

**CARACTERIZACIÓN DE PERTURBACIONES ELÉCTRICAS CAUSADAS POR
LA OPERACIÓN DE FUSIBLES**

NEIL ANDERSON ORTIZ SILVA



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2012**

**CARACTERIZACIÓN DE PERTURBACIONES ELÉCTRICAS CAUSADAS
POR LA OPERACIÓN DE FUSIBLES**



NEIL ANDERSON ORTIZ SILVA

Trabajo de Investigación para optar al título de Ingeniero Electricista

Director:

Ph.D. GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA

Codirector:

Ph.D. VICTOR AUGUSTO BARRERA NÚÑEZ

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

2012

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios ya que sin Él nada de esto hubiera sido posible y de Él proviene todo lo bueno.

A mi padre Jorge Ortiz y mi madre María Silva, que son el regalo más grande que Dios me ha dado, por su apoyo, sacrificio y respaldo incondicional en todo lo referente a mi educación.

A Víctor Augusto Barrera Núñez y Jairo Blanco por todo el apoyo y orientación que me brindaron durante el desarrollo de este proyecto.

Al profesor Gabriel Ordóñez por su excelente orientación, su compromiso y constante apoyo con el desarrollo del proyecto.

A todos y cada uno de los profesores de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones por ser los gestores de nuestra formación profesional.



TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN..... 15

2. GENERALIDADES DE LOS FUSIBLES..... 17

 2.1 Fusible Limitador de Corriente 18

 2.2 Fusible de Expulsión 19

3. MODELAMIENTO DE FUSIBLES Y SIMULACIÓN DE SU OPERACIÓN 21

4. METODOLOGÍA E IMPLEMENTACIÓN..... 22

 4.1 Formulación de Descriptores 23

 4.1.1 Coeficiente de forma triangular instantánea (CFTi) 23

 4.1.2 Incremento en componentes de secuencia cero y negativa de impedancia (IZ0 y IZ.) 25

 4.1.3 Delta de tiempo de Perturbación (ΔTP) 25

 4.1.4 Pendiente de subida y caída de corriente instantánea ($iPI+$, $iPI-$): 26

 4.1.5 Porcentaje caída de tensión instantánea (%CTi)..... 26

 4.1.6 Razón de Corrientes (I_{RATIO}) 27

 4.1.7 Energía disipada (I^2t) 27

 4.1.8 Coeficiente de forma rectangular instantánea (CFRi)..... 28

 4.1.9 Angulo de Inserción de Operación Fusible ($\pm AIOP$)..... 29

 4.1.10 Cercanía Paso por Cero (CP0) 29

 4.2 Análisis Estadístico Multivariable (MANOVA) 30

 4.3 Selección de Umbrales de Decisión..... 32

 4.4 Diseño de la Metodología..... 32

 4.5 Validación de la Metodología 33

 4.6 Análisis Base de Datos ENDESA..... 35

 4.6.1 Perturbaciones Fusibles de Expulsión..... 36



Universidad
Industrial de
Santander

4.6.2	Perturbaciones Fusible Limitador de Corriente.....	37
5.	CONCLUSIONES.....	39
6.	LISTADO DE ANEXOS.....	41
7.	REFERENCIAS.....	41



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distorsión en tensión ocasionada por la operación de fusible limitador de corriente. [13]	17
Figura 2. Pico de corriente por la operación de fusible limitador de corriente. [11] 19	
Figura 3. Principales componentes del fusible limitador de corriente. [18].....	19
Figura 4.Principales componentes fusible de expulsión. [18].....	20
Figura 5. Distorsión en tensión por la operación de fusibles de expulsión.	21
Figura 6. Distorsión en corriente por operación de fusible de expulsión.	21
Figura 7. Resistencia no lineal. Modelo fusible limitador de corriente.....	22
Figura 8. Pico de corriente de forma triangular.	23
Figura 9. Muesca de tensión real ℓmt y muesca de tensión ideal ℓsi	28
Figura 10. Angulo de Inserción Operación Fusible.....	29
Figura 11. Metodología para la identificación de perturbaciones relacionadas con la operación de fusibles limitadores de corrientes corrienteenntes y fusibles.	33
Figura 12. Perturbación real ocasionada por la operación de fusible de expulsión. a) Tensión [p.u], b) Corriente [p.u].....	36
Figura 13. Perturbación ocasionada por la operación de fusible limitador de corriente.	38
Figura A.1. Dispositivo Type-94 Thevenin.....	44
Figura A.2. Diagrama de flujo, Modelo Fusible de Expulsión.....	48
Figura A.3. Circuito sencillo de prueba.....	49
Figura A.4. Circuito de 13 nodos.....	53
Figura A.5. Característica Resistencia-Tiempo Fusible Limitador de Corriente	56
Figura A.6. Curva calculada según ecuación A.3.....	58
Figura A.7. Algoritmo modelo CLF	62
Figura A.8. Circuito de prueba modelo CLF	63
Figura A.9. Circuito de 34 nodos... ..	66
Figura B.1. Característica general de un sistema de aprendizaje automático.....	86
Figura C.1. Registro #2 Fusible de Expulsión.....	93
Figura C.2. Registro #3 Fusible de Expulsión.....	93
Figura C.3. Registro #34 Fusible Limitador de Corriente	94



Universidad
Industrial de
Santander

Figura C.4. Registro #35 Fusible Limitador de Corriente.....	94
Figura C.5. Registro #39 Fusible Limitador de Corriente.....	95



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Descriptores Formulados y su Relevancia según el Análisis Estadístico.31

Tabla 2. Reglas de Selección Obtenidas con CN2..... 32

Tabla 3. Matriz de Confusión para los resultados Obtenidos por el Algoritmo.. 34

Tabla 4. Descriptores de una Perturbación Real Originada por Operación de Fusible de Expulsión. 37

Tabla 5. Descriptores de una perturbación real por la operación de fusible limitador de corriente. 38

Tabla A.1.45

Tabla A.2. Tabla comparativa validación modelo.....51

Tabla A.3. Resultados simulación. Ángulo de inserción de falla -90°54

Tabla A.4. Resultados simulación. Ángulo de inserción de falla 0°55

Tabla A.5.....57

Tabla A.6.65

Tabla A.7.68

Tabla B.1. Contrastes Multivariados.....85

Tabla B.2. Clasificación de un mineral..... 87

Tabla B.3. Esquema general de la base de entrenamiento.....90

Tabla C.1.96



LISTA DE ANEXOS

ANEXO A.....	44
A.1 MODELADO FUSIBLE DE EXPULSIÓN.....	44
A.1.1 Algoritmo del Modelo	46
A.1.2 Validación y Evaluación del Modelo.....	49
A.2 MODELADO FUSIBLE LIMITADOR DE CORRIENTE	56
A.2.1 Algoritmo del Modelo.....	58
A.2.2 Validación y Evaluación del Modelo.....	63
A.3 CODIGOS FUENTE, MODELOS DE FUSIBLES ATP-MODELS.....	71
A.3.1 Fusible de Expulsión.....	71
A.3.2 Fusible Limitador de Corriente.....	79
ANEXO B	82
B.1 IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE LOS DESCRIPTORES RELEVANTES	82
B.1.1 Análisis Multivariante de los Descriptores	84
B.2 SELECCIÓN DE LOS UMBRALES	86
B.2.1 Algoritmo CN2.....	89
B.3 ANÁLISIS DE LOS DESCRIPTORES EN CN2.....	90
B.4 METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE PERTURBACIONES ELECTRICAS POR LA OPERACIÓN DE FUSIBLES.....	91
ANEXO C.....	92
C.1 CASOS FUSIBLE DE EXPULSIÓN	92
C.2 CASOS FUSIBLE LIMITADOR DE CORRIENTE.....	93
ANEXO D.....	100



ABREVIATURAS

- **CFTi**: Coeficiente de forma triangular instantánea.
- **CS**: Coeficiente de similitud.
- **CA**: Coeficiente de acotamiento.
- **IZ0**: Incremento en componente de secuencia zero de corriente.
- **IZ-**: Incremento en componente de secuencia negativa de corriente.
- **Δ TP**: Delta de tiempo de perturbación.
- **iP⁺**: Pendiente de subida corriente instantánea.
- **iP⁻**: Pendiente de caída corriente instantánea.
- **%CTi**: Porcentaje caída de tensión instantanea.
- **I_{RATIO}**: Razón de corrientes.
- **I_{2t}**: Energía disipada .
- **CFRi**: Coeficiente de forma rectangular instantanea.
- **AIOP**: Angulo de inserción de operación fusible.
- **CP0**: Cercanía paso por cero.



Universidad
Industrial de
Santander

TITULO: CARACTERIZACIÓN DE PERTURBACIONES ELÉCTRICAS CAUSADA POR LA OPERACIÓN DE FUSIBLES. ¹

AUTOR:

NEIL ANDERSON ORTIZ SILVA²

PALABRAS CLAVE:

Perturbaciones Electromageticas, Fusible de Expulsión, Fusible Limitador de Corriente, Descriptores, Análisis Multivariante de la Varianza (MANOVA).

DESCRIPCIÓN:

Este trabajo de grado tiene como propósito brindar nuevas herramientas de fácil implementación para el análisis de perturbaciones electromagneticas en las redes de distribución de energía eléctrica. Se describe una metodología que, mediante el uso de algunos descriptores, permite el diagnóstico de perturbaciones. La metodología permite identificar eventos ocasionados por la operación de fusibles del tipo limitador de corriente y de expulsión.

A partir de las formas de onda de las perturbaciones, se realiza la formulación de descriptores con el proposito de extraer la mayor información relacionada con el evento. Posteriormente, se aplica un análisis estadístico multivariable al conjunto de descriptores planteados inicialmente para verificar la existencia de grupos o clases de acuerdo a cada causa de fusible asociada. Con el análisis estadístico se seleccionan los descriptores que resultan relevante de acuerdo al tipo de causa. Con estos descriptores y haciendo uso de técnicas de aprendizaje automático se diseña la metodología. La validación de la metodología se realiza en MATLAB tomando como señales de entrada registros de tensión y corriente reales y simulados, previamente clasificados. Por último y como caso de aplicación, se analiza una base de registros de perturbaciones reales proporcionados por la empresa de distribución de energía eléctrica de España ENDESA.

¹ Proyecto de Grado: Trabajo de Investigación.

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Gabriel Ordoñez Plata. Codirector: Víctor Augusto Barrera Núñez.



Universidad
Industrial de
Santander

TITLE: CHARACTERISING POWER QUALITY DISTURBANCES RESULTING FROM CURRENT LIMITING FUSE OPERATION.³

AUTHOR:

NEIL ANDERSON ORTIZ SILVA⁴

KEYWORDS:

Electromagnetic disturbances, current limiting fuses, expulsion fuse, descriptor, variance multi-variant analysis (MANOVA).

DESCRIPTION:

This document offers new tools of easy implementation for the analysis of electromagnetic disturbances in the distribution networks of electricity. Describes a methodology that, using some descriptors, allows the diagnosis of disturbances. The methodology to identify events resulting from the operation of current limiting fuse and expulsion fuse.

Since the waveforms of disturbances, the formulation is made of descriptors for the purpose of extracting more information relating to the event. Afterwards, a multivariate statistical analysis is applied to set descriptors initially proposed to verify the existence of groups or classes according to each cause associated fuse. With the statistical analysis are selected descriptors that are relevant for the type of cause. With these descriptors and using machine learning techniques are designing the methodology. The validation of the methodology is performed in MATLAB using as input signal voltage and current records of real and simulated, previously classified. Finally, as the case of application, we analyze a database of real shocks records provided by the company for electricity distribution in Spain ENDESA.

³ Degree Project: Research Work.

⁴ Faculty of Physical-Mechanic Engineering. School of Electrical, Electronical and Telecommunications Engineering. Dir: Gabriel Ordoñez Plata. Codir: Víctor Augusto Barrera Núñez.



1. INTRODUCCIÓN

Desde la introducción del concepto de calidad en la prestación del servicio de energía eléctrica, se ha presentado un gran interés por el estudio de las perturbaciones eléctricas que alteran la calidad del servicio. El estudio de diferentes tipos de perturbaciones y las causas asociadas a los mismos han sido motivo de recientes investigaciones, que pretenden mejorar la calidad de la energía con la disminución de eventos que afectan en gran medida un sistema eléctrico.

La aparición de perturbaciones electromagnéticas y su consecuente impacto económico, ha priorizado sus estudios en el sector eléctrico con especial interés por parte de las empresas distribuidoras de energía. En el marco regulatorio, estas empresas deben continuamente monitorizar estos eventos para ser reportados ante los entes encargados de la supervisión de la calidad de la energía eléctrica y valorar los índices de la prestación del servicio. Por tal razón, actualmente es de gran

importancia el avance en este tipo de investigaciones.

Dentro de las investigaciones relacionadas con las perturbaciones electromagnéticas se identifica el interés por estimar la localización y la causa asociada a un determinado evento. Estas causas en su mayoría están relacionadas con anomalías internas de la red o fallas de origen externo al sistema de energía.

Para la prevención de daños severos en la red eléctrica debida a estas anomalías o fallas, es común el uso y coordinación de dispositivos de protección, los cuales operan de forma característica de acuerdo a su tipo y principio de funcionamiento. El fusible es una de las protecciones más usadas en cualquier sistema eléctrico debido a su simplicidad y características de funcionamiento, y bajo costo en comparación con otros dispositivos de protección.

Durante el proceso de operación de los fusibles, se presentan fenómenos que impactan la calidad de la energía, reflejados en las distorsiones en las formas de ondas de tensión y



corriente que pueden ser registradas por los equipos de monitorización. Debido a esto y la continua aparición de equipos cada vez más sensibles a estos fenómenos, en los últimos años se ha despertado un gran interés en el estudio de las mismas. En la literatura se encuentra importantes desarrollos en la caracterización de huecos y subidas de tensión, como por ejemplo *Bollen* [14], [15]. Pero son escasos aquellos referentes al estudio de perturbaciones de corta duración como la operación de fusibles limitadores de corriente.

Los trabajos más relevantes en el estudio de los efectos por operación de fusibles, se destacan los realizados por *Kojovic* y *Williams* quienes han realizado investigaciones y pruebas sobre la distorsión que sufren las ondas de tensión y de corriente durante la operación de estos dispositivos, ante la presencia de fallas en circuitos de distribución [11] [12] [13]. También se destacan en este campo, el trabajo realizado por *Allen* y *Chopra* [2] identificando y cuantificando características únicas de la operación de fusibles en las

señales de tensión y corriente registradas aguas abajo del punto de medida. Características que son propuestas para la identificación de la operación de estos dispositivos de protección por inspección visual.

Continuando con esa línea de estudio y condesando los resultados expuestas en las diferentes publicaciones mencionadas, el presente trabajo desarrolla y propone una metodología basada en la caracterización de las formas de onda de los eventos. Con el propósito de dar una solución, que permita la identificación automática de perturbaciones causadas por la operación de fusibles.

En el artículo se presenta en la sección 2 las generalidades de los fusibles, resaltando sus principales características tanto físicas como eléctricas. En la sección 3 se describe los modelos utilizado para la simulación del fusible limitador de corriente y fusible de expulsión, y la obtención de registros de tensión y corriente. En la sección 4 se realiza la formulación de los descriptores



Universidad
Industrial de
Santander

(subsección 4.1), análisis estadístico (subsección 4.2) y selección de los umbrales de decisión (subsección 4.3), así como también, el diseño de la metodología (subsección 4.4), validación de la metodología (subsección 4.5) y Análisis base de Datos ENDESA (subsección 4.6). Las conclusiones son presentadas en la sección 5.

2. GENERALIDADES DE LOS FUSIBLES

El fusible es un simple y confiable dispositivo de seguridad, el cual presenta grandes ventajas en comparación con otros dispositivos de protección gracias a su facilidad de aplicación y en la capacidad para la protección de personas y equipos. Son dispositivos sensibles a la corriente, con características inversas de tiempo para realizar la apertura, operan una sola vez y normalmente son de acción monopolar [10]. Están constituidos por un elemento conductor de sección transversal reducida, normalmente rodeado por un extintor de arco y disipador de calor, encapsulado en un cartucho (comúnmente de forma cilíndrica) y

dotado de sus respectivos terminales de conexión.

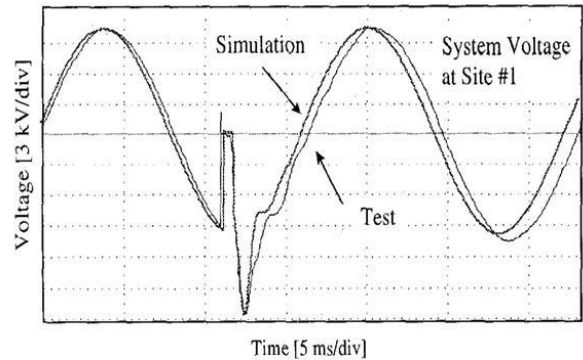


Figura 1. Distorsión en tensión ocasionada por la operación de fusible limitador de corriente.[13]

Dentro del cartucho se encuentra el elemento fusible, el cual normalmente está formado por un alambre o tiras metálicas con una sección reducida y calibrado de acuerdo con su capacidad de corriente. En esta sección metálica se produce una densidad de corriente elevada que, al pasar de un valor determinado y durante un tiempo predefinido, se produce la fusión del elemento y la apertura del circuito el cual se está protegiendo.

Para los elementos fusibles se utiliza como material un alambre de aleación a base de plomo, en el caso de bajas tensiones y corrientes, y una cinta de aleación a base de cobre o



de aluminio en el caso de corrientes más elevadas.

Como dispositivo de protección, su función principal es la de interrumpir circuitos cuando se presenta la circulación de sobrecorrientes, principalmente bajo condiciones de sobrecarga y/o cortocircuitos, y adicionalmente soportar la tensión transitoria de recuperación que se produce posteriormente al despeje de la falla.

La mayoría de los fusibles se especifican según su corriente, tensión nominal y su capacidad de interrupción. La corriente nominal indica la intensidad de corriente que puede fluir a través del dispositivo sin fundirse o exceder la temperatura límite. La tensión nominal especifica la máxima tensión que puede ser aplicado a los terminales del fusible, y la capacidad de interrupción define la máxima corriente de corto circuito que el fusible puede interrumpir de manera segura. Si una corriente de falla es mucho mayor que la capacidad de interrupción del fusible, puede ocurrir una explosión al operar, debido a las altas presiones y los

esfuerzos electromecánicos que se generarán. De acuerdo con su capacidad de ruptura, lugar de instalación y costo, es posible seleccionar el tipo de fusible en relación a los requerimientos del sistema eléctrico.

En este trabajo se tendrá en consideración los fusibles de tipo limitador de corriente y expulsión.

2.1 Fusible Limitador de Corriente

El fusible limitador de corriente se caracteriza por ser un dispositivo de rápida acción, con interrupciones de corriente de falla en tiempo inferiores a un semiciclo mediante la introducción de una elevada resistencia en el circuito, llevando la sobrecorriente a cero.

Además que, su construcción y forma de operación es más sencillo y simple que el fusible de expulsión.

Cuando se presenta una corriente de corto circuito, el elemento fusible, cuya longitud es mayor que el del fusible de expulsión y de área transversal reducida con pequeña



perforaciones, se calienta y funde rápidamente generando un arco. Arco el cual es controlado y apagado gracias al relleno de arena sílice que rodea al elemento fusible.

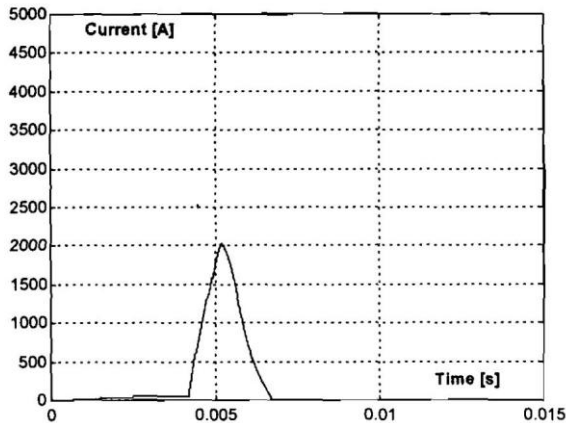


Figura 2. Pico de corriente por la operación de fusible limitador de corriente. [11]

La aparición del arco corresponde al cambio repentino del fusible de un estado de baja resistencia a apertura del circuito. Esto ocasiona una rápida reducción de la corriente del circuito, limitando el pico de corriente de corto.

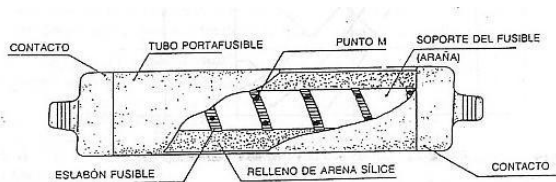


Figura 3. Principales componentes del fusible limitador de corriente. [18]

La distorsión en las formas de ondas, al presentarse la operación de este tipo de dispositivos, se caracteriza principalmente por su corta duración. Aspecto el cual se ve reflejado en tensión como una muesca, seguidamente de una sobretensión transitoria de restablecimiento y posteriormente, la tensión restablecida del sistema (Figura 1). En corriente se presenta un pico elevado de sobrecorriente durante el mismo lapso de tiempo (Figura 2).

2.2 Fusible de Expulsión

El fusible de expulsión a diferencia de su contra parte, aprovecha la generación de un gas de alta presión producido por pastillas comprimidas de ácido bórico para la extinción del arco.

El elemento fusible se encuentra entre dos contactos: uno móvil y otro fijo. El contacto móvil lo comprime un resorte y la cámara de arqueo se localiza en la parte inferior donde se encuentran las pastillas de ácido bórico, las cuales contienen un canal



Universidad Industrial de Santander

por donde se desliza el contacto móvil.

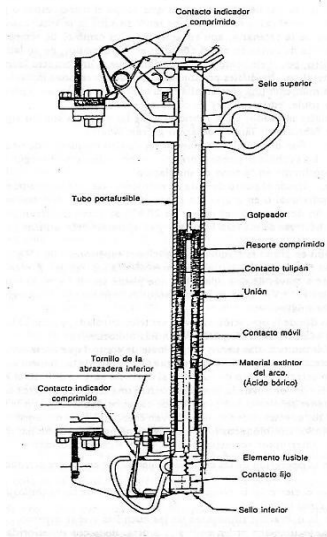


Figura 4. Principales componentes fusible de expulsión. [18]

Al fundirse el elemento fusible, se genera el arco eléctrico quedando libre el contacto móvil. El resorte que estaba comprimido desplaza el contacto móvil, produciendo un alargamiento del arco. A su vez, el arco produce calor y este provoca una reacción en el ácido bórico que desprende vapor de agua y óxido de boro. La extinción del arco se logra por la acción desionizadora del vapor y la turbulencia de las partículas del óxido de boro. Una vez que la presión interior llega a los valores elevados,

se desprende el sello y escapa el gas en forma explosiva.

Debido a la emanación de gases que se presentan en la operación de este dispositivo, es común su instalación en recintos abiertos o al aire libre.

Los fusibles de expulsión comúnmente tienen tiempos de operación prolongados, que van desde un semiciclo hasta tiempos que exceden los minutos.

En sus formas de onda, se aprecia huecos de tensión, Figura 5, y periodos largos de sobrecorriente, Figura 6, lo que implica el paso de grandes volúmenes de energía pasante (I^2t) a través del circuito, afectando así aquellos equipos en la red sensibles a corrientes muy elevadas. A diferencia del fusible limitador de corriente que, gracias a su rápida acción, su factor I^2t es muy inferior al fusible de expulsión.

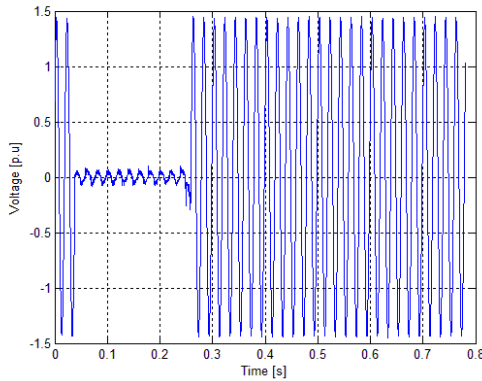


Figura 5. Distorsión en tensión por la operación de fusibles de expulsión.[1]

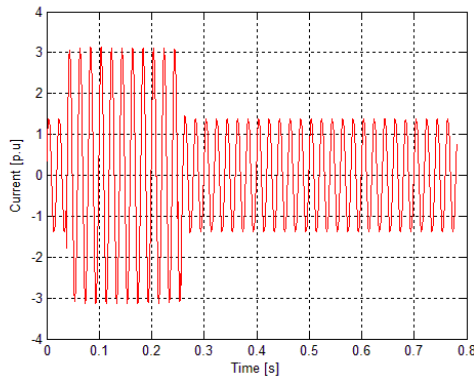


Figura 6. Distorsión en corriente por la operación de fusible de expulsión. [1]

3. MODELAMIENTO DE FUSIBLES Y SIMULACIÓN DE SU OPERACIÓN

Los fusibles fueron modelados independientemente con características diferentes, debido a las formas de operación que tienen cada uno en particular.

Los modelos fueron programados en MODELS e implementado en

dispositivos type-94 Thevenin de ATPdraw (ANEXO A). Las simulaciones se realizaron en dos circuitos de prueba, conectando el fusible a una de sus fases, de los cuales se obtuvieron los registros para la caracterización de las perturbaciones y algunas pruebas de la metodología. Los circuitos usados en las simulaciones corresponden a un sistema de 13 Nodos [6] y un sistema de 34 Nodos [7].

El fusible limitador de corriente fue modelado como una resistencia no lineal de acuerdo a lo propuesto por Kojovic y Williams en [13]. Los dos principales parámetros tenidos en cuenta en el modelamiento del fusible fueron la energía pasante I^2t y la característica no lineal de la resistencia del fusible al entrar en operación, Figura 7, como lo sugiere la publicación en mención. El modelo implementado fue para un fusible limitador de corriente de 8.3 [kV], 20 [A] (Anexo A.1).

El fusible de expulsión se modeló con base a la característica de tiempo



Universidad Industrial de Santander

inverso de un fusible de expulsión tipo K de 12 [A]. El modelo tiene la característica de un interruptor ideal cuyos tiempos de apertura están determinados por la curva de tiempo inverso y el cruce por cero de la corriente instantánea, cumpliendo con los requerimientos básicos de un fusible de expulsión:

- ✓ Apertura del sector del circuito en que se encuentra instalado al operar.
- ✓ Protección de un circuito ante sobrecorrientes.
- ✓ La instalación en serie en un circuito, sin afectar su operación en condiciones de normalidad.

4. METODOLOGÍA E IMPLEMENTACIÓN

En las siguientes secciones se describen aspectos de interés de cada una de las etapas planteadas para el desarrollo y elaboración de la metodología.

Inicialmente se expone la manera como se formularon y propusieron los diferentes descriptores según las características de las formas de onda de las perturbaciones, analizadas en funciones programadas en MATLAB. Señales que corresponden a eventos simulados en ATP-EMPT según lo mencionado en el apartado 3.

Posteriormente es presentada la aplicación de un análisis estadístico multivariable para conocer el grado de relevancia de cada uno de los

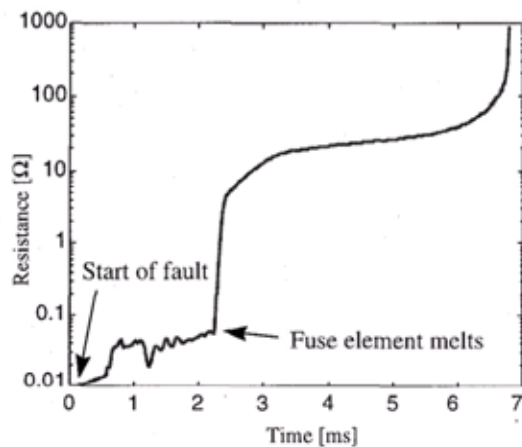


Figura 7. Resistencia no lineal. Modelo fusible limitador de corriente. [13]

Detección de sobrecorrientes.

- ✓ Tiempo de operación según la magnitud de la sobrecorriente.
- ✓ Interrupción de la corriente cuando esta cruza por cero.
- ✓ Operación única una vez activado.



descriptores y la selección de sus correspondientes umbrales de decisión de acuerdo a técnicas de aprendizaje automático, para el diseño de la metodología.

Después, se realiza la validación de la metodología haciendo uso de diferentes tipos de perturbaciones previamente identificadas. Por último, se analiza una base de datos con perturbaciones reales como caso de aplicación.

4.1 Formulación de Descriptores

La formulación de descriptores se realiza con base a las formas de onda de las perturbaciones, además de características identificadas en [2], correspondientes a la duración del evento, ángulos de inicio y finalización de la perturbación, pendientes de subida y caída de la sobrecorriente, razón de las corrientes de falla y pre-falla. Se plantea una serie de descriptores que permitan medir estas y otras características postuladas en este artículo.

A continuación se presenta la definición de cada uno de estos descriptores y su correspondiente forma de cuantificación o medida en las señales de tensión y corriente.

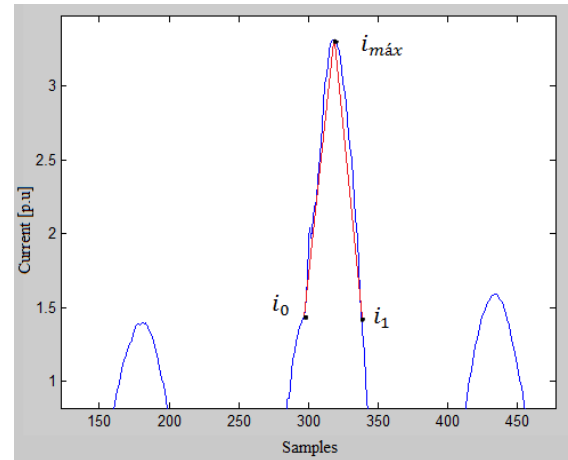


Figura 8. Pico de corriente de forma triangular. [1]

4.1.1 Coeficiente de forma triangular instantánea (CFTi)

Este descriptor es denominado como el coeficiente de forma triangular de la señales de corriente instantánea. Es propuesto para estimar si la forma de la corriente durante la perturbación es triangular o no triangular, siendo propuesto originalmente en [8] para valores eficaces. Se espera que, si se trata de una sobrecorriente diferente a la operación de un fusible, $CFTi$



obtendrá valores menores o cercanos a cero, debido a que la forma característica del comportamiento de esta corriente se asemeja a la de un triángulo.

La manera de cuantificar esta categorización es comparando las longitudes de la corriente instantánea con las longitudes de los lados de un triángulo (triángulo de referencia) cuyo vértice corresponde al valor pre-falla, post-falla, y el máximo ó mínimo valor instantánea de la corriente registrado durante la perturbación, Figura 8. En otras palabras, se estima el grado con el cual el comportamiento de la secuencia de valores de la sobrecorriente se asemeja a los lados del triángulo planteado.

Para el cálculo del descriptor CFT_i , se estiman previamente los siguientes factores:

4.1.1.1 Coeficientes de similitud (CC y CS):

CS es la diferencia entre el lado del triángulo con pendiente positiva y la longitud de las corrientes calculadas desde el punto pre-falla (i_0) hasta la

muestra que contiene la sobrecorriente máxima instantánea ($i_{m\acute{a}x}$). CC es la diferencia entre el lado del triángulo con pendiente negativa y la longitud de las corrientes entre $i_{m\acute{a}x}$ hasta alcanzar la corriente post-falla (i_1).

La expresión para la longitud de las corrientes es la siguiente:

$$\ell_{s,c} = \sum_{i=2}^{n-1} \sqrt{((1/n)^2 + (i(n_{i+1}) - i(n_i))^2)} \quad (1)$$

Donde n = número total de muestras de la perturbación.

$$CS = \left| \frac{\ell_{c_p} - \ell_s}{\ell_{c_p}} \right| \quad CC = \left| \frac{\ell_{c_n} - \ell_c}{\ell_{c_n}} \right| \quad (2)$$

Donde ℓ_{c_p} y ℓ_{c_n} son las longitudes de los lados de pendientes positivas y negativas del triángulo de referencia.

4.1.1.2 Coeficiente de acotamiento (CA):

Este coeficiente examina el porcentaje de puntos de las corrientes que caen fuera del triángulo de referencia. Este porcentaje es respecto al número total de muestras del registro (n).

$$CA = \frac{n_{out-A}}{n} \quad (3)$$



$n_{out-\Delta}$ = número de muestras cuyo valor de corriente instantánea cae por fuera del triángulo de referencia.

Con estos coeficientes se define matemáticamente el *Coficiente de forma triangular instantánea*:

$$CFTi = 1 - (CC + CS + CA) \quad (4)$$

Por lo tanto, se espera que el descriptor $CFTi$ tome valores muy cercanos a la unidad para perturbaciones de fusibles.

Para aquellas perturbaciones presentes en el semiciclo negativo se realiza el mismo análisis tomando el valor absoluto de la secuencia de valores del evento.

4.1.2 Incremento en componentes de secuencia cero y negativa de impedancia (IZ0 y IZ-).

Los descriptores $IZ0$ y $IZ-$ se utilizan para calcular el grado de desbalance de carga después de la perturbación, comparado con el desbalance presente en pre-falla. Una variación de este tipo de impedancias es característica en la salida de carga

debido a la operación de dispositivos de protección, entre ellos los fusibles. $IZ0$ y $IZ-$ se definen como la diferencia entre las integrales de las impedancias de secuencia cero antes y después de la perturbación.

$$IZ0 = Z0_{pos-falla} - Z0_{pre-falla} \quad (5)$$

$$Z0_{pre,pos-falla} = \sum \frac{Z_0(t)}{Z_{pre,pos-falla}} \quad (6)$$

El cálculo de $Z0_{pre,post-falla}$ se realiza durante dos ciclos antes y después de la perturbación y consiste en una sumatoria de las magnitudes de la impedancia de secuencia cero ($Z_0(t)$) en p.u de la impedancia pre y pos falla en cada instante de tiempo. Con este resultado se pretende identificar la salida de carga de forma desbalanceada después de una falla, como un indicativo de la operación de fusibles.

4.1.3 Delta de tiempo de Perturbación (ΔTP)

El descriptor ΔTP se define como la diferencia de muestras que hay entre el punto final (n_{final}) de la perturbación con el punto inicial



($n_{inicial}$), sobre el número total de muestras por ciclo (n).

$$\Delta TP = \frac{n_{final} - n_{inicial}}{n} \quad (7)$$

Para la determinación de los puntos inicial y final del evento se utilizó la herramienta de segmentación desarrollada en [9]. La herramienta identifica los cambios en magnitud y frecuencia de la señal, estableciendo segmentos de acuerdo a las variaciones detectadas en estos parámetros. Su funcionamiento se basa en el uso del análisis tensorial de señales y en la transformada Wavelet, aplicadas directamente sobre la secuencia de valores instantáneos de las señales. El algoritmo propuesto combina las ventajas de las dos técnicas mencionadas y se convierte en una herramienta de gran eficiencia en la segmentación de señales.

4.1.4 Pendiente de subida y caída de corriente instantánea (iPI^+ , iPI^-):

Los descriptores iPI^+ y iPI^- miden la velocidad con que crece y decae la corriente instantánea durante el

tiempo de la perturbación y se definen como la pendiente de la regresión lineal de los valores de la corriente entre los puntos $i_0 - i_{máx}$ para iPI^+ , y $i_{máx} - i_1$ para iPI^- .

Con estos descriptores se pretende extraer información importante sobre el estado transitorio del evento y descartar la operación de fusibles con otras perturbaciones de corta duración. Las pendientes de subida y de caída de la sobrecorriente son estimaciones del comportamiento del fusible durante los tiempos de fundición del elemento fusible y arco en su operación.

4.1.5 Porcentaje caída de tensión instantánea (%CTi)

El porcentaje de caída de tensión instantánea se refiere al grado de disminución que presenta la tensión durante el transcurso de la perturbación.

$$\%CTi = 1 - \left(\frac{v(n)_{perturbación}}{v(n)_{replica}} \right)_{promedio} \quad (8)$$

Para el cálculo de su valor se construye una señal réplica de la tensión con los valores de pre-falla de



la señal original, y tomando aquellas muestras que corresponden a la perturbación, se estima el valor medio de la razón de cambio de ambas tensiones.

Como consecuencia, se espera que con esté descriptor se pueda identificar aquellos eventos que tienen una disminución en la tensión instantánea entre valores de 40% y 60% que corresponde a los valores estadístico en que se ha registrado la operación de fusibles [2].

4.1.6 Razón de Corrientes (I_{RATIO})

Debido a que la característica principal de la operación de fusibles es la salida o desconexión de carga en un circuito, se propone el siguiente descriptor, definido como:

$$I_{RATIO} = \frac{I_{pre-falla}}{I_{post-falla}} - 1 \quad (9)$$

Donde $I_{pre-falla}$ y $I_{post-falla}$ corresponde a los valores eficaces en un periodo antes del inicio de la perturbación y dos periodos después de finalizado el evento, respectivamente.

Se espera que si se presenta un posible evento relacionado con la

operación de fusible el descriptor tendrá valores mayores a cero; de lo contrario, con valores menores o iguales a cero se descarta la operación del dispositivo de protección al no presentarse reducción de corriente en post-falla.

4.1.7 Energía disipada (I^2t)

El descriptor I^2t se utiliza para estimar la cantidad de energía disipada por el fusible, y se define como la integral de la corriente de falla al cuadrado y estimada durante el tiempo del evento.

$$I^2t = \int_0^t i^2 dt = \sum i^2(n) \quad (10)$$

Con este descriptor se pretende diferenciar las perturbaciones causadas por fusibles de expulsión con las causadas por fusibles limitadores de corriente. Los fusibles de expulsión disipan energía superiores a 10.000 A²s, mientras que los limitadores de corrientes presenta disipación de energía inferior a esa cifra [13].



4.1.8 Coeficiente de forma rectangular instantánea (CFRi)

Para las señales de tensión, se propone el descriptor $CFRi$ como parámetro estimativo en el cálculo de la forma de la perturbación, el cual regularmente presenta comportamiento rectangular.

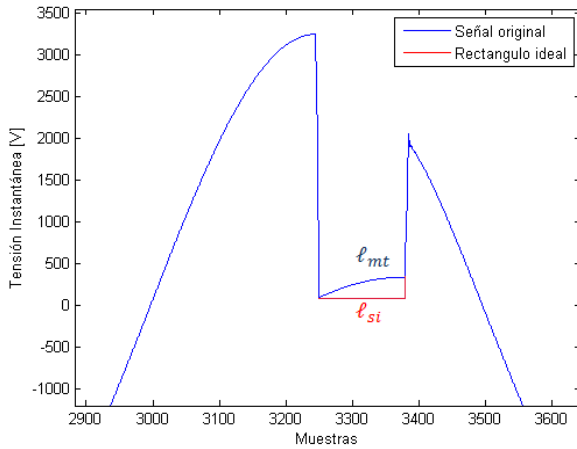


Figura 9. Muesca de tensión real ℓ_{mt} y muesca de tensión ideal ℓ_{si} . [1]

Con este descriptor se pretende conocer el grado de tendencia rectangular que existe en los valores instantáneos de tensión durante la operación del fusible.

Su cálculo se realiza mediante la comparación de las longitudes de la base de los rectángulos, tomándose como referencia un rectángulo ideal,

el cual es formado por los valores instantáneos de las muestras inicial y final de la perturbación y el menor valor absoluto registrado durante el evento. Se considera el menor valor absoluto debido a que la perturbación puede presentarse tanto en el semiciclo positivo como en el negativo.

La longitud de la recta base del rectángulo de referencia se plantea como:

$$\ell_{si} = n_T - 1 \quad (11)$$

ℓ_{si} : Longitud máxima señal ideal
 n_T : número total de muestras de la perturbación

La longitud de los valores instantáneos de la muesca de tensión se define como:

$$\ell_{mt} = \sum_2^{n_T-1} \sqrt{((1/n)^2 + (v(n_{i+1}) - v(n_i))^2)} \quad (12)$$

ℓ_{mt} : Longitud de la muesca de tensión

Con estas longitudes se define matemáticamente el *Coeficiente de Forma Rectangular Instantánea* como:

$$CFRi = \frac{\ell_{mt} - \ell_{si}}{\ell_{si}} \quad (13)$$



4.1.9 Angulo de Inserción de Operación Fusible (\pm AIOF)

El descriptor denominado *Angulo de Inserción Operación Fusible (AIOF)* corresponde al ángulo de fase en el que inicia la operación del fusible en la señal de tensión. Este descriptor se propone para las ondas de tensión y no de corriente debido a que las señales de corrientes son más propensas a ser distorsionadas por efectos de componentes de alta frecuencia que producen cruces por ceros indeseados.

El ángulo de operación es medido desde el cruce por cero previo a la perturbación hasta el valor

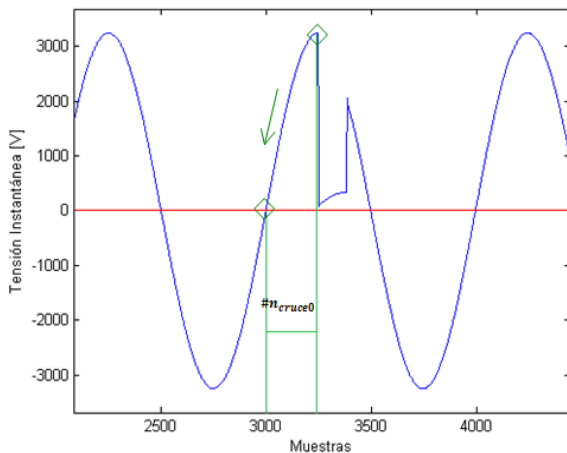


Figura 10. Angulo de Inserción Operación Fusible. [1]

instantáneo en el que inicia el evento. Para el cálculo del descriptor se debe identificar previamente el punto de inserción de la falla en la señal, determinando si ocurre en un semiciclo positivo o en el negativo y consecutivamente realizando la estimación del ángulo.

Posteriormente, se determina el número de muestras que hay entre los dos puntos de referencia. Este cálculo del número de muestras se realiza partiendo del punto inicial de falla, contando en retroceso, hasta que se identifique un cambio de signo, indicio del cruce por cero.

Según el semiciclo en el cual inició el evento el valor del descriptor será:

$$+AIOF = \frac{(\#n_{cruce0}) * 360}{n_{ciclo}} \quad (14)$$

$$-AIOF = \frac{\left(\frac{n_{ciclo}}{2} - (\#n_{cruce0} + 1)\right) * 360}{n_{ciclo}} \quad (15)$$

n_{ciclo} : número de muestras de un ciclo.

4.1.10 Cercanía Paso por Cero (CP0)

Una vez se ha presentado una perturbación, resulta importante identificar el instante en el que dicha perturbación desaparece debido al



despeje de la falla, tomando como puntos de referencia los instantes finales de los semiciclos (cruce por cero).

El descriptor *CPO* se plantea con el objeto de estimar la proximidad del punto de despeje de la falla al cruce por cero más cercano. Consecuentemente, se determina si la interrupción se presentó en un valor diferente de corriente al cruce normal de la onda por cero (característica diferenciadora entre ambos tipos de fusibles).

Es resumen, el descriptor *CPO* calcula el número de muestras que hay entre el punto final de la perturbación y el cruce por cero más cercano a este punto. Para efectos de este cálculo se sigue un procedimiento similar al expuesto en la sección 4.1.9 a diferencia que, en este descriptor se censa el número de muestras entre los cruces por ceros antes y después del punto final del evento, tomando como valor del descriptor el menor de las dos distancias dividido en el número total de muestras por periodo.

4.2 Análisis Estadístico Multivariable (MANOVA)

Para establecer el nivel de efectividad de los descriptores anteriormente planteados y el grado de relevancia de cada uno de ellos en la identificación de los eventos de tensión y corriente causados por la operación de fusibles, se realiza un análisis estadístico multivariable tras aplicar los descriptores a un conjunto de 79 señales eléctricas de tensión y corriente (obtenidas por simulación y de registros en sistemas eléctricos reales). Estas señales han sido previamente identificadas y clasificadas en 3 clases de causas, operación de fusibles limitadores de corriente, operación de fusibles de expulsión y energización de bancos de condensadores.

El análisis multivariable verifica la existencia de grupos o clases en los datos, es decir, si en el espacio de descriptores (variables) existen nubes correspondientes a grupos de perturbaciones por fusibles (limitador de corriente y expulsión) y



condensadores. De esta manera, y aplicando un Análisis Multivariante de la Varianza (MANOVA), los descriptores relevantes serán identificados.

El propósito de MANOVA es explorar como las *variables independientes* influyen en el comportamiento de las *variables dependientes* [17]. Es decir, el grado de influencia del evento en cada característica, permitiendo conocer la importancia de cada descriptor con respecto al origen del evento (fusible limitador, fusible de expulsión, energización de bancos de condensadores).

Por ejemplo, la operación del fusible limitador de corriente es considerada como una *variable independiente*, mientras que los descriptores formulados son las *variables dependientes*.

El parámetro R^2 -*corregida* (ver Tabla 1, 3ta columna) obtenido como resultado de este análisis indica el grado de influencia de la causa del evento sobre cada uno de los descriptores que se han planteado. Aquellos valores de R^2 -*corregida* cercanos a la unidad indican mayor

relevancia del descriptor con respecto al origen de la perturbación. Finalmente, fueron seleccionados los descriptores con mayor grado de influencia, aquellos con valores R^2 -*corregida* $\geq 0,5$.

Según este criterio se seleccionan los descriptores, I_{RATIO} , $CFTi$, ΔTP , $CFRi$ y $CP0$ como descriptores relevantes para la caracterización de perturbaciones electromagnéticas originadas por fusibles.

Tabla 1. Descriptores Formulados y su Relevancia según el Análisis Estadístico.

Descriptor	Definición	R^2 - <i>corregida</i>
$CFTi$	Coefficiente de forma triangular instantánea	0,639
ΔTP	Delta de tiempo de perturbación	0,727
iPI^+	Pendiente de subida de sobrecorriente instantánea	0,002
iPI	Pendiente de caída de sobrecorriente instantánea	0,023
$\%CTi$	Porcentaje caída de tensión instantánea	0,046
I_{RATIO}	Relación de corrientes	0,705
$I2t$	Energía pasante	0,036
$CFRi$	Coefficiente de forma rectangular instantánea	0,586
$\pm AIOP$	Angulo inserción operación de fusible	0,123
$CP0$	Cercanía paso por cero	0,717
$IZ0$	Incremento componente cero impedancia	0,100
$IZ-$	Incremento componente negativa impedancia	0,046

En la Tabla 1 se presenta el listado de descriptores tratados en esta sección con su correspondiente índice R .²

4.3 Selección de Umbrales de Decisión

La selección de los umbrales de decisión consiste en la búsqueda de los valores adecuados con los cuales los descriptores distinguen las diferentes causas y no permitan la presencia de solapamiento en el agrupamiento de las perturbaciones según la causa asociada. La obtención de estos umbrales se realiza mediante la técnicas de Minería de Datos, la cuales consisten en la búsqueda de patrones y de regularidades importantes en grandes bases de datos.

Para efectos de tal propósito, en el presente estudio se utiliza el algoritmo CN2, la cual es una técnica de aprendizaje automático que se basa en un algoritmo iterativo para la búsqueda de reglas IF THEN [10], de forma tal, que en cada iteración busca un conjunto de descriptores

que cubra un gran número de ejemplos de una clase determinada y sólo algunos de otras clases, de forma que éste sirva para después hacer una predicción fiable de la clase de los ejemplos a los que cubre.

Consecuentemente y con el fin de evitar falsos resultados por parte del CN2 se utiliza la heurística de la estimación laplaciana del error esperado [10].

En la Tabla 2 se presentan las reglas de selección obtenidas.

Tabla 2. Reglas de Selección Obtenidas con CN2

REGLA	ASIGNACIÓN DE LA CAUSA
IF $I_{RATIO} > 0$ AND $\Delta TP \leq 0,5313$ AND $(1,721 < CFRI \leq 338$ AND $0,402 < CFTI \leq 1)$ AND $CP0 > 0,047$	CAUSA=FUSIBLE LIMITADOR DE CORRIENTE
IF $I_{RATIO} > 0$ AND $\Delta TP > 0,5313$ AND $CP0 \leq 0,047$ AND $(CFRI \leq 0$ AND $CFTI \leq -65,662)$	CAUSA=FUSIBLE EXPULSIÓN

4.4 Diseño de la Metodología

El proceso seguido para la identificación automática de perturbaciones eléctricas ocasionadas por la operación de fusibles limitadores de corriente y de expulsión es mostrado en Figura 11.



Como señales de entrada se tienen la tensión y la corriente en el tiempo adquiridas del proceso de monitorización. Posteriormente se calculan los descriptores seleccionados como prioritarios y estos resultados son utilizados para evaluar las sentencias de decisión. Todo el análisis estadístico, selección de umbrales y diseño de la metodología se presenta de manera detallada en el Anexo B.

4.5 Validación de la Metodología

Como paso posterior a la formulación de los descriptores y al desarrollo de la metodología para la identificación de perturbaciones, se realiza la evaluación de las sentencias de decisión haciendo uso de casos de pruebas, los cuales contiene perturbaciones de fusibles ya identificadas, con el objetivo de validar la metodología propuesta y medir su grado de eficiencia.

Para la validación de la metodología, se construyó un escenario de 60 registros formado por 20

perturbaciones de fusible de expulsión, 20 de fusible limitador de corriente y 20 registros de perturbaciones de causa diferente a la operación de fusibles.

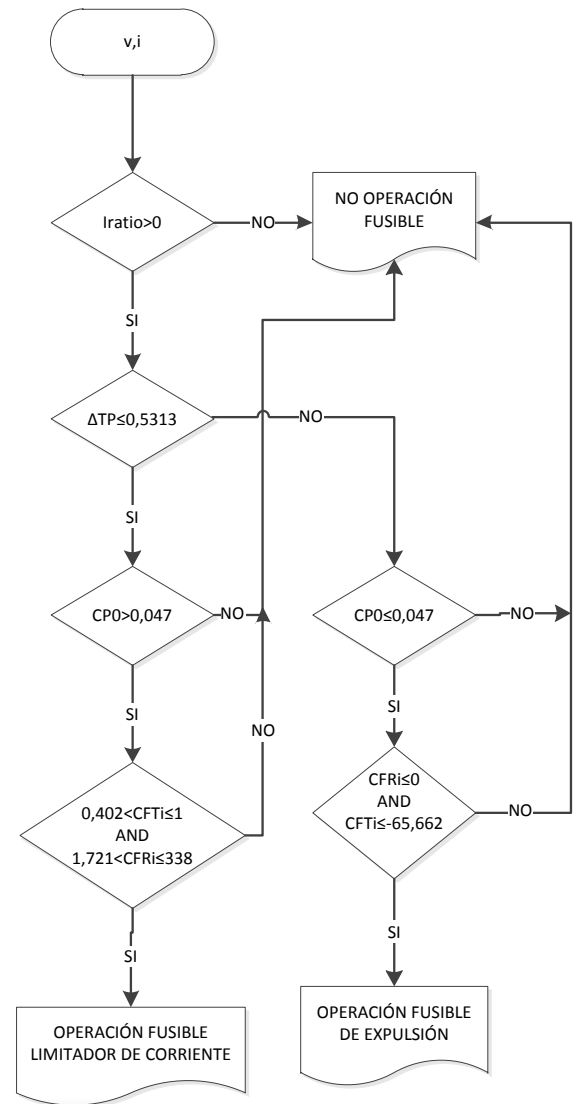


Figura 11. Metodología para la identificación de perturbaciones relacionadas con la operación de fusibles limitadores de corrientes y fusibles de expulsión. [1]

Los registros de fusibles de expulsión corresponden a datos reales proporcionados por la Universidad de Girona en España. Estos registros no han sido utilizados en ninguna de las etapas del planteamiento de la metodología. Cada perturbación está formada por 128 muestras por periodo, 50 Hz y 40 ciclos.

Debido a que no se contaron con señales reales de fusibles limitadores de corriente para este análisis, fue necesaria la creación de una nueva base de datos con registros simulados. Los registros fueron simulados en ATP según el modelo planteado correspondiente a este tipo de dispositivo, Anexo A.1.

Se realizaron 20 simulaciones de 128 muestras por periodo, 60 HZ y 6 ciclos de duración, en los circuitos de 13 y 34 nodos, con variaciones en los parámetros de: ángulo de inserción de falla (0°, -90°, 90° y 45°), lugar de la medición (aguas arriba y aguas abajo de punto de medida), impedancia de falla y corriente límite de operación ($I_{m\acute{a}x}$).

La matriz de confusión mostrada en la Tabla 3 presenta los resultados del análisis en mención.

Tabla 3. Matriz de Confusión para los resultados Obtenidos por el Algoritmo.

CAUSA	fusible expulsión	fusible limitador de corriente	No fusible	TOTAL
Verdaderos positivos (VP)	18	17	20	55
Falsos negativos (FN)	2	3	0	5
Falsos positivos (FP)	0	0	5	5
Verdaderos negativos (VN)	40	40	35	No Aplica
Rata de verdaderos positivos (RTP)	0,9	0,85	1	0,917
Rata de falsos positivos (RFP)	0	0	0,14	0,047

La rata de verdaderos positivos (RTP) representa la eficiencia con la que el algoritmo clasifica las perturbaciones correctamente de acuerdo a la causa que las originó (fusibles de expulsión, fusible limitador de corriente ó no fusible). Por ejemplo, tal como se observa en la Tabla 3 con las perturbaciones de fusibles de expulsión, el RTP indica que la metodología clasifica correctamente el 90% de todo el conjunto de evento que compone el escenario. La rata de



Universidad
Industrial de
Santander

falsos positivos (RFP) indica que tanto se confunde la metodología a la hora de asignar la causa de una perturbación. Así, en el caso perturbaciones relacionadas con los fusibles limitadores de corriente es igual a cero, y se interpreta que el algoritmo no está asignando esta causa a eventos diferentes a la misma.

En general, la metodología obtuvo los siguientes RTP y RFP globales. Un RTP de 0,917 y un RFP de 0,047.

En el Anexo C se presenta la tabla de resultados de cada uno de los registros analizados en la validación, así como también un análisis de aquellas perturbaciones que no fueron clasificadas correctamente.

4.6 Análisis Base de Datos ENDESA

La base de Datos de ENDESA comprende un conjunto de 1288 registros en formato MAT de MatLab®, organizadas en dos grupos. El primer grupo contiene 477 perturbaciones registrados aguas arriba con respecto al punto de

registro, mientras que el otro grupo contiene 811 perturbaciones con origen aguas abajo. Las señales son formas de onda de tensión y corriente tomadas en el secundario de los transformadores de distribución.

Las perturbaciones fueron registradas en subestaciones de distribución (25 [kV]) de ENDESA, frecuencia fundamental 50 Hz y 128 muestras por ciclo. Las perturbaciones reales suministrados por esta empresa tienen algunas causas asociadas como: fallas de red y la energización de algunos transformadores.

Propuesto el algoritmo para el diagnóstico de perturbaciones ocasionada por operación de fusibles y comprobada la efectividad del mismo, se procede a analizar la base de datos de ENDESA como caso de aplicación de la metodología. Base en la cual no ha sido clasificada el tipo de perturbación estudiado en este trabajo. El análisis consiste en tomar los registros de perturbaciones de la base de dato, extraer los descriptores y evaluarlos en las sentencias de



decisión de la metodología, Figura 11.

Se presenta en detalle dos ejemplos de diferentes de tipos de perturbaciones identificados en la base de ENDESA. El primero causado por la operación de un fusible de expulsión, el segundo por la operación de un fusible limitador de corriente.

4.6.1 Perturbaciones Fusibles de Expulsión

Al realizar el análisis a todos los registros de la base de datos de ENDESA, la metodología propuesta determinó que existía un total 342 perturbaciones de larga duración y 84 perturbaciones de corta duración.

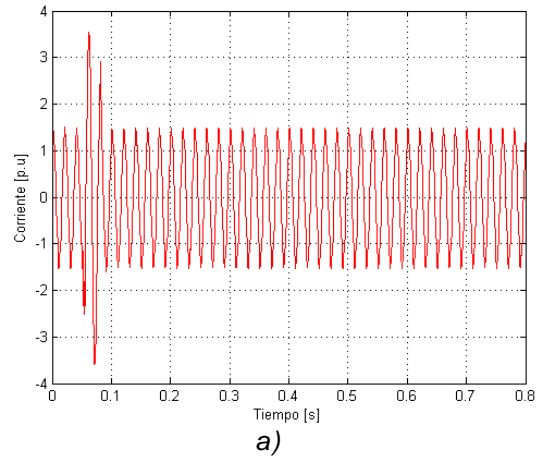
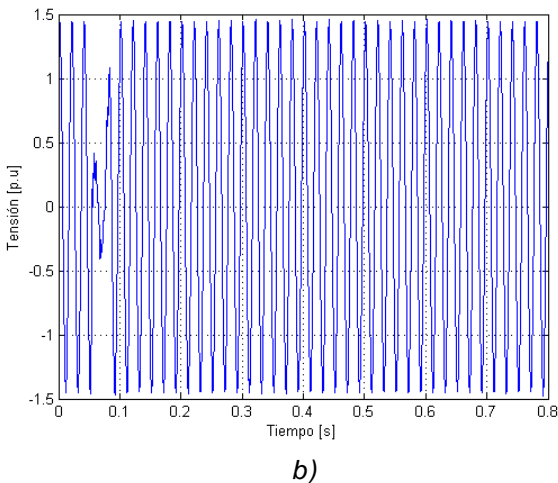


Figura 12. Perturbación real ocasionada por la operación de fusible de expulsión. a) Tensión [p.u], b) Corriente [p.u]. [1]

De las 342 perturbaciones de larga duración se identificaron 22 registros como ocasionados por la operación de fusibles de expulsión, de los cuales 18 se identificó la operación en una sola fase, 2 registros en las 3 fases, 1 operación bifásica.

En la Figura 12 se observa las formas de onda en tensión y corriente instantáneas de un caso monofásico identificado por la metodología, ubicado aguas abajo con respecto al punto de medida. Esta perturbación presenta una reducción en tensión en la fase B de hasta un 65%, y un incremento en la corriente aproximadamente de 133% en falla. En post-falla la tensión se recupera a



su valor nominal con una reducción en la corriente de 13,8%.

La Tabla 4 presenta los valores de los descriptores para la señal de la Figura 12.

Dado que el descriptor I_{RATIO} es mayor que cero, se determina que hubo una reducción del flujo de corriente finalizado el evento, considerando así la posibilidad de ser causado por fusible. Seguidamente, se establece que ΔTP es mucho mayor a 0,5313 lo cual, según la metodología, se define como una perturbación de larga duración con aproximadamente un ciclo y medio de longitud. Además, el descriptor $CP0$ que cuantifica la cercanía que tuvo el despeje de la falla con el cruce por cero de la corriente, establece que la interrupción de la sobrecorriente se presento aproximadamente cuando la corriente cruzaba por cero, característica común de los fusibles de expulsión. Por último los descriptores $CFTi$ y $CFRi$ los cuales miden la forma de onda de la perturbación presenta valores por muy debajo de cero para que

representan formas de ondas debido a la operación de un fusible de expulsión.

Por lo tanto, y según la metodología planteada, el registro es clasificado como una perturbación de larga duración cuya causa asociada es la operación de un fusible de expulsión.

Tabla 4. Descriptores de una perturbación real originada por operación de fusible de expulsión.

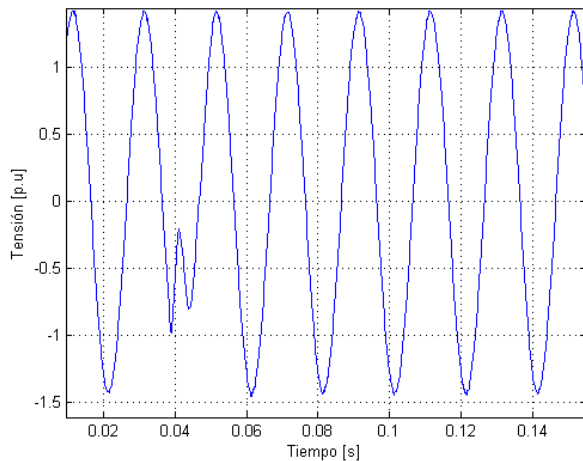
Descriptor	VALOR
I_{RATIO}	0,0202
ΔTP	1,6621
$CFTi$	-105,6746
$CFRi$	-1,0296
$CP0$	0,0234

4.6.2 Perturbaciones Fusible Limitador de Corriente

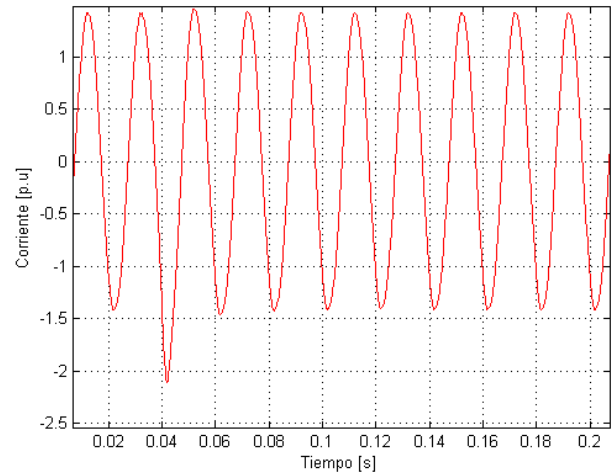
De los 84 registros identificados como perturbaciones de corta duración, el análisis de los descriptores calculados de acuerdo a las sentencias de decisión de Figura 11, determino que 2 de esos registros corresponde a perturbaciones de origen operación fusible limitador de corriente.



Al realizar una revisión visual minuciosa a cada uno de estos registros, se pudo constatar que los resultados del análisis por la metodología propuesta eran acertados, debido a que la mayoría de las perturbaciones de corta duración no presentaba las características comunes de operación estos dispositivos de protección. Características tales como disminución de la corriente post-falla en comparación con la corriente pre-falla, elevación abrupta de la corriente instantánea al presentarse la perturbación y recuperación o aumento de la tensión post-falla.



a)



b)

Figura 13. Perturbación ocasionada por la operación de fusible limitador de corriente. a) Tensión [p.u], b) Corriente [p.u]. [1]

Tabla 5. Descriptores de una perturbación real por la operación de fusible limitador de corriente.

Descriptor	VALOR
I_{RATIO}	0,0054
ΔTP	0,3906
$CFTi$	0,9596
$CFRi$	1,9469
$CP0$	0,1719

En la Figura 13 se presentan las formas de onda de una de las perturbaciones diagnosticada como operación de fusible limitador de corriente extraída de la base de datos de ENDESA.

Teniendo en cuenta el conjunto de descriptores calculados en la Tabla 5



para la perturbación de la Figura 13, se puede afirmar que:

- I_{RATIO} es mayor que cero, lo cual indica que dicho evento presenta disminución en la corriente en post-falla.
- ΔTP es un poco mayor a un cuarto de ciclo, catalogando el evento como perturbación de corta duración.
- El coeficiente de forma triangular CFT_i presenta un valor aproximado a la unidad, indicando la sobrecorriente tiene forma triangular.
- El coeficiente de forma rectangular CFR_i presenta un valor superior a 1,7. Lo cual indica que su deformación en tensión puede ser catalogada como una muesca de forma rectangular.
- El descriptor $CP0$ establece el punto de despeje de falla el cual se presenta en un punto diferente a un cruce por cero.

Finalmente, la causa de la perturbación es identificada como operación de fusible limitador de corriente debido a que cumple con las características comunes a esta causa y medidos por el conjunto de descriptores señalados anteriormente.

5. CONCLUSIONES

- A partir de una revisión bibliográfica del estado del arte sobre la operación de fusibles de expulsión y limitadores de corriente se encontró que el estudio sobre los efectos que producen en los sistemas eléctricos no es muy significativo. De forma similar, en estudios de caracterización que permita su identificación automática.
- Se implementó una metodología para la detección automática de eventos causados por la operación fusibles registrados en los sistemas de distribución de energía eléctrica de acuerdo al tipo de fusible que lo origina.

El proceso de caracterización de eventos causados por fusibles



Universidad
Industrial de
Santander

estuvo basado en la selección de un conjunto de descriptores con el propósito de cuantificar las características relevantes de las perturbaciones. Descriptores que, mediante la combinación de herramientas estadísticas con el previo análisis de los registros de entrada, se evaluaron para conocer su grado de efectividad y mediante técnicas de minería de datos, la determinación de umbrales de decisión.

Se validó la metodología con un conjunto de eventos reales y simulados.

- La metodología propuesta en este trabajo pretende ser una opción útil y confiable para aquellas empresas que abordan el tema de la calidad de la energía desde el punto de vista de optimización de los recursos.
- El conjunto de descriptores propuesto en este trabajo, y que a su vez fueron seleccionados como relevantes, se caracterizan por requerir segmentación en la señales de tensión y corriente. Lo cual conlleva a errores en la estimación de los mismos cuando la segmentación es inadecuada.
- En el análisis de perturbaciones de corta duración, es necesario una tasa de muestro alta para no incurrir en errores en la segmentación de la señales. Debido a su naturaleza de corta duración (menores a medio ciclo) pueden presentar problemas para el cálculo de descriptores ya que no cuenta con la suficiente cantidad de muestras (información).
- Se desarrollaron e implementaron modelos de los fusibles de estudio, para la elaboración de la metodología con resultados satisfactorios, los cuales sirvieron como base en el estudio de los efectos producidos por estos dispositivos en los sistemas de distribución eléctricos.
- La combinación de técnicas de análisis estadístico multivariable y técnicas de aprendizaje automático sirven de soporte para otros estudios en distintas áreas en los cuales se requiera clasificar a partir de una serie de características



Universidad
Industrial de
Santander

(descriptores) un determinado evento, estado de anomalía o proceso.

- A partir del presente trabajo, se obtuvieron como productos adicionales la participación como ponencia en el *IV Simposio Internacional sobre la Calidad de la Energía Eléctrica*, Asunción-Paraguay 2011. Adicionalmente fue seleccionada entre las 20 mejores artículos del evento, y por consiguiente fue publicada en la revista *INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN* (Vol. 31, No 2 SUP: SICEL 2011, pp. 88-96) [19]; revista clasificada como A1 por Colciencias. En el Anexo D se presenta la publicación en mención.

6. LISTADO DE ANEXOS

A continuación se realiza una presentación del contenido de los anexos relacionados con el presente trabajo:

- Anexo A: Modelado fusible limitador de corriente y fusible de expulsión, diagramas de flujo, códigos fuente en ATP-MODELS, validación y simulaciones de los modelos.
- Anexo B: Análisis estadístico multivariable, identificación y selección de los descriptores relevantes en la identificación de eventos relacionados con la operación de fusibles, selección de umbrales y sentencias de decisión, diseño del diagrama de flujo para el diagnóstico automática de perturbaciones por fusibles.
- Anexo C: Validación de la metodología propuesta, tabla de resultados y análisis de casos no identificados correctamente por la metodología.
- Anexo D: artículo publicado en la revista *INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN*, SICEL 2011.

7. REFERENCIAS

- [1] Autor
- [2] Alicia J. Allen, Shivaz Chopra, Surya Santoso, and Thomas A. Short, "Unique Waveform Characteristics of Current Limiting Fuse Operations," *IEEE Transactions on Power Delivery and Energy Society General Meeting*, pp. 1-6, July 2010.



Universidad
Industrial de
Santander

- [3] Arthur Wright and Gordon Newbery, *Electric Fuses*, 3rd ed. London, United Kingdom: IEE Power & Energy Series, 2004.
- [4] C.J. Santos, D. Courvy, M. Tavares, and M. Oleskoviccz, "An ATP Simulation of Shunt Capacitor Switching in an Electrical Distribution System," *Dept of Electrical Engineering. University of Sao Paulo*, 2001.
- [5] H.R. Barker and B.M. Barker, *Multivariate Analysis of Variance (Manova) a Practical Guide to its use in Scientific Decision Making*. Alabama, 1984.
- [6] IEEE Distribution System Analysis. (2010, September) Radial Test Feeders. 13 bus Feeder (XLS and DOC). [Online]. <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders.html>.
- [7] IEEE Distribution System Analysis. (2010, September) Radial Test Feeders. 34 bus Feeder (XLS and DOC). [Online]. <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders.html>.
- [8] J. Blanco and J. Jagua, *Metodología para el Diagnóstico de la Causa de Hundimientos de Tensión: Análisis de Fallas*. Bucaramanga, Colombia: Tesis de Pregrado de la Universidad Industrial de Santander, 2009.
- [9] Jairo. Blanco, *Diseño de una Metodología para la Valoración de Eventos Causados por Fallas de Red e Inserción de Bancos de Condensadores en Sistemas de Energía Eléctrica*. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander: Tesis de Maestría en Ingeniería Eléctrica, 2012.
- [10] Jesus Maria Rincon Daza and Camilo Eduardo Urquijo Velasquez, *Modelamiento y Simulación de Protección por Sobrecorriente Utilizando EMTP*. Bucaramanga, Colombia: Tesis de Pregado. Universidad Industrial de Santander, 1995, ch. 3, pp. 84-104.
- [11] Lj. A. Kojovic and S. Hassler, "Application of Current Limiting Fuses in Distribution Systems for Improved Power Quality and Protection," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, no. 2, pp. 791-800, April 1997.
- [12] Lj. A. Kojovic, S. P. Hassler, and H. Singh, C. W. Williams,



Universidad
Industrial de
Santander

"Current-Limiting Fuses Improve Power Quality," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, pp. 281-286.

[13] Lj. A. Kojovic, S.P. Hassler, K. L. Leix, C. W. Williams, and E. E. Baker, "Comparative Analysis of Expulsion and Current-Limiting Fuse Operation in Distribution Systems for Improved Power Quality and Protection," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 3, pp. 863-869, July 1998.

[14] M.H.J Bollen and L. Zhan, "A Method for Characterisation of Three-Phase Unbalanced Dips from Recorded Voltage Waveshapes," *IEEE Telecommunications Energy Conference, Chalmers of Electric of Technology*, 1999.

[15] M.H.J Bollen and L. Zhan, "Characteristic of Voltage Dips (Sags) in Power System," *IEEE Trans. Power*, vol. 15, no. 2, pp. 827-832, April 2000.

[16] Nick Angelopoulos, "All About Fuses," *IEEE Potentials*, vol. 10, no. 4, pp. 34-36, 1991.

[17] Peter Clark and Robin Boswell, "Rule Induction with CN2: some recent improvements," *Machine*

Learning-Proceedings or the Fifth European Conference (EWSL-91).

[18] Raul Martín, "Diseño de Subestaciones Eléctricas", Mc Graw-Hill, 1992, pp. 105-110.

[19] V. Vega, "Detección y Clasificación Automática de Perturbaciones que Afectan la Calidad de la Energía Eléctrica," *Universidad Industrial de Santander. Tesis de Maestría*, 2007.



Neil Ortiz S. estudiante de pregrado en ingeniería eléctrica de la Universidad Industrial de Santander. Pertenece al grupo de investigación en sistemas de energía eléctrica Gisel. Realizó su proyecto de grado en el tema de calidad de la energía eléctrica.



ANEXO A

A.1 MODELADO FUSIBLE DE EXPULSIÓN

El modelo del fusible se realiza con base a la característica Tiempo Inverso de un fusible de expulsión Tipo K de 12 [A] ^[5]. Modelo el cual, se define como un interruptor de apertura permanente y en cruce por cero, normalmente cerrado, cuyo tiempo de operación es función de la corriente eficaz de falla que fluye a través del dispositivo [10]. Los tiempos de operación son definidos con 34 puntos de la curva de tiempo inverso, seleccionados de tal manera que definen el comportamiento de toda la curva, Tabla A.1.

El modelo se implementa en ATP mediante la programación en MODELS (lenguaje de programación utilizada por ATP), haciendo uso de un dispositivo de tipo Type-94 Thevenin (dispositivo programable, Figura A.1). Su entrada corresponde a la corriente instantánea que atraviesa al dispositivo y sus salidas están definidas por la corriente que circula por el dispositivo y la caída de tensión que este ocasiona en sus terminales, ecuaciones A.1 y A.2.

$$i = \frac{v_{th}}{R+r_{th}} [A] \quad (A.1)$$

$$v = R * i [V] \quad (A.2)$$

Donde v_{th} y r_{th} corresponde a los valores de tensión y resistencia de Thevenin, los cuales son parámetros por defecto del dispositivo T94. R es la resistencia del modelo cuyo valor por defecto es 0.01 [Ω].

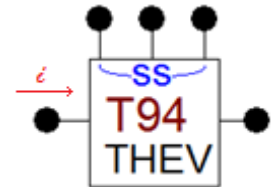


Figura A.1
Dispositivo Type-94
Thevenin. Modelo del
fusible de expulsión
en ATP-MODELS. [1]

^[5] Total Clearing Time-Current Characteristic Curves for Kerny Type K fuse Link. Mc. GRAW EDISON CUTOOUT basis for data Standards ANSI C 37 41. Dated 1969



La lógica básica del modelo consiste en censar la corriente eficaz que fluye por el modelo y analizar si ésta es mayor o igual al límite de operación. Al presentarse una violación del límite, el modelo compara el valor rms de la corriente con los valores de la primera columna de la Tabla A.1, determinando el tiempo de operación. Al transcurrir el tiempo de operación, el fusible espera a que la corriente haga su primer cruce por cero, para interrumpir de forma permanente el flujo de corriente. Mientras no se registre sobrecorrientes que activen el modelo, este se comportará como una resistencia de 0,01 $[\Omega]$ de acuerdo a [13].

Como es mostrado en la Figura A.3, el modelo es instalado en serie en la rama en la cual se desea proteger.

Para la evaluación y validación del modelo planteado, se realiza en primer lugar simulaciones con el circuito de prueba de [11]. Artículo donde se exponen pruebas de laboratorio a un fusible real, con los cuales se compararon las obtenidas en las simulaciones, para validar el modelo.

Posteriormente se realiza un conjunto de simulaciones en un circuito de 13 nodos (Figura A.4), registrando medidas en la cabecera de la red, en la rama de falla, en el modelo del fusible y aguas arriba de la rama fallada. La falta se simula como una falla monofásica a tierra permanente con un valor determinado de impedancia que varía según la prueba que se realiza, e igualmente se varía el ángulo de inserción de la falla. Los resultados de las simulaciones son analizados en detalle para evaluar su funcionamiento.

Corriente [Arms]	Tiempo [s]
30	70
31	60
32	50
33	40
34	30
35	20
37	10
39	9
40	8
41	7
43	6
45	5
48	4
53	3
60	2
74	1
77	0.9
80	0.8
84	0.7
88	0.6
95	0.5
100	0.4
112	0.3
130	0.2
180	0.1
190	0.09
210	0.08
220	0.07
240	0.06
270	0.05
310	0.04
400	0.03
600	0.02
850	0.0075

Tabla A.1



A.1.1 ALGORITMO DEL MODELO

La lógica completa del algoritmo implementado (Figura A.2.) en el modelo se detalla a continuación, explicando cada una de las variables que lo conforman y las sentencias de decisión que implica su procesamiento.

El algoritmo se establece con un único parámetro de entrada definido por el usuario, ***I_{max}***, que corresponde al valor de corriente eficaz con que se activa el fusible ó límite de operación ^[6]. Este valor es el primer elemento de la primera columna de la Tabla A.1 de la curva Tiempo Inverso. El valor de la corriente eficaz se obtiene mediante una función llamada ***rms(x)***. El algoritmo está definido dentro del bucle ***EXEC*** que es el utilizado por MODELS para evaluar el código en cada paso de tiempo. Se puede considerar ***EXEC*** como un bucle FOR que inicia en el primer instante de tiempo, hasta el final de la simulación con paso “*delta T*”.

Al presentarse la sobrecorriente, la activación de fusible se registra con el cambio de la variable ***falla***, de 0 a 1, y almacenando el instante de tiempo en que se presentó la sobrecorriente en la variable ***tif***. Posteriormente, se evalúa el valor eficaz de la sobrecorriente y se determina su correspondiente tiempo de fundición (***t_{ment}***), según la Tabla A.1.

Debido al retardo que presenta la función ***rms(x)***, en el cálculo del valor rms de la corriente, se define un conjunto de variables (***tif***, ***tsf***, ***tas***) para compensarlo en el cálculo de ***tt***, ecuación A.3. La variable ***tt*** corresponde al instante de tiempo en la simulación en el que el elemento del fusible se funde y espera a partir de ese momento el primer cruce por cero para interrumpir el flujo de corriente.

$$tt = \text{tiempo de fundición}(t_{ment}) - \text{tiempo de demora}(tas) + \text{tiempo simulado}(t) \quad (A.3)$$

Al ser establecido el tiempo ***tt***, el algoritmo procede a esperar el primer cruce por cero de la sobrecorriente. Este procedimiento lo determina la variable ***pasocero***, la cual es el producto de la corriente en dos instantes diferentes de tiempo. La

^[6] Entiéndase como fusible al modelo del fusible



sobrecorriente en el instante actual de la simulación (i) y la misma en el instante de tiempo anterior (i_2). Cuando se presenta el cruce por cero este producto tendrá un valor menor que cero, criterio para iniciar la interrupción del flujo de corriente por el fusible. El registro del cruce por cero se realiza en el cambio del valor de 0 a 1 en la variable **ceropfalla**.

Con un valor de 1 en la variable **ceropfalla**, se procede a evaluar los parámetros de salida de modelo como:

$$i = 0 [A] \quad (A.1)$$

$$v = R * i [V] \quad (A.5)$$

En todo el tiempo restante de la simulación.

El Anexo A.3.1 contiene el código fuente utilizado en la programación del modelo en ATP-MODELS.

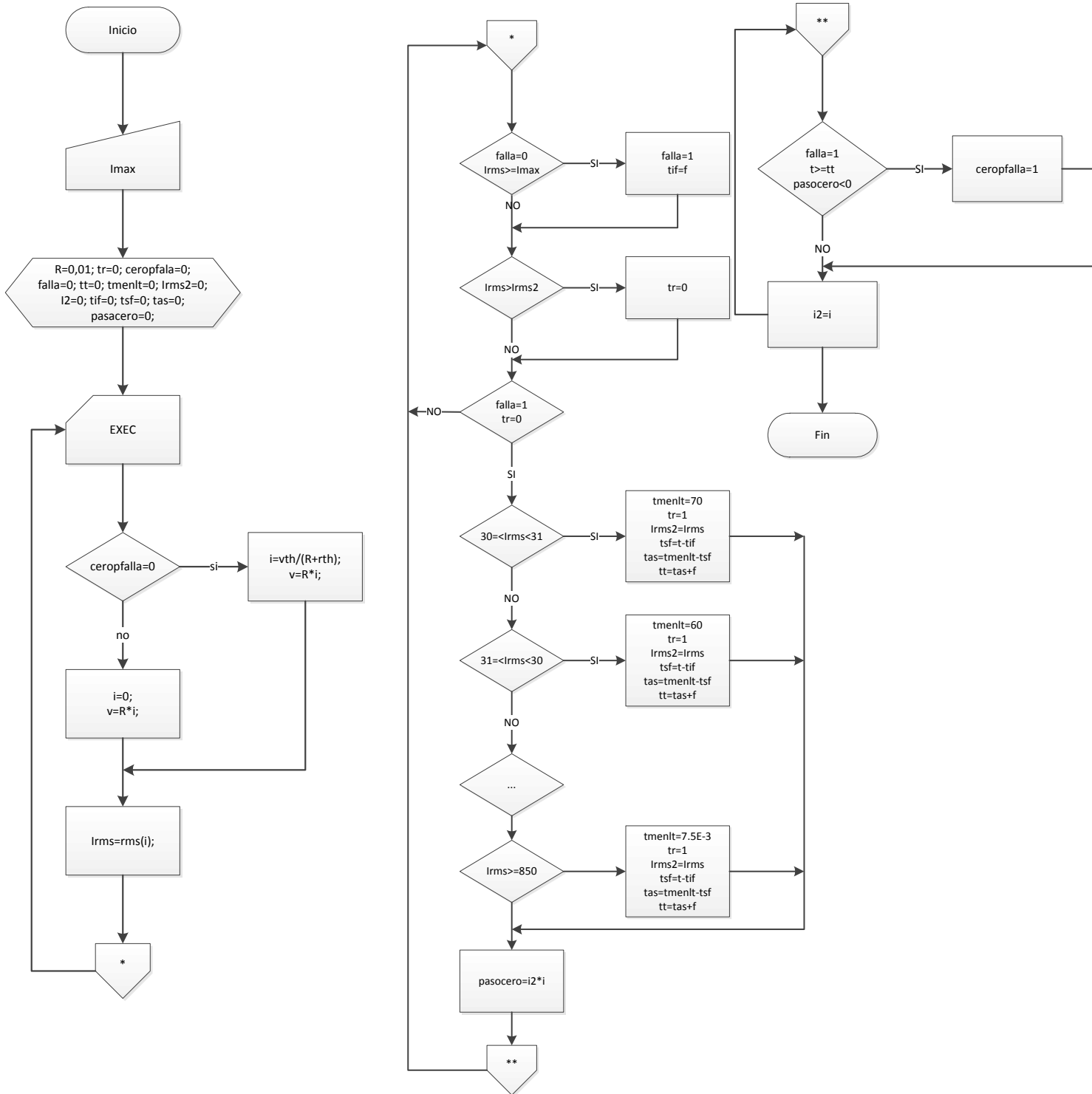


Figura A.2. Diagrama de flujo, modelo fusible de expulsión. [1]



A.1.2 VALIDACIÓN Y EVALUACIÓN DEL MODELO

A.1.2.1 Circuito sencillo: La primera simulación se realizó con el circuito de prueba planteado en la Figure 1 de [11]. La prueba se plantea utilizando el fusible en serie con la falla a tierra y paralelo a la carga. Se implementa una impedancia de falla de 0,01 [Ω] y se toma medidas de tensión y corriente en la carga y en la rama del fusible (rama de falla). Al fusible se le instala en paralelo una red Snubber de valores $R = 11$ [Ω], $C = 0,333$ [μF] para disminuir el ruido presentado al interrumpirse el flujo de corriente y apreciar mejor el comportamiento de la tensión operado el fusible. La falta se introduce al circuito ocurrido 50 [ms] de la simulación, la cual es una falla permanente. Corriente nominal del circuito 7,07 [Arms]. Corriente de falla 2181,42 [Arms].

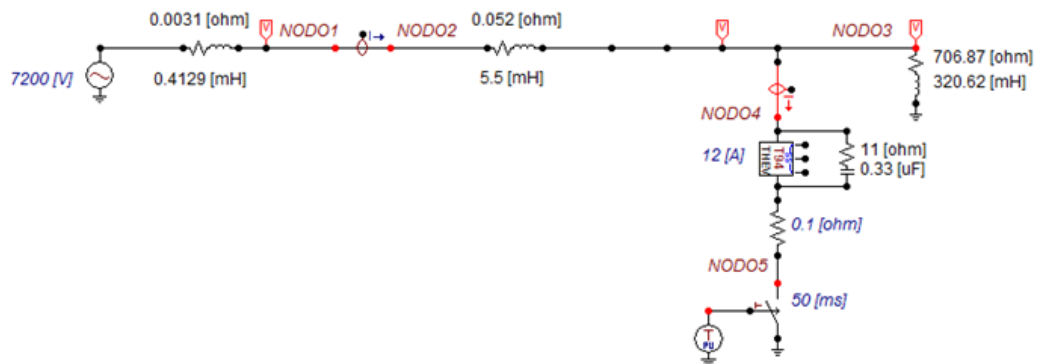


Figura A.3. Circuito de prueba sencillo. [1]

De acuerdo a la Tabla A.2, se puede observar la gran similitud entre los datos obtenidos en la simulación y los datos reales expuestos en el artículo de estudio. Por lo cual se puede considerar el modelo como una buena aproximación de este dispositivo de protección, según sus características de operación ante eventualidades de sobrecorriente de tiempos prolongados. El modelo cumple específicamente con los requerimientos básicos de un fusible de expulsión:

- ✓ Detección de sobrecorrientes
- ✓ Tiempo de operación según la magnitud de la sobrecorriente



Universidad
Industrial de
Santander

- ✓ Interrupción de la corriente cuando esta cruza por cero
- ✓ Operación única una vez activado
- ✓ Apertura del sector del circuito en que se encuentra instalado al operar.
- ✓ Protección de un circuito ante sobrecorrientes.
- ✓ La instalación en serie en un circuito, sin afectar su operación en condiciones de normalidad.

Por lo tanto, se ha logrado plantear un algoritmo que permite de manera práctica y sencilla el modelado de cualquier tipo de fusible de expulsión con solo la descripción de su característica de tiempo inverso.



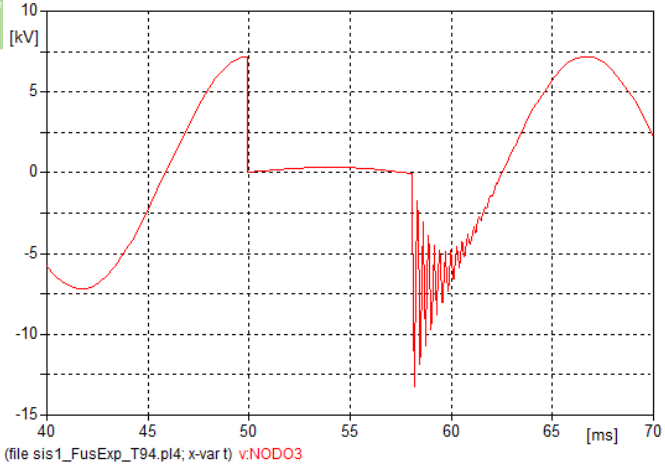
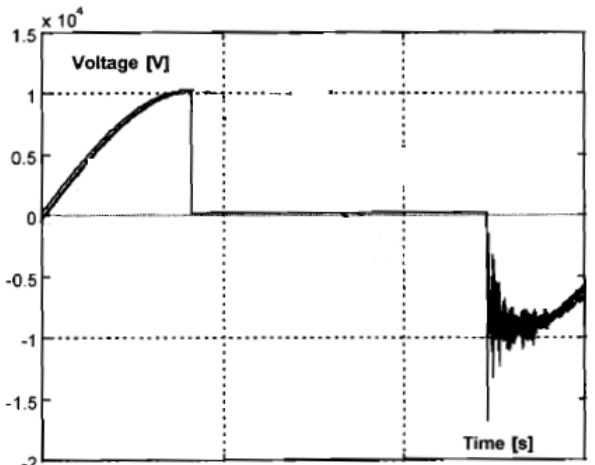
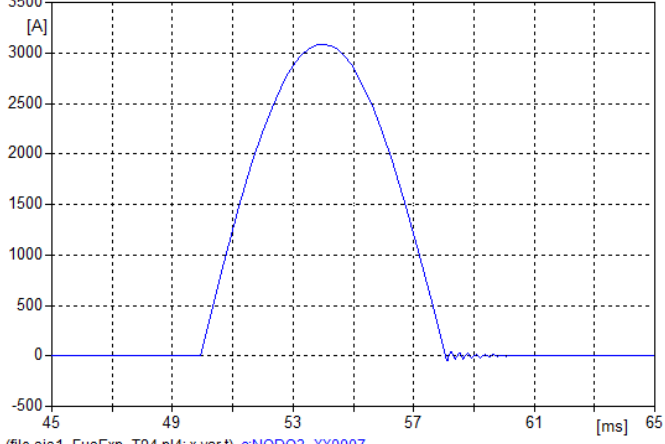
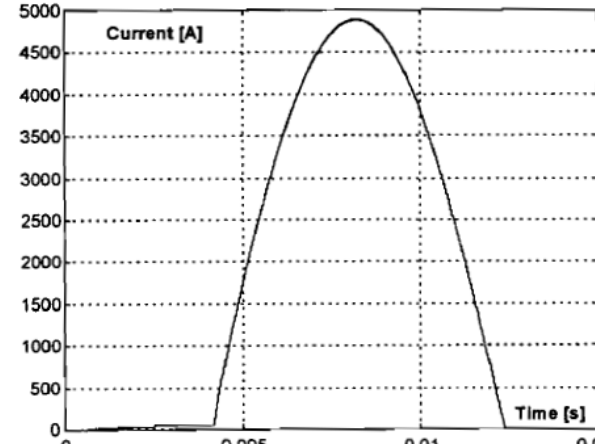
TENSIÓN EN LA CARGA	SIMULACIÓN	DATOS REALES
CORRIENTE EN EL FUSIBLE	 <p>(file sis1_FusExp_T94.pl4; x-var t) v:NODO3</p>	 <p>Time [s]</p>
CORRIENTE EN LA CARGA	 <p>(file sis1_FusExp_T94.pl4; x-var t) c:NODO3-XX0007</p>	 <p>Time [s]</p> <p style="text-align: center;"><i>Sin imagen para comparar</i> Se aprecia el correcto funcionamiento del dispositivo, estableciendo la corriente de carga al despejar la falla en el primer cruce por cero.</p>

Tabla A.2. Tabla Comparativa. Validación del Modelo.



A.1.2.2 Circuito 13 nodos: En el circuito de 13 nodo mostrado en Figura A.4, se instaló un fusible tipo H de 70 [A] en la fase B de la rama señalada de cargas inductiva desequilibrada y carga capacitiva equilibrada cuya corriente nominal es de 69,61 [Arms]. Se realizaron pruebas introduciendo la falla a tierra ($R_{falla} = 1 [\Omega]$) en diferentes ángulos de fases de la corriente ($\theta = 0^\circ, 45^\circ, -90^\circ$). Se tomaron registros de tensión y corriente en el *medidor 1* (en la fuente del circuito), *medidor 2* (en la rama de falla), *medidor 3* y *medidor 4* (aguas arriba de la rama de falla).

Los diferentes resultados son presentados en la Tabla A.3 y Tabla A.4, en los que se detalla y describe las distorsiones de onda que ocasionan la operación del modelo del fusible. Los resultados obtenidos para el ángulo de inserción de falla igual a 45° fueron muy similares a los simulados con un ángulo de 0° . Por lo tanto, y debido a que no se encontraron diferencias relevantes a destacar, no fueron publicados.

Finalmente, del modelo anteriormente planteado e implementado, se observa realizaron las siguientes observaciones:

- El modelo se restringe a uso de un dispositivo por circuito. Limitante debido al uso de Type-T94 Thevenin el cual, por defecto ATP restringe su utilización de esta manera a causa del algoritmo iterativo que usa para resolver el circuito Thevenin. Para mejorar el modelo y poderlo utilizar en una mayor cantidad de veces en un circuito sería necesario definir el modelo en un dispositivo diferente al Thevenin, como por ejemplo el Iterated o el Norton lo que implicaría un replanteamiento del algoritmo.
- Se encontró que la aparición de ruido al operar el fusible se debe a las características propias del circuito y no del modelo. Caso visto en la necesidad de utilizar una red snubber en el *circuito sencillo* y no en el circuito de *13 nodos*. Se Realizó pruebas también en un circuito de 34 nodos pero debido al alto contenido de ruido en la señales de estudio al operar el fusible no fue posible analizar los resultados.

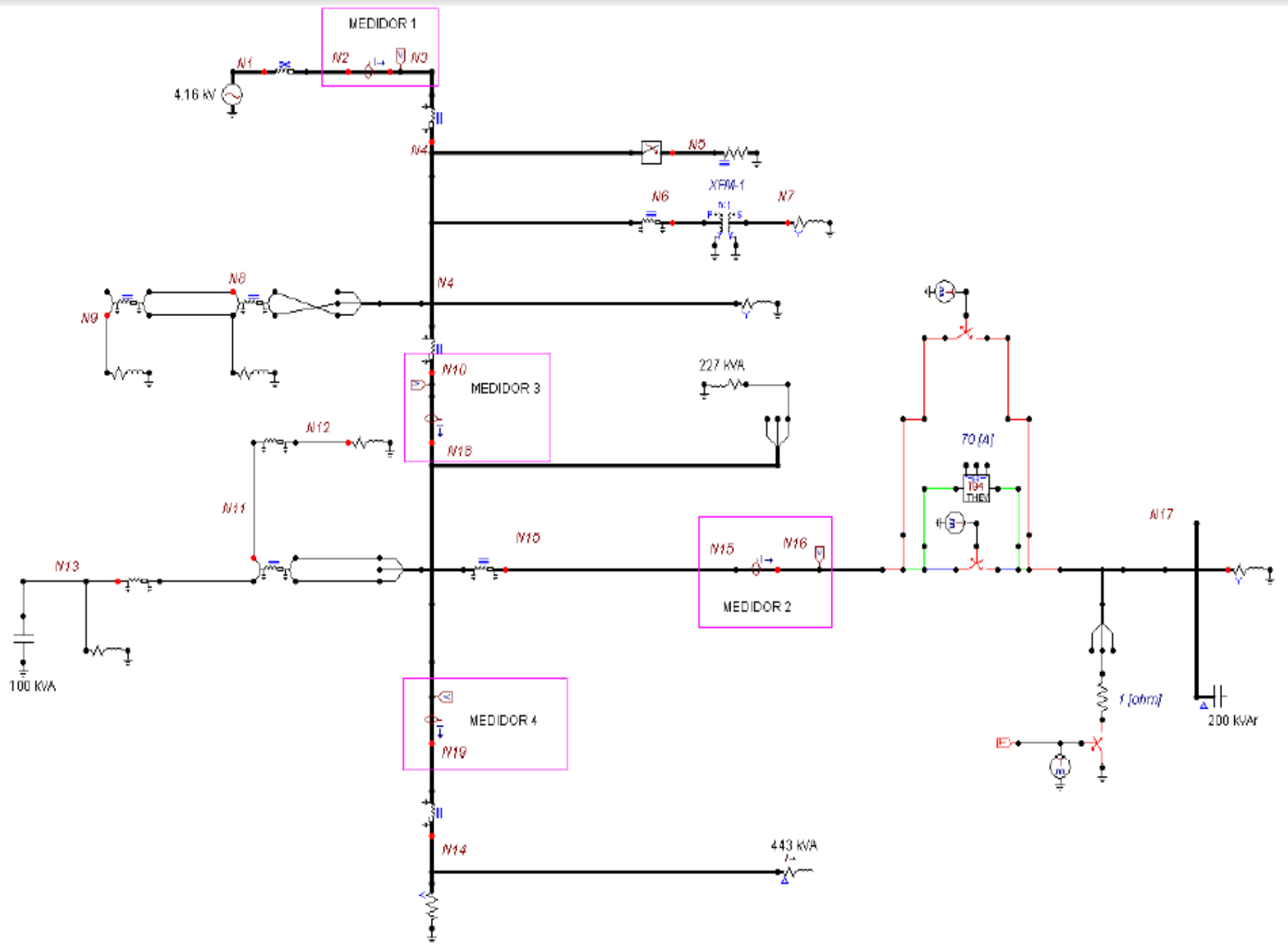


Figura A.4. Circuito de 13 nodos. [1]

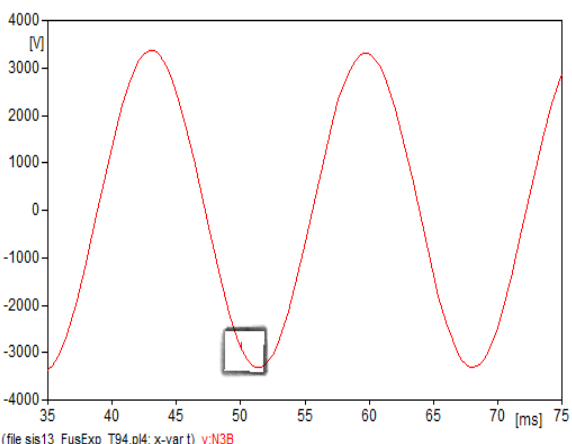
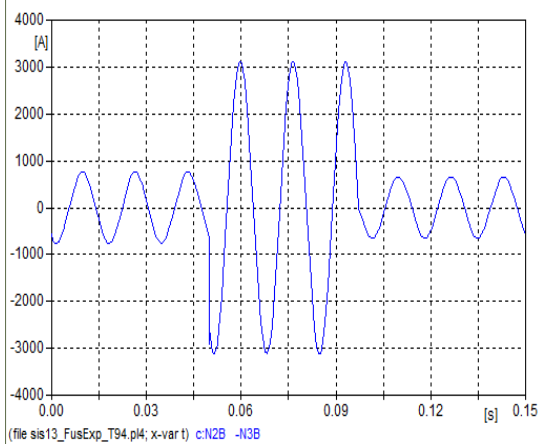
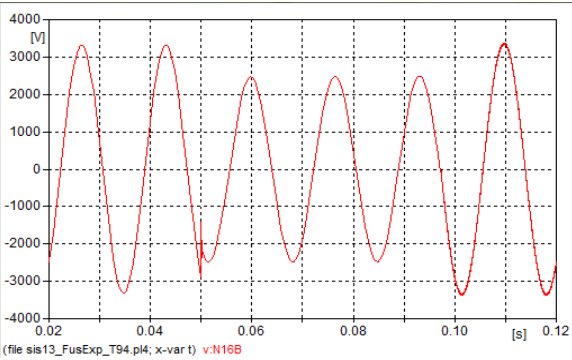
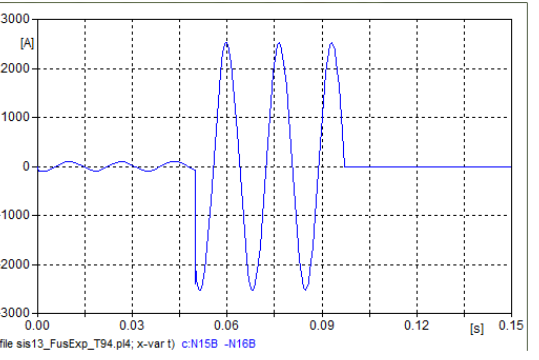
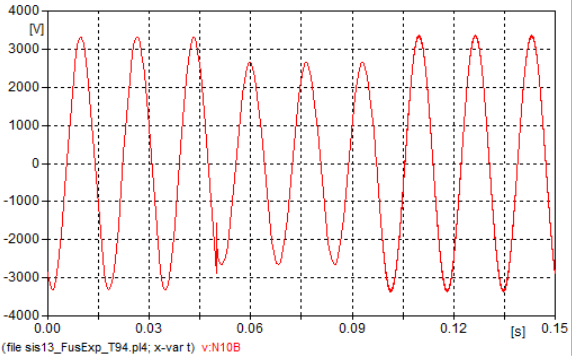
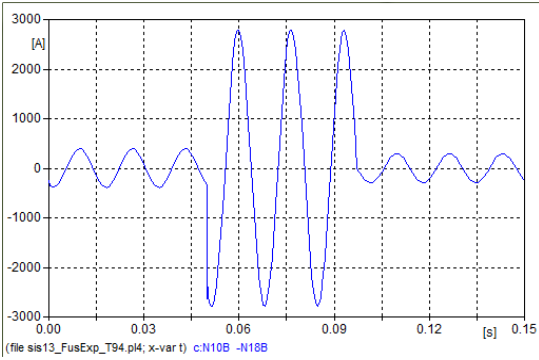
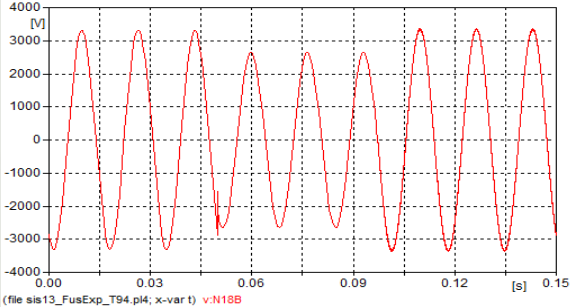
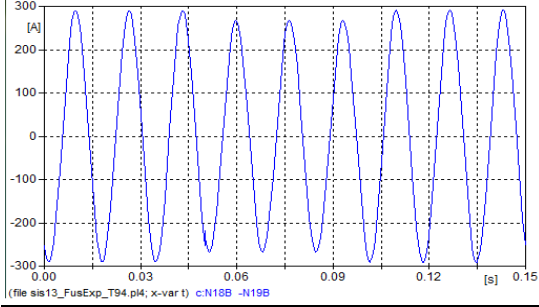
	TENSIÓN	CORRIENTE	OBSERVACIONES
<p>MEDIDOR 1</p>  <p>(file sis13_FusExp_T94.pl4; x-var t) v:N3B</p>	 <p>(file sis13_FusExp_T94.pl4; x-var t) c:N2B -N3B</p>	<p>* Tensión se observa una pequeña muesca al inicio de la falla de 0,1 [ms] con una disminución de 60,73 [V] en el valor pico y una posterior restablecimiento al operar el fusible con una variación de ± 2 [V] producto del ruido. Observaciones muy difíciles de apreciar por su magnitud. Ninguna variación registrada en las demás fases.</p> <p>* Corriente: 413,46% Incremento por falla y disminución del 87,43% al operar el fusible en la corriente pico. En las demás fases solo se aprecia una muesca de 0,1 [ms] sin ningún efecto posterior en las ondas.</p>	
<p>MEDIDOR 2</p>  <p>(file sis13_FusExp_T94.pl4; x-var t) v:N16B</p>	 <p>(file sis13_FusExp_T94.pl4; x-var t) c:N15B -N16B</p>	<p>* Tensión: Se registra un pequeño transitorio de 1 [ms] al inicio de la falla con una disminución posterior de la tensión a 0,74 p.u. Incremento del 1,04% al operar el fusible en la tensión pico con ruido de $\pm 0,0092$ p.u. En la fase A: incremento del 5% en falla y tensión post-falla 1p.u. Fase C: incremento de 5,5% en falla y tensión de 1 p.u post-falla</p> <p>* Corriente: En falla: 25,65 p.u. post-falla: 0. Fase A y C: incremento de la corriente de 5,4% y 5,7% en falla y corriente post-falla 1 p.u.</p>	
<p>MEDIDOR 3</p>  <p>(file sis13_FusExp_T94.pl4; x-var t) v:N10B</p>	 <p>(file sis13_FusExp_T94.pl4; x-var t) c:N10B -N18B</p>	<p>* Tensión: Comportamiento muy similar al del MEDIDOR 2. Transitorio de 1 [ms] al inicio de la falla con tensión de 0,8 p.u y incremento del 1,2 % al operar el fusible con ruido de $\pm 0,0081$ p.u. Fase A y C incremento de 4,28% y 18% en falla y tensión post-falla de 1 p.u.</p> <p>* Corriente: En falla 7,2 p.u. post-falla 0,75 p.u. Fase A y C incrementos de 2,1% y 2% en falla y 1 p.u post-falla</p>	
<p>MEDIDOR 4</p>  <p>(file sis13_FusExp_T94.pl4; x-var t) v:N18B</p>	 <p>(file sis13_FusExp_T94.pl4; x-var t) c:N18B -N19B</p>	<p>* Tensión: Comportamiento muy similar al del MEDIDOR 2. Tensión en falla 0,8 p.u y incremento de 0,8% post-falla con ruido de $\pm 0,004$ p.u. Fase A y C incremento de 4,28% y 4,29% en falla y tensión post-falla 1 p.u.</p> <p>* Corriente: En falla 0,9207 p.u. post-falla 1,0034 p.u. Fase A y C disminución de 1,9% y 2,03% 1 p.u post-falla</p>	

Tabla A.3. Resultados simulación. Ángulo de inserción de falla -90°.



	TENSIÓN	CORRIENTE	OBSERVACIONES
MEDIDOR 1	<p>(file sis13_FusExp_T94.p4; x-var t) v:N3B</p>	<p>(file sis13_FusExp_T94.p4; x-var t) c:N2B -N3B</p>	<p>* Tensión: Se registra una leve disminución de la tensión iniciada la falla a 0,9825 p.u, pero no se aprecia efecto alguno al operar el fusible sobre la onda, solo la recuperación de la tensión a su estado pre-falla. Ningún cambio en las otras fases.</p> <p>* Corriente: sobrecorriente de 4,14 p.u y reducción a 0,874 p.u operado el fusible. En las Fases A y C incremento de 2% en falla, y post-falla 1 p.u.</p>
MEDIDOR 2	<p>(file sis13_FusExp_T94.p4; x-var t) v:N16B</p>	<p>(file sis13_FusExp_T94.p4; x-var t) c:N15B -N16B</p>	<p>* Tensión: Se registra cambios en falla de 0,746 p.u y 1,0096 p.u post-falla con ruido de $\pm 0,0053$ p.u en la onda. Fase A y C incrementos en falla del 5,5 % y recuperación de 1 p.u en ambas fases.</p> <p>* Corriente: Sobrecorriente de 25,67 p.u y 0 post-falla. Fase A y C incremento en falla de 5,5% y 1 p.u post-falla en ambas fases.</p>
MEDIDOR 3	<p>(file sis13_FusExp_T94.p4; x-var t) v:N10B</p>	<p>(file sis13_FusExp_T94.p4; x-var t) c:N10B -N18B</p>	<p>* Tensión: 0,8 p.u en falla y 1,0074 p.u post-falla con ruido de $\pm 0,0042$ p.u. Fases A y C incrementos en la corriente de 4,3% en falla y 1 p.u post-falla en ambas fases.</p> <p>* Corriente: sobrecorriente de 7,2 p.u y 0,75 post-falla. Fase A y C incremento en falla de 2,03% y 2,17% y 1 p.u post-falla.</p>
MEDIDOR 4	<p>(file sis13_FusExp_T94.p4; x-var t) v:N18B</p>	<p>(file sis13_FusExp_T94.p4; x-var t) c:N18B -N19B</p>	<p>* Tensión: Comportamiento igual al MEDIDOR 2.</p> <p>* Corriente: Corriente de falla 0,92 p.u y 1,0033 p.u post-falla. Fase A y C corriente de 0,98 p.u en falla y 1 p.u en post-falla.</p>

Tabla A.4. Resultados simulación. Ángulo de inserción de falla 0°.

A.2 MODELADO FUSIBLE LIMITADOR DE CORRIENTE

El modelado del fusible de tipo limitador de corriente, se realiza según estudios de caracterización y pruebas de laboratorio publicados en [11], además del modelo en EMTP planteado en [10]. Considerando también, las características comunes de estos dispositivos de protección, tales como: operación única e interrupción del flujo de corriente en el sector del circuito instalado, conexión en serie a la carga a proteger y detección de sobrecorrientes.

Se define el modelo como una resistencia variable en el tiempo que actúa a partir del instante en que se detecta la sobrecorriente. Resistencia la cual, varía de acuerdo a la curva característica Resistencia-Tiempo, Figura A.5. Para condiciones normales de operación de la red se considera el modelo como una resistencia fija de valor despreciable.

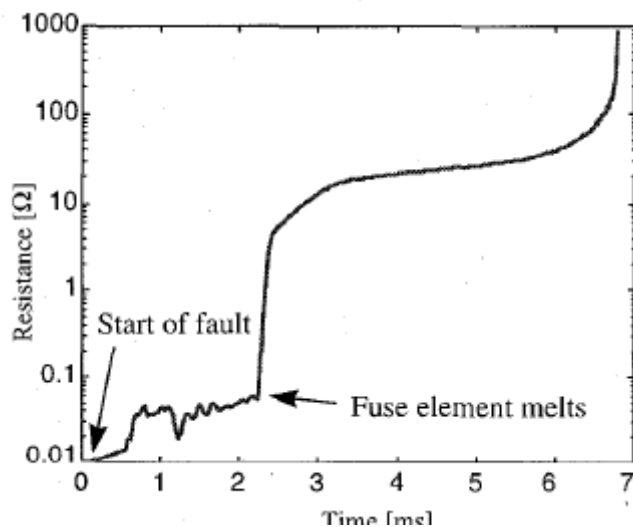


Figura A.5. Característica Resistencia-Tiempo
Fusible limitador de corriente 8.3 kV y 20 A.
[11]

Al igual que el modelo del fusible de expulsión, el algoritmo se programa en MODELS e implementa en un dispositivo Type-94 Thevenin de ATP. Su entrada corresponde a la corriente instantánea que atraviesa al elemento y sus salidas están definidas por la caída de tensión y corriente del dispositivo en valores instantáneos, ecuaciones A.1 y A.2.

La caracterización se realiza con base a la curva característica Resistencia-Tiempo de un fusible limitador de corriente de 8.3 [kV] y 20 [A], Figura A.5. Curva calculada a partir de las pruebas de laboratorio de [11].

En el modelo, se definió la resistencia por intervalos (Ecuación A.3), para lograr una interpolación segmentaria en cada uno de los puntos seleccionados, Figura



A.6, y que pudiera ser evaluada en cada instante de tiempo, tratando de amortiguar los cambios bruscos en los valores de resistencia.

$$R(t) = \begin{cases} 22.7273 * t + 0.01, & 0 \leq t < 2.2 [ms] \\ 55500 * t - 122.04, & 2.2 \leq t < 2.28 [ms] \\ 10937.5 * t - 20.4375, & 2.28 \leq t < 2.6 [ms] \\ 16000 * t - 33.6, & 2.6 \leq t < 2.85 [ms] \\ 13333.33 * t - 26, & 2.85 \leq t < 3.3 [ms] \\ 6538.4615 * t - 3.569, & 3.3 \leq t < 5.9 [ms] \\ 33333.33 * t - 161.66, & 5.9 \leq t < 6.35 [ms] \\ 133333.33 * t - 796.66, & 6.35 \leq t < 6.8 [ms] \\ 89E5 * t - 60410, & 6.8 \leq t < 6.9 [ms] \\ 9E7 * t - 62E4, & 6.9 \leq t < 7 [ms] \\ 3E7 * t - 2E5, & 7 \leq t \leq 10 [ms] \end{cases}$$

(A.3)

Se define de esta manera debió a la no existencia de métodos de interpolación directa en MODELS. Además, se intento en llevar a cabo la interpolación en MATLAB para lo cual, era necesario definir un vector de dimensiones muy grande que excedía la capacidad permitía por ATP en MODELS.

La lógica del algoritmo diseñado para el modelo consiste en censar la corriente instantánea que pasa por el dispositivo la cual, si esta supera el límite de corriente permitido, entra en operación el modelo. Al entrar en operación, el algoritmo varía el valor de la resistencia según la Figura A.6, hasta finalizar con un muy elevado valor. Por consiguiente, al terminar de operar, el modelo estará permitiendo un flujo de corriente despreciable por la rama del circuito que está protegiendo.

El modelo es instalado en serie a la carga y el símbolo que lo representa es igual al del fusible de expulsión, Figura A.1.

La validación del modelo se realiza con la comparación de simulaciones del circuito de prueba utilizado en las pruebas de laboratorio del artículo de estudio con los resultados publicado en el mismo.

Para la evaluación del modelo se realiza un conjunto de simulaciones en circuitos de 13 nodos y 34 nodos, registrando medidas tanto en la rama fallada como en la fuente del circuito. Los resultados son analizados para

TIEMPO [ms]	RESISTENCIA [Ω]
0	0.01
2.2	0.06
2.28	4.5
2.6	12
2.85	15
3.3	18
5.9	35
6.35	50
6.8	110
6.9	1000
7	10000
10	100000

Tabla A.5



evaluar el comportamiento del modelo y estudiar las formas de distorsión que presentan las señales al entrar en operación.

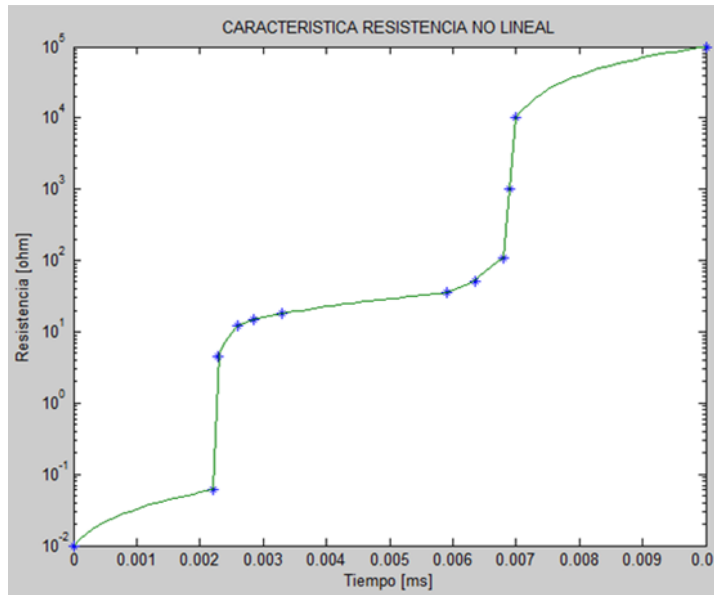


Figura A.6. Curva calculada según ecuación A.3. [1]

A.2.1 ALGORITMO DEL MODELO

De acuerdo al diagrama de flujo mostrado en la Figura A.7, el modelo censa la corriente que fluye a través del dispositivo. Al presentarse un valor superior a I_{max} establece la condición de sobrecorriente con la bandera **falla**.

Posteriormente, define los tiempos de actuación en el vector **tR** a partir del instante de tiempo en que se registró el inicio del evento en **tfalla**. El vector **tR** establece los tiempos en que la resistencia del fusible realizará sus cambios según la ecuación A.3 y la cual se define como:

$$tR[1,12] = td[1,12] + tfalla \quad (A.5)$$

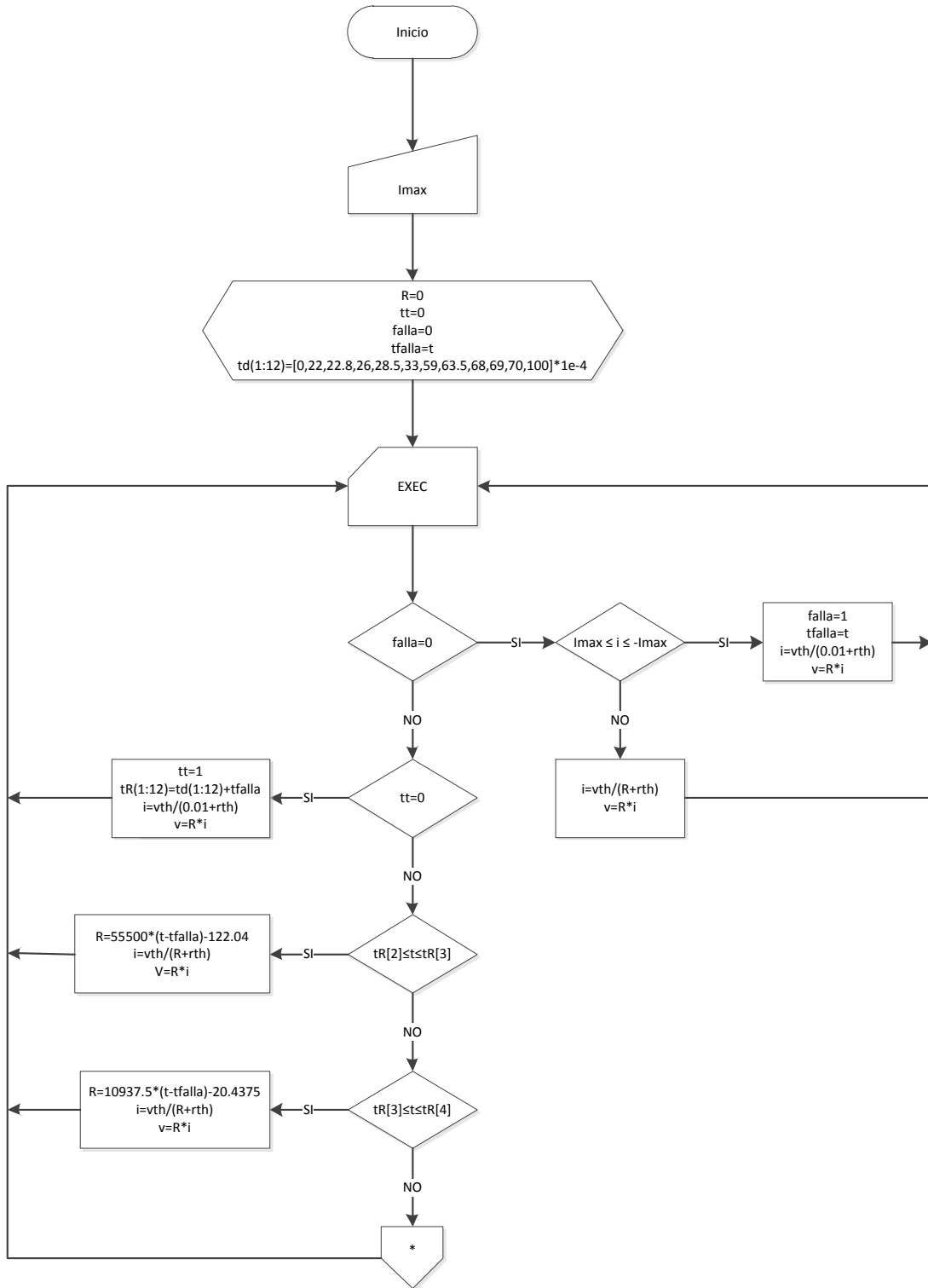
Donde **td**[1,12] contiene cada uno de los instantes de tiempos en [ms] definidos en la Tabla A.5.

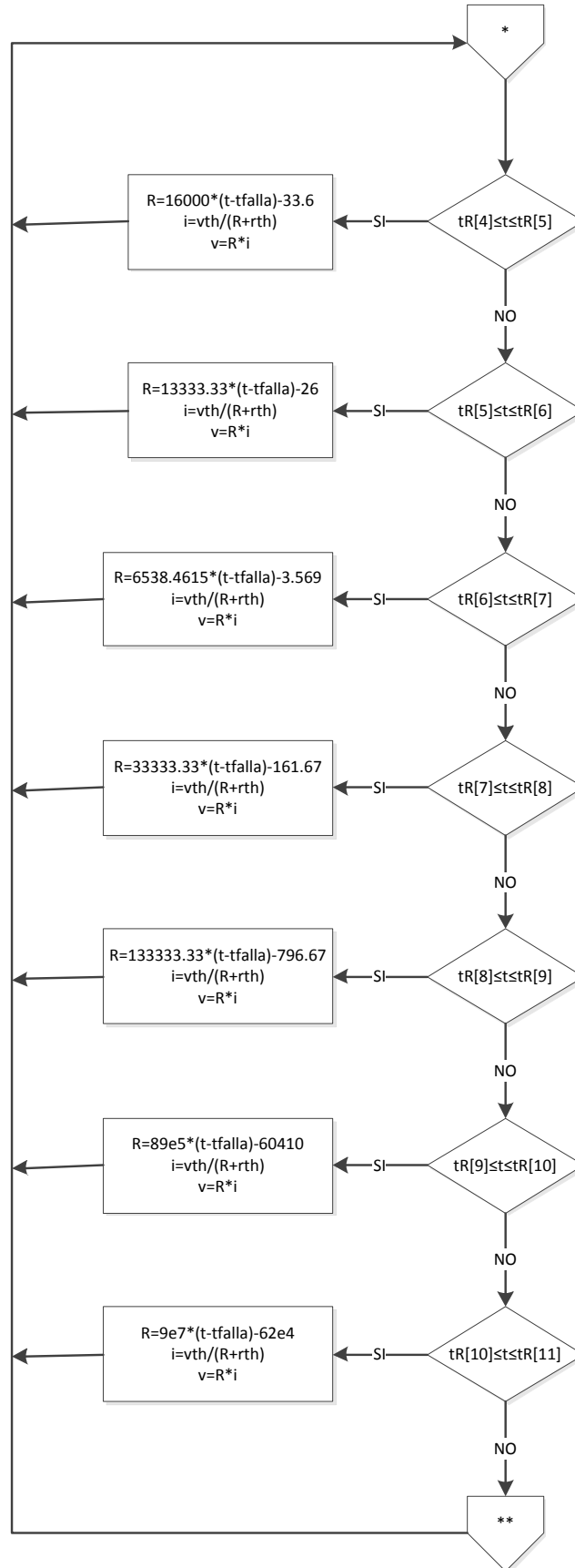


Universidad
Industrial de
Santander

A continuación, el modelo evalúa las salidas (ecuaciones A.1 y A.2) según el valor de resistencia R que se ha definido para cada intervalo, hasta el valor final en el que R toma un valor elevado lo cual impide el paso de corriente, simulando la apertura del fusible.

El Anexo A.3.2 contiene el código fuente utilizado en la programación del modelo en ATP-MODELS.





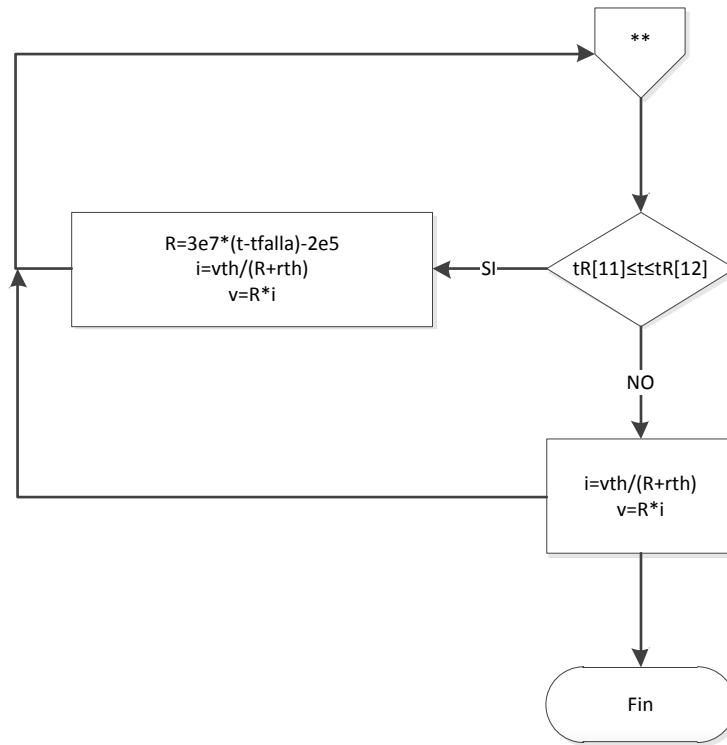


Figura A.7. Algoritmo Modelo Fusible Limitador de Corriente. [1]



A.2.2 VALIDACIÓN Y EVALUACIÓN DEL MODELO

A.2.2.1 Circuito Sencillo: La primera simulación se realizó con el circuito de prueba planteado en la Figura 1 del artículo [11]. La prueba se plantea utilizando el fusible en serie con la falla a tierra y paralelo a la carga. Se implementa una falla a tierra a los 33 [ms] de simulación. Corriente nominal de la circuito 7,07 [Arms]. Corriente de falla 2512,2 [A_{pico}].

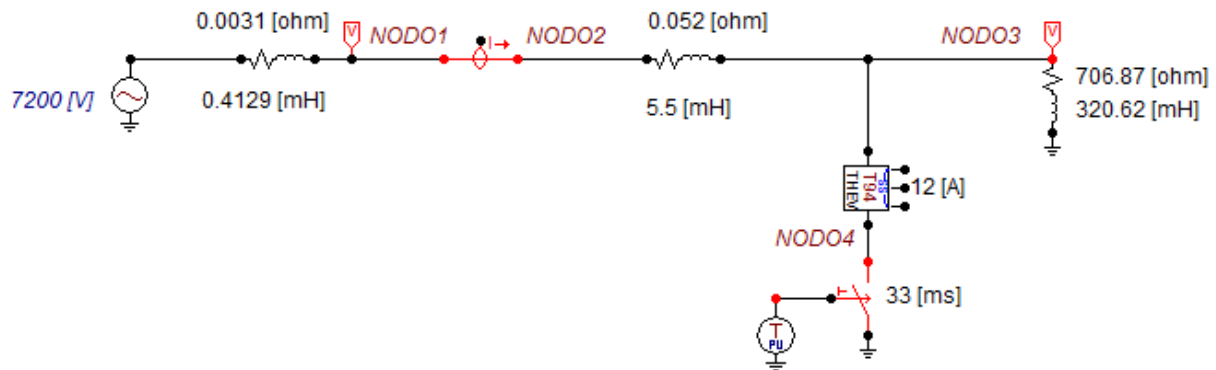


Figura A.8. Circuito de prueba modelo fusible limitador de corriente. [1]

A.2.2.2 Circuito 13 nodos:

Se conectó el modelo del fusible en serie a la fase A de la rama del circuito, por el cual fluye una corriente de 5 [A] y carga resistiva equilibrada, Figura A.4.

Se produce una falla a tierra de 10 [ms] de duración a los 35,57 [ms] de la simulación en el que la corriente alcanza su valor pico.

Se registraron medidas de tensión y corriente en la rama de falla como en la fuente del circuito.



A.2.2.3 *Circuito 34 nodos:*

Se instaló el modelo del fusible en el nodo N039 rama el cual tiene una carga resistiva-inductiva desequilibrada, en la fase B se maneja una corriente de 2,56 [A], Figura A.9.

Se produce una falla a tierra permanente a los 90 [ms] de la simulación, cuando la corriente está pasando por su valor pico.

Se registraron medidas de tensión y corriente en la fuente, nodos Nf00 y Nf01 y en la rama de falla.

Tabla A.6



	SIMULACIÓN	DATOS REALES
TENSIÓN EN MEDIDOR 2	<p>(file red_nodo1_RT94_mono_fuse_paralelo_interpolado.pl4; x-var t) v:NODO3</p>	
	<p>Duración Muesca: 2,2 ms Valor pico sobretensión: 2,4 p.u Observación: Se presenta un pico de sobretensión en el semiciclo negativo de muy corta duración de 1,6 p.u en los instantes en que la resistencia no lineal del modelo cambia de 50 a 110 [Ω]</p>	<p>Duración Muesca: 1,2 ms Valor pico sobretensión: 1,85 p.u</p>
CORRIENTE EN EL FUSIBLE (MEDIDOR 2)	<p>(file red_nodo1_RT94_mono_fuse_paralelo_interpolado.pl4; x-var t) c:NODO3 -NODO4</p>	
	<p>Duración: 2,6 [ms] Valor pico: 2484 [A]</p>	<p>Duración: 1,2 [ms] Valor pico: 2000 [A]</p>

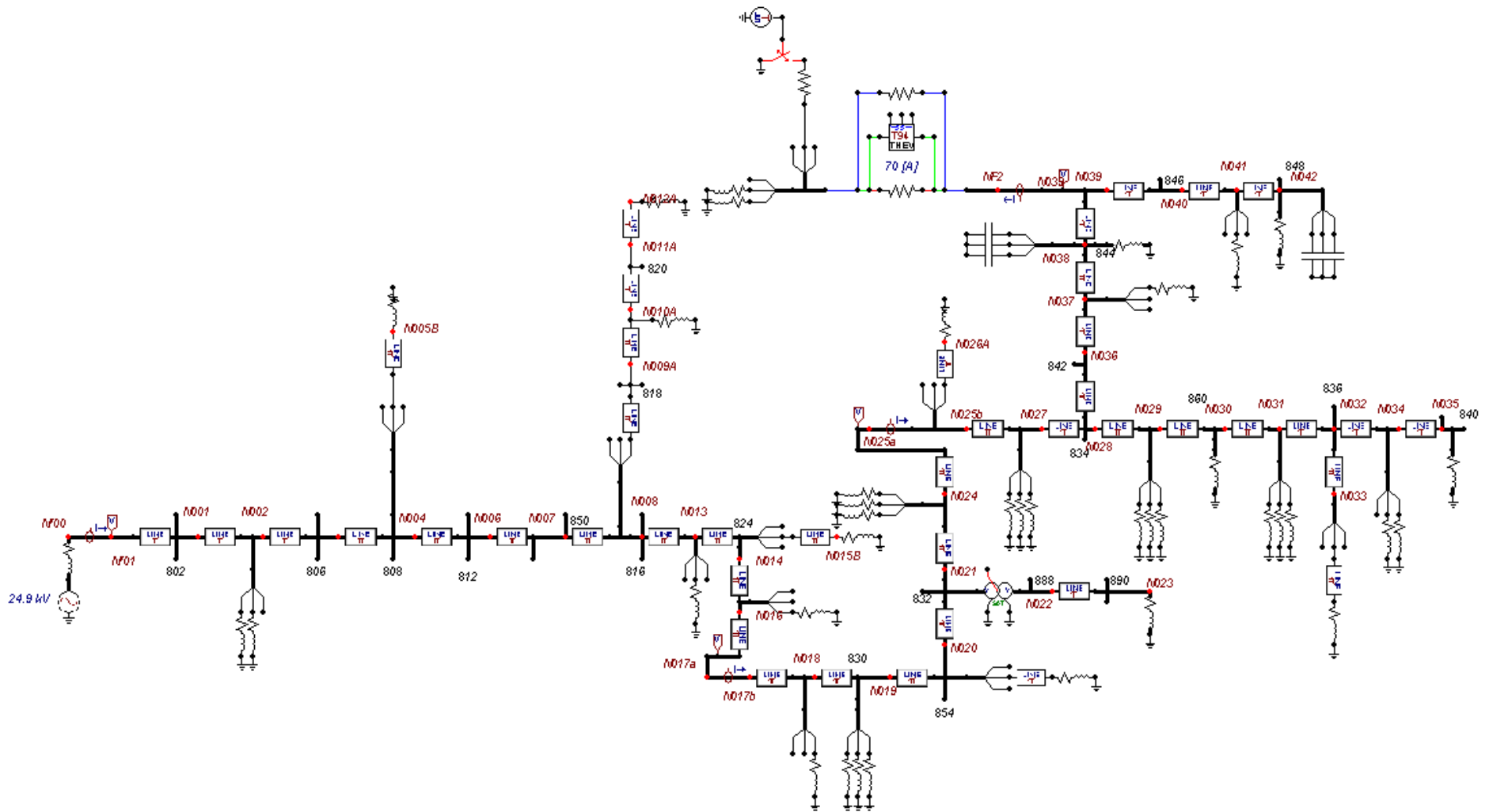
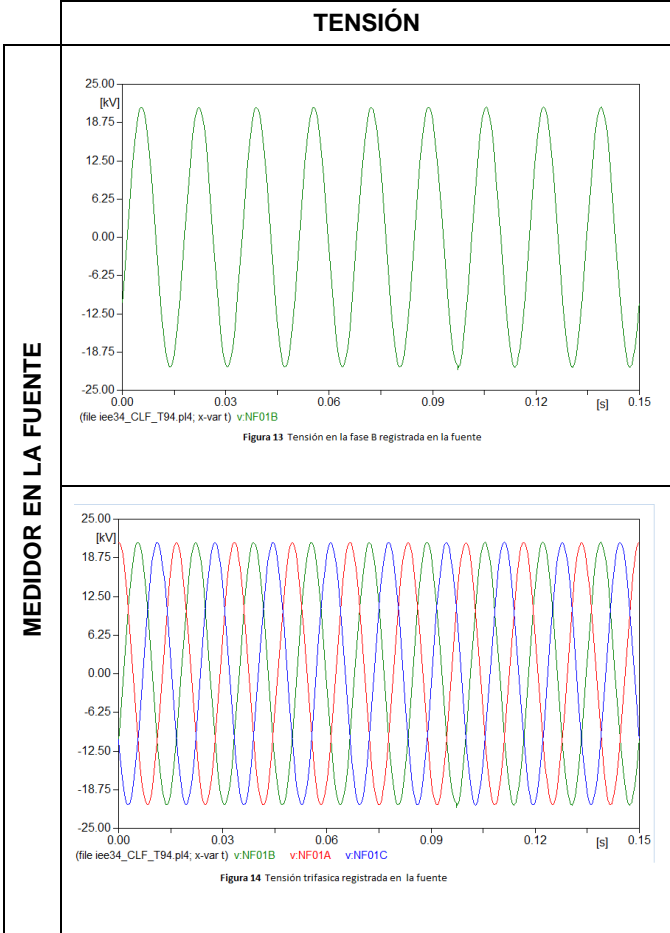
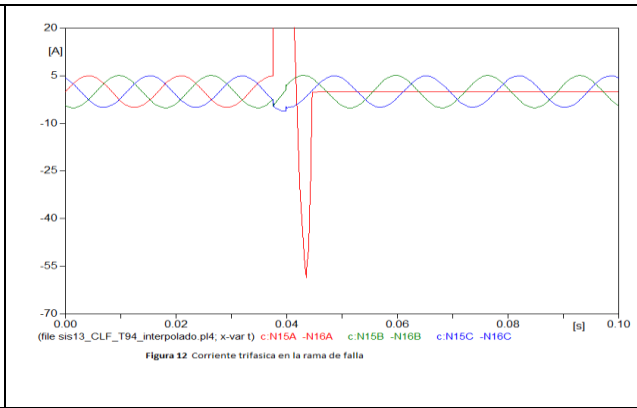
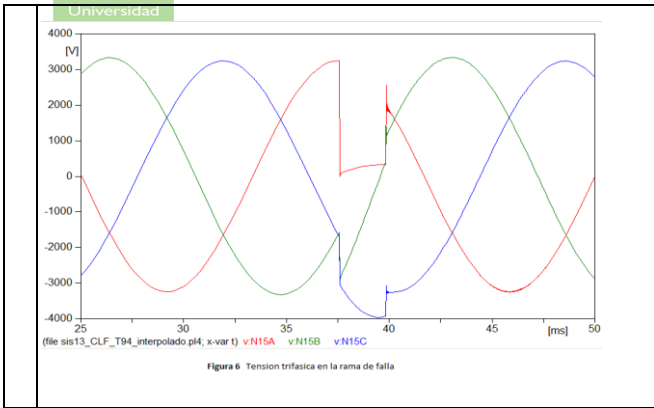


Figura A.9. Circuito de 34 nodos. [1]



	TENSIÓN	CORRIENTE	OBSERVACIONES
MEDIDOR 1	<p>Figura 5 Tensión en la rama de la falla</p>	<p>Figura 7 Corriente en la fase de falla media en la fuente</p>	<p>En la Figura de tensión se aprecia una muesca de tensión de 2,2 [ms] registrada en la tensión de la carga del circuito de prueba, de la cual se no registra la presencia de sobretensión alguna. Se presenta también distorsiones en las otras dos fases en los instantes en que dura la operación del modelo.</p> <p>Se registra un elevado incremento de corriente en la fase de falla (Fase A), de 11,24 p.u y duración 2,27 [ms]. En las demás fases se presenta pequeñas distorsiones no muy significativas mientras transcurre la operación del fusible.</p>
	<p>Figura 6 Tension trifasica en la rama de falla</p>	<p>Figura 8 Corriente trifasica medida en la fuente</p>	
MEDIDOR 2	<p>Figura 5 Tensión en la rama de la falla</p>	<p>Figura 11 Corriente Fase A medida en la rama de falla</p>	<p>Las 2 graficas anteriores presentan características muy similares a las de las del medidor 1</p> <p>Se presenta un pico exageradamente elevado de corriente de un valor de 1810 p.u y un pico de sobrecorriente también en el lóbulo negativo de 11 p.u. Igualmente en las 2 fases restantes se registran pequeñas distorsiones en la onda durante la falla.</p>



En La tensión medida en la fuente del circuito no registró perturbación alguna en ninguna de las ondas, ni siquiera en la fase donde se produjo la falla. Se registraron 2 sobrecorriente en la onda de corriente en la fase B la cual la primera de 3,21 p.u se presenta en el instante en que aparece la falla y la segunda de 3,52 p.u en el lóbulo negativo de la onda. Duración total de la perturbación 17 [ms]. En las otras 2 fases se presenta también perturbación en el mismo tiempo



Universidad Industrial de Santander

MEDIDOR EN LA RAMA FALLADA	<p>Figura 17 Tensión Fase B medida en rama de falla</p>	<p>Figura 19 Corriente en la fase B medida en el nodo de falla</p>	Se registra en la fase B una distorsión que dura aproximadamente medio ciclo con una sobretensión de 3,68 p.u. Igualmente se presenta distorsiones en las otras 2 fases con la misma duración. La sobrecorriente presentada en la fase B con valores picos 59 y 60 p.u y de duración 9[ms].
	<p>Figura 18 Tensión trifásica en la rama de falla</p>	<p>Figura 20 Corriente trifásica en la rama de falla</p>	

Tabla A.7

Se ha logrado obtener un modelo de fusible aproximado al presentado en los artículos de estudios, el cual trabajan el modelo como una resistencia no lineal. Mediante una interpolación segmentaria se ha logrado disminuir casi completamente el ruido que se presentaba en los anteriores modelos planteados.

El modelo presenta una limitante que no permite utilizarlo más de una vez por circuito. Está limitación es debida al dispositivo T94-thevenin que por defecto ATP restringe su utilización de esta manera. Debido al proceso iterativo que utiliza para resolver el circuito Thevenin. Si se quiere eliminar esta limitante sería necesario utilizar un dispositivo diferente al Thevenin, como por ejemplo el iterated o el Norton. Lo que significaría un replanteamiento en el algoritmo ya implementado.

El modelo cumple con los requerimientos básicos de un fusible.

- ✓ La detección de sobrecorrientes.



Universidad
Industrial de
Santander

- ✓ Operación única una vez activado.
- ✓ Interrupción del sector del circuito en que se encuentra instalado al operar.
- ✓ La instalación en serie en un circuito Proteger un circuito de sobrecorrientes.

A.3 CÓDIGOS FUENTE, MODELOS DE FUSIBLES ATP-MODELS

A.3.1 FUSIBLE EXPULSIÓN

```

MODEL RES01      -- NB! 6 character name limit

-- Start header. Do not modify the type-94 header.
comment-----
| First, declarations required for any type 94 Thevenin 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 node pairs
    n2 {dflt: n*n} -- number of matrix elements

INPUT vth -- Thev. voltage(t) across each branch
    rth -- Thev. resistance(t) matrix, symmetrical
    gth -- inverse of rth
    v0  -- voltage(t=0) across each branch
    i0  -- current(t=0) into each branch

VAR v -- calculated voltage(t) across each branch
    i -- calculated current(t) into each branch

OUTPUT i

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
-- End header

DATA Imax
    freq
    luca {dflt:-1} -- initial rms value

VAR
    irms -- rms value of monitored signal
    ip2  -- internal, i*i
    ix2  -- internal, integral of x2
    period -- 1/freq
    R     -- Resistencia del fusible
    tr
    ceropfalla
    falla
    tt
    tmenlt
    irms2 -- variable de irms para buscar el mayor valor de la corriente eficaz en la simulación
    i2    -- variable de la corriente de la instante de tiempo anterior
    tif   -- Instante de tiempo en el que se detecta la falla
    tsf   -- Tiempo se seguimiento de Falla. Variable que cuanto el tiempo transcurrido desde que apareció la falla
    tas   -- La diferencia entre el tiempo de menlt y el tiempo transcurrido desde la detección de la falla
    pasocero -- Variable que me indica cuando la corriente pasa por cero
    let
    tiempo
    retard

```

```
comment-----
| Next, declarations provate to this model           |
-----endcomment
```

```
DELAY CELLS(ix2): 1/freq/timestep +1
```

```
INIT
```

```
    period    := 1/60
    histdef(ix2) := 0
    integral(ip2) := 0
    IF luca <0 THEN irms:=0 ELSE irms:=luca ENDIF
    R:=0.01
    tr:=0
    ceropfalla:=0
    falla:=0
    i := vth/(R+rth)
    v := R*i
    tt:=0
    tmenlt:=0
    irms2:=0
    i2:=0
    tif:=0
    tsf:=0
    tas:=0
    pasocero:=0
    let:=0
    cont:=0
    retard:=0
```

```
ENDINIT
```

```
EXEC
```

```
tiempo:=t
```

```
-- CORRIENTE DEL FUSIBLE
```

```
IF ceropfalla=0 THEN
```

```
    i := vth/(R+rth)
    v := R*i
```

```
ELSE
```

```
    i := 0
    v := R*i
```

```
ENDIF
```

```
-- VALOR EFICAZ DE LA CORRIENTE
```

```
ip2 := i*i
```

```
ix2 := integral(ip2)
```

```
IF t>period THEN
```

```
    irms := sqrt((ix2 - delay(ix2, period))/period)
```

```
ENDIF
```

```
retard:=delay(ix2, period)
```

```
-- CONDICION DE FALLA
```

```
IF falla=0 AND irms>=Imax THEN
```

```
    falla:=1
    tif:=t
```

```
ENDIF
```

```
-- CONDICION DE APERTURA DEL FUSIBLE
```



Universidad
Industrial de
Santander

```
IF irms>irms2 THEN
    tr:=0
ENDIF

IF falla=1 AND tr=0 THEN
    IF irms>=120 AND irms<125 THEN
        tmenlt:=300
        tr:=1
        irms2:=irms
        tsf:=t-tif
        tas:=tmenlt-ts
        tt:=tas+t
    ELSIF irms>=125 AND irms<130 THEN
        tmenlt:=200
        tr:=1
        irms2:=irms
        tsf:=t-tif
        tas:=tmenlt-ts
        tt:=tas+t
    ELSIF irms>=130 AND irms<137 THEN
        tmenlt:=40
        tr:=1
        irms2:=irms
        tsf:=t-tif
        tas:=tmenlt-ts
        tt:=tas+t
    ELSIF irms>=137 AND irms<140 THEN
        tmenlt:=30
        tr:=1
        irms2:=irms
        tsf:=t-tif
        tas:=tmenlt-ts
        tt:=tas+t
    ELSIF irms>=140 AND irms<145 THEN
        tmenlt:=20
        tr:=1
        irms2:=irms
        tsf:=t-tif
        tas:=tmenlt-ts
        tt:=tas+t
    ELSIF irms>=145 AND irms<150 THEN
        tmenlt:=10
        tr:=1
        irms2:=irms
        tsf:=t-tif
        tas:=tmenlt-ts
        tt:=tas+t
    ELSIF irms>=150 AND irms<155 THEN
        tmenlt:=9
        tr:=1
        irms2:=irms
        tsf:=t-tif
        tas:=tmenlt-ts
        tt:=tas+t
    ELSIF irms>=155 AND irms<160 THEN
        tmenlt:=8
        tr:=1
        irms2:=irms
        tsf:=t-tif
        tas:=tmenlt-ts
```



```
tt:=tas+t
ELSIF irms>=160 AND irms<180 THEN
tmenlt:=7
tr:=1
irms2:=irms
tsf:=t-tif
tas:=tmenlt-tsif
tt:=tas+t
ELSIF irms>=180 AND irms<200 THEN
tmenlt:=5
tr:=1
irms2:=irms
tsf:=t-tif
tas:=tmenlt-tsif
tt:=tas+t
ELSIF irms>=200 AND irms<220 THEN
tmenlt:=4
tr:=1
irms2:=irms
tsf:=t-tif
tas:=tmenlt-tsif
tt:=tas+t
ELSIF irms>=220 AND irms<240 THEN
tmenlt:=3
tr:=1
irms2:=irms
tsf:=t-tif
tas:=tmenlt-tsif
tt:=tas+t
ELSIF irms>=240 AND irms<252 THEN
tmenlt:=2
tr:=1
irms2:=irms
tsf:=t-tif
tas:=tmenlt-tsif
tt:=tas+t
ELSIF irms>=252 AND irms<264 THEN
tmenlt:=1.8
tr:=1
irms2:=irms
tsf:=t-tif
tas:=tmenlt-tsif
tt:=tas+t
ELSIF irms>=264 AND irms<276 THEN
tmenlt:=1.6
tr:=1
irms2:=irms
tsf:=t-tif
tas:=tmenlt-tsif
tt:=tas+t
ELSIF irms>=276 AND irms<288 THEN
tmenlt:=1.4
tr:=1
irms2:=irms
tsf:=t-tif
tas:=tmenlt-tsif
tt:=tas+t
ELSIF irms>=288 AND irms<300 THEN
tmenlt:=1.2
tr:=1
```

```

irms2:=irms
tsf:=t-tif
tas:=tmenlt-tsf
tt:=tas+t
ELSIF irms>=300 AND irms<338.1 THEN
tmenlt:=1
tr:=1
irms2:=irms
tsf:=t-tif
tas:=tmenlt-tsf
tt:=tas+t
ELSIF irms>=338.1 AND irms<376.19 THEN
tmenlt:=0.9
tr:=1
irms2:=irms
tsf:=t-tif
tas:=tmenlt-tsf
tt:=tas+t
ELSIF irms>=376.19 AND irms<414.29 THEN
tmenlt:=0.8
tr:=1
irms2:=irms
tsf:=t-tif
tas:=tmenlt-tsf
tt:=tas+t
ELSIF irms>=414.29 AND irms<452.38 THEN
tmenlt:=0.7
tr:=1
irms2:=irms
tsf:=t-tif
tas:=tmenlt-tsf
tt:=tas+t
ELSIF irms>=452.38 AND irms<490.48 THEN
tmenlt:=0.6
tr:=1
irms2:=irms
tsf:=t-tif
tas:=tmenlt-tsf
tt:=tas+t
ELSIF irms>=490.48 AND irms<528.57 THEN
tmenlt:=0.5
tr:=1
irms2:=irms
tsf:=t-tif
tas:=tmenlt-tsf
tt:=tas+t
ELSIF irms>=528.57 AND irms<566.67 THEN
tmenlt:=0.4
tr:=1
irms2:=irms
tsf:=t-tif
tas:=tmenlt-tsf
tt:=tas+t
ELSIF irms>=566.67 AND irms<604.76 THEN
tmenlt:=0.3
tr:=1
irms2:=irms
tsf:=t-tif
tas:=tmenlt-tsf
tt:=tas+t

```

```

ELSIF irms>=604.76 AND irms<620 THEN
    tmenlt:=0.2
    tr:=1
    irms2:=irms
    tsf:=t-tif
    tas:=tmenlt-tsif
    tt:=tas+t

ELSIF irms>=620 AND irms<707.27 THEN
    tmenlt:=0.16
    tr:=1
    irms2:=irms
    tsf:=t-tif
    tas:=tmenlt-tsif
    tt:=tas+t

ELSIF irms>=707.27 AND irms<794.55 THEN
    tmenlt:=0.14
    tr:=1
    irms2:=irms
    tsf:=t-tif
    tas:=tmenlt-tsif
    tt:=tas+t

ELSIF irms>=794.55 AND irms<881.82 THEN
    tmenlt:=0.12
    tr:=1
    irms2:=irms
    tsf:=t-tif
    tas:=tmenlt-tsif
    tt:=tas+t

ELSIF irms>=881.82 AND irms<969.09 THEN
    tmenlt:=0.1
    tr:=1
    irms2:=irms
    tsf:=t-tif
    tas:=tmenlt-tsif
    tt:=tas+t

ELSIF irms>=969.09 AND irms<1056.36 THEN
    tmenlt:=0.08
    tr:=1
    irms2:=irms
    tsf:=t-tif
    tas:=tmenlt-tsif
    tt:=tas+t

ELSIF irms>=1056.36 AND irms<1100 THEN
    tmenlt:=0.06
    tr:=1
    irms2:=irms
    tsf:=t-tif
    tas:=tmenlt-tsif
    tt:=tas+t

ELSIF irms>=1100 AND irms<1780 THEN
    tmenlt:=0.05
    tr:=1
    irms2:=irms
    tsf:=t-tif
    tas:=tmenlt-tsif
    tt:=tas+t

ELSIF irms>=1780 AND irms<2460 THEN
    tmenlt:=0.043
    tr:=1
    irms2:=irms

```



Universidad
Industrial de
Santander

```
tsf:=t-tif
tas:=tmenlt-tsf
tt:=tas+t
ELSIF irms>=2460 AND irms<3140 THEN
tmenlt:=0.036
tr:=1
irms2:=irms
tsf:=t-tif
tas:=tmenlt-tsf
tt:=tas+t
ELSIF irms>=3140 AND irms<3820 THEN
tmenlt:=0.029
tr:=1
irms2:=irms
tsf:=t-tif
tas:=tmenlt-tsf
tt:=tas+t
ELSIF irms>=3820 AND irms<4500 THEN
tmenlt:=0.015
tr:=1
irms2:=irms
tsf:=t-tif
tas:=tmenlt-tsf
tt:=tas+t
ELSIF irms>=4500 THEN
tmenlt:=0.015/2
tr:=1
irms2:=irms
tsf:=t-tif
tas:=tmenlt-tsf
tt:=tas+t

ENDIF
ENDIF
write('i2 =', i2 )
write('i =', i )

-- BUSQUEDA DEL PRIMER CERO DESPUES DEL TIEMPO DE FUNDICIÓN
pasocero:=i2*i
IF falla=1 AND t>=tt AND pasocero<0 THEN
ceropfalla:=1
ENDIF
i2:=i
let:=irms*irms*t

ENDEXEC

ENDMODEL
RECORD RES01.v AS voltaj
```



Universidad
Industrial de
Santander

A.3.2 FUSIBLE LIMITADOR DE CORRIENTE

```
MODEL RES01      -- NB! 6 character name limit

-- Start header. Do not modify the type-94 header.
comment-----
| First, declarations required for any type 94 Thevenin 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 node pairs
  n2 {dflt: n*n} -- number of matrix elements

INPUT vth -- Thev. voltage(t) across each branch
  rth -- Thev. resistance(t) matrix, symmetrical
  gth -- inverse of rth
  v0  -- voltage(t=0) across each branch
  i0  -- current(t=0) into each branch

VAR v -- calculated voltage(t) across each branch
  i  -- calculated current(t) into each branch

OUTPUT i

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
-- End header

DATA  Imax
VAR
  R
  tt
  falla
  tR[1..12]
  tfalla
CONST td[1..12] {val: [0,22,22.8,26,28.5,33,59,63.5,68,69,70,100]*1e-4}

comment-----
| Next, declarations provate to this model |
-----endcomment

INIT
  R:=0
  tt:=0
  falla:=0
  i := vth/(R+rth)
  v := R*i
  tfalla:=0
  ENDINIT

EXEC
IF falla=0 THEN
  IF i>=Imax OR i<=-Imax THEN
    falla:=1
    i := vth/(0.01+rth)
    v := R*i
  ELSE
```



Universidad
Industrial de
Santander

```

        i := vth/(R+rth)
        v := R*i
    ENDIF
ELSE
    IF tt=0 THEN
        tt:=1
        tR[1..12] :=td[1..12]+t
        tfalla:=t
        i := vth/(0.01+rth)
        v := R*i
    ELSE
        IF t>=tR[1] AND t<tR[2] THEN
            R := 22.7273*(t-tfalla)+0.01
            i := vth/(R+rth)
            v := R*i
        ELSIF t>=tR[2] AND t<tR[3] THEN
            R := 55500*(t-tfalla)-122.04
            i := vth/(R+rth)
            v := R*i
        ELSIF t>=tR[3] AND t<tR[4] THEN
            R := 10937.5*(t-tfalla)-20.4375
            i := vth/(R+rth)
            v := R*i
        ELSIF t>=tR[4] AND t<tR[5] THEN
            R := 16000*(t-tfalla)-33.6
            i := vth/(R+rth)
            v := R*i
        ELSIF t>=tR[5] AND t<tR[6] THEN
            R := 13333.3333*(t-tfalla)-26
            i := vth/(R+rth)
            v := R*i
        ELSIF t>=tR[6] AND t<tR[7] THEN
            R := 6538.4615*(t-tfalla)-3.569
            i := vth/(R+rth)
            v := R*i
        ELSIF t>=tR[7] AND t<tR[8] THEN
            R := 33333.3333*(t-tfalla)-161.6667
            i := vth/(R+rth)
            v := R*i
        ELSIF t>=tR[8] AND t<tR[9] THEN
            R :=133333.3333*(t-tfalla)-796.6667
            i := vth/(R+rth)
            v := R*i
        ELSIF t>=tR[9] AND t<tR[10] THEN
            R :=89e5*(t-tfalla)-60410
            i := vth/(R+rth)
            v := R*i
        ELSIF t>=tR[10] AND t<=tR[11] THEN
            R := 9e7*(t-tfalla)-62e4
            i := vth/(R+rth)
            v := R*i
        ELSIF t>=tR[11] AND t<=tR[12] THEN
            R :=3e7*(t-tfalla)-2e5
            i := vth/(R+rth)
            v := R*i
    ELSE
        i := vth/(R+rth)
        v := R*i
    ENDIF

```



Universidad
Industrial de
Santander

ENDIF
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL



ANEXO B

DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Partiendo del conjunto de descriptores formulados en capítulo 4.1, se procede a la elaboración de la metodología para el diagnóstico de perturbaciones ocasionadas por la operación de fusibles.

Inicialmente se desarrollo un análisis estadístico multivariable (MANOVA ^[7]) para la identificación y selección de los descriptores relevantes en la clasificación de las perturbaciones de acuerdo a la causa previamente asociada.

Posteriormente se seleccionan los umbrales ó rango de valores adecuados con los cuales, los descriptores logran discriminar las diferentes causas (operación de fusible de expulsión ó fusible limitador de corriente). Tales umbrales garantizan el mínimo grado de traslape entre los distintos orígenes de la perturbación (clases). Por último se diseña el diagrama de flujo utilizado para el diagnóstico automático de la causa del evento.

A continuación se detalla cada una de estas de etapas en el proceso de formulación de la metodología.

B.1 IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE LOS DESCRIPTORES RELEVANTES

Para determinar y valorar el grado de influencia del evento sobre cada uno de los descriptores formulados, es decir, el grado de importancia que tiene cada descriptor planteado en relación con el origen de la perturbación ó que tan significativo es el descriptor para la identificación de la causa del evento, se hace uso de un análisis multivariante de la varianza (MANOVA).

MANOVA es la generalización del análisis de la varianza para el caso de más de una variable dependiente. Esta generalización se puede aplicar tanto al

^[7] Multivariate Analysis of Variance



análisis de la varianza de un factor como el análisis de la covarianza con varios factores.

Para lo cual, el modelo de MANOVA establece que, para K variables dependientes ($k=1,2,\dots,K$), y G grupos ($g=1,2,\dots,G$) se tiene :

$$\begin{bmatrix} Y_{1gi} \\ Y_{2gi} \\ \vdots \\ Y_{kgi} \\ \vdots \\ Y_{Kgi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{1g} \\ \mu_{2g} \\ \vdots \\ \mu_{kg} \\ \vdots \\ \mu_{Kg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{1gi} \\ \varepsilon_{2gi} \\ \vdots \\ \varepsilon_{kgi} \\ \vdots \\ \varepsilon_{Kgi} \end{bmatrix} \quad g = 1,2,\dots,G, \quad i = 1,\dots,n_g$$

(B.2)

$$y_g = \mu_g + \varepsilon_g$$

(B.3)

Donde y_g es igual a la media teórica del grupo más una variable aleatoria.

MANOVA, al igual que su análogo univariante (ANOVA [8]), trabaja con hipótesis o supuestos estadísticos aplicados tanto al diseño del experimento como a la población. La diferencia con ANOVA es que ahora se trata de una igualdad vectorial y no de una escalar. Las hipótesis son definidas como:

➤ Hipótesis de diseño sobre el proceso de obtención de la muestra:

Se asume que se ha extraído una muestra aleatoria multivariante independiente de cada una de las G poblaciones.

➤ Hipótesis sobre la población:

Homocedasticidad: la matriz de covarianzas de todas las poblaciones es la misma. Cada una de las poblaciones tiene una distribución normal multivariante. Por lo tanto se tiene que las poblaciones se distribuyen como $y_g \sim N(\mu_g)$.

[8] Analysis of Variance



Con el fin de determinar si el factor investigado tiene una influencia significativa sobre las variables dependientes, MANOVA utiliza el contraste de las hipótesis nulas y no nulas:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \dots \mu_g = \dots = \mu_G \quad (\text{B.4})$$

$$H_1: \text{No todas las } \mu_g \text{ son iguales} \quad (\text{B.5})$$

La hipótesis H_0 argumenta que todas las medidas grupales son las mismas mientras la hipótesis H_1 refuta esta proposición.

B.1.1 Análisis Multivariante de los Descriptores:

En el análisis multivariante de los descriptores se realiza una prueba para verificar estadísticamente la existencia de grupos o clases en los datos, es decir, si en el espacio de descriptores (variables) existen nubes correspondientes a grupos de perturbaciones causados por la operación de fusibles de tipo limitador de corriente y del tipo expulsión. Si se comprueba la existencia de estos grupos, los descriptores relevantes serán identificados aplicando el Análisis Multivariantes de la Varianza (MANOVA) ^[9]. De lo contrario, no será posible realizar un análisis MANOVA.

La primera prueba consiste en los *Contrastes Multivariados*, la cual a través de estadísticos de contraste, como la *Lambda de Wilks*, verifica si existen diferencias significativas entre los centroides de los grupos, es decir, si se puede contemplar la existencia de diferentes grupos dependiendo del tipo de causa. El estadístico es denotado por (Λ) y se define:

$$\Lambda = \frac{|W|}{|T|} \quad (\text{B.5})$$

Donde W es la matriz de la suma de cuadrados y productos cruzados residual (SCPCR) y T es la matriz de la suma de cuadrados y productos cruzados total (SPCPCT).

Dicho contraste tiene como hipótesis nula H_0 : “Los centros de los grupos son iguales a la medida global”. Por tanto, aceptar H_0 implica la no existencia de

^[9] El análisis estadístico es llevado a cabo en la herramienta SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*).



grupos o clases en los datos. Si la significancia de *Lambda de Wilks* es menor al margen de confianza (0.05)^[10], se rechaza la hipótesis nula H_0 .

En la Tabla B.1 se observa los resultados arrojados por SPSS para la prueba de los Contraste Multivariados, siendo de interés la *Lambda de Wilks*, el cual resulta de aplicar la prueba a un total de 79 perturbaciones como variables independientes y 12 descriptores como variables dependientes., agrupados según el tipo de causa que los originó.

Clase \ Efecto	F	SIGNIFICACIÓN
Traza de Pillai	16,891	0,000
Lambda de Wilks	20,570	0,000

Tabla B.1. Contrastes Multivariados.

El valor de significancia de *Lambda de Wilks* para los datos de entrada corresponde a 0. Al realizar un contraste de hipótesis y tomar un nivel de significancia del 5% (0,05), se puede notar que la hipótesis nula es rechazada por el nivel de significancia es mayor que 0. Lo que indica la existencia de grupos en el espacio n-dimensional de los descriptores formulados. Como resultado, se concluye que es posible realizar un análisis MANOVA.

Con el estudio estadístico se pretende evaluar el impacto de las variables independientes sobre las dependientes y con ello estimar el grado de influencia sobre cada descriptor dependiendo del tipo de causa. La *Prueba Intersujetos* realiza esta estimación a través del estadístico (R^2 -corregida). La Tabla I se presenta los resultados de dicha prueba.

^[10] Probabilidad de fallar en la estimación.



Valores de R^2 -corregida cercanos al 100% indican mayor relevancia del descriptor con respecto a la causa de la perturbación. Con un criterio superior al 50% fueron seleccionados los descriptores que finalmente son utilizados en la elaboración de la metodología los cuales corresponde a: $CFTi$, ΔTP , $CFRi$, I_{RATIO} y $CP0$.

B.2 SELECCIÓN DE LOS UMBRALES

Seleccionado el conjunto de descriptores relevantes que caracterizan la causa de perturbaciones por operación de fusibles, se hace necesario obtener un conjunto de reglas de decisión que permitan agrupar eficientemente los descriptores según la causa asociada. Para determinar dichos umbrales y extraer las reglas de decisión apropiadas, se utilizaron algoritmos basados en técnicas de aprendizaje automático.

El Aprendizaje Automático es el estudio y desarrollo de algoritmos que implementan los distintos modelos de aprendizaje y su aplicación a la resolución de problemas prácticos [17]. Estos algoritmos se basan en el uso de expresiones lógicas en forma disyuntiva. La Figura B.1 presenta el esquema general de un proceso de aprendizaje automático.

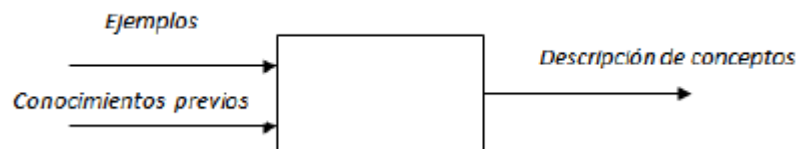


Figura B.1. Característica general de un sistema de aprendizaje automatico

Los conocimientos previos permiten interpretar los ejemplos y así generar descripciones a partir de los mismos. Los ejemplos generalmente se presentan en una tabla donde las filas hacen referencia a los casos de entrenamiento y cada columna representa un atributo.



Para ilustrar esto, en la Tabla B.2 se presenta una serie de ejemplos con los que se pretende clasificar un mineral a partir del aprendizaje automático.

EJEMPLO	COLOR	AISLANTE	DUREZA	ESTABILIDAD	MINERAL
1	Gris	Alto	Elevada	Alta	Diamante
2	Gris	Bajo	Baja	Estable	Grafito
3	Amarillo	Alto	Baja	Alta	Oro
4	Incoloro	Alto	Elevada	Alta	Diamante

Tabla B.2. Clasificación de un Mineral.

De la tabla anterior se pueden extraer las siguientes reglas:

- $\text{Aislante}=\text{Alto} \wedge \text{Dureza}=\text{Elevada} \wedge \text{Estabilidad}=\text{Alta} \Rightarrow \text{Mineral}=\text{Diamante}$
- $\text{Aislante}=\text{Alto} \wedge \text{Dureza}=\text{Baja} \wedge \text{Estabilidad}=\text{Alta} \Rightarrow \text{Mineral}=\text{Oro}$

Estas reglas se denominan estrellas, las cuales son un conjunto de expresiones lógicas que describen a todos los ejemplos de una clase en particular. Cuando se han eliminado todos los elementos redundantes en la descripción de los casos de entrenamiento, la estrella resultante se denomina estrella reducida.

El siguiente es un ejemplo de una estrella reducida:

- $\text{Dureza}=\text{Elevada} \wedge \text{Estabilidad}=\text{Alta} \Rightarrow \text{Mineral}=\text{Diamante}$

La nomenclatura comúnmente usada en estos algoritmos es la siguiente:

- *Selector*: se trata de una variable asociada a un valor o a una disyunción de valores. Un selector cubre a un ejemplo si la expresión que denota es cierta para dicho ejemplo. Para el ejemplo de la Tabla B2, los selectores utilizados son color, aislante eléctrico, dureza y estabilidad térmica.
- *Complejo*: un complejo es una colección de selectores. Un complejo vacío (conjunción de ceros selectores) cubre a todos los ejemplos



posibles. Para el caso anterior un complejo puede ser {dureza, estabilidad}.

- **Covers:** es una agrupación de complejos por medio de conjunciones o disyunciones para representar las reglas de decisión: Si es vacío quiere decir que no cubre a ningún ejemplo. Siguiendo con el ejemplo inicial, un cover podría ser:

$$\text{Aislante} = \text{Alto} \wedge \text{Dureza} = \text{Baja} \wedge \text{Estabilidad} = \text{Alta} \Rightarrow \text{Mineral} = \text{Oro}$$

Las formas de representar el conocimiento adquirido en el proceso de aprendizaje se basan en la generación de árboles de decisión y en expresiones simbólicas de carácter disyuntivo.

En la representación mediante árboles cada nodo indica una pregunta sobre un atributo y cada hoja se refiere a una decisión. De esta manera se puede clasificar un caso particular respondiendo todas las preguntas que contengan los nodos hasta llegar a una hoja del árbol. Los árboles de decisión se crean de forma recursiva y de manera descendente, por esta razón a estos algoritmos se les denomina TDIDT ^[11] [17]. Dichos algoritmos pueden manejar información con ruido mediante técnicas de poda las cuales, las ramas del árbol con menor capacidad de predicción.

Por otra parte, con las expresiones simbólicas se pueden generar una serie de reglas. Esto resulta conveniente cuando el árbol de decisión resulta excesivamente grande. Michalski y otros autores desarrollaron un conjunto de técnicas de aprendizaje inductivo basadas en este tipo de expresiones. De esta manera se describe de forma automática los conceptos impuestos en el proceso de entrenamiento. Un algoritmo propuesto por Michalski que ha sido utilizado con éxito en la extracción de reglas de decisión y al cual se le han hecho distintas variantes es el algoritmo AQ.

^[11] Top Down Induction on Decision Trees.



A continuación se presenta el algoritmo CN2^[12], el cual fue utilizado para la extracción de las reglas de decisión.

B.2.1 Algoritmo CN2

El algoritmo CN2, desarrollado por Clark y Niblett se concentra en la búsqueda de un conjunto ordenado de reglas del tipo “If... THEN...” empleando técnicas heurísticas basadas en una estimación del ruido presente en los datos para reducir el espacio de búsqueda [17]. De esta manera CN2 obtiene un conjunto de reglas que permiten clasificar de forma eficiente nuevos datos a pesar de no cubrir en su totalidad los casos de entrenamiento.

CN2 elimina la dependencia respecto a los casos de entrenamiento. También el espacio de búsqueda se amplía para permitir la inclusión de reglas que no se ajusten perfectamente al conjunto de entrenamiento.

Este es un algoritmo iterativo; en cada iteración busca reglas que cubra un gran número de ejemplos de una clase determinada y solo algunos de otras clases, de modo que se obtenga una predicción más segura. Posteriormente se selecciona las reglas con mejores índices de clasificación y añade la regla *IF* (Atributo, Umbral) *THEN CLASE* al final de la lista de decisión. Las iteraciones culminan cuando ya no se encuentren nuevas reglas satisfactorias.

Durante el proceso de entrenamiento, el algoritmo debe tomar dos decisiones heurísticas; debe evaluar la capacidad de predicción de reglas para saber cuáles deben ser incluidas en la lista de mejores reglas encontradas, y por otra parte debe verificar la fiabilidad de la predicción para averiguar si un atributo es realmente relevante.

^[12] Referencia a los autores (Clark, Niblett, 88)

A continuación se presentan las formas de evaluar cada uno de estas decisiones.

Mientras se encuentre una regla estadísticamente significativa:

- i. Eliminar de E los ejemplos cubiertos por la regla seleccionada. Construir la regla “IF (atributo, valor) THEN CLASE”, donde CLASE es la clase más común en los ejemplos cubiertos por el atributo o conjunto de atributos y su respectivo umbral.
- ii. Detener las iteraciones cuando no sean encontradas más reglas significativas.

B.3 ANÁLISIS DE LOS DESCRIPTORES EN CN2

Con el algoritmo CN2, se busca de manera iterativa un conjunto de descriptores que cubra un gran número de perturbaciones originados por una causa específica (operación de fusible limitador de corriente ó expulsión), y sólo algunos que tenga asociados otras causas, de tal forma que este conjunto posteriormente sirva para hacer una predicción fiable de la clase (causa) a la que pertenecen las perturbaciones que la regla cubre.

Para utilizar el CN2 se dispone de un conjunto de registros de perturbaciones con causa previamente identificada, los cuales se convierten en su base de conocimientos. Se utilizó un total 79 perturbaciones para obtener las reglas de decisión. En este caso, la perturbación es la clase, y los descriptores comprenden el conjunto de atributos. En la Tabla B.3 se ilustran 2 casos en los que se identifican las clases y los atributos.

CASO	DESCRIPTORES					CLASE
	I_{RATIO}	ΔTP	CFTi	CFRi	CP0	
1	0,32	0,1974	0,9888	9,0595	0,4028	Fusible Limitador de corriente
2	0,45	4,2891	0	-0,9903	0,0156	Fusible Expulsión

Tabla B.3. Esquema general de la base de entrenamiento de CN2.



Al implementar el modelo de aprendizaje en el sistema automático se obtiene un conjunto de reglas de decisión con las que se asocian ciertos descriptores a cada una de las causas de perturbación. La Tabla 2 se expone tales reglas con las que se clasifica cada causa.

B.4 METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE PERTURBACIONES ELÉCTRICAS OCACIONADA POR LA OPERACIÓN DE FUSIBLES.

Las sentencias de decisión propuestas para la detección automática de perturbaciones eléctricas por fusibles son presentadas en la Figura 11.

Las señales de entrada corresponden a la tensión y corriente monofásica (instantánea) en el dominio del tiempo. Las cuales son utilizadas para la estimación de 5 descriptores que fueron valorados como prioritarios en el análisis estadístico.

El algoritmo inicialmente, y como primer filtro, valora si la perturbación presenta disminución de corriente finalizado el evento con el descriptor I_{RATIO} . Si la señal no presenta esta característica inmediatamente es descartado como perturbación por operación de fusibles.

Seguidamente se clasifica el evento de acuerdo a su duración. Clasificándolo como perturbación de corta ó larga duración mediante el descriptor ΔTP . Si el evento es clasificado como corta duración se evalúa la posibilidad de que este corresponda a una perturbación relacionada con la operación de fusible limitador de corriente a través de los descriptores CFT_i , CFR_i y CP_0 , según el umbral establecido para esta clase de eventos. De igual manera para el caso en que sea clasificado como evento de larga duración, se realiza la evaluación de los descriptores CFT_i , CFR_i y CP_0 , pero en los rangos de valores determinados para fusibles de tipo expulsión.



Universidad
Industrial de
Santander

En ambos casos, si alguno de los descriptores no tiene algún valor que sea acorde a los rangos de decisión, el evento es clasificado como evento no relacionado con la operación de fusible.

ANEXO C

RESULTADOS: VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA

La metodología fue probada con un total de 60 perturbaciones, entre datos de fusibles y no fusibles, provenientes de registros reales y simulaciones obtenidas en los circuitos de prueba propuestos por la IEEE. A continuación se detalla los resultados de la validación de la metodología expuestos en la Tabla 3.

C.1 CASOS FUSIBLE DE EXPULSIÓN

La Tabla C.1 presenta el listado de descriptores para cada uno de los registros reales relacionados con la operación de fusibles y no fusibles. Se encuentra que, en los registros #2 y #3 no fueron asociados a este tipo de perturbación en ninguna de sus fases.

Realizando una revisión visual y de los descriptores calculados, se determinó que el registro #2 presenta una deformación en su señal poco significativa (Figuras C.1). Debido tal vez, a que la falla estuvo muy lejos del medidor o porque su impedancia fue muy grande.

Aunque la fase 2 es la única que presenta disminución del flujo de corriente finalizada el evento (descriptor I_{ratio}), no es muy claro el punto exacto en que finaliza y la forma de onda de la perturbación en la señal de corriente, afectan los descriptores $CP0$ y $CFTi$ los cuales tiene valores por encima a los establecidos a fusibles de expulsión.

El registro #3 (Figuras C.3), a diferencia del registro #2, presentan deformaciones muy claras. Pero se encuentra que, en ninguna de sus tres fases existe disminución alguna de la corriente post-falla, descartando inmediatamente así la posible causa asociada a la de un fusible de expulsión.

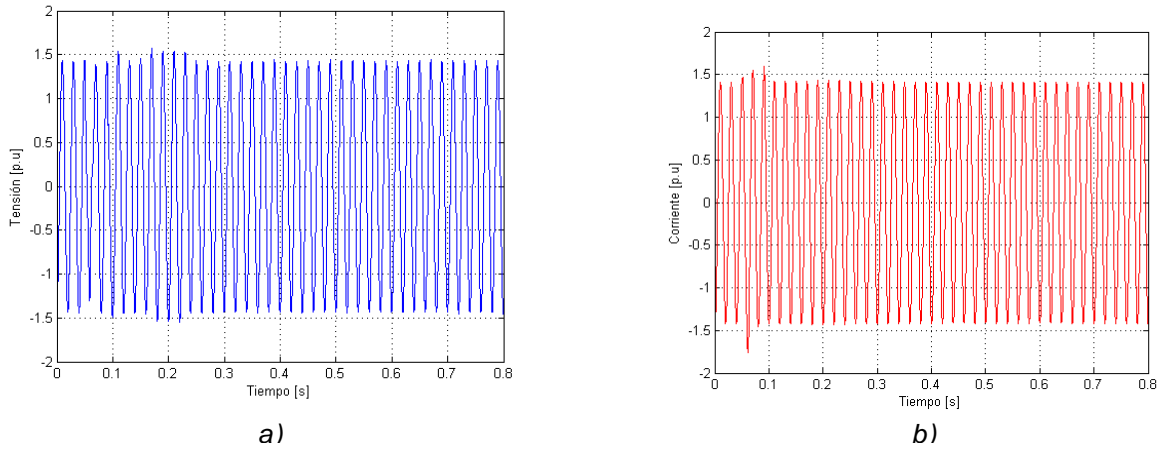


Figura C.1. Registro #2, fusible expulsión.
a) Tensión [p.u.]. b) Corriente [p.u.]. [1]

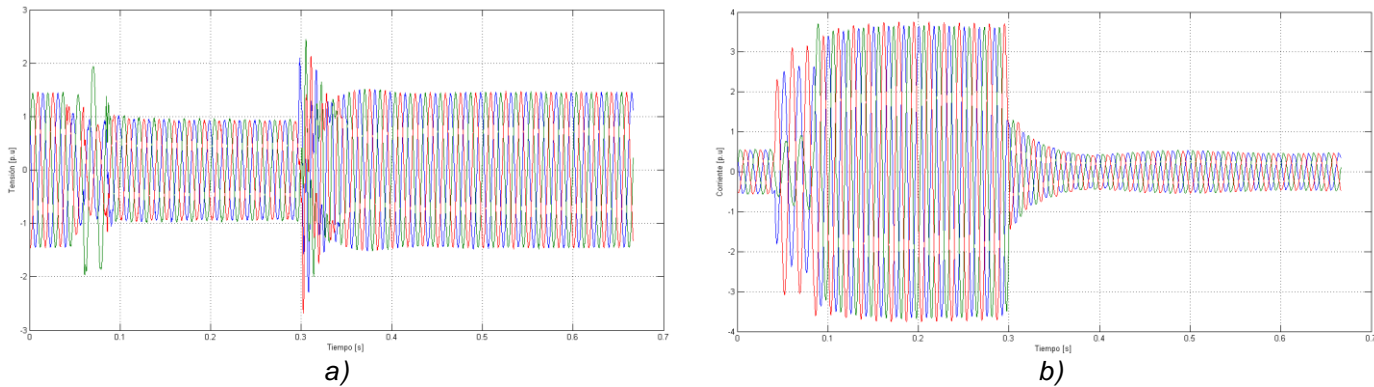
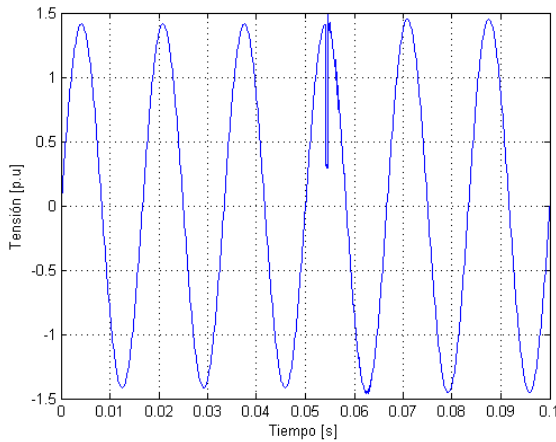


Figura C.2. Registro #3, fusible expulsión.
Tensión trifásica [p.u.]. b) Corriente trifásica [p.u.]. [1]

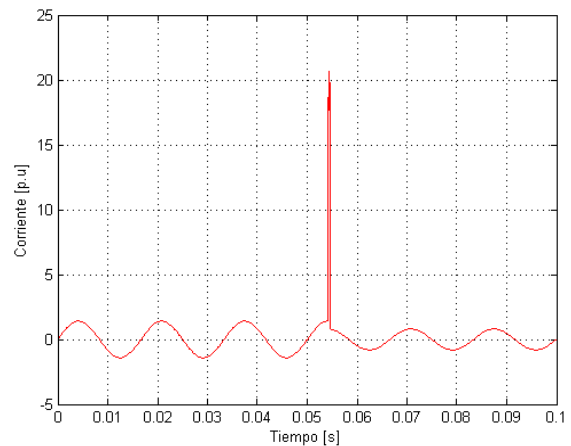
C.2 CASOS FUSIBLE LIMITADOR DE CORRIENTE

En el análisis al conjunto de señales simuladas por operación de fusible limitador de corriente, se presentaron 3 registros en los cuales no fue detectada la operación de este dispositivo de protección.

Los registros anómalos, señalados en rojo en la Tabla, presentan ciertas singularidades que ponen en manifiesto la dificultad para la detección de este tipo de perturbación por parte de la metodología planteada.



a).



b).

Figura C.3. Registro #34, fusible limitador de corriente. a) Tensión [p.u]. b) Corriente [p.u]. [1]

En el registro número #34, donde el fusible opera en la fase 1, presenta una duración del evento muy corta ($\Delta TP=0.039$), aunque está en el umbral aceptable para este tipo de evento, dificulta el cálculo de los descriptores de forma de onda $CFRi$ y $CRTi$, ya que la cantidad de muestras (5 muestras) para su cálculo no son suficientes para una correcta valoración del descriptor. Lo que ocasiona que estos descriptores se encuentren por fuera de los rangos asociados a la causa.

El registro número #35 en el cual se presenta el evento del fusible en la fase 2, presenta una duración del evento ($\Delta TP=0.563$) que excede el rango permitido para esta clase. Además, la forma de la sobrecorriente no corresponde a una forma triangular durante su aparición, produciendo un

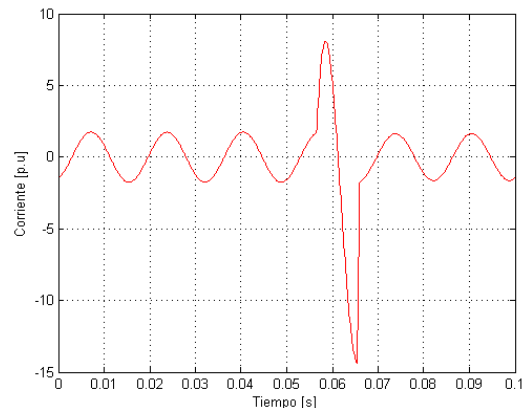
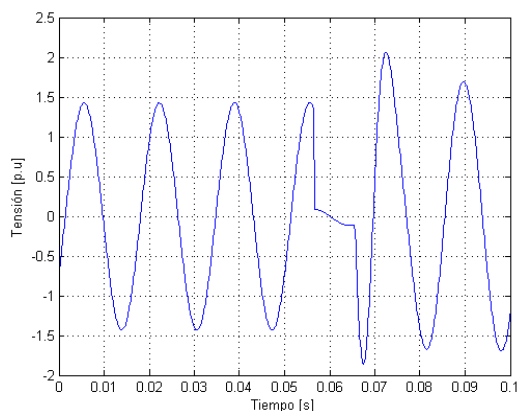


Figura C.4. Registro #35, fusibles limitadores de corriente. [1]



muy bajo valor en el descriptor que mide esta característica ($CFTi=-0.2$). A diferencia del falso negativo del registro #34, cuya causa de descarte fue la excedía corta duración, el registro #35 es descartada lo por su prolongado tiempo de duración.

Finalmente, el registro #39 obtuvo un valor muy bajo en el descriptor de coeficiente de forma triangular ($CFTi=0.1$). Queriendo decir que la perturbación es descartada de la causa fusible limitador de corriente, al no presentar una forma triangular de sobrecorriente. Al realizar la inspección visual del evento, en la grafica se puede apreciar que efectivamente la sobrecorriente no presenta un pico de sobrecorriente sino dos picos (uno positivo y otro negativo). Forma a la cual el descriptor en cuestión responde a un valor inferior al asignado a esta causa.

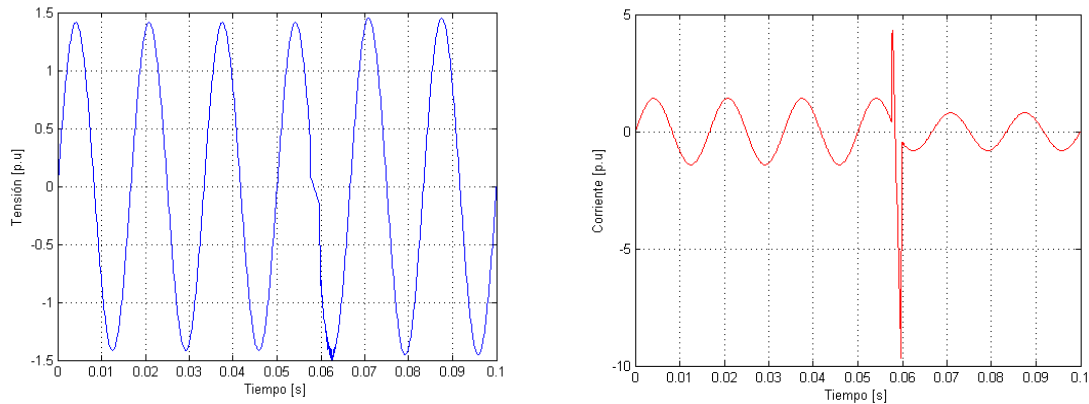


Figura C.5. Registro #39, fusibles limitadores de corriente. [1]

TABLA DE RESULTADOS										
#REGISTRO	ID	#FASE	CAUSA	I _{ratio}	ΔTPtsn	ΔTPcte	CFRi	CFTi	CP0	
FUSIBLE EXPULSIÓN	1	FE_1	1	FE	0.02	1.430	1.664	313.8	-6.3	0.023
			2	NoFuse	-0.00	1.328	1.594	-919.4	-6.2	0.055
			3	NoFuse	-0.00	36.039	22.188	-682.0	272.0	0.211
	2	FE_2	1	NoFuse	-0.02	1.867	2.047	-830.6	-63.0	0.250
			2	NoFuse	0.02	1.852	2.031	-622.9	-12.7	0.094
			3	NoFuse	-0.03	30.125	2.031	-672.2	-10.2	0.086
	3	FE_3	1	NoFuse	-0.21	0.000	15.359	NaN	-64.1	0.023
			2	NoFuse	-0.84	37.656	3.000	-646.8	-1.2	0.125
			3	NoFuse	-0.18	0.000	15.586	NaN	-70.8	0.055
	4	FE_4	1	NoFuse	-0.04	0.031	1.516	1195.9	-19.8	0.117
			2	NoFuse	-0.07	36.227	0.031	-679.2	NaN	0.039
			3	FE	0.06	3.313	1.844	-743.7	-5.8	0.016
	5	FE_5	1	FE	0.02	1.945	0.641	-841.9	-1.2	0.000
			2	NoFuse	-1.00	31.477	37.031	-687.2	437.0	0.141
			3	NoFuse	0.00	0.000	1.320	NaN	-17.4	0.031
	6	FE_6	1	FE	0.54	0.008	10.844	-1.0	-46.7	0.023
			2	NoFuse	0.53	36.625	33.961	-768.8	208.1	0.164
			3	NoFuse	0.11	0.000	0.031	NaN	NaN	0.102
	7	FE_7	1	FE	0.03	37.703	4.258	-693.7	-16.3	0.039
			2	NoFuse	-0.34	5.188	0.000	-960.1	NaN	0.227
			3	NoFuse	-0.31	36.117	0.055	-674.3	NaN	0.078
	8	FE_8	1	NoFuse	-0.06	8.891	4.883	-436.5	257.1	0.250
			2	FE	0.03	29.797	6.063	-641.2	-27.2	0.039
			3	NoFuse	-0.12	30.516	4.789	-703.7	-49.5	0.008
	9	FE_9	1	NoFuse	0.62	6,906	6,070	-631.8	-39.5	0.172
			2	FE	5.21	33,547	6,570	-625.9	-19.9	0.047
			3	NoFuse	4.28	5,984	6,648	-353.8	-27.1	0.234
	10	FE_10	1	NoFuse	0.08	19,406	31,813	-633.0	600.0	0.227
			2	NoFuse	0.00	19,406	31,836	-640.3	299.8	0.055
			3	FE	0.06	38,469	3,727	-635.4	-14.5	0.023
11	FE_11	1	FE	0.06	17,484	3,539	-671.5	-12.1	0.016	
		2	NoFuse	NaN	36,977	NaN	-681.8	NaN	NaN	
		3	NoFuse	0.05	0.000	3,570	NaN	-12.2	0.070	
12	FE_12	1	NoFuse	0.30	6,242	23,219	-561.6	-34.3	0.203	
		2	FE	0.29	36,297	23,227	-654.6	-33.2	0.023	
		3	NoFuse	0.41	6,203	22,508	-559.5	-32.7	0.117	
13	FE_13	1	FE	0.02	14,344	33,117	-553.1	-45.7	0.016	
		2	NoFuse	0.29	0.031	5,625	1040.3	-10.4	0.250	
		3	NoFuse	0.06	16,141	13,500	-566.5	-50.4	0.211	
14	FE_14	1	NoFuse	0.07	10,852	7,961	-652.2	-43.7	0.109	
		2	FE	0.08	11,352	7,914	-626.9	-30.5	0.031	
		3	NoFuse	0.18	30,445	31,516	-639.1	-60.2	0.258	
15	FE_15	1	NoFuse	2.00	4,352	5,289	-533.9	-19.6	0.055	
		2	FE	1.83	4,375	5,313	-452.0	-18.4	0.023	
		3	FE	0.31	37,922	14,109	-655.8	-54.5	0.039	
16	FE_16	1	FE	0.05	34,484	13,953	-656.4	-30.9	0.023	
		2	NoFuse	0.23	4,234	0.000	-624.6	NaN	0.227	
		3	NoFuse	0.02	4,195	7,203	-469.4	-21.0	0.078	

TABLA DE RESULTADOS

	#REGISTRO	ID	#FASE	CAUSA	I _{ratio}	ΔTPtsn	ΔTPcte	CFRi	CFTi	CP0
FUSIBLE EXPULSIÓN	17	FE_17	1	NoFuse	0.32	35,734	29,758	-924.6	134.3	0.063
			2	NoFuse	0.42	35,758	5,188	-950.2	-19.6	0.250
			3	FE	0.98	36,742	5,172	-298.5	-30.2	0.000
	18	FE_18	1	FE	1.66	24,719	4,727	-589.4	-23.2	0.000
			2	NoFuse	0.61	5,188	4,734	-918.4	-6.6	0.117
			3	NoFuse	0.51	24,703	4,734	-672.4	-18.8	0.133
	19	FE_19	1	NoFuse	0.01	34,859	11,805	-737.8	-28.4	0.055
			2	NoFuse	0.14	36,813	23,523	-700.5	-81.1	0.117
			3	FE	0.06	12,344	11,805	-462.5	-32.0	0.000
20	FE_20	1	FE	1.37	13,727	12,883	-535.8	-28.3	0.039	
		2	NoFuse	-0.18	23,133	6,508	-626.9	-39.0	0.219	
		3	NoFuse	-0.45	38,719	5,898	-688.5	-11.7	0.094	
FUSIBLE LIMITADOR DE CORRIENTE	21	CLF_1	1	CLF	0.86	0.156	0.102	128.4	0.6	0.14
			2	NoFuse	-0.00	0.164	0.102	160.8	NaN	0.04
			3	NoFuse	0.00	0.156	0.000	78.6	NaN	0.10
	22	CLF_2	1	CLF	0.76	0.063	0.063	131.8	1.0	0.18
			2	NoFuse	-0.00	0.047	0.000	113.5	NaN	0.02
			3	NoFuse	NaN	0.063	NaN	102.5	NaN	NaN
	23	CLF_3	1	CLF	0.78	0.148	0.148	98.7	1.0	0.12
			2	NoFuse	-0.00	0.148	0.008	142.4	NaN	0.10
			3	NoFuse	NaN	0.172	NaN	72.6	NaN	NaN
	24	CLF_4	1	CLF	1.52	0.039	0.039	563.7	0.8	0.20
			2	NoFuse	-0.00	0.031	0.031	117.8	NaN	0.04
			3	NoFuse	0.00	0.031	0.031	91.8	NaN	0.13
	25	CLF_5	1	NoFuse	0.00	0.211	0.188	470.9	-1.3	0.14
			2	CLF	0.07	0.203	0.203	210.7	1.0	0.22
			3	NoFuse	0.00	0.219	0.188	939.9	1.0	0.05
	26	CLF_6	1	CLF	0.76	0.188	0.188	121.9	1.0	0.24
			2	NoFuse	0.01	0.039	0.016	91.1	1.0	0.13
			3	NoFuse	0.00	0.023	0.000	104.5	NaN	0.02
	27	CLF_7	1	CLF	0.75	0.133	0.133	131.9	1.0	0.17
			2	NoFuse	0.00	0.000	0.016	NaN	1.0	0.19
			3	NoFuse	0.00	0.000	0.000	NaN	NaN	0.04
	28	CLF_8	1	CLF	0.75	0.227	0.227	102.7	1.0	0.27
			2	NoFuse	0.01	0.000	0.000	NaN	NaN	0.11
			3	NoFuse	0.00	0.000	0.000	NaN	NaN	0.06
	29	CLF_9	1	CLF	0.76	0.094	0.094	167.5	1.0	0.17
			2	NoFuse	0.01	0.242	0.031	105.4	0.8	0.21
			3	NoFuse	0.00	0.000	0.000	NaN	NaN	0.08
	30	CLF_10	1	NoFuse	0.02	0.289	0.016	92.2	NaN	0.02
			2	CLF	0.07	0.281	0.281	190.0	0.8	0.28
			3	NoFuse	0.05	0.359	0.016	647.8	NaN	0.15
	31	CLF_11	1	CLF	0.86	0.102	0.102	112.1	0.8	0.16
		2	NoFuse	0.00	0.094	0.094	148.4	NaN	0.01	
		3	NoFuse	0.00	0.094	0.094	95.2	NaN	0.17	
TABLA DE RESULTADOS										
	#REGISTRO	ID	#FASE	CAUSA	I _{ratio}	ΔTPtsn	ΔTPcte	CFRi	CFTi	CP0
F	32	CLF_12	1	CLF	0.76	0.063	0.063	121.8	1.0	0.20

		2	NoFuse	0.00	0.047	0.000	106.9	NaN	0.04	
		3	NoFuse	NaN	0.063	NaN	114.7	NaN	NaN	
33	CLF_13	1	CLF	0.76	0.148	0.148	100.9	1.0	0.12	
		2	NoFuse	0.00	0.133	0.000	139.9	NaN	0.05	
		3	NoFuse	NaN	0.148	NaN	92.4	NaN	NaN	
34	CLF_14	1	NoFuse	1.54	0.039	0.039	585.5	0.8	0.23	
		2	NoFuse	0.00	0.031	0.031	105.4	NaN	0.06	
		3	NoFuse	0.00	0.031	0.031	108.7	NaN	0.11	
35	CLF_15	1	NoFuse	0.03	0.570	0.016	551.3	NaN	0.13	
		2	NoFuse	0.07	0.563	0.563	116.1	-0.2	0.23	
		3	NoFuse	0.08	0.586	0.016	726.6	NaN	0.06	
36	CLF_16	1	CLF	0.76	0.242	0.242	121.9	0.5	0.23	
		2	NoFuse	0.00	0.273	0.250	73.7	0.9	0.13	
		3	NoFuse	0.00	0.258	0.234	132.6	NaN	0.02	
37	CLF_17	1	CLF	0.76	0.188	0.188	138.2	0.7	0.16	
		2	NoFuse	0.00	0.000	0.016	NaN	1.0	0.19	
		3	NoFuse	0.00	0.000	0.000	NaN	NaN	0.04	
38	CLF_18	1	CLF	0.76	0.281	0.281	112.6	0.8	0.26	
		2	NoFuse	0.01	0.000	0.000	NaN	NaN	0.11	
		3	NoFuse	0.00	0.000	0.000	NaN	NaN	0.06	
39	CLF_19	1	NoFuse	0.81	0.141	0.141	117.6	0.1	0.16	
		2	NoFuse	0.00	0.273	0.164	108.0	0.6	0.22	
		3	NoFuse	0.00	0.133	0.133	138.3	NaN	0.09	
40	CLF_20	1	CLF	0.00	0.320	0.320	759.0	0.5	0.05	
		2	NoFuse	2.44	0.406	0.016	473.9	NaN	0.28	
		3	NoFuse	0.05	0.398	0.016	656.7	NaN	0.14	
NO FUSIBLES	41	NF_1	1	NoFuse	0.05	37.43	0.07	964.7	NaN	0.008
			2	NoFuse	0.44	30.484	0.07	281.1	0.7	0.148
			3	NoFuse	0.11	0.031	0.07	1145.9	0.7	0.172
	42	NF_2	1	NoFuse	0.29	0.055	2.406	2402.3	-6.4	0.125
			2	NoFuse	0.55	20.398	0	164.3	NaN	0.094
			3	NoFuse	0.39	20.422	0	1060	NaN	0.242
	43	NF_3	1	NoFuse	0.32	36.18	36.203	155.3	-223.6	0.031
			2	NoFuse	0.05	0.031	36.203	1667.9	-640.2	0.148
			3	NoFuse	0.02	0.031	36.203	2293	1488.4	0.203
	44	NF_4	1	NoFuse	0.37	19.961	34.492	182.9	-115.8	0.008
			2	NoFuse	0.14	36.492	26.508	1029.6	-344.1	0.164
			3	NoFuse	0.15	36.492	6.563	1113.1	-14.2	0
	45	NF_5	1	NoFuse	0.34	0.047	24.672	1546.5	-130.6	0.031
			2	NoFuse	0.06	37.148	24.664	1028.1	1057.6	0.203
			3	NoFuse	0.01	31.141	24.672	1090.9	-204.6	0.148
	46	NF_6	1	NoFuse	0.34	0.008	0.031	-1	NaN	0.164
			2	NoFuse	0.08	0.008	2.945	-1	-120.5	0.227
			3	NoFuse	0.01	9.547	0.039	1039.6	NaN	0.008



TABLA DE RESULTADOS									
#REGISTRO	ID	#FASE	CAUSA	I _{ratio}	ΔTPtsn	ΔTPcte	CFRi	CFTi	CP0
NO FUSIBLES	47	1	NoFuse	0.12	0	0.031	NaN	NaN	0.055
		2	NoFuse	0.07	0	0.031	NaN	NaN	0.125
		3	NoFuse	0.49	32.797	0.047	164.3	NaN	0.211
	48	1	NoFuse	0.12	0	0.039	NaN	NaN	0.094
		2	NoFuse	0.09	0	0.039	NaN	NaN	0.078
		3	NoFuse	-0.5	38.18	0.055	185.3	NaN	0.234
	49	1	NoFuse	0.01	NaN	0.547	NaN	-0.9	0.07
		2	NoFuse	0.27	NaN	0.57	NaN	-28	0.234
		3	NoFuse	0.04	NaN	0.008	NaN	NaN	0.102
	50	1	NoFuse	0.06	0.055	0.055	1262.9	NaN	0.039
		2	NoFuse	0.03	0.039	0.055	2273.1	NaN	0.133
		3	NoFuse	0.35	0.055	0.055	2449.1	NaN	0.195
	51	1	NoFuse	0.07	0	21.602	NaN	-229.6	0.047
		2	NoFuse	0.46	0	0.359	NaN	-8.6	0.156
		3	NoFuse	0.14	0.008	36.805	-1	3882.6	0.242
	52	1	NoFuse	0.27	0.039	0.055	1069.6	-5.2	0.164
		2	NoFuse	0.05	36.664	0.031	847.5	NaN	0.18
		3	NoFuse	0	34.602	0.055	944.8	NaN	0
	53	1	NoFuse	-0.1	0.867	0	626.9	NaN	0.031
		2	NoFuse	0	38.367	8.313	727.5	-115.7	0.047
		3	NoFuse	0.01	0.867	0	645.4	NaN	0.203
	54	1	NoFuse	0.29	0.305	0.133	1071.4	0.8	0.273
		2	NoFuse	0.51	0.297	0.008	993.2	NaN	0.055
		3	NoFuse	-1	37.547	38.297	938.4	-756.1	0.258
55	1	NoFuse	0.16	35.266	35.359	596	-185.5	0.219	
	2	NoFuse	0.48	0.906	0.008	594.9	NaN	0.195	
	3	NoFuse	0.42	0.836	0.008	1109.5	NaN	0.148	
56	1	NoFuse	0.15	23.813	22.758	598.2	-176.3	0.148	
	2	NoFuse	0.47	0.117	0.023	821.6	NaN	0.234	
	3	NoFuse	0.35	0.117	0.117	858	NaN	0.109	
57	1	NoFuse	0.21	32.203	0.016	599.5	NaN	0.211	
	2	NoFuse	0.48	28.391	0	563.1	NaN	0.117	
	3	NoFuse	0.18	28.367	0.016	935.9	NaN	0.047	
58	1	NoFuse	0.03	22.711	0.031	606.6	NaN	0.063	
	2	NoFuse	0.36	23.969	0.031	569.4	1	0.234	
	3	NoFuse	0.12	0.047	0.016	2346.8	NaN	0.109	
59	1	NoFuse	0.02	36.703	0	958.3	NaN	0.023	
	2	NoFuse	0.01	27.227	0	687.3	NaN	0.156	
	3	NoFuse	0.24	36.164	0	493.1	NaN	0.195	
60	1	NoFuse	0.04	35.945	34.359	767.1	-154.6	0.031	
	2	NoFuse	0.34	34.859	0	428.3	NaN	0.219	
	3	NoFuse	0.08	0	0	NaN	NaN	0.055	

Tabla C.1



Universidad
Industrial de
Santander

ANEXO D

**Artículo publicado en la revista INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN
(Vol. 31, No 2, SUP: 2011, pp. 88-96)**

Characterising power quality disturbances resulting from current limiting fuse operation

Caracterización de Perturbaciones Eléctricas Causadas por la Operación de Fusibles Limitadores de Corriente

N. Ortiz S¹, J. Blanco S², G. OrdoñezP³, V. Barrera N⁴

Abstract— This article presents novel and easily implemented tools for characterising electrical disturbances originated by fuse operations. A methodology is described that (with the use of some descriptors) led to identifying electrical disturbances of this kind. The algorithm's decision thresholds were estimated using machine learning techniques. This work was aimed at providing new tools for assessing power quality, characterising and extracting information from voltage and current records obtained from monitoring distribution systems. MATLAB was used for validating this methodology, receiving voltage and current records of simulated events in ATP-EMTP and also real events as input.

Keywords—Electromagnetic disturbances, current limiting fuses, descriptor, variance multi-variant analysis (MANOVA)

Resumen— Este artículo presenta nuevas herramientas de fácil implementación para la caracterización de perturbaciones eléctricas originadas por la operación de fusibles. Se describe una metodología que, mediante el uso de algunos descriptores, permite la identificación de esta clase de perturbaciones eléctricas. Los umbrales de decisión del algoritmo son estimados mediante técnicas de aprendizaje automático. Este trabajo tiene como objetivo proporcionar nuevas herramientas para evaluar la calidad de energía, caracterizando y extrayendo información de los registros de tensión y corriente obtenidos a través de la monitorización en los sistemas eléctricos de distribución. La validación de la metodología se realiza en MATLAB tomando como señales de entrada algunos registros de tensión y corriente obtenidos por simulación en ATP-EMTP y utilizando también algunos registros de eventos reales.

Palabras Claves— Perturbaciones electromagnéticas, fusibles limitadores de corriente, descriptores, análisis multivariante de la varianza (MANOVA).

¹N. Ortiz S is student in electrical engineering from the Industrial University of Santander (UIS) Colombia. He belongs to the Research Group on Electric Power Systems GISEL. Email: itan_leon@hotmail.com

²J. Blanco S received the B.Sc. degree in electrical engineering from the Universidad Industrial de Santander (UIS), Bucaramanga, Colombia, in 2009. Currently, he is pursuing master studies in electrical engineering at Universidad Industrial de Santander. Email: jablas_19@hotmail.com

³G. Ordoñez P received the B.Sc. degree in electrical engineering from the Universidad Industrial de Santander (UIS), Bucaramanga, Colombia, in 1985. He received his PhD in Industrial Engineering from the Universidad Pontificia Comillas, Madrid, Spain, in 1993. Currently, he is Titular Professor of the School of Electrical Engineering at the Universidad Industrial de Santander (UIS-Colombia). E-mail: gaby@uis.edu.co.

⁴V. Barrera N received the B.Sc. and M.Sc. degrees in electrical engineering from the Universidad Industrial de Santander (UIS), Bucaramanga Colombia, in 2003 and 2006, respectively. Barrera is with (IIA) Institute of Informatics and Applications of the University of Girona (UdG), Catalonia. He is PhD student in UdG and member of C4.112 CIGRE working group "Guidelines for Power Quality Monitoring". Email: victor.barrera@udg.edu, <http://eia.udg.edu/~vbarrera>

1. INTRODUCTION

The power quality concept was introduced in the electric power sector, there has been great interest in studying electrical disturbances affecting service quality. There is great current interest in studying electromagnetic disturbances affecting power quality. Recent investigations have studied different types of disturbance and their associated causes for improving power quality.

Electromagnetic disturbances and their consequent economic impact have prioritised their analysis by the electricity sector, having special interest for utilities. The actual regulatory framework states that these companies have to implement monitoring equipment in power systems to record electromagnetic disturbances and are required to report power quality-related indicators. Progress must thus be made in this kind of research.

Electromagnetic disturbance-related research is interested in identifying the localisation of and causes associated with a specific event. These causes are often related to internal network anomalies or external faults.

Protective device use and coordination are thus used to prevent severe damage to an electrical grid due to such anomalies or faults; they operate in a characteristic way, according to the type of protection and pertinent operating principle. Fuse protection is one of the most widely used in power systems due to its operation simplicity, protection features and low cost compared to other protection devices.

Some phenomena have an impact on power quality during fuse operation which is reflected in voltage and current waveform distortions which can be recorded by monitoring equipment. There has been increasing interest in their study because of this, and the continuing emergence of equipment which is increasingly sensitive to such phenomena. Major developments in voltage sag and swell characterisation have been documented in the literature by such authors as Bollen (Bollen and Zhang, 2000; Bollen and Zhang, 1999), but few publications have been related to short-term perturbation analysis, such as current-limiting fuse operation.

Kojovic and William have highlighted the effects of operating current limiting fuses by researching and testing voltage and current wave distortion during fuse operation in the presence of faults (Kojovic *et al.*, 1997; Kojovic *et al.*, 2002; Kojovic *et al.*, 1998). Allen and Chopra's study (2010) is worth mentioning because they identified and quantified the characteristics of current-limiting fuse operation in voltage and current waves recorded downstream of the

measuring point.

To continue this line of study and summarising the results presented in the aforementioned publications, this paper develops and proposes a methodology based on characterising waveform perturbations.

2. FUSE OVERVIEW

A fuse is a simple and reliable safety device which has great advantages compared to other protective devices due to its ease of application and the ability to protect people and equipment. It is a current sensitive device consisting of a conductor element having a small cross-section which is usually surrounded by an arc-extinguisher and a heat sink encased in a cartridge (usually cylindrical) and equipped with terminal connections.

The fuse element is contained inside a cartridge, normally consisting of a wire or metal strip with a reduced section and is calibrated according to its current capacity. There is high current density in this metallic section for a given value and for a preset time, producing the melting of the element and the opening of the circuit which it is protecting. A lead-based alloy is used for fuse elements in the case of low voltages and currents, and a tape-based copper or aluminium alloy in the case of higher currents.

Its main function as a protective device is to interrupt a circuit when there are high currents, especially concerning overload and/or short circuits, and the ability to withstand the transient recovery voltage that occurs subsequent to a fault being cleared.

Most fuses are specified according to their current, voltage rating and interrupting capacity. Nominal current indicates the current that can flow through the device without melting it or exceeding the temperature limit. Nominal voltage specifies the maximum voltage that can be applied to a fuse's terminals and interrupting capacity defines the maximum short circuit current that a fuse can safely interrupt. If a fault current is much greater than a fuse's breaking capacity, then an explosion may occur when operating, due to high pressure and electromagnetic stress. According to its breaking capacity, installation location and cost, it is possible to select the type of fuse in relation to electrical system requirements.

This work considers current-limiting fuses. A current-limiting fuse is a fast-acting device, having less than a half-cycle fault current interruption time introducing high resistance into a circuit. Some distortions in voltage and current waveforms are shown in Figures 1 and 2.

The fusible element, whose length is greater than the expulsion fuse and is located within silica sand to focus the arc (Angelopoulos, 1991), raises pressure along the fuse element and produces a momentary increase in resistance, limiting fault current, thus reducing operation time to a value considered in the first half cycle of the current wave (Wright and Newbery, 2004, pp. 38).

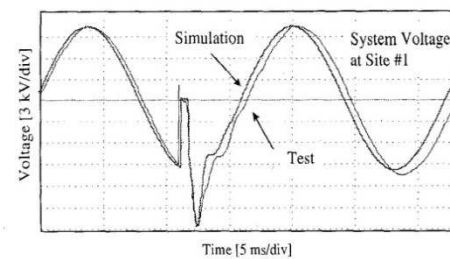


Figure 1. Voltage distortion caused by current-limiting fuse operation (Kojovic *et al.*, 1998).

3. FUSE MODELLING AND SIMULATING ITS OPERATION

A current-limiting fuse was modelled as a nonlinear resistance according to Kojovic and Williams (Kojovic *et al.*, 1998). The two main parameters taken into account in its modelling were the fuse's melting point I^2t and the fuse's nonlinear resistance characteristics after melting open. The implemented model was taken from a 8.3 [kV], 20 [A] current-limiting fuse.

This model was implemented in ATPDraw and simulated on two test circuits whose records were obtained for characterising the disturbances and for future tests of the methodology. A 34-node system and a 13-node system (Kersting and Dugan, 2000) were used in the simulations.

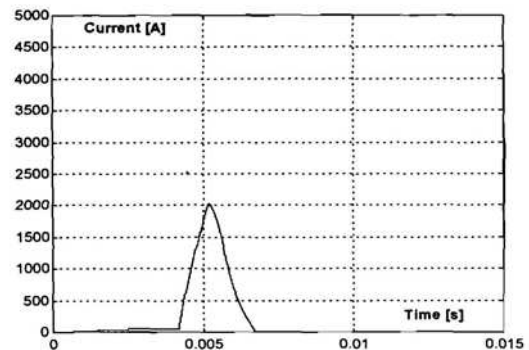


Figure 2. Current peak for operation of the current-limiting fuse (Kojovic and S. Hassler, 1997).

4. METHODOLOGY AND IMPLEMENTATION

The following sections describe relevant aspects of each stage in developing and elaborating the methodology. According to waveform disturbance types, analysed in MATLAB, different descriptors were proposed and explained. These waveforms corresponded to simulated events in ATP-EMTP, as mentioned in section 3.

Applying a multivariable statistical analysis for obtaining the relevance factor for every descriptor and selecting its decision threshold according to automatic learning methodologies is presented later on, as well as the methodological design and some tests on different disturbances previously identified for its validation.

A. Descriptor formulation

Descriptor formulation was based on disturbance waveforms, taking the characteristics identified in (Allen *et al.*, 2010) as a starting point, i.e. event duration, disturbance starting and finishing angles, overcurrent slope rise and slope fall and fault / pre-fault current ratio. A group of descriptors was proposed for measuring these characteristics.

A.1 Instant triangular shape coefficient (*iTSC*)

This descriptor was defined as instant current signal triangular form coefficient. It was proposed to estimate whether current waveform during a disturbance had a triangular form. It was originally proposed by Blanco and Jagua(2009, pp. 39) for RMS values. If current is different to current-limiting fuse operational value, then *iTSC* will report small values close to zero, because the electrical current pattern is different to that of a triangle.

Instant current length is compared to the length of one side of a reference triangle to quantify this categorisation; the vertex is equal instant current pre-fault, post-fault and maximum or minimum value recorded during a disturbance (Figure 3). In other words, it measures the degree to which overcurrent value sequence pattern resembles the reference triangle's sides. The following factors were estimated for calculating *iTSC*:

A.1.1 Similarity coefficients (*CC* and *CS*): *CS* was the difference between the side having a positive slope and current length was calculated from the pre-fault point (i_0) to the sample containing maximum instantaneous overcurrent (i_{max}). *CC* was the difference between the triangle's side having a negative slope and current length was between i_{max} to post-fault current (i_1).

The mathematical expression for current length was:

$$\ell_{s,c} = \sum_{i=2}^{n-1} \left(\sqrt{\left(\frac{1}{n}\right)^2 + (i(n_{i+1}) - i(n_i))^2} \right) \quad (1)$$

where n was the total number of samples recorded during each current.

$$CS = \left| \frac{\ell_{c_p} - \ell_s}{\ell_{c_p}} \right| \quad CC = \left| \frac{\ell_{c_n} - \ell_c}{\ell_{c_n}} \right| \quad (2)$$

where ℓ_{c_p} and ℓ_{c_n} were the reference triangle's positive and negative slope sides.

A.1.2. Limitation coefficient (*LC*): This coefficient examined the percentage of currents points appearing outside the reference triangle. This percentage referred to the total number of samples in a record (n).

$$LC = \frac{n_{out-\Delta}}{n} \quad (3)$$

$n_{out-\Delta}$ was the number of samples where instant current value appeared outside the reference triangle.

The *instantaneous triangular shape coefficient* was mathematically defined with these coefficients:

$$iTSC = 1 - (CC + CS + LC) \quad (4)$$

Hence, it would be expected that the *iTSC* descriptor had values close to one for current-limiting fuses. The same analysis was performed for disturbances present during the negative semi-cycle taking the event sequence's absolute value.

A.2 Increased zero-sequence impedance (*IZO*) and increased negative-sequence impedance (*IZ*)

Descriptors *IZO* and *IZ* were used to calculate the degree of load unbalance. A variation of this kind of impedance is typical on the load output due to operating protection devices, i.e. fuses.

IZO and *IZ* were defined as the difference between zero sequence impedance integrals before and after a disturbance.

$$IZO = Z0_{pos-fault} - Z0_{pre-fault} \quad (5)$$

$$Z0_{pre,pos-fault} = \sum \frac{Z_0(t)}{Z_{pre,pos-fault}} \quad (6)$$

$Z0_{pre,post-fault}$ was calculated during two cycles before and after a disturbance and was the sum of the magnitudes of zero sequence impedances ($Z_0(t)$) in p.u of the pre-fault and post-fault fault at each instant of time.

With this result the load output could be identified after a fault, thereby becoming a fuse operation indicator.

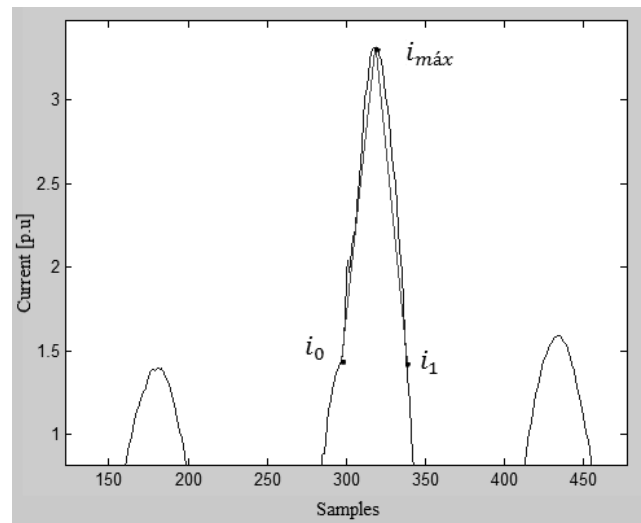


Figure 3. Triangular shaped current peak

A.3 Disturbance time delta (ΔTP)

Descriptor ΔTP was defined as the number of samples between the disturbance's final and initial points, divided by the total number of samples per cycle.

$$\Delta TP = \frac{n_{final} - n_{initial}}{n_{cycle}} \quad (7)$$

To determine the initial and final points of an event, decomposition was executed by wavelet transform coefficients (WTCs) according to Vega (2007); such decomposition was done by the Bior 3.9 family.

The detail coefficients vector (CD) was then analysed. This vector presented points on the signal where sudden changes appeared. Sample selection was performed, taking into account points of the CD vector exceeding the mean value of 3 standard deviations.

$$Up = |CD| + 3 * \sigma(CD) \quad (8)$$

This is represented in Figure 5 as the horizontal line, where Figure 4 is the original signal. The initial point was defined as the sample corresponding to the first intercepted peak by the Up line, observed from left to right and the final point was defined as the sample corresponding to the first interception between the Up line and the first peak, but observed from right to left.

A.4 Instant current upslope and downslope (iPI^+ and iPI^-):

Descriptors iPI^+ and iPI^- estimated the ratio of instant current growth and decay during disturbance time and were defined as the slope of linear regression calculated for current values between $i_0 - i_{max}$ for iPI^+ and $i_{max} - i_1$ for iPI^- .

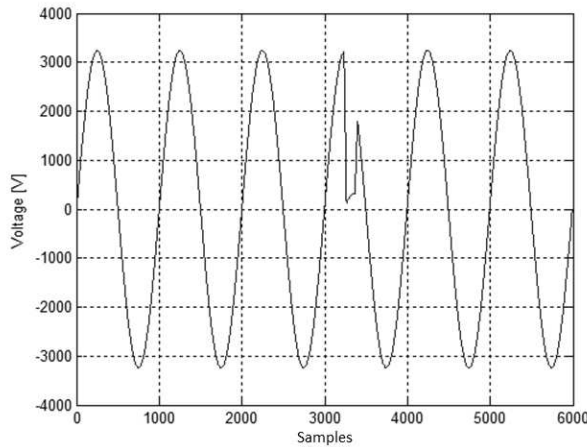


Figure 4. The time domain signal

Important information about the transient state of the event could be extracted with these descriptors and fuse operation with other short-duration faults could be ruled out. Electrical current upslopes and downslopes were estimations of fuse behaviour during melting and arcing time during operation.

A.5 Instant voltage fall percentage (%iVF)

Instant voltage fall percentage refers to the degree of voltage reduction during a particular disturbance.

$$\%iVF = 1 - \left(\frac{v(n)_{disturbance}}{v(n)_{reptica}} \right)_{mean} \quad (9)$$

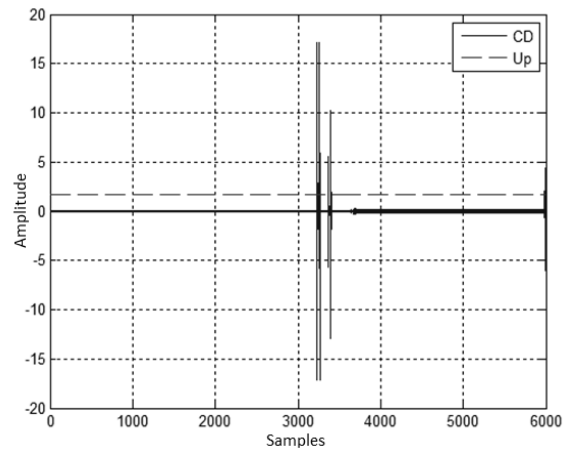


Figure 5. Detail coefficients by wavelet transform Bior 3.9

An identical voltage signal was constructed to that of the original pre-fault data for such calculation and the mean value of the ratio between both voltages was calculated with the samples corresponding to the disturbance.

Consequently, events having 40% to 60% reduced instant voltage corresponding to fuse operation statistical values could be identified with this descriptor.

A.6 Current ratio (I_{RATIO})

This descriptor determines the overcurrent values reached during the first disturbance which compared to other values reached by the current-limiting fuse offers orientation regarding fuse operation identification. It is defined as:

$$I_{RATIO} = \frac{i_{fault}}{i_{pre-fault}} \quad (10)$$

where i_{fault} and $i_{pre-fault}$ were such current's peak values.

So I_{RATIO} was the ratio between the peak current attained during the disturbance and pre-fault peak current.

A.7 Dissipated energy ($I2t$)

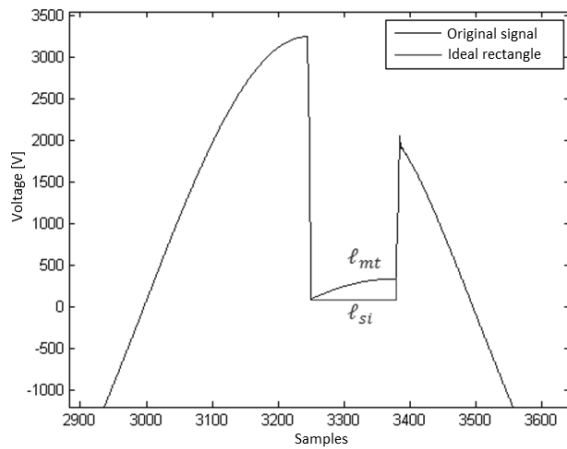
The $I2t$ descriptor was used to estimate the amount of energy dissipated by a fuse as defined as the integral of the fault current squared and estimated during the event time.

$$I2t = \int_0^t i^2 dt = \sum i^2(n) \quad (11)$$

This descriptor differentiated the disturbances caused by expulsion fuses and those caused by current-limiting fuses. Expulsion fuses dissipate energy over 10,000 [A²s] and current limiting ones dissipate below this amount (Kojovic et al., 1998).

A.8 Instant rectangular shape coefficient ($iRSC$)

The $iRSC$ descriptor is proposed as an estimator for calculating voltage signals' disturbance shape, which is normally presented as a rectangular shape.


 Figure 6. Real voltage notch l_{mt} and ideal voltage notch l_{si}

This descriptor was intended to obtain the rectangular tendency regarding voltage values during fuse operation.

It was calculated by comparing the lengths of the rectangle's base (taking an ideal square as reference) formed by initial and final samples' values concerning the disturbance and the least absolute value recorded during such event. The least absolute value was considered due to the probability that disturbance could occur on a positive or negative semi-cycle. Reference rectangle base length was defined as:

$$l_{si} = n - 1 \quad (12)$$

l_{si} : Maximum length of the ideal signal

n : total samples number during the disturbance

The length of the instant values on the voltage notch was defined as:

$$l_{mt} = \sum_{i=2}^{n-1} \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right)^2 + (v(n_{i+1}) - v(n_i))^2} \quad (13)$$

l_{mt} : Voltage notch length

With these lengths, the instant rectangular shape coefficient could be mathematically defined as:

$$iRSC = \frac{l_{mt} - l_{si}}{l_{si}} \quad (14)$$

A.9 \pm fuse operation insertion angle (FOIA)

This descriptor represented voltage signal phase angle when fuse operation began. This descriptor was proposed for voltage waveforms and not for current waveforms because current signals are more likely to be distorted by high frequency components producing unwanted zeros.

The operation angle was measured from the zero-cross prior to the disturbance until the instant value when an event began.

The insertion point of the fault in a signal must be identified to calculate the descriptor, determining whether it occurred on a positive or negative semi-cycle and estimating the angle.

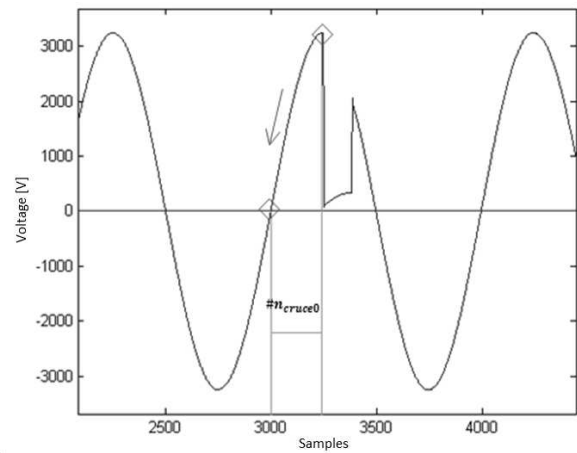


Figure 7. Fuse operation angle voltage

The number of samples between the two reference points was then determined. The number of samples was counted from the initial fault point, counting backwards until a sign change was detected, thereby indicating a zero-cross.

According to the initial event's semi-cycle, the descriptor value was:

$$+FOIA = \frac{(\#n_{cross0}) * 360}{n_{cycle}} \quad (15)$$

$$-FOIA = \frac{\left(\frac{n_{cycle}}{2} - (\#n_{cross0} + 1)\right) * 360}{n_{cycle}} \quad (16)$$

n_{cycle} : Number of samples during a cycle

A.10 the nearest zero-crossing (NZC)

After a disturbance has appeared, it is important to identify the instant when it disappears due to fault clearing, taking semi-cycles' final instants (zero-crosses) as reference points.

The NZC descriptor estimated fault clearing point proximity to the nearest zero-cross. It would thus have been determined whether the disturbance was present regarding a different current value than normal waveform zero-crossing, this being the main characteristic of current-limiting fuses' fast action.

The NZC descriptor calculated the number of samples between disturbance final point and the zero-cross nearest to that point. A similar procedure to that presented in section A.9 was followed, the difference being that in this descriptor the number of samples between the zero-crosses before and after the final point of the event were recorded. The descriptor value was the least of the two distances divided by the total number of samples per cycle.

B. Multivariate analysis of variance (MANOVA)

A multivariable statistical analysis was performed after applying a set of 79 current and voltage signals (obtained by simulation and real electrical system records) to establish the previously described descriptors' effectiveness and the degree of relevance of each in identifying current and voltage events caused by fuse operation. These signals were identified and classified into three classes (according to the type of cause):

capacitor bank energising, current-limiting fuse operation and expulsion fuse.

Multivariable analysis verified the existence of groups or classes in the data, i.e. it sought whether there were clouds corresponding to fuse-related disturbances (current-limiters and expulsion) and capacitors in the descriptors (variables) space. Significant descriptors were thus identified by applying MANOVA.

MANOVA's purpose was to explore how independent variables affected dependent variables' behaviour (Barker and Barker, 1984), i.e. the degree of influence regarding the event in each characteristic revealing the importance of each descriptor regarding an event's origin (limiting fuse, expulsion fuse, capacitor bank energising).

For example, current-limiting fuse operation was considered as an independent variable and the descriptors so formulated were dependent variables.

Parameter R^2 -corrected (see Table 1, third column) as a result of this analysis indicated the degree of influence of the cause of the event on each one of the exposed descriptors. R^2 values (corrected close to the unit) indicated greater relevance regarding the origin of a disturbance. Descriptors were selected which had the greatest degree of influence, those having R^2 -corrected ≥ 0.5 values.

According to this criteria, descriptors $iTSC$, ΔTP , $iRSC$ and NZC were selected as relevant descriptors for electromagnetic disturbance characterisation based on current-limiting fuses.

Table 1 presents a list of the descriptors explained in this section and their corresponding R^2 index.

Table 1. Proposed descriptors and their relevance according to a statistical analysis

Descriptor	Definition	R^2
$iTSC$	Instant triangular-shaped coefficient	0.639
ΔTP	Disturbance time delta	0.727
iPI^+	Instant overcurrent upslope	0.002
iPI^-	Instant overcurrent downslope	0.023
$\%iVF$	Instant voltage fall percentage	0.046
i_{RATIO}	Instant current ratio	0.036
I_2t	Dissipated energy	0.035
$iRSC$	Instant rectangular-shaped coefficient	0.586
$\pm FOIA$	Fuse operation insertion angle	0.123
NZC	The nearest zero-crossing	0.717
IZO	Increased zero-sequence impedance	0.100
$IZ-$	Increased negative-sequence impedance	0.046

C. Selecting the decision thresholds

Selecting decision thresholds was the search for suitable values so that descriptors could distinguish between different causes and prevent overlapping disturbance grouping according to cause. Data mining was used to obtain these thresholds, being a pattern and regularity recognition technique used with large databases.

The CN2 algorithm was used, being an automated learning

technique based on an iterative algorithm searching for IF THEN rules (Clark and Boswell, 1991). Every iteration looks for a set of descriptors covering a large number of examples in a specific class and just some from another classes so this could be used to make a reliable prediction of the class containing the covered examples.

Consequently, and in order to avoid fake data from CN2, the heuristic of Laplacian estimate of mean error was used (Peter and Robin, 1991).

Table 2 presents the selection rules obtained.

Table 2. Extracted rule set using cn2 induction algorithm

Rule	CAUSE ASSIGNATION
If $\Delta TP \leq 0.5313$ and $(1.721 < iRSC \leq 338$ or $0.402 < iTSC \leq 1)$ and $NZC > 0.047$	Cause=current-limiting fuse
If $\Delta TP > 9.918$ and $NZC \leq 0.047$ and $(iRSC \leq 0$ or $iTSC \leq -65.662)$	Cause=expulsion fuse
If $0.813 < \Delta TP < 9.918$ and $NZC > 0.047$ and $(0 < iRSC \leq 13.17$ and $-65.66 < iTSC \leq 0.402)$	Cause=capacitor bank energising

Table 2 shows that some of the obtained decision rules implied causes which were not studied by this article; such rules would have allowed the discrimination of current-limiting disturbances from other causes. Some descriptors were identified which could be useful in studying these events.

D. Methodology design

Figure 8 presents the automatic identification of electrical disturbances caused by current-limiting fuse operation. Monitoring voltage and current were the input. Selected descriptors were then calculated and the results were used to evaluate case decision.

E. Test cases and result analysis

Some results and operational details regarding the methodology are presented. Three different types of disturbance are presented: that caused by current-limiting fuse operation (simulated record), expulsion fuse operation (real record) and capacitor bank energising (simulated record).

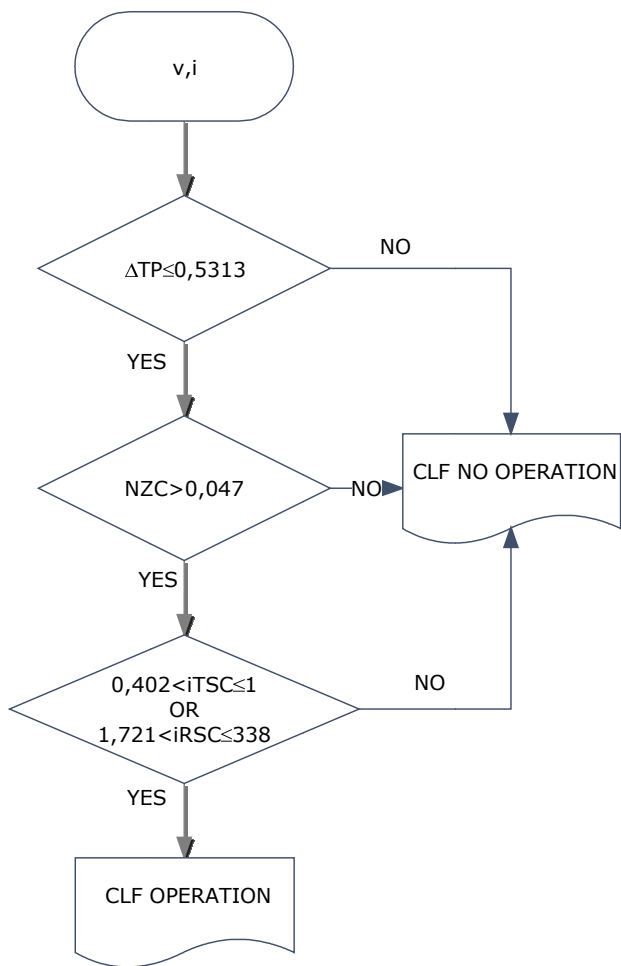


Figure 8. Framework for identifying disturbances related to current-limiting fuse operation

E.1 Current-limiting fuse operation

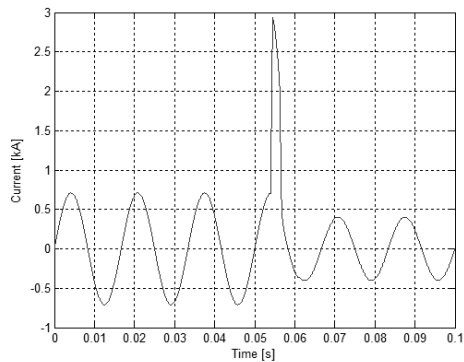
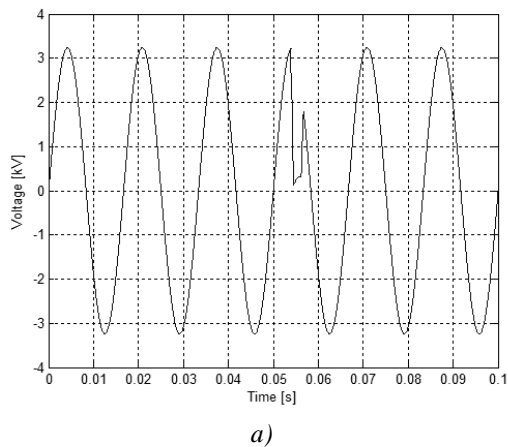


Figure 9. Disturbance caused by current-limiting fuse operation a) voltage [kV]. b) current [kA].

Table 3. Descriptors for a disturbance caused by current-limiting fuse operation

DESCRIPTOR	VALUE
ΔTP	0.1663
$iTSC$	0.9571
$iRSC$	26.9974
NZC	0.1964

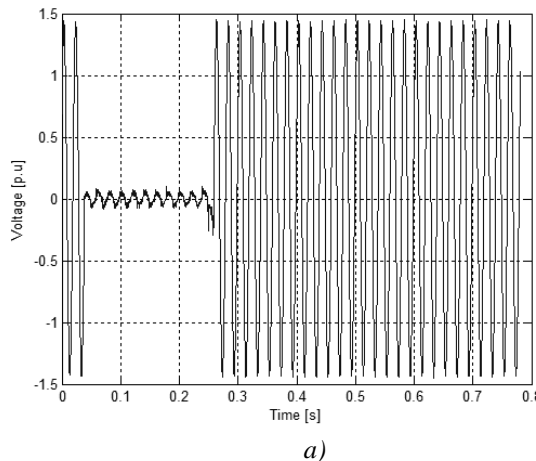
Table 3 presents descriptor values for a disturbance caused by a current-limiting fuse simulated in ATPDraw. ΔTP was less than 0.5313 and it could be considered as a possible source of a disturbance, given that $\Delta TP=0.1663$ indicated that it represented a short disturbance.

The fault clearance was different from zero regarding one instant, the overcurrent peak was triangular-shaped ($iTSC$ close to the unit) and the event was present in the voltage waveform as a rectangular-shaped notch ($iRSC$ between threshold values).

So, according to the proposed methodology, this record was classified as a disturbance caused by current-limiting fuse operation.

E.2 Expulsion fuse operation

The next record was taken from a real substation's database regarding a disturbance caused by expulsion fuse operation.



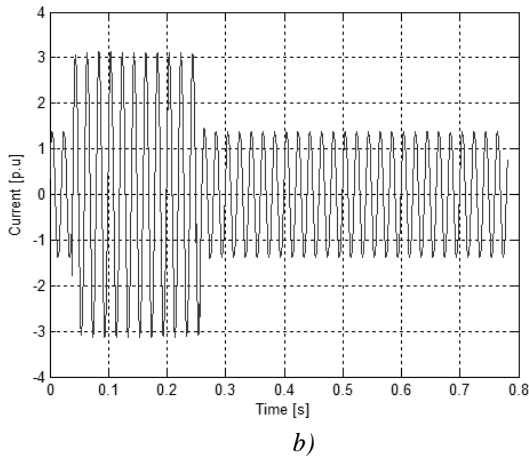


Figure 10. Disturbance caused by expulsion fuse operation
a) voltage [p.u] b) current [p.u]

Table 4. Descriptors for a disturbance caused by expulsion fuse operation

DESCRIPTOR	VALUE
ΔTP	11.0625
iTSC	-46.5032
iRSC	-0.9894
NZC	0.0781

According to Table 4, it was concluded that the disturbance was not caused by current-limiting fuse operation (Figure 8) because its duration was a semi-cycle (ΔTP way over the unit). Also, instant signal disturbance waveforms were not triangular-shaped (current) or rectangular-shaped (voltage) because iTSC and iRSC were less than zero and fault time was close to a zero-cross ($NZC \approx 0$).

E.3 Capacitor energising.

The methodology was tested by using a simulated record (Santos *et al.*, 2001) of capacitor bank energising. The methodology ruled out that the cause was a current-limiting fuse, due to the high ΔTP value (see Table 5).

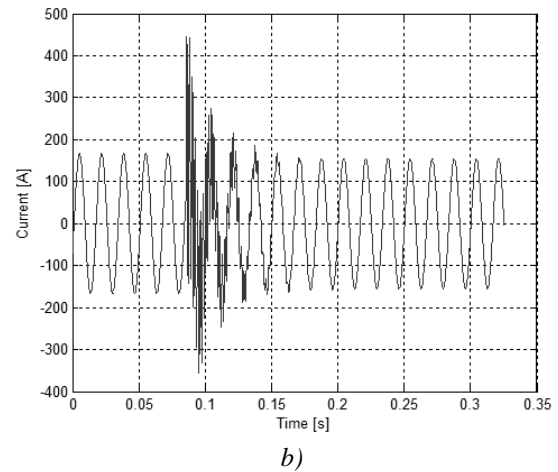
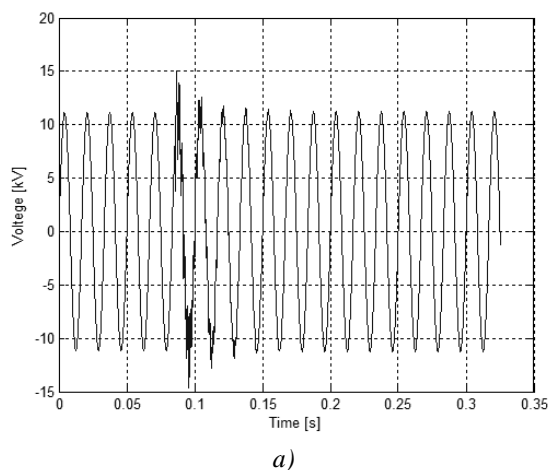


Figure 11. Capacitor bank energising a) voltage [kV].
b) current [A].

Table 5. Descriptors of a disturbance caused by capacitor bank energising

DESCRIPTOR	VALUE
ΔTP	9.3125
iTSC	-38.41782
iRSC	544.1908
NZC	0.2813

5. CONCLUSIONS

A methodology has been proposed for the automatic detection of events caused by operating current-limiting fuses. The characterisation of events caused by current-limiting fuses was based on the selection of a set of descriptors for quantifying relevant disturbance characteristics. Combining statistical tools with previous analysis of input registers led to developing descriptors which were evaluated to obtain their effectiveness. Thresholds decisions were estimated by using data mining techniques. This methodology was validated with a set of real and simulated events.

6. REFERENCES

- Allen J., Chopra S., Santoso S., Short T., "Unique Waveform Characteristics of Current Limiting Fuse Operations", IEEE Power Delivery and Energy Society General Meeting, E-ISBN 978-1-4244-8357-0, July 2010, Pages: 1-6.
- Angelopoulos N., "All About Fuses", IEEE Potentials, Vol. 10, Issue: 4, 1991, Pages: 34-36.
- Blanco J. and Jagua J., "Metodología para el Diagnóstico de la Causa de Hundimientos de Tensión: Análisis de Fallas", Degrethesis, Universidad Industrial de Santander, Colombia. 2009.
- Barker H.R. and Barker B.M. "Multivariate Analysis of Variance (Manova) a Practical Guide to its use in Scientific Decision Making". Alabama, 1984.
- Bollen, M.H.J. and Zhang L., "Characteristic of Voltage Dips (Sags) in Power System". IEEE Trans. Power Del., vol. 15, no. 2, pp. 827-832, Apr. 2000.
- Clark P. and Boswell R., "Rule induction with CN2: some recent improvements", In Y. Kodratoff, editor, Machine Learning - EWSL-91, pages 151-163, Berlin, 1991. Springer-Verlag.

- Kersting B. and Dugan, R. "Radial Test Feeders" - IEEE Distribution System Analysis Subcommittee. <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders.html>. 34-bus Feeder (XLS and DOC). Consulted 17 Sept 2010.
- Kersting, B. and Dugan R., "Radial Test Feeders" - IEEE Distribution System Analysis Subcommittee. <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders.html>. 13-bus Feeder (XLS and DOC). Consulted 17 Sept 2010.
- Kojovic A., Hassler S., "Application of Current Limiting Fuses in Distribution Systems for Improved Power Quality and Protection", IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 12 Issue: 2, April 1997, Pages: 791-800.
- Kojovic A., Hassler S., Singh H., Williams C. W., "Current-Limiting Fuses Improve Power Quality", IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 10, August 2002, Pages 281-286
- Kojovic A., Hassler S., Leix K., Williams C. W., Baker E., "Comparative Analysis of Expulsion and Current-Limiting Fuse Operation in Distribution Systems for Improved Power Quality and Protection", IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 13 Issue: 3, July 1998, Pages: 863-869.
- Santos C.J., Courvy D., Tavares M., Oleskoviccz M., "An ATP Simulation of Shunt Capacitor Switching in an Electrical Distribution System". Dept. of Electrical Engineering, University of São Paulo. 2001.
- Vega V., "Detección y Clasificación Automática de Perturbaciones que Afectan la Calidad de la Energía Eléctrica", Master thesis, Universidad Industrial de Santander, Colombia. 2007.
- Wright A. and Newbery P. "Electric Fuses". Issue: 3, ISBN: 0-86341-399-4, 2004, Pages: 33-52.
- Zhang L. and Bollen M., "A Method for Characterisation of Three-Phase Unbalanced Dips from Recorded Voltage Waveshapes". IEEE. Telecommunications Energy Conference, Chalmers of Electric of Technology, 1999.