%	29,74%	30,58%	30,58%
						Fase B	35,39%	35,55%	35,39%	35,39%
						Fase C	35,81%	35,98%	35,81%	35,81%
					842	Fase A	35,87%	36,13%	35,87%	35,87%
						Fase B	35,94%	36,11%	35,94%	35,94%
						Fase C	36,31%	35,42%	36,31%	36,31%
862	Fase A	41,63%			40,05%	41,63%	41,63%			
	Fase B	44,76%			42,14%	44,76%	44,76%			
	Fase C	44,44%			43,71%	44,44%	44,44%			

Tabla 33. Error relativo porcentual del THD en corriente con respecto al escenario con fuente ideal para los modelos del variador de frecuencia

				Error relativo con respecto a la fuente ideal			
				Escenarios			
				Fuente distorsionada	Tensión -5%	Tensión -5%	
Modelos Implementados	Inyección de corrientes	Puntos de medición	802	Fase A	0,00%	0,00%	0,00%
				Fase B	0,00%	0,00%	0,00%
				Fase C	0,00%	0,00%	0,00%
			828	Fase A	0,00%	0,00%	0,00%
				Fase B	0,00%	0,00%	0,00%
				Fase C	0,00%	0,00%	0,00%
			836	Fase A	0,00%	0,00%	0,00%
				Fase B	0,00%	0,00%	0,00%
				Fase C	0,00%	0,00%	0,00%
	Equivalente de Norton	Puntos de medición	802	Fase A	2,46%	0,42%	0,37%
				Fase B	1,55%	0,00%	0,00%
				Fase C	0,73%	0,26%	0,25%
			828	Fase A	0,15%	0,01%	0,01%
				Fase B	1,20%	0,00%	0,00%
				Fase C	2,52%	0,22%	0,18%
			836	Fase A	2,26%	0,47%	0,43%
				Fase B	1,09%	0,00%	0,00%
				Fase C	0,12%	0,01%	0,01%
	Físicamente basado	Puntos de medición	802	Fase A	2,75%	0,00%	0,00%
				Fase B	0,45%	0,00%	0,00%
				Fase C	0,49%	0,00%	0,00%
			828	Fase A	0,73%	0,00%	0,00%
				Fase B	0,46%	0,00%	0,00%
				Fase C	2,45%	0,00%	0,00%
			836	Fase A	3,78%	0,00%	0,00%
				Fase B	5,86%	0,00%	0,00%
				Fase C	1,65%	0,00%	0,00%

Tabla 34. Error relativo porcentual del THD en corriente con respecto al modelo físicamente basado para los modelos del variador de frecuencia

				Escenarios				
				Fuente ideal	Fuente distorsionada	Tensión -5%	Tensión +5%	
Modelos Implementados	Inyección de corriente	Puntos de Medición	812	Fase A	2,77%	5,68%	2,77%	2,77%
				Fase B	2,45%	1,99%	2,45%	2,45%
				Fase C	1,25%	0,76%	1,25%	1,25%
			842	Fase A	12,39%	13,02%	12,39%	12,39%
				Fase B	0,87%	0,42%	0,87%	0,87%
				Fase C	0,15%	2,36%	0,15%	0,15%
			862	Fase A	24,50%	21,53%	24,50%	24,50%
				Fase B	19,00%	13,95%	19,00%	19,00%
				Fase C	18,41%	17,04%	18,41%	18,41%
	Equivalente de Norton	Puntos de medición	812	Fase A	3,86%	4,17%	3,42%	4,24%
				Fase B	0,37%	0,72%	0,37%	0,37%
				Fase C	0,24%	0,01%	0,02%	0,01%
			842	Fase A	2,40%	3,26%	2,41%	2,39%
				Fase B	4,07%	3,36%	4,07%	4,07%
				Fase C	17,93%	17,99%	18,11%	17,78%
			862	Fase A	24,92%	23,73%	25,27%	24,60%
				Fase B	22,92%	17,23%	22,92%	22,92%
				Fase C	21,28%	19,87%	21,27%	21,29%

Tabla 35. Desviación estándar de los errores del THD en corriente con respecto al modelo físicamente basado del variador de frecuencia

		Desviación Estándar de los escenarios			
		Escenarios			
		Fuente Distorsionada	Tensión -5%	Tensión -5%	Tensión +5%
Modelos Implementados	Inyección de corrientes	9,53%	7,96%	9,53%	9,53%
	Equivalente de Norton	10,55%	9,43%	10,69%	10,49%

Tabla 36. Comportamiento de la distorsión armónica total en tensión (THD) de los modelos del variador de frecuencia

				Escenarios				
				Fuente ideal	Fuente distorsionada	Tensión -5%	Tensión +5%	
Modelos Implementados	Inyección de corriente	Puntos de Medición	812	Fase A	1,08%	3,13%	1,19%	1,98%
				Fase B	1,63%	3,17%	1,75%	1,51%
				Fase C	2,71%	3,31%	2,84%	2,60%
			842	Fase A	3,71%	3,40%	3,05%	3,41%
				Fase B	3,77%	3,31%	3,06%	3,50%
				Fase C	3,51%	3,36%	3,79%	3,25%
			862	Fase A	2,16%	3,22%	2,45%	2,90%
				Fase B	2,95%	3,32%	2,26%	2,68%
				Fase C	3,08%	3,50%	3,39%	3,80%
	Equivalente de Norton	Puntos de medición	812	Fase A	1,53%	3,07%	1,55%	1,52%
				Fase B	1,89%	3,96%	1,96%	1,82%
				Fase C	2,01%	4,08%	2,08%	1,95%
			842	Fase A	3,29%	4,63%	3,47%	3,14%
				Fase B	3,83%	4,45%	4,01%	3,67%
				Fase C	2,30%	3,11%	2,39%	2,22%
			862	Fase A	2,17%	3,11%	2,25%	2,11%
				Fase B	3,73%	4,30%	3,90%	3,58%
				Fase C	3,81%	4,44%	3,98%	3,66%
	Físicamente basado	Puntos de medición	812	Fase A	1,56%	3,33%	1,56%	1,56%
				Fase B	1,22%	3,18%	1,22%	1,22%
				Fase C	1,49%	4,14%	1,49%	1,49%
			842	Fase A	2,12%	4,77%	2,12%	2,12%
				Fase B	1,88%	4,56%	1,88%	1,88%
				Fase C	2,01%	3,33%	2,01%	2,01%
862			Fase A	2,53%	3,40%	2,53%	2,53%	
			Fase B	1,92%	4,12%	1,92%	1,92%	
			Fase C	2,05%	4,93%	2,05%	2,05%	

Tabla 37. Error relativo porcentual del THD en tensión con respecto al escenario con fuente ideal para los modelos del variador de frecuencia

					Error relativo con respecto a la fuente ideal		
					Escenarios		
					Fuente distorsionada	Tensión -5%	Tensión -5%
Modelos Implementados	Inyección de corrientes	Puntos de medición	802	Fase A	190,47%	10,63%	83,22%
				Fase B	95,23%	7,85%	7,07%
				Fase C	21,92%	4,62%	4,15%
			828	Fase A	8,27%	17,92%	8,13%
				Fase B	12,26%	18,76%	7,04%
				Fase C	4,12%	8,14%	7,35%
			836	Fase A	49,01%	13,32%	34,25%
				Fase B	12,31%	23,59%	9,31%
				Fase C	13,75%	9,99%	23,41%
	Equivalente de Norton	Puntos de medición	802	Fase A	100,18%	0,97%	0,82%
				Fase B	109,91%	3,68%	3,30%
				Fase C	102,91%	3,23%	2,89%
			828	Fase A	40,52%	5,33%	4,77%
				Fase B	16,11%	4,55%	4,12%
				Fase C	35,06%	3,75%	3,36%
			836	Fase A	43,00%	3,38%	2,98%
				Fase B	15,26%	4,56%	4,13%
				Fase C	16,51%	4,38%	3,96%
	Físicamente basado	Puntos de medición	802	Fase A	113,00%	0,00%	0,00%
				Fase B	160,21%	0,00%	0,00%
				Fase C	178,41%	0,00%	0,00%
			828	Fase A	124,54%	0,00%	0,00%
				Fase B	143,10%	0,00%	0,00%
				Fase C	65,77%	0,00%	0,00%
			836	Fase A	34,16%	0,00%	0,00%
				Fase B	114,25%	0,00%	0,00%
				Fase C	140,07%	0,00%	0,00%

Tabla 38. Error relativo porcentual del THD en tensión con respecto al modelo físicamente basado para los modelos del variador de frecuencia

				Escenarios				
				Fuente ideal	Fuente distorsionada	Tensión -5%	Tensión +5%	
Modelos Implementados	Inyección de corrientes	Puntos de Medición	812	Fase A	31,03%	5,94%	23,70%	26,37%
				Fase B	33,07%	0,16%	43,52%	23,66%
				Fase C	82,43%	20,12%	90,85%	74,86%
			842	Fase A	74,73%	28,62%	43,42%	60,53%
				Fase B	100,95%	27,47%	63,25%	86,79%
				Fase C	74,56%	0,96%	88,76%	61,72%
			862	Fase A	14,79%	5,36%	3,44%	14,40%
				Fase B	53,57%	19,50%	17,35%	39,28%
				Fase C	50,00%	28,92%	64,99%	85,12%
	Equivalente de Norton	Puntos de medición	812	Fase A	1,93%	7,83%	0,97%	2,72%
				Fase B	54,37%	24,53%	60,04%	49,27%
				Fase C	35,29%	1,40%	39,66%	31,38%
			842	Fase A	55,00%	3,01%	63,26%	47,61%
				Fase B	104,31%	2,41%	113,60%	95,90%
				Fase C	14,60%	6,63%	18,90%	10,75%
			862	Fase A	14,29%	8,64%	11,40%	16,84%
				Fase B	94,18%	4,47%	103,04%	86,17%
				Fase C	85,75%	9,85%	93,89%	78,40%

Tabla 39. Desviación estándar de los errores del THD en tensión con respecto al modelo físicamente basado del variador de frecuencia

		Desviación Estándar de los escenarios			
		Escenarios			
		Fuente Distorsionada	Tensión -5%	Tensión -5%	Tensión +5%
Modelos Implementados	Inyección de corrientes	28,04%	12,11%	30,76%	27,46%
	Equivalente de Norton	37,53%	6,98%	41,38%	34,17%

Los resultados obtenidos son muy similares a los del convertidor trifásico de 6 pulsos y ratifican lo que se planteó para esa carga.

Se evidencia que los modelos del circuito equivalente de Norton y físicamente basado, presentan distorsión armónica en corriente más baja en el escenario con fuente distorsionada que en el escenario con fuente ideal. Esto se debe a la interacción armónica.

Las distorsiones armónicas en tensión para el variador de frecuencia son un poco más altas que las que se presentaron con el convertidor, este comportamiento se espera debido a que el variador tiene doble conmutación.

3.4.3 Horno de arco. La implementación de los modelos de horno de arco se realizó en el sistema de tres nodos presentado en el Capítulo 2, debido a que por su topología el modelo de Cassie necesita de condiciones de operación que el sistema de 34 nodos no puede mantener.

Bajo este nuevo escenario solo se implementa una carga por simulación y las mediciones se hacen sobre un único punto, la barra IND1, que corresponde al secundario del transformador de la subestación. El resto del procedimiento se realizó siguiendo los mismos lineamientos de los casos anteriores.

En las Tablas 39, 40, 41 y 42 se presentan los resultados para la distorsión en corriente.

Tabla 40. Comportamiento de la distorsión armónica total en corriente (THD) de los modelos del horno de arco

			Escenarios			
			Fuente Ideal	Fuente Distorsionada	Tensión -5% (damental)	Tensión +5% (Fundamental)
Modelos Implementados	Inyección de Corrientes	Fase A	7,7690%	7,7690%	7,7690%	7,7690%
		Fase B	6,6641%	6,6641%	6,6641%	6,6641%
		Fase C	9,4998%	9,4998%	9,4998%	9,4998%
	Equivalente de Norton	Fase A	7,7429%	8,69%	7,7460%	0,0774
		Fase B	6,1152%	6,34%	6,1428%	0,0609
		Fase C	8,9559%	9,53%	8,9828%	0,0893
	Físicamente Basado	Fase A	3,4844%	2,9137%	3,2876%	3,0907%
		Fase B	3,6446%	2,8996%	3,5948%	3,4359%
		Fase C	3,3016%	3,0314%	3,6439%	3,0429%

Tabla 41. Error relativo porcentual del THD en corriente con respecto al escenario con fuente ideal para los modelos del horno de arco

			Error relativo con respecto a la fuente ideal		
			Escenarios		
			Fuente Distorsionada	Tensión -5%	Tensión +5%
Modelos Implementados	Inyección de Corrientes	Fase A	0,00%	0,00%	0,00%
		Fase B	0,00%	0,00%	0,00%
		Fase C	0,00%	0,00%	0,00%
	Equivalente de Norton	Fase A	12,21%	0,04%	0,04%
		Fase B	3,61%	0,45%	0,45%
		Fase C	6,38%	0,30%	0,30%
	Físicamente Basado	Fase A	16,38%	5,65%	11,30%
		Fase B	20,44%	1,37%	5,73%
		Fase C	8,18%	10,37%	7,84%

Tabla 42. Error relativo porcentual del THD en corriente con respecto al modelo físicamente basado para los modelos del horno de arco

			Escenarios			
			Fuente Ideal	Fuente Distorsionada	Tensión -5% (damental)	Tensión +5% Fundamental)
Modelos Implementados	Inyección de Corrientes	Fase A	122,9652%	166,6369%	136,3122%	151,3670%
		Fase B	82,8486%	129,8283%	85,3817%	93,9550%
		Fase C	187,7332%	213,3800%	160,7042%	212,1956%
	Equivalente de Norton	Fase A	122,2162%	198,1982%	135,6126%	150,4190%
		Fase B	67,7880%	118,5026%	70,8802%	77,1850%
		Fase C	171,2594%	214,3003%	146,5161%	193,4372%

Tabla 43. Desviación estándar de los errores del THD en corriente con respecto al modelo físicamente basado del horno de arco

		Desviación Estándar de los escenarios			
		Escenarios			
		Fuente Distorsionada	Tensión -5%	Tensión -5%	Tensión +5%
Modelos Implementados	Inyección de corrientes	52,92%	41,87%	38,43%	59,13%
	Equivalente de Norton	51,76%	51,30%	40,89%	58,78%

En las Tablas 43, 44, 45 y 46 se presentan los resultados equivalentes para el THD en tensión.

Tabla 44. Comportamiento de la distorsión armónica total en tensión (THD) de los modelos del horno de arco

			Escenarios			
			Fuente Ideal	Fuente Distorsionada	Tensión -5% (damental)	Tensión +5% (Fundamental)
Modelos Implementados	Inyección de Corrientes	Fase A	0,2776%	3,1324%	0,2912%	0,2653%
		Fase B	0,2453%	3,2911%	0,2568%	0,2349%
		Fase C	0,3062%	3,1498%	0,3227%	0,2913%
	Equivalente de Norton	Fase A	0,2657%	3,1276%	0,2793%	0,0025
		Fase B	0,2420%	3,2671%	0,2536%	0,0023
		Fase C	0,3183%	3,3431%	0,3347%	0,0030
	Físicamente Basado	Fase A	0,9187%	3,7549%	0,8725%	0,8337%
		Fase B	1,0156%	3,9175%	0,8808%	0,8996%
		Fase C	0,9171%	4,0612%	0,8962%	0,8442%

Tabla 45. Error relativo porcentual del THD en tensión con respecto al escenario con fuente ideal para los modelos del horno de arco

			Error relativo con respecto a la fuente ideal		
			Escenarios		
			Fuente Distorsionada	Tensión -5%	Tensión +5%
Modelos Implementados	Inyección de Corrientes	Fase A	1028,35%	4,90%	4,44%
		Fase B	1241,72%	4,70%	4,25%
		Fase C	928,61%	5,38%	4,87%
	Equivalente de Norton	Fase A	1076,98%	5,11%	4,64%
		Fase B	1250,04%	4,79%	4,34%
		Fase C	950,27%	5,16%	4,67%
	Físicamente Basado	Fase A	308,71%	5,04%	9,26%
		Fase B	285,73%	13,28%	11,42%
		Fase C	342,83%	2,28%	7,94%

Tabla 46. Error relativo porcentual del THD en tensión con respecto al modelo físicamente basado para los modelos del horno de arco

			Escenarios			
			Fuente Ideal	Fuente Distorsionada	Tensión (-5% damental)	Tensión (+5% Fundamental)
Modelos Implementados	Inyección de Corrientes	Fase A	230,9427%	19,8729%	199,6120%	214,2561%
		Fase B	314,0405%	19,0332%	242,9445%	283,0239%
		Fase C	199,4906%	28,9352%	177,7248%	189,8181%
	Equivalente de Norton	Fase A	71,0764%	16,7062%	67,9851%	69,6050%
		Fase B	76,1717%	16,6024%	71,2086%	74,2655%
		Fase C	65,2917%	17,6820%	62,6508%	64,0552%

Tabla 47. Desviación estándar de los errores del THD en tensión con respecto al modelo físicamente basado del horno de arco

		Desviación Estándar de los escenarios			
		Escenarios			
		Fuente Distorsionada	Tensión (-5%)	Tensión (-5%)	Tensión (+5%)
Modelos Implementados	Inyección de corrientes	59,18%	5,49%	33,19%	48,33%
	Equivalente de Norton	5,44%	0,60%	4,32%	5,11%

De nuevo se evidencia que el modelo de inyección de corrientes no responde frente variaciones en el sistema.

Los modelos de inyección de corriente y del circuito equivalente de Norton presentan un comportamiento muy lejano al del modelo de Cassie, esa diferencia se debe a que el modelo físico presenta la variabilidad propia de los hornos de arco, mientras los otros modelos considerados tienen respuestas muy estables. Esta falencia se le detectó en el Capítulo 2 cuando se modelan arcos eléctricos y se ratifica en el análisis del Capítulo tres.

3.5 IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE TRANSITORIO TIPO HUNDIMIENTO DE TENSIÓN

En esta sección se estudia el comportamiento de las cargas consideradas frente a fenómenos de hundimiento de tensión (voltage sags), que son frecuentes en las redes de distribución. Se verifica el comportamiento durante el estado estable del hundimiento de tensión, sin considerar los transitorios generados en inicio y fin del evento.

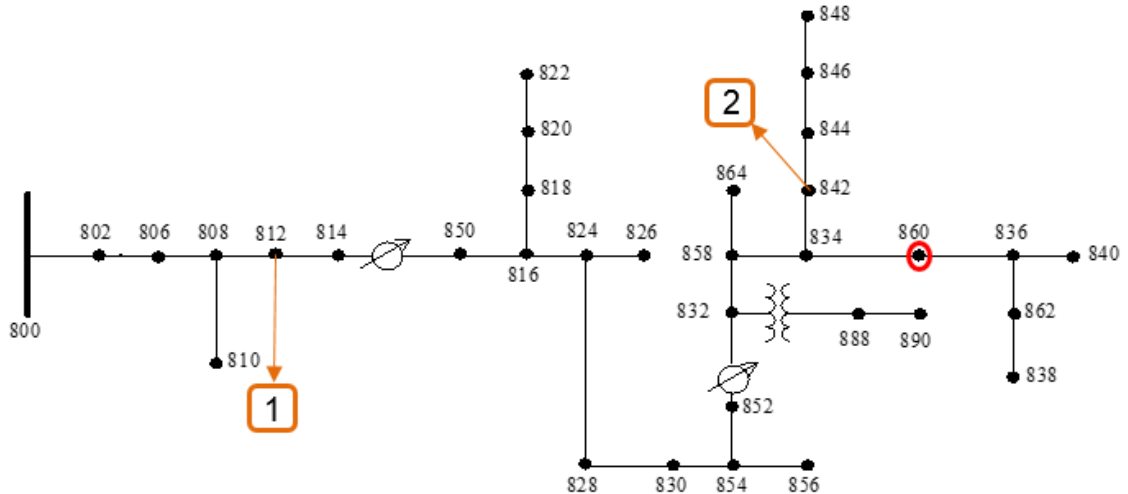
El modelado de la carga para el estudio transitorio se realiza con un arreglo R-L. Los valores de resistencia e inductancia se obtienen a partir del modelo físicamente basado de las cargas, cuando opera con alimentación ideal y se determinan a partir de la relación entre la tensión de alimentación de la carga y la potencia consumida por esta, los cálculos se realizan por fase.

Las cargas seleccionadas para este estudio fueron el convertidor trifásico de seis pulsos y el variador de frecuencia, debido a que estas operan en condiciones normales en el sistema de 34 nodos.

Se seleccionaron los nodos 812 y 842 como punto de conexión de las cargas estudiadas y el 860 como el nodo donde se crea la falla a tierra que ocasiona el hundimiento de tensión en el sistema.

En la Figura 35 se muestran los puntos de conexión de cargas y de ocurrencia de la falla.

Figura35. Sistema IEEE de 34 nodos, ubicación de la carga, el interruptor y los medidores para estudio de hundimiento de tensión



La simulación se configuró para que el hundimiento de tensión se presentará entre 0.05 [s] y 0.085 [s]. Para lo cual se fijó una ventana de simulación de 1.5[s].

Se realiza la medición de intensidad de corriente y tensión en los nodos de conexión de la carga. Las pruebas se realizan para los modelos R-L y los modelos basados en electrónica de potencia del convertidor trifásico de seis pulsos y el variador de frecuencia, con lo que se tiene una base comparativa entre modelos para el evento estudiado.

No fue posible realizar el análisis para el modelo de horno de arco debido a que esta carga no se puede operar en buenas condiciones en el sistema de 34 nodos del IEEE y el sistema de dos barras donde se realizó el análisis previo para el horno de arco, no permite la simulación de hundimientos de tensión por su tamaño.

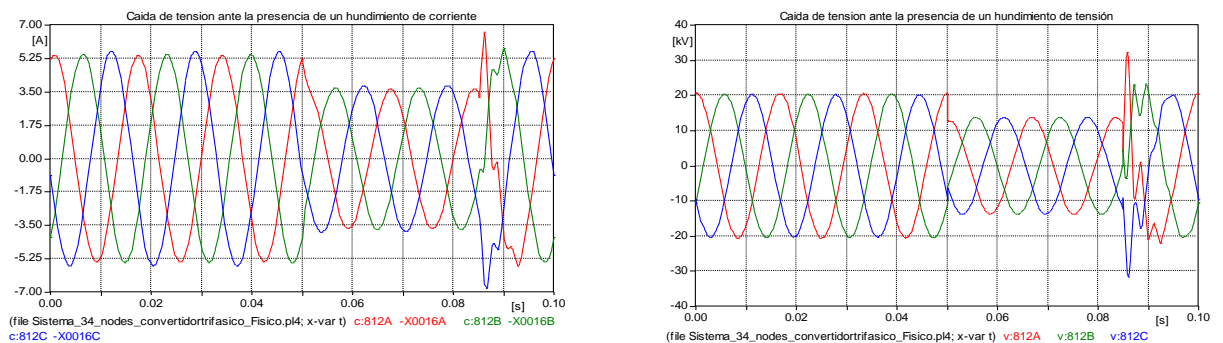
3.5.1 Convertidor trifásico de seis pulsos. Se realiza el procedimiento anteriormente descrito con el convertidor trifásico de seis pulsos. En la Tabla 47 se presentan los valores de resistencia (R) e impedancia (ωL) por fase del modelo del convertidor de seis pulsos, para los dos puntos de conexión.

Tabla 48. Valor de Impedancia por nodo convertidor trifásico de seis pulsos

		Impedancia	
		R (Ohm)	ωL (Ohm)
Nodo 812	Fase A	3660.9853	962.371
	Fase B	3558.802	1135.82
	Fase C	3401.627	1197.34
Nodo 842	Fase A	4757.378	596.32
	Fase B	4645.8	685.65
	Fase C	4347.22	1010.05

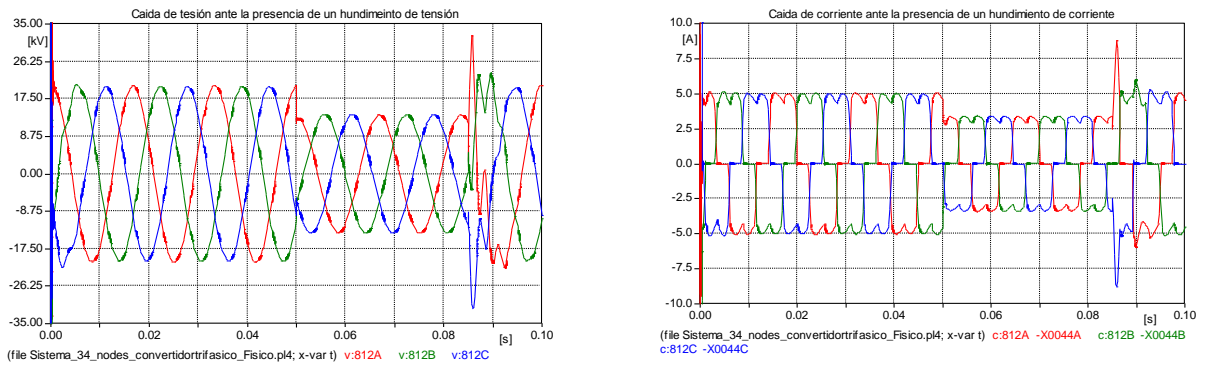
En la Figura 36 se muestran las ondas de corriente y tensión para la carga conectada en el nodo 812 frente la aparición de un hundimiento de tensión, debido a una falla en el nodo 860 con el modelo R-L.

Figura 36. Ondas de corriente y tensión cuando se produce un hundimiento de tensión para el convertidor trifásico de seis pulsos modelo R-L (Nodo 812)



La Figura 37 presenta los resultados equivalentes para el modelo físico del convertidor trifásico de seis pulsos.

Figura 37. Ondas de corriente y tensión cuando se produce un hundimiento de tensión para el convertidor trifásico de seis pulsos modelo físicamente basado (Nodo 812)



En las Figuras 38 y 39 se presentan los resultados cuando la carga se conecta al nodo 842, bajo las mismas condiciones de falla.

Figura 38. Onda de corriente y tensión cuando se produce un hundimiento de tensión para el convertidor trifásico de seis pulsos modelo R-L (Nodo 842)

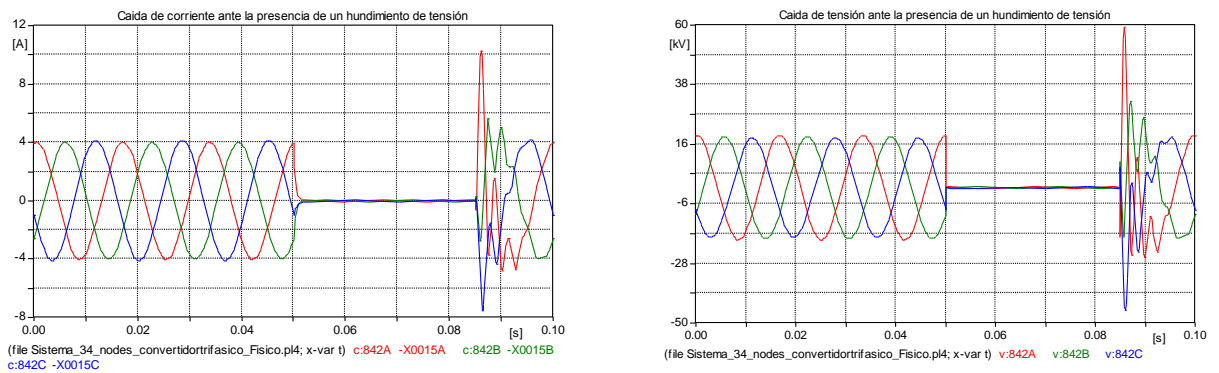
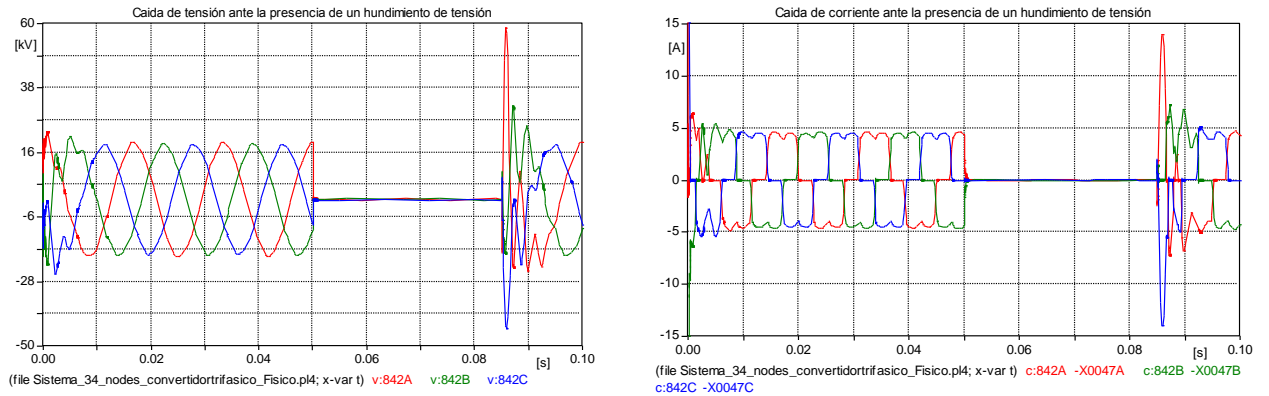


Figura 39. Onda de corriente y tensión cuando se produce un hundimiento de tensión para el convertidor trifásico de seis pulsos modelo físicamente basado (Nodo 842)



Se evidencia que el hundimiento de tensión es menos severo en el nodo 812 que en el 842, esto se debe a que el nodo 812 está muy cerca de la fuente de tensión del sistema y lejos del punto donde se presenta la falla, mientras el nodo 842 está cerca al punto donde ocurre la falla.

Se constató que los dos modelos responde instantáneamente frente la caída en la tensión en 0.05 [s], cambia su estado de operación durante el hundimiento de tensión y retorna en 0.085[s] a las condiciones normales de operación, sin embargo como se esperaba el modelo físico lo hace con una forma de onda más cercana a la realidad.

En la Tabla 48 se presentan las magnitudes de tensión y corriente durante el hundimiento de tensión.

Tabla 49. Magnitud de tensión y corriente durante el hundimiento de tensión para el convertidor trifásico de seis pulsos

		Magnitud durante el Sag		Magnitud durante el Sag		
		Tensión [V]	Corriente [A]	Tensión [V]	Corriente [A]	
Nodo 812	Fase A	13933	3,6482	13673	3,5528	
	Fase B	13749	3,7069	13581	3,5618	
	Fase C	13634	3,8226	13873	3,5333	
Nodo 842	Fase A	267,84	0,055863	268,65	0,069313	
	Fase B	270,53	0,057289	268,95	0,069411	
	Fase C	267,64	0,059858	267,87	0,06271	
			Modelo R-L		Modelo Fisico	

En la tabla 49 se presentan los errores relativos de corriente del modelo R-L tomando como referencia al modelo basado en electrónica de potencia.

Tabla 50. Errores relativos de corriente del modelo R-L con respecto al modelo basado en electrónica de potencia durante el hundimiento de tensión para el convertidor trifásico de seis pulsos

Error Relativo	
Corrientes	
Fase A	2,69%
Fase B	4,07%
Fase C	8,19%
Fase A	19,40%
Fase B	17,46%
Fase C	4,55%

Los errores alcanzan valores cercanos al 20% cuando se presenta un fenómeno del tipo hundimiento de tensión.

3.5.2 Variador de frecuencia Para el caso del variador de frecuencia se sigue el mismo procedimiento del convertidor trifásico de seis pulsos, en esta sección se incluye el análisis sobre este tipo de carga.

En la Tabla 50 se encuentran los valores característicos del modelo R-L para variador de frecuencia.

Tabla 51. Valor de Impedancia por nodo. Variador de frecuencia

		Impedancia	
		R (Ohm)	wL (Ohm)
Nodo 812	Fase A	3534.8	919.56
	Fase B	3440	1114.8
	Fase C	3284	1175
Nodo 842	Fase A	2976.96	498.4
	Fase B	2883.56	574.48
	Fase C	2633.86	844.75

En las Figuras 40, 41, 42 y 43 se presentan las respectivas ondas de tensión y corriente para el análisis del variador de frecuencia durante el hundimiento de tensión.

Figura 40. Ondas de corriente y tensión cuando se produce un hundimiento de tensión para el variador de frecuencia modelo R-L (Nodo 812)

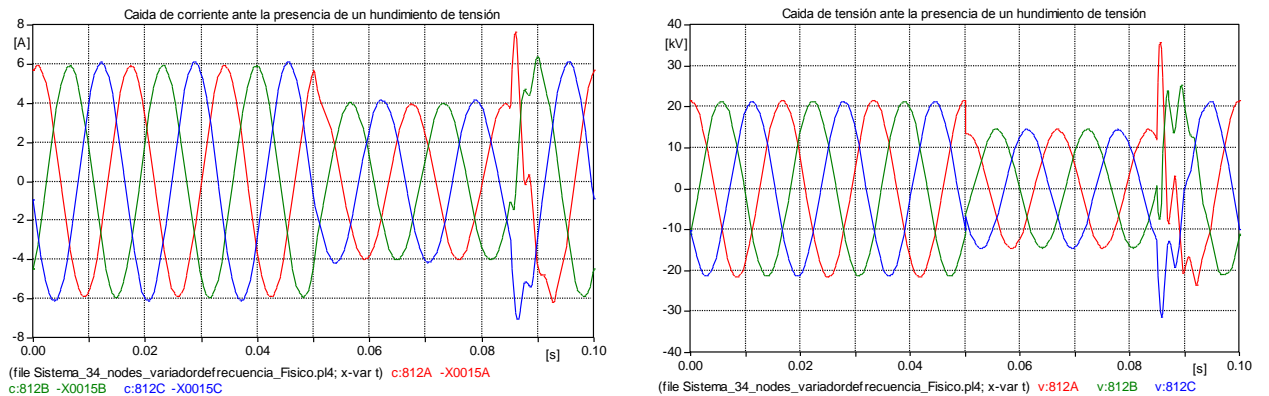


Figura 41. Ondas de corriente y tensión cuando se produce un hundimiento de tensión para el variador de frecuencia modelo físicamente basado (Nodo 812)

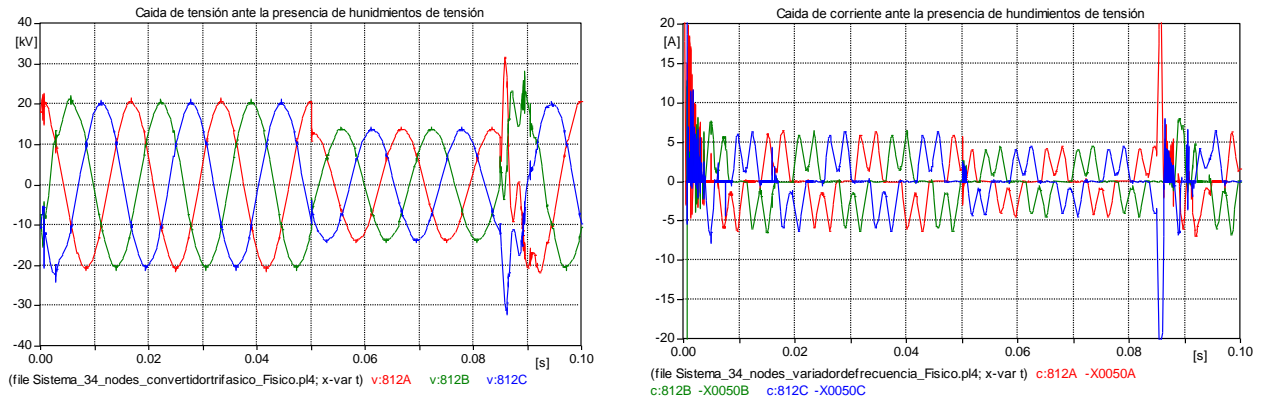


Figura 42. Onda de corriente y tensión cuando se produce un hundimiento de tensión para el variador de frecuencia modelo R-L (Nodo 842)

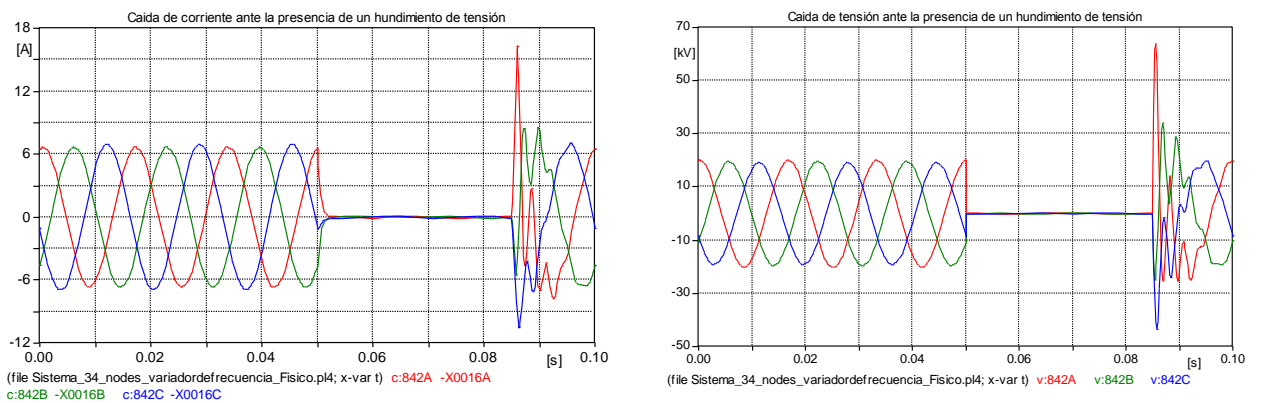
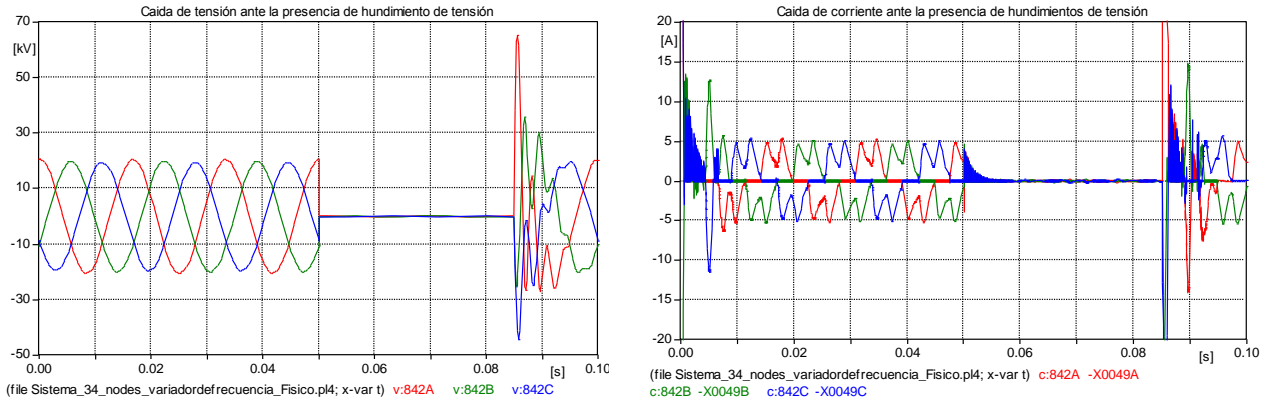


Figura 43. Onda de corriente y tensión cuando se produce un hundimiento de tensión para el variador de frecuencia modelo físicamente basado (Nodo 842)



Con el variador de frecuencia se presenta un comportamiento muy similar al obtenido con el convertidor trifásico de seis pulsos. En la Tabla 51 se presentan las magnitudes correspondientes a las ondas presentadas en las Figuras anteriores.

Tabla 52. Magnitud de tensión y corriente durante el hundimiento de tensión para el variador de frecuencia

		Magnitud durante el hundimiento de tensión		Magnitud durante el hundimiento de tensión	
		Tensión [V]	Corriente [A]	Tensión [V]	Corriente [A]
Nodo 812	Fase A	14527	3,9802	13879	2,5488
	Fase B	14514	4,0171	13797	2,5546
	Fase C	14516	4,1524	14063	2,5432
Nodo 842	Fase A	282,44	0,093149	282,04	0,0438
	Fase B	284,37	0,094444	282,25	0,0710
	Fase C	280,12	0,10127	281,2400	1,14E-02
		Modelo R-L		Modelo Físico	

Tabla 53. Errores relativos de corriente del modelo R-L con respecto al modelo basado en electrónica de potencia durante el hundimiento de tensión para el variador de frecuencia

Error Relativo	
Corrientes	
Fase A	56,16%
Fase B	57,25%
Fase C	63,27%
Fase A	112,75%
Fase B	33,09%
Fase C	784,69%

El convertidor de frecuencia presenta errores muchos más altos que el convertidor trifásico de 6 pulsos, lo que ratifica que el modelos R-L no se comporta de manera similar a los modelos basado en electrónica de potencia durante los hundimientos de tensión.

3.6 PROPUESTAS DE MEJORA DE IMPLEMENTACIÓN

A continuación se presentan las propuestas de mejora de implementación que se sugieren con base en las experiencias que se presentaron durante el desarrollo del trabajo de investigación.

- Los parámetros de los modelos físicamente basados se debe configurar para el punto de operación en el que van a ser implementados.
- Las mediciones de corriente y tensión que se realizan para construir los modelos de inyección de corrientes y del circuito equivalente de Norton, se debe realizar bajo condiciones muy próximas a las de simulación.

- La proximidad a una onda cuadrada en la tensión del nodo ARC, es un indicador de buen comportamiento del modelo físicamente basado del horno de arco.
- La tensión de alimentación del modelo físicamente basado del horno de arco debe ser la adecuada para romper la tensión de codo predeterminada.

3.7 RESUMEN CAPÍTULO TRES

Para el convertidor trifásico de 6 pulsos y el variador de frecuencia, se evidenció que los modelos físicamente basados no son sensibles a pequeños cambios en la tensión de alimentación, como los que se presentaron en el análisis. Por lo que cuando las cargas se sometieron a los distintos escenarios contemplados, los modelos basados en electrónica de potencia presentaron comportamiento con poca variabilidad. Ocasionó que el rendimiento de los modelos de inyección de corriente fuera más próximo al referente (modelos físicamente basados), comparado con el comportamiento de los modelos del circuito equivalente de Norton, porque estos últimos presentan alta sensibilidad a los cambios en la tensión de alimentación.

Aún con diferencias apreciables en su comportamiento, se pudo constatar que los tres modelos contemplados son útiles para modelar cargas electrónicas de gran potencia. Estos modelos muestran con buena aproximación el efecto de las cargas que conmutan sobre el sistema, como se puede evidenciar en las distorsiones de tensión que presentaron las cargas electrónicas contempladas.

Los modelos de inyección de corriente y del circuito equivalente de Norton mostraron no ser muy apropiados para modelar cargas con arco eléctrico, debido a que por su topología no pueden presentar el comportamiento estocástico propio

de estas cargas. Los modelos físicamente basados presentan comportamientos bastante cercanos a la realidad.

El modelamiento de cargas no lineales con arreglos R-L para el estudio de hundimientos de tensión, mostró resultados alejados del comportamiento de los modelos físicos en el mismo escenario; debido a la topología de conmutación de los electrónicamente basados.

4. CONCLUSIONES

- En la búsqueda bibliográfica inicial, se evidenció que la mayoría de los trabajos en los que se presentan modelos de carga armónica se limitan a descripciones cualitativas de estos. En este trabajo se consiguió crear una base comparativa de los modelos a partir de valores numéricos, en diferentes condiciones de operación y para tres tipos de carga, lo contribuye a facilitar la selección del modelo adecuado para cada propósito.
- La distorsión armónica total (THD) es un parámetro eficaz para evaluar el rendimiento de modelos de carga armónica, ya que se puede usar como herramienta de comparación de la respuesta teórica de la carga con la que presenta el modelo estudiado. Sin embargo se debe tener precaución cuando se estudian cargas con comportamiento altamente variables (como el horno de arco), debido a que como se evidenció, modelos como el de inyección de corrientes y circuito equivalente de Norton pueden presentar distorsiones armónicas muy similares a los modelos físicamente basados, pero con ondas muy estables que se alejan del comportamiento teórico de la carga.
- El modelado de cargas electrónicas como el convertidor trifásico de seis pulsos y el variador de frecuencia mostró ser más eficiente usando modelos de cargas como el de inyección de corrientes y el circuito equivalente de Norton, debido a que ofrecen respuestas bastante cercanas a las teóricas y a que son modelos prácticos, de fácil implementación, mientras los modelos basados en electrónica de potencia son muy complejos y requieren del ajuste preciso de múltiples variables para operar correctamente.
- En las pruebas con cargas electrónicas, se encontró que las respuestas de los modelos de inyección de corriente fueron más cercanas a las de los modelos basados en electrónica de potencia, comparadas con las respuestas de los modelos del circuito equivalente de Norton. Este resultado se obtiene frente

pequeñas variaciones en el sistema de alimentación que se dan dentro de los márgenes operativos que fija la norma.

- El modelado del horno de arco por medio de los modelos de inyección de corriente y del circuito equivalente de Norton no ofrecen resultados cercanos a los teóricos, debido a que por su topología no pueden presentar la variabilidad propia de este tipo de carga. Por otra parte los modelos físicamente basados se ajustan muy bien al comportamiento esperado de los hornos de arco.
- Los parámetros de los modelos de inyección de corrientes y del circuito equivalente de Norton se deben obtener en puntos de operación muy próximos a los que van hacer implementados. Debido a que como se ratificó en este trabajo, el modelo de inyección de corrientes se limitará por completo a condiciones preestablecidas. Mientras que el modelo del circuito equivalente de Norton es muy sensible a cambios en tensión, debido a su topología. Esto factores, en condiciones inadecuadas pueden alterar negativamente la respuesta de la carga modelada en el sistema estudiado.
- El modelamiento de cargas no lineales por medio de arreglos R-L para el estudio de fenómenos transitorios del tipo hundimientos de tensión, no ofrece resultados cercanos al de los modelos físicos. La diferencia se hizo más significativa cuando se modelaban cargas con doble conmutación (variador de frecuencia), en donde se obtuvieron diferencias entre los dos escenarios de hasta 784%.
- No se encontró un modelo que suministrara resultados satisfactorios para modelar múltiples cargas conectadas simultáneamente, este es un tema sobre el que aún se está trabajando en el campo investigativo y que genera todavía varias interrogantes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]DUBÉ, Laurent. Users guide to models en ATP. April 1996.
- [2]MORA BARAJAS, M.A. y BAÑUELOS SÁNCHEZ, P. Contaminación armónica producida por cargas no lineales de baja potencia: modelo matemático y casos prácticos. Ingeniería, investigación y tecnología. Febrero, 2015, vol. 11, no. 2.
- [3]SCHIPMAN, Kurt y DELINCÉ, François. The importance of good power quality. ABB Power Qaulity Products. Bélgica. vol. 93.
- [4]BLANCO SOLANO, Jairo y JAGUA GUALDRÓN, Jorge Luis. Metodología para el diagnóstico de la causa de huecos de tensión: análisis de fallas. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2009. 116 p.
- [5]CARVAJAL CARREÑO, William. Armónicos: método híbrido tiempo-frecuencia para el Análisis de sistemas eléctricos con elementos no lineales. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2009. 127 p.
- [6]SANDOVAL CABALLERO, Estephania Diana y TROUCHÓN BRAVO, José Mauricio. Localización de fallas: validación de modelos de fuentes de alimentación y cargas empleados en la simulación de sistemas de distribución de energía eléctrica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2011. 122 p.
- [7]ORTIZ TAMAYO, Ramon Hector. Evaluación de la calidad de la potencia eléctrica (CPE) ante eventos de corta duración en un sistema de distribución. Medellín: Universidad Pontifica Bolivariana. 2006. 126 p.

- [8]RAMÍREZ CASTAÑO, Samuel y CANO PLATA, Eduardo Antonio. Calidad del servicio de energía eléctrica. Manizales: Universidad Nacional de Colombia. 2006. 371 p.
- [9]INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Power engineering society. Power system analysis, computing and economics committee. IEEE-34 Node Test Feeder.
- [10]INSTITUTO COLOMBIANOS DE NORMAS TÉCNICAS. Calidad de la potencia eléctrica. límites y metodología de evaluación en punto de conexión común. Bogotá D.C: ICONTEC, 2008. 51 p. NTC 5001.
- [11]TEJADA PERALTA, Alexis y LLAMAS TERRÉS, Armando. Efectos de las armónicas en los sistemas eléctricos. 2010. 8 p.
- [12]INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Load representation for dynamic performance analysis. IEEE transactions on power systems. 1993, Vol. 8, no. 2.
- [13]INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Standard load models for power flow and dynamic performance simulation.. IEEE transactions on power systems. 1995, Vol. 10, no. 3.
- [14]INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Bibliography on load models for power flow and dynamic performance simulation.. IEEE transactions on power systems. 1995, Vol. 10, no. 1.

- [15] ALLEGO R, Ramón Alfonso, GALVIS MANSO, Juan Carlos y GARCÉS RUIZ, Alejandro. Modelamiento de cargas no lineales para análisis armónico. *Scientia et Technica*. 2004, no. 26.
- [16] FUENTES MORENO, Juan Alvaro. Modelos eléctricos de respuesta de cargas: obtención y aplicación a la identificación de usos finales en bajos niveles de agregación. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena, 2001. 202 p.
- [17] ARAGONÉS, Oriol Boix. Estudio y modelización en régimen permanente de cargas no lineales para el análisis armónico de redes eléctricas. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 1996.
- [18] RASHID, Muhammad. *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Pearson Educación, 2004. 878 p.
- [19] XU, Wilsun. Power disturbance and signaling laboratory. [En línea]. <http://www.ece.ualberta.ca/~wxu/> [citado el 27 de abril de 2015]
- [20] BAGGINI, Angelo. Handbook of power quality. Willey, 2008. 642 p.
- [21] ARRILLAGA, Jos, y NEVILLE R, Watson. Power system harmonics. Wiley, 2003. 412 p.
- [22] PEÑALOSA, Francisco J. ATPDraw cases. [En línea]. <http://www.atpdraw.net/showpost.php?id=19&kind=0> [citado el 27 de abril de 2015]

- [23]VILLA ESTRADA, Gabriel Ricardo. Evaluación del modelo de arco eléctrico para estimar niveles de flicker. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2014. 86 p.
- [24]ESTRADA VILLA, G.R., CANO PLATA, E.A. y USTARIZ FARFAN, A.J.. Modeling electric arc furnace to estimate flicker levels in power systems using ATP. 16th International conference on harmonics and quality of power, 2014. 410–414 p.
- [25][PARICIO ARIAS, Daniel Alonso. Análisis de comportamiento armónico en plantas húmedas. Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2010. 79 p.
- [26]TÉLLEZ RAMÍREZ, Eugenio. Distorsion armónica: Automatización productividad y calidad. 2008.
- [27]SUÁREZ, J.A., DI MAURO, G.F., ANAUT, D. y AGÜERO, C. Análisis de la distorsión armónica y los efectos de atenuación y diversidad en áreas residenciales. IEEE Latin América Transactions, Diciembre 2005. vol. 3, no.5.

BIBLIOGRAFÍA

MORA BARAJAS, M.A. y BAÑUELOS SÁNCHEZ, P. Contaminación armónica producida por cargas no lineales de baja potencia: modelo matemático y casos prácticos. Ingeniería, investigación y tecnología. Febrero, 2015, vol. 11, no. 2.

SCHIPMAN, Kurt y DELINCÉ, François. The importance of good power quality. ABB Power Quality Products. Bélgica. vol. 93.

BLANCO SOLANO, Jairo y JAGUA GUALDRÓN, Jorge Luis. Metodología para el diagnóstico de la causa de huecos de tensión: análisis de fallas. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2009. 116 p.

CARVAJAL CARREÑO, William. Armónicos: método híbrido tiempo-frecuencia para el Análisis de sistemas eléctricos con elementos no lineales. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2009. 127 p.

SANDOVAL CABALLERO, Estephania Diana y TROUCHÓN BRAVO, José Mauricio. Localización de fallas: validación de modelos de fuentes de alimentación y cargas empleados en la simulación de sistemas de distribución de energía eléctrica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2011. 122 p.

ORTIZ TAMAYO, Ramon Hector. Evaluación de la calidad de la potencia eléctrica (CPE) ante eventos de corta duración en un sistema de distribución. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana. 2006. 126 p.

RAMÍREZ CASTAÑO, Samuel y CANO PLATA, Eduardo Antonio. Calidad del servicio de energía eléctrica. Manizales: Universidad Nacional de Colombia. 2006. 371 p.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Power engineering society. Power system analysis, computing and economics committee. IEEE-34 Node Test Feeder.

INSTITUTO COLOMBIANOS DE NORMAS TÉCNICAS. Calidad de la potencia eléctrica. límites y metodología de evaluación en punto de conexión común. Bogotá D.C: ICONTEC, 2008. 51 p. NTC 5001.

TEJADA PERALTA, Alexis y LLAMAS TERRÉS, Armando. Efectos de las armónicas en los sistemas eléctricos. 2010. 8 p.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Load representation for dynamic performance analysis. IEEE transactions on power systems. 1993, Vol. 8, no. 2.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Standard load models for power flow and dynamic performance simulation.. IEEE transactions on power systems. 1995, Vol. 10, no. 3.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Bibliography on load models for power flow and dynamic performance simulation.. IEEE transactions on power systems. 1995, Vol. 10, no. 1.

ALLEGRO R, Ramón Alfonso, GALVIS MANSO, Juan Carlos y GARCÉS RUIZ, Alejandro. Modelamiento de cargas no lineales para análisis armónico. *Scientia et Technica*. 2004, no. 26.

FUENTES MORENO, Juan Alvaro. Modelos eléctricos de respuesta de cargas: obtención y aplicación a la identificación de usos finales en bajos niveles de agregación. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena, 2001. 202 p.

ARAGONÉS, Oriol Boix. Estudio y modelización en régimen permanente de cargas no lineales para el análisis armónico de redes eléctricas. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 1996.

RASHID, Muhammad. *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Pearson Educación, 2004. 878 p.

XU, Wilsun. Power disturbance and signaling laboratory. [En línea]. <http://www.ece.ualberta.ca/~wxu/> [citado el 27 de abril de 2015]

BAGGINI, Angelo. Handbook of power quality. Wiley, 2008. 642 p.

ARRILLAGA, Jos, y NEVILLE R, Watson. Power system harmonics. Wiley, 2003. 412 p.

PEÑALOSA, Francisco J. ATPDraw cases. [En línea]. <http://www.atpdraw.net/showpost.php?id=19&kind=0> [citado el 27 de abril de 2015]

VILLA ESTRADA, Gabriel Ricardo. Evaluación del modelo de arco eléctrico para estimar niveles de flicker. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2014. 86 p.

ESTRADA VILLA, G.R., CANO PLATA, E.A. y USTARIZ FARFAN, A.J.. Modeling electric arc furnace to estimate flicker levels in power systems using ATP. 16th International conference on harmonics and quality of power, 2014. 410–414 p.

[PARICIO ARIAS, Daniel Alonso. Análisis de comportamiento armónico en plantas húmedas. Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2010. 79 p.

TÉLLEZ RAMÍREZ, Eugenio. Distorsión armónica: Automatización productividad y calidad. 2008.

SUÁREZ, J.A., DI MAURO, G.F., ANAUT, D. y AGÜERO, C. Análisis de la distorsión armónica y los efectos de atenuación y diversidad en áreas residenciales. IEEE Latin America Transactions, Diciembre 2005. vol. 3, no.5.

DUBÉ, Laurent. Users guide to models en ATP. April 1996.

ANEXOS

ANEXO A. Código para la implementación del modelo de inyección de corriente con “MODELS” [1].

```
MODEL CZIPL -- NB! 6 character name limit

comment-----
| First, declarations required for any type 94 Norton non-TR model |
| - these data and input values are provided to the model by ATP |
| - these output values are used by ATP |
| - these names can be changed, except 'n', but not their order |
-----endcomment

DATA n          -- number of phases
     ng {dflt: n*(n+1)/2} -- number of conductances on each side

INPUT v[1..n] -- voltage(t) at each left node
      v0[1..n] -- voltage(t=0) at each left node
      i0[1..n] -- current(t=0) into each left node

VAR  i[1..n] -- current(t) into each left node (for plotting)
     is[1..n] -- Norton source(t+timestep) at each left node
     g[1..ng] -- conductance(t+timestep) at each left node
           -- sequence is 1-gr, 1-2, 1-3..1-n,2-gr,2-3..2-n,...n-gr
     flag -- set to 1 whenever conductance value is modified

OUTPUT i[1..n],is[1..n],g[1..ng],flag

comment-----
| Next, declarations of user-defined data for this particular model |
```

| - their value is defined at the time of using the type-94 component |
-----endcomment

CONST freq {val: 60}

DATA

I1 -- Corriente en Ampers pico

Fase1-- en grados

I3 -- Armónicos en Porcentaje de la corriente fundamental

Fase3

I5

Fase5

I7

Fase7

I9

Fase9

I11

Fase11

I13

Fase13

I15

Fase15

I17

Fase17

I19

Fase19

I21

VAR

It1

It3

It5

It7

It9

It11

lt13
lt15
lt17
lt19
litt
g

EXEC

```
lt1 :=l1*cos(frec*2*pi*t+((Fase1*pi)/180))
lt3 :=(l3*I1/100)*cos(3*(frec*2*pi*t+((Fase3*pi)/180)))
lt5 :=(l5*I1/100)*cos(5*(frec*2*pi*t+((Fase5*pi)/180)))
lt7 :=(l7*I1/100)*cos(7*(frec*2*pi*t+((Fase7*pi)/180)))
lt9 :=(l9*I1/100)*cos(9*(frec*2*pi*t+((Fase9*pi)/180)))
lt11 :=(l11*I1/100)*cos(11*(frec*2*pi*t+((Fase11*pi)/180)))
lt13 :=(l13*I1/100)*cos(13*(frec*2*pi*t+((Fase13*pi)/180)))
lt15 :=(l15*I1/100)*cos(15*(frec*2*pi*t+((Fase15*pi)/180)))
lt17 :=(l17*I1/100)*cos(17*(frec*2*pi*t+((Fase17*pi)/180)))
lt19 :=(l19*I1/100)*cos(19*(frec*2*pi*t+((Fase19*pi)/180)))

litt :=lt1+lt3+lt5+lt7+lt9+lt11+lt13+lt15+lt17+lt19
```

-- Cálculo de las variables de salida

g :=1/10000

is := -litt+g*v

i := litt -- t=0 current total

ENDEXEC

ENDMODEL

ANEXO B. Código para la implementación del modelo del circuito equivalente de norton con “MODELS”.

MODEL NORTON -- NB! 6 character name limit

```
comment-----
| First, declarations required for any type 94 Norton non-TR model |
| - these data and input values are provided to the model by ATP   |
| - these output values are used by ATP                           |
| - these names can be changed, except 'n', but not their order   |
-----endcomment
```

```
DATA n          -- number of phases
      ng {dflt: n*(n+1)/2} -- number of conductances on each side
      FREQ
```

```
INPUT v[1..n] -- voltage(t) at each left node
      v0[1..n] -- voltage(t=0) at each left node
      i0[1..n] -- current(t=0) into each left node
      X
```

```
VAR i[1..n] -- current(t) into each left node (for plotting)
     is[1..n] -- Norton source(t+timestep) at each left node
     g[1..ng] -- conductance(t+timestep) at each left node
              -- sequence is 1-gr, 1-2, 1-3..1-n,2-gr,2-3..2-n,...n-gr
     flag -- set to 1 whenever conductance value is modified
```

OUTPUT i[1..n],is[1..n],g[1..ng],flag

```
comment-----  
| Next, declarations of user-defined data for this particular model |  
| - their value is defined at the time of using the type-94 component |  
-----endcomment
```

CONST freq {val: 60}

DATA

```
    lh1  
    Fase1  
    Y1  
FasY1  
    lh5  
    Fase5  
    Y5  
FasY5  
    lh7  
    Fase7  
    Y7  
FasY7  
    lh11  
    Fase11  
    Y11  
FasY11  
    lh13  
    Fase13  
    Y13  
FasY13  
    lh17  
    Fase17  
    Y17
```

FasY17
lh19
 Fase19
 Y19
FasY19
lh23
 Fase23
 Y23
FasY23
lh25
 Fase25
 Y25
FasY25

VAR

lgp1[1..2]
lgp5[1..2]
lgp7[1..2]
lgp11[1..2]
lgp13[1..2]
lgp17[1..2]
lgp19[1..2]
lgp23[1..2]
lgp25[1..2]
lscp1[1..2]
lscp5[1..2]
lscp7[1..2]
lscp11[1..2]
lscp13[1..2]
lscp17[1..2]
lscp19[1..2]
lscp23[1..2]
lscp25[1..2]

lgr1[1..2]
lgr5[1..2]
lgr7[1..2]
lgr11[1..2]
lgr13[1..2]
lgr17[1..2]
lgr19[1..2]
lgr23[1..2]
lgr25[1..2]
lscr1[1..2]
lscr5[1..2]
lscr7[1..2]
lscr11[1..2]
lscr13[1..2]
lscr17[1..2]
lscr19[1..2]
lscr23[1..2]
lscr25[1..2]
lm1[1..2]
lm5[1..2]
lm7[1..2]
lm11[1..2]
lm13[1..2]
lm17[1..2]
lm19[1..2]
lm23[1..2]
lm25[1..2]
lt1
 lt5
 lt7
lt11
 lt13
 lt17
lt19
 lt23
 lt25

```
ltt  
g  
magV[1..26]  
angV[1..26]  
EE
```

MODEL FOURIER

```
INPUT X          --input signal to be transformed  
DATA  FREQ {DFLT:60}  --power frequency  
      n {DFLT:26}    --number of harmonics to calculate
```

```
OUTPUT absF[1..26], angF[1..26],F0 --DFT signals  
VAR   absF[1..26], angF[1..26],F0, reF[1..26], imF[1..26],i,NSAMPL,OMEGA  
      D,F1,F2,F3,F4
```

HISTORY

```
X {DFLT:0}
```

```
DELAY CELLS DFLT: 1/(FREQ*timestep)+2
```

INIT

```
OMEGA:= 2*PI*FREQ  
NSAMPL:=1/(FREQ*timestep)  
F0:=0  
FOR i:=1 to 26 DO  
  reF[i]:=0  
  imF[i]:=0  
  absF[i]:=0  
  angF[i]:=0
```

```
ENDFOR
```

ENDINIT

EXEC

```
--window X?  
f1:=delay(X,(NSAMPL+1)*timestep,1)  
f2:=delay(X,NSAMPL*timestep,1)  
f3:=delay(X,timestep,1)
```

```

f4:=X
F0:=F0+(f4+f3-f2-f1)/(2*NSAMPL)
FOR i:=1 to n DO
  D:=1/(i*PI)*((f4-f2)*sin(i*OMEGA*T)-(f3-f1)*sin(i*OMEGA*(T-timestep))
    +(f4-f3-f2+f1)/(timestep*i*OMEGA)*
    (cos(i*OMEGA*T)-cos(i*OMEGA*(T-timestep))))

  reF[i]:=reF[i]+D

  D:=1/(i*PI)*(-(f4-f2)*cos(i*OMEGA*T)+(f3-f1)*cos(i*OMEGA*(T-timestep))
    +(f4-f3-f2+f1)/(timestep*i*OMEGA)*
    (sin(i*OMEGA*T)-sin(i*OMEGA*(T-timestep))))

  imF[i]:=imF[i]+D
  absF[i]:=sqrt(reF[i]**2+imF[i]**2)
  IF abs(imF[i])<1E-10
  THEN
    angF[i]:=0
  ELSE
    angF[i]:=atan2(imF[i],reF[i])
  ENDIF
ENDFOR

ENDEXEC
ENDMODEL

EXEC

USE FOURIER AS FOURIERRR

DATA  FREQ      :=frec

INPUT  X        :=v[1..n]

```

OUTPUT magV[1..26]:=absF[1..26]

angV[1..26]:=angF[1..26]

EE :=F0

ENDUSE

Iscp1[1..2]:=[Ih1,Fase1]

Iscp5[1..2]:=[Ih5*(Ih1/100),Fase5]

Iscp7[1..2]:=[Ih7*(Ih1/100),Fase7]

Iscp11[1..2]:=[Ih11*(Ih1/100),Fase11]

Iscp13[1..2]:=[Ih13*(Ih1/100),Fase13]

Iscp17[1..2]:=[Ih17*(Ih1/100),Fase17]

Iscp19[1..2]:=[Ih19*(Ih1/100),Fase19]

Iscp23[1..2]:=[Ih23*(Ih1/100),Fase23]

Iscp25[1..2]:=[Ih25*(Ih1/100),Fase25]

Igp1[1..2]:=[magV[1]*Y1,angV[1]+FasY1]

Igp5[1..2]:=[magV[5]*Y5,angV[5]+FasY5]

Igp7[1..2]:=[magV[7]*Y7,angV[7]+FasY7]

Igp11[1..2]:=[magV[11]*Y11,angV[11]+FasY11]

Igp13[1..2]:=[magV[13]*Y13,angV[13]+FasY13]

Igp17[1..2]:=[magV[17]*Y17,angV[17]+FasY17]

Igp19[1..2]:=[magV[19]*Y19,angV[19]+FasY19]

Igp23[1..2]:=[magV[23]*Y23,angV[23]+FasY23]

Igp25[1..2]:=[magV[25]*Y25,angV[25]+FasY25]

Igr1[1..2]:=[Igp1[1]*cos(Igp1[2]),Igp1[1]*sin(Igp1[2])]

Igr5[1..2]:=[Igp5[1]*cos(Igp5[2]),Igp5[1]*sin(Igp5[2])]

Igr7[1..2]:=[Igp7[1]*cos(Igp7[2]),Igp7[1]*sin(Igp7[2])]

Igr11[1..2]:=[Igp11[1]*cos(Igp11[2]),Igp11[1]*sin(Igp11[2])]

Igr13[1..2]:=[Igp13[1]*cos(Igp13[2]),Igp13[1]*sin(Igp13[2])]

Igr17[1..2]:=[Igp17[1]*cos(Igp17[2]),Igp17[1]*sin(Igp17[2])]

Igr19[1..2]:=[Igp19[1]*cos(Igp19[2]),Igp19[1]*sin(Igp19[2])]

Igr23[1..2]:=[Igp23[1]*cos(Igp23[2]),Igp23[1]*sin(Igp23[2])]

Igr25[1..2]:=[Igp25[1]*cos(Igp25[2]),Igp25[1]*sin(Igp25[2])]

Iscr1[1..2]:=[Iscp1[1]*cos(Iscp1[2]),Iscp1[1]*sin(Iscp1[2])]

Iscr5[1..2]:=[Iscp5[1]*cos(Iscp5[2]),Iscp5[1]*sin(Iscp5[2])]

Iscr7[1..2]:=[Iscp7[1]*cos(Iscp7[2]),Iscp7[1]*sin(Iscp7[2])]

```

lscr11[1..2]:=[lscp11[1]*cos(lscp11[2]),lscp11[1]*sin(lscp11[2])]
lscr13[1..2]:=[lscp13[1]*cos(lscp13[2]),lscp13[1]*sin(lscp13[2])]
lscr17[1..2]:=[lscp17[1]*cos(lscp17[2]),lscp17[1]*sin(lscp17[2])]
lscr19[1..2]:=[lscp19[1]*cos(lscp19[2]),lscp19[1]*sin(lscp19[2])]
lscr23[1..2]:=[lscp23[1]*cos(lscp23[2]),lscp23[1]*sin(lscp23[2])]
lscr25[1..2]:=[lscp25[1]*cos(lscp25[2]),lscp25[1]*sin(lscp25[2])]
lm1[1..2]:=lgr1[1..2]+lscr1[1..2]
    lm5[1..2]:=lgr5[1..2]+lscr5[1..2]
    lm7[1..2]:=lgr7[1..2]+lscr7[1..2]
lm11[1..2]:=lgr11[1..2]+lscr11[1..2]
    lm13[1..2]:=lgr13[1..2]+lscr13[1..2]
    lm17[1..2]:=lgr17[1..2]+lscr17[1..2]
lm19[1..2]:=lgr19[1..2]+lscr19[1..2]
    lm23[1..2]:=lgr23[1..2]+lscr23[1..2]
    lm25[1..2]:=lgr25[1..2]+lscr25[1..2]
lt1 :=norm(lm1[1],lm1[2])*cos(frec*2*pi*t+(atan2(lm1[2],lm1[1])))
    lt5:=norm(lm5[1],lm5[2])*cos(5*frec*2*pi*t+(atan2(lm5[2],lm5[1])))
    lt7:=norm(lm7[1],lm7[2])*cos(7*frec*2*pi*t+(atan2(lm7[2],lm7[1])))
lt11:=norm(lm11[1],lm11[2])*cos(11*frec*2*pi*t+(atan2(lm11[2],lm11[1])))
lt13:=norm(lm13[1],lm13[2])*cos(13*frec*2*pi*t+(atan2(lm13[2],lm13[1])))
lt17:=norm(lm17[1],lm17[2])*cos(17*frec*2*pi*t+(atan2(lm17[2],lm17[1])))
lt19:=norm(lm19[1],lm19[2])*cos(19*frec*2*pi*t+(atan2(lm19[2],lm19[1])))
lt23:=norm(lm23[1],lm23[2])*cos(23*frec*2*pi*t+(atan2(lm23[2],lm23[1])))
lt25:=norm(lm25[1],lm25[2])*cos(25*frec*2*pi*t+(atan2(lm25[2],lm25[1]))) ltt
    :=lt1+lt5+lt7+lt11+lt13+lt17+lt19+lt23+lt25

```

-- Cálculo de las variables de salida

g :=1/10000

is := -itt+g*v

i := ltt -- t=0 current total

ENDEXEC

ENDMODEL