

DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA EFICIENTE DE SIMULACIÓN AUTOMÁTICA DE FALLAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

DESIGN OF AN EFFICIENT AND AUTOMATED FAULT SIMULATION TOOL APPLIED TO ELECTRIC POWER SYSTEMS

LUCAS PÉREZ-HERNÁNDEZ

Ingeniero Electricista, Universidad Tecnológica de Pereira, Asistente de Investigación, lucasperez@utp.edu.co

SANDRA PÉREZ-LONDOÑO

Ingeniero Electricista, Universidad Tecnológica de Pereira, Docente, saperez@utp.edu.co

JUAN MORA-FLÓREZ

Ingeniero Electricista, Universidad Tecnológica de Pereira, Docente, jjmora@utp.edu.co

Recibido para revisar Abril 14 de 2009, aceptado Junio 17 de 2009, versión final Junio 22 de 2009

RESUMEN: En este artículo se propone una alternativa eficiente para la simulación automática de fallas en sistemas de potencia a partir de una estrategia cooperativa entre Matlab[®] y el ATP. Esta estrategia de simulación permite reducir el tiempo para la obtención de una base de datos de fallas, tal como lo demuestran los resultados comparativos obtenidos en el caso de cuatro sistemas diferentes, donde se obtuvieron reducciones promedio del 96% en el tiempo de simulación, con respecto al tiempo de simulación obtenido con las metodologías clásicas. Las bases de datos obtenidas a partir de las simulaciones son normalmente utilizadas para ajustar herramientas de computación suave aplicadas a la resolución de problemas, tal como el aquí referenciado y asociado a la localización de fallas en sistemas de distribución de energía eléctrica.

PALABRAS CLAVE: Computación suave, Localización de fallas, Simulación extensiva de fallas, Sistemas eléctricos de potencia.

ABSTRACT: In this paper an efficient alternative based on a cooperative strategy which uses Matlab[®] and ATP and applied in automatic fault simulation in electric power systems is presented. This simulation strategy helps to reduce the time needed to obtain a complete fault database, as it is demonstrated by the results obtained from four different power systems used in tests, where the average reduction in the simulating time is 96% from the simulation time obtained using classical strategies.

The fault databases obtained from these simulations are normally used to adjust soft computing toolboxes, applied to solve problems as the here presented and relate to the fault location in power distribution systems.

KEYWORDS: Soft computing, Fault location, Extensive fault simulation, Electric power systems

1. INTRODUCCIÓN

A partir del surgimiento de las técnicas de computación suave tales como las redes neuronales, las máquinas de soporte vectorial,

clasificadores estadísticos, entre las más importantes, se ha logrado dar solución a problemas de difícil modelamiento en diversos campos de investigación [1][2][3]. Las metodologías basadas en estas técnicas tienen

que ser ajustadas en una etapa de “entrenamiento”, en la cual se requiere de grandes bases de datos que representen el proceso a modelar. Las bases de datos normalmente se obtienen a partir de la medición continua de las variables de interés, pero dado que muchas veces no se tienen todos los posibles estados de funcionamiento, el proceso de entrenamiento se realiza utilizando bases de datos completas, obtenidas con herramientas para la simulación de muchas de las posibles situaciones que un proceso pueda experimentar. Así, la herramienta de computación suave se ajusta utilizando datos simulados y se prueba con bases de datos medidas en un sistema real [4].

De acuerdo con lo anterior, para realizar muchos de los desarrollos científicos actuales, la simulación forma parte de un conjunto de etapas dentro de un proyecto de investigación. Las simulaciones pueden ser realizadas usando software especializado, o diseñando una herramienta para tal fin, según los requerimientos específicos. En la etapa de simulación del sistema real se deben conocer todos los elementos presentes en el sistema, de tal forma que su comportamiento se describa de la manera más exacta posible [5]. Para el caso de la aplicación presentada en esta investigación, asociada al modelado de los sistemas de distribución de energía eléctrica, es necesario contar con información de la longitud del alimentador, calibre del conductor en cada tramo, cargas del sistema, tramos monofásicos y trifásicos, la configuración de la estructura de suspensión o de retención, el nivel de tensión, entre los más importantes [6].

Uno de los campos en los cuales se pueden aplicar las técnicas de computación suave a los sistemas de distribución y por lo tanto se requiere de una gran base de datos, está asociado al mejoramiento de la continuidad del suministro de energía eléctrica, mediante la oportuna localización del sitio de falla [4][7]. El mejoramiento de la continuidad del suministro de energía es importante debido a que se debe mantener un nivel de calidad del servicio o por el contrario estar sujeto a las penalizaciones impuestas a las empresas encargadas de la distribución de energía estipuladas en el marco

de la reestructuración que experimenta el sector eléctrico a nivel mundial [8].

Tal como se mencionó, se requiere de una gran base de datos de falla, para lo cual se necesita realizar una simulación automática de fallas (SAF). La SAF se ha aplicado a la solución de diferentes problemas, entre los más destacados se encuentra la localización de fallas en sistemas de distribución [4][7], y también al mejoramiento de esquemas de pruebas para algoritmos de relés [9]. Esta última aplicación es una respuesta al paradigma cliente servidor [10], y propone una forma para que investigadores u operadores de red prueben el desempeño de relés comerciales, sin que los fabricantes tengan que revelar sus modelos de *hardware* y *software* a los clientes.

Aunque la SAF reduce en gran parte el tiempo de simulación comparada con una simulación extensiva realizada de forma manual, la estructura con la que se ha desarrollado en forma clásica presenta tiempos de simulación grandes, especialmente cuando se desean realizar simulaciones en sistemas de gran tamaño. Esto se debe principalmente a la forma secuencial con que realiza las múltiples tareas [11] [12]. Por esta razón, es necesario crear nuevas estructuras con las que se optimice el tiempo de realización de tareas asociadas a simulación automática de fallas, y almacenar la información relevante de manera adecuada para que facilite su acceso de forma eficiente. Este acceso es fundamental en aquellos casos donde las empresas de distribución quieran suministrar información de señales de tensión y corriente de su sistema pero sin revelar datos confidenciales sobre topologías a los usuarios de los datos, como fabricantes de relevadores de protección, equipo de control, entre otros.

Este artículo presenta una estrategia de simulación automática de fallas que permite un ahorro significativo en tiempo, comparado con las metodologías clásicas. Como contenido del documento, en la sección 2 se presenta una breve descripción del enfoque clásico de la SAF, en la cual se explican de forma general las partes relevantes que la componen. En la sección 3 se presenta el enfoque propuesto de SAF, mientras

que en la sección 4 se presentan los resultados de las pruebas realizadas en cuatro sistemas de distribución de diferentes tamaños. Finalmente en la sección 5 se presentan las conclusiones más relevantes de la investigación.

2. ENFOQUE CLÁSICO DE LA SAF

El enfoque clásico en el desarrollo de este tipo de herramientas, consiste en las etapas de simulación vertical usadas hasta ahora por investigadores en aplicaciones de “software” para relés y para localización automática de fallas, entre otros [11][12]. Las etapas más importantes que componen las herramientas de simulación basadas en el enfoque clásico se describen a continuación:

2.1. Programas base para el desarrollo de la herramienta propuesta

La SAF puede ser realizada usando cualquier programa de simulación de eventos transitorios electromagnéticos como el EMTP, Alternative transients Program - ATP, EMTDC/PSCAD, NETOMAC, MORGAT, MICROTRAN en combinación con algún software de manejo eficiente de datos como el Matlab[®] o el Scilab. En esta investigación se propone analizar la combinación entre ATP debido a su calidad de software libre, a la excelente capacidad de cálculo y a la exactitud de los modelos empleados para la simulación, entre otros [13]. El Matlab[®], se utiliza por la eficiencia que presenta en la conversión de archivos *.pl4* a *.mat*, por la facilidad que presenta en el manejo de cadenas de caracteres, la capacidad de realizar tareas de computación paralelas y finalmente por las herramientas de análisis general de datos [14].

2.2. Modelamiento del sistema eléctrico de potencia

Con el fin de realizar la etapa de modelado de la manera más aproximada al comportamiento real del sistema es necesario conocer sus aspectos físicos y topológicos, al igual que la resistencia y

la reactancia de cada tramo, nivel de tensión y valor de las cargas, entre los más importantes. Los datos que requiere cada simulador dependen de su propósito y también de la forma como procesa la información.

Para el caso de la SAF, el modelo del sistema de potencia debe incluir la mayor cantidad de información posible, ya que los fenómenos de este tipo son sensibles a cambios en las condiciones de previas, durante y luego de la falla del sistema.

La información requerida para el enfoque clásico de SAF, aplicado a los sistemas de distribución de energía eléctrica, consta básicamente de: a) El diagrama unifilar del sistema; b) El número de fases de cada tramo (monofásico, bifásico, trifásico); c) Configuración, tipo de conductor y longitud de cada tramo; d) Características de las cargas y sus localizaciones; e) Conexión y localización de los transformadores; f) Características del sistema de potencia que alimenta al sistema de distribución a modelar (Tensión e impedancia de Thevenin); g) Tensión y frecuencia de operación y, h) Rango probable de variación de los parámetros del sistema [6].

Dentro del enfoque clásico es necesario tener en cuenta que la mayoría de empresas de energía encargadas especialmente de la distribución, cuentan con muy poca información de la mencionada anteriormente, lo cual dificulta la comparación de los modelos desarrollados frente al comportamiento real del sistema.

2.3. Generación automática de fallas

Para la simulación automática de fallas en los sistemas de distribución, se efectúan cambios en la tarjeta generada por *atpdraw* de ATP. Estos cambios se realizan por medio de un software que permita el manejo de archivos de texto y cadenas de caracteres tal como lo hace Matlab[®] para el enfoque clásico. La SAF de manera general, se realiza creando copias del sistema de distribución por medio de la “tarjeta base” generada en el código propio de ATP. Cada copia de la “tarjeta base” contiene el sistema de distribución modificado para que se simule una

falla diferente, según los requerimientos de la simulación. Las fallas generadas en el sistema de distribución y la forma estructurada de numerarlas se encuentra descrito en [11].

Durante la generación de las fallas se tiene en cuenta que el sistema puede tener tramos monofásicos donde sólo se realizan fallas de este tipo, en los tramos bifásicos sólo se pueden realizar fallas monofásicas o bifásicas, mientras que en los tramos trifásicos se pueden realizar todos los tipos de fallas. La simulación de fallas se realiza utilizando diferentes resistencias de falla, según el propósito de la base de datos. Normalmente, para fallas de cortocircuito de baja impedancia se sugiere utilizar resistencias de falla en el rango de 0 a 40Ω [15].

En la figura 1 se muestra la estructura para la simulación automática de fallas según la propuesta clásica [12]. En esta estrategia se aprecia cómo se utiliza Matlab® y ATP de manera complementaria. Las etapas más importantes se presentan brevemente a continuación:

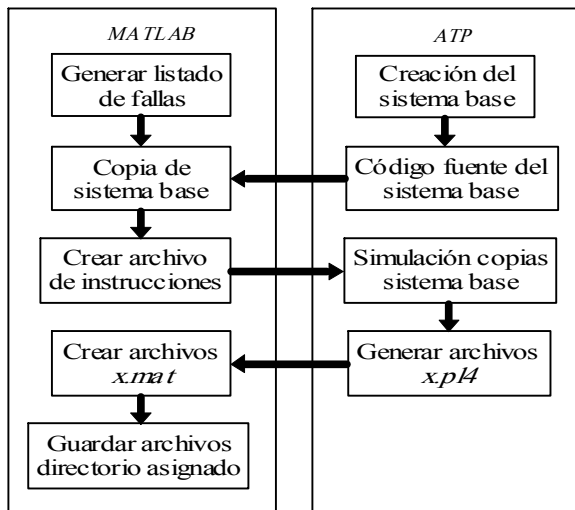


Figura 1. Estructura clásica secuencial para la simulación automática de fallas

Figure 1. Classic structure used in automatic fault simulation

2.3.1. Obtención de la lista de fallas

Para la generación del listado de fallas es necesario crear una rutina usando Matlab®, por lo cual se requiere conocer cuales de los nodos

del sistema son trifásicos, bifásicos o monofásicos y las correspondientes fases, para los últimos dos casos. Finalmente, se debe especificar los rangos en los cuales varía la resistencia de falla, con el fin de generar un archivo para cada una de las fallas simuladas.

El archivo contiene una lista con todas las fallas que se deben simular (*filelistatpfault.txt*). La sintaxis para nombrar el archivo contiene toda la información asociada, tal como el tipo de falla (*XX* con dos números de 01 a 11 para los 11 tipos de fallas), el número de la barra en falla (*YY* de 01 a 99) y el valor de la resistencia de falla (*ZZ* para 01 a 99 valores posibles). El nombre así definido se graba en una plantilla como *Falla_{XX}Bus_{YY}Rf_{ZZ}.txt*, a partir del cual se genera un archivo *Falla_{XX}Bus_{YY}Rf_{ZZ}.atp*

2.3.2. Generación de copias de la tarjeta base

En esta parte es necesario volver a llamar al archivo donde se tiene el listado de fallas (*filelistatpfault.txt*), y también un archivo *x.atp* que contiene la tarjeta del sistema de distribución que será copiado un número determinado de veces.

Los nombres de los archivos copia que salen del sistema base tienen la misma plantilla que la lista de fallas creada previamente. Este nombre va cambiando para cada nodo del sistema según el tipo de falla y la resistencia de falla.

2.3.3. Ejecución automática de los archivos copia para fallas

En la ejecución automática de los archivos copia generados en la sección anterior, se utiliza un archivo de simulación por lotes llamado *batch*, para crear nuevos archivos con extensión *x.bat* que ejecutan todas las simulaciones propuestas en los archivos copia.

Para la operación de esta rutina es necesario abrir el archivo de texto con el listado de fallas, al igual que todos los archivos copia, generados previamente. Se debe tener en cuenta que al simular un archivo *x.atp*, son generados un

conjunto de archivos asociados como $\times.lis$, $\times.dbg$, $\times.tmp$ y $\times.pl4$. En el caso de la SAF clásica, sólo se conserva el archivo $\times.pl4$ que contiene los resultados numéricos de las muestras de tensión y corriente trifásicas obtenidas de las simulaciones de los archivos $\times.atp$.

2.4. Conversión de resultados en $\times.atp$ a archivos $\times.mat$

Los resultados obtenidos de las simulaciones en el paso anterior, son los registros de tensión y de corriente medidos en la subestación para cada una de las fallas simuladas en el sistema base, bajo diferentes condiciones de falla. Con el fin de aprovechar la facilidad en la manipulación de datos que posee Matlab®, se crea una rutina que realiza la apertura de cada archivo $\times.pl4$, que convierte datos de cadena de caracteres a números y los almacena en vectores que llevan el mismo nombre de cada una de las variables (para este caso va , vb , vc , ia , ib e ic).

3. ENFOQUE PROPUESTO PARA LA SAF

El enfoque clásico de SAF que se presenta en el numeral 2, permite realizar la simulación de cada archivo $\times.atp$ de manera secuencial, al igual que la conversión de cada archivo $\times.pl4$ a $\times.mat$. Esta es una tarea con alto costo computacional en el enfoque clásico y para sistemas de potencia de gran tamaño, con lo cual la simulación automática tarda mucho tiempo si se consideran varias resistencias de falla. El enfoque propuesto para la SAF permite reducir el tiempo computacional en la ejecución de las etapas mencionadas, además de proponer una forma eficiente de identificar cada uno de los elementos del sistema de distribución, así como guardar la información relevante de forma ordenada para diferentes estudios, especialmente los de fallas. A continuación se mencionan los aspectos más importantes del enfoque propuesto.

3.1. Información requerida del sistema de potencia

Así como en el enfoque clásico de la SAF, el enfoque propuesto debe contar con un modelo

que pueda contener toda la información requerida. Como complemento a la información usada en el enfoque clásico, el nuevo enfoque cuenta con información topológica adicional de la red tal como: a) Longitud y tipo de conductor de los tramos del sistema; b) Tipo de estructuras usado en cada tramo y; c) Presencia de conductor de retorno en el sistema.

3.2. Codificación eficiente para el acceso a la información

Con el fin de acceder de forma eficiente a la información durante la SAF, es necesario plantear una estructura para designar a los nodos del sistema de forma adecuada. Para ello se propone designar los nodos trifásicos usando cuatro dígitos, de la forma $nxxx$, donde los tres últimos dígitos representan cada uno de los nodos del sistema.

Para los nodos monofásicos se designan usando cinco dígitos de la forma $nxxxf$, donde la letra f representa cada una de las fases, y para nombrar los nodos que pertenecen al conductor de neutro se propone $gxxx$ donde la letra g representa un nodo de neutro.

3.3. Conexión de los elementos falladores

Otro aspecto a considerar dentro del enfoque propuesto son los elementos falladores. A diferencia del enfoque clásico donde solo se consideraban sistemas sin presencia del conductor de neutro, el nuevo enfoque considera dos elementos falladores, uno para la simulación de fallas a tierra (11 tipos diferentes de fallas), y otro para la simulación de fallas que consideran el conductor de neutro (7 tipos de falla). La ilustración del elemento fallador genérico que permite la simulación de todo el conjunto de fallas se muestra en la figura 2.

Con el fin de incluir el elemento fallador a la SAF es necesario determinar el tipo de estudio que se desea realizar (fallas a tierra o al neutro), ya que cada simulación requiere modificación en la conexión del elemento fallador al sistema.

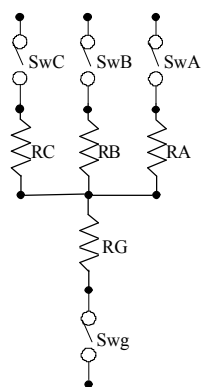


Figura 2. Elemento fallador genérico para simular cualquier tipo de falla

Figure 2. Generic element used to simulate any fault type

Con la determinación del tipo de falla a analizar y luego de definir los valores de resistencia y el instante de inserción de la falla (cierre de los elementos de conmutación), se debe ajustar el elemento fallador como se presenta en la figura 3. Por ejemplo en el caso de realizar una falla monofásica de la fase *b* a tierra, es necesario conectar el elemento de conmutación *Swg* a tierra, ajustar los valores de resistencia de la fase *b*, y de la resistencia *RG*, realizar la conexión del elemento de conmutación *SwB* al nodo donde se desea simular la falla (fase *b*) e indicar el tiempo de cerrado del elemento de conmutación de la fase correspondiente y el de tierra.

Para una falla entre dos fases sin tierra, se conectan los elementos de conmutación correspondientes a las fases donde se desea simular la falla. Luego se indica el tiempo de cerrado de sus elementos de conmutación entre fases, pero no el del elemento de conmutación de tierra, ya que éste debe permanecer abierto para evitar falla a tierra. Si se desean simular todo el conjunto de fallas a tierra, el conjunto total de fallas posibles es once (3 fallas monofásicas a tierra, 3 fallas bifásicas, 3 fallas bifásicas a tierra, 1 falla trifásica, 1 falla trifásica a tierra). Para las fallas a neutro se pueden simular igual número de fallas, pero se conectan al nodo de neutro correspondiente.

Para la simulación de fallas a neutro es necesario tener en cuenta que el elemento de conmutación

Swg debe ir conectado del nodo de neutro. Así si se desea realizar una falla en el nodo *nxxx*, se debe conectar el elemento de conmutación *Swg* al nodo *gxxx*.

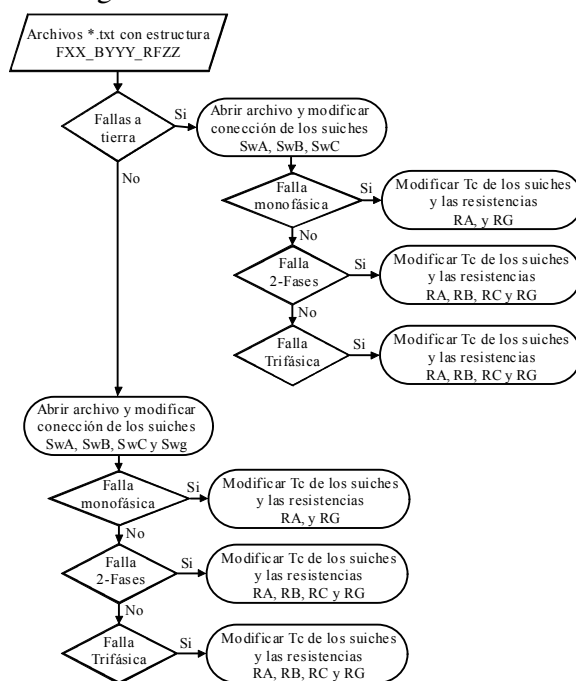


Figura 3. Conjunto de acciones necesarias para la configuración del elemento fallador

Figure 3. Actions required for adjusting the element used for faults

3.4. Simulación paralela de eventos

Con el fin de reducir el tiempo computacional en la simulación, se propone una estructura de simulación donde de forma paralela se simulan un conjunto de fallas según el tipo de falla propuesto en [11] y [12]. La estructura propuesta para simulación paralela de eventos se muestra en la figura 4.

La estrategia propuesta considera que se realizan de forma paralela *n* simulaciones. El valor de *n* seleccionado es 3, debido a que hay tres posibilidades de falla, según el numero de fases, considerando un sólo *tipo* de falla (por ejemplo, si es una falla monofásica, ésta tiene la posibilidad de ser en la fase *a*, *b* o *c*). En la figura 4 el bloque de fallas corresponde al conjunto de fallas que es posible simular de

acuerdo al valor de la variable *tipo*. Como ejemplo, el bloque 1 corresponde a fallas monofásicas tierra o a neutro, el bloque 2 fallas corresponde a fallas entre dos fases, el bloque 3 está definido por las fallas entre dos fases a tierra o a neutro, y el bloque 4 está asociado a las fallas trifásicas.

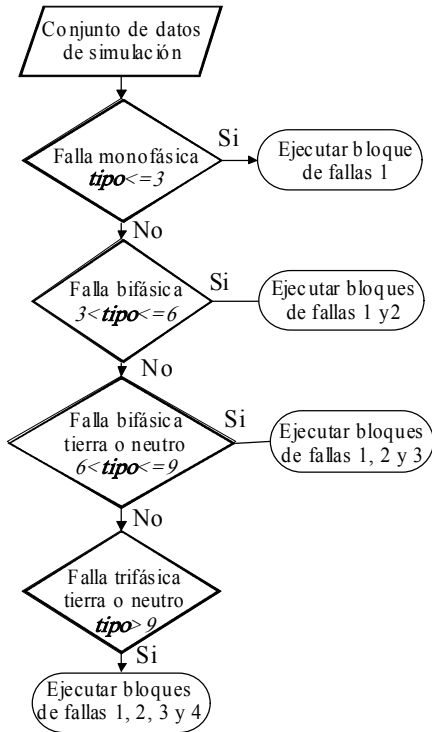


Figura 4. Estrategia de simulación paralela de fallas del enfoque propuesto

Figure 4. Proposed strategy for simulating faults

Para el caso de un sistema de distribución, si se desea simular los 11 tipos de falla diferentes (tres fallas monofásicas, una por fase; tres fallas bifásicas; tres fallas bifásicas a tierra; una trifásica y finalmente la trifásica a tierra), se simulan de forma secuencial cuatro conjuntos de fallas. Los tres primeros conjuntos contienen tres tipos de falla diferentes cada uno y el último conjunto contiene sólo dos. Si el número de simulaciones deseado es menor a tres, se tiene solo un conjunto de simulación con una o dos simulaciones de forma paralela. De forma adicional, toda la información resultante y que no es relevante para el problema de simulación de fallas se debe eliminar para reducir el espacio usado en memoria. La información relevante (archivos *x.pl4*), se guarda en la carpeta correspondiente al tipo de falla.

3.5. Conversión paralela de archivos *x.pl4* a archivos *x.mat*

Luego de tener la información de las simulaciones guardadas de forma ordenada, se deben convertir los archivos *x.pl4* a archivos *x.mat*, con el fin de tener toda la información proveniente de la SAF disponible bajo el estándar de Matlab® para realizar diferentes análisis. El proceso de conversión de archivos se realiza de forma similar a la simulación automática mostrada en el numeral 3.1, usando una herramienta llamada *pl42mat.exe* encargada de hacer la conversión de datos a *x.mat*.

Cuando todos los archivos están convertidos al estándar de datos de Matlab®, cada archivo contiene información de tensión y de corriente medidos en la subestación, además de un vector de tiempo de simulación, e información de la corriente que circula por el conductor de neutro (sólo si éste es incluido dentro de la simulación). La estructura completa del nuevo enfoque para simulación automática de fallas se presenta en la figura 5, donde se muestran las carpetas (Principal, Archivos ATP, Archivos MAT, Archivos PL4, Ejecutables ATP), que son necesarias para almacenar de forma organizada la información de la SAF.

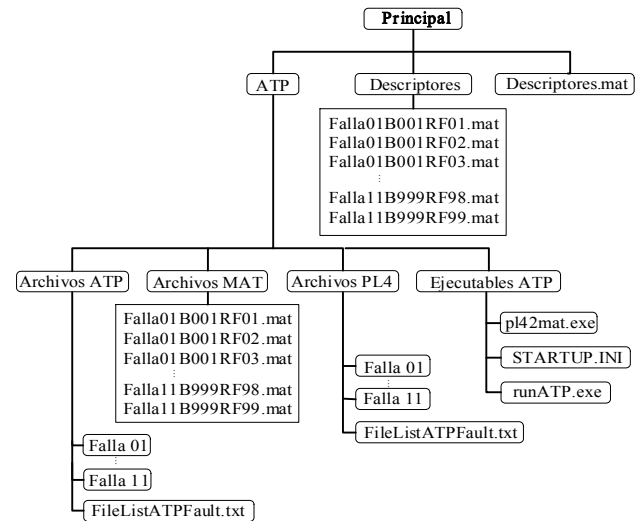


Figura 5. Estructura completa propuesta para simulación automática de fallas

Figure 5. Proposed structure for simulating faults automatically

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

Para probar la metodología propuesta se proponen cuatro sistemas de distribución de energía eléctrica de amplia difusión para estudios de fallas. Los sistemas de prueba propuestos son un sistema prototipo de 20 nodos, el sistema IEEE de 34 nodos [16], el sistema IEEE de 123 nodos [16], y un sistema de prueba real de una empresa de distribución en Colombia de 250 nodos. Cada uno de estos sistemas cumplen con características propias de las redes de distribución como cargas desbalanceadas, cargas intermedias, laterales monofásicos y trifásicos, entre las características más importantes.

Las pruebas realizadas fueron enfocadas a determinar el ahorro en tiempo computacional que ofrece la metodología propuesta en comparación al enfoque clásico, haciendo un análisis comparativo con cuatro sistemas con diferente número de nodos.

4.1. Tiempo de simulación con el enfoque clásico

Para cada uno de los sistemas simulados, el número de fallas máximo ($N_{fallas-max}$) que es posible realizar en este sistema de potencia está dado por la ecuación (1).

$$N_{fallas-max} = N_{nodos} \times N_{fallas-nodo} \times N_{Rf} \quad (1)$$

Donde N_{nodos} es el número de nodos del sistema de distribución, $N_{fallas-nodo}$ corresponde al número posible de fallas en cada uno de los nodos y N_{Rf} es el número de resistencias de falla utilizadas para la simulación.

4.1.1. Sistema de prueba de 20 nodos

Este sistema cuenta con 15 nodos trifásicos y 5 nodos monofásicos de la fase *a*. Considerando que se utilizaron 10 valores diferentes de resistencias de falla, se pueden realizar 1650 fallas en los nodos trifásicos, mientras que 50

fallas en los nodos monofásicos, para un total de 1700 fallas.

Con el enfoque clásico, la simulación de cada evento tiene un tiempo computacional de 6,03 s, y la simulación completa de los eventos tiene un tiempo computacional de 10264 s o 2,85 horas.

4.1.2. Pruebas con el sistema IEEE-34 nodos

Este sistema cuenta con un conjunto de 26 nodos trifásicos, 5 nodos monofásicos de la fase *b* y 3 de la fase *a*. Considerando que se utilizaron 10 valores de resistencia de falla, en los nodos trifásicos es posible realizar 2860 fallas, mientras que en los nodos monofásicos se tienen 240 fallas, para un total de fallas de 3100.

Bajo el enfoque clásico, la simulación de cada evento tiene un tiempo computacional de 6,58 s, y la simulación completa de los eventos tiene un tiempo computacional de 20398 s o 5,66 horas.

4.1.3. Pruebas con el sistema IEEE-123 nodos

A partir de la ecuación (1) y con 10 valores de resistencia de falla, es posible realizar 7040 fallas en los nodos trifásicos, mientras que se pueden tener 900 fallas para los nodos monofásicos, con un total de fallas de 7940 fallas.

A partir del enfoque clásico la simulación de cada evento tiene un tiempo computacional de 7,35s, y la simulación completa de los eventos tiene un tiempo computacional de 58359 s o 16,21 horas.

4.1.4. Pruebas con el sistema real de 250 nodos

Al igual que en los casos anteriores y con 10 resistencias de falla es posible realizar 7700 fallas en los nodos trifásicos, mientras que para los nodos monofásicos se pueden realizar 4290, para un total de fallas de 11900 fallas. Bajo el enfoque clásico la simulación de cada evento tiene un tiempo computacional de 9,35 s, y la simulación completa de los eventos tiene un

tiempo computacional de 112106,5 s o 31,14 horas.

4.2. Tiempo de simulación con el enfoque propuesto y comparación con el clásico

En la tabla 1 se presenta la comparación entre el tiempo de simulación usando el enfoque clásico y el de la metodología propuesta.

Tabla 1. Comparación de los tiempos de simulación en el enfoque clásico y el enfoque propuesto

Table 1. Simulating times comparison between the classic and the proposed approaches

Sistema de prueba	Tiempo de simulación [segundos]	
	Enfoque clásico	Enfoque propuesto
Sistema prototipo de 20 nodos	10264	635
IEEE 34 nodos	20398	900
IEEE 123 nodos	58359	1200
Sistema real 250 nodos	112106	2160

En la figura 6 se presenta una gráfica de tendencia lineal en escala semi-logarítmica, que permite ver los tiempos de simulación para resolver cada una de las simulaciones extensivas de falla, según en enfoque clásico y el enfoque propuesto.

A partir de la tabla 1 y la figura 6, es posible observar que los tiempos computacionales para realizar el proceso de SAF usando la metodología propuesta son muy inferiores a los de la metodología clásica. También que entre más nodos tenga el sistema el enfoque clásico presenta tiempos de simulación que crecen casi de forma aritmética. Según los resultados se

aprecian reducciones en el tiempo de simulación de 93,8%, 95,6%, 97,9% y 98,1% para los sistemas de potencia de 20 nodos, 34 nodos, 123 nodos y 250 nodos, respectivamente.

Las pruebas presentadas se realizaron utilizando un computador de escritorio PC Pentium 2,8GHz, 504MB RAM.

Los bajos tiempos de simulación obtenidos usando la metodología SAF propuesta permiten realizar simulaciones extensivas de fallas en sistemas reales que normalmente pueden tener más de 200 nodos, según el alimentador a analizar. Así, utilizando un computador relativamente básico, se pueden obtener tiempos de simulación extensiva de fallas del orden de una o dos horas, considerando sistemas de hasta 700 nodos, lo cual hace viable la aplicación en sistemas reales. Adicionalmente, aplicaciones como la aquí presentada hacen viable resolver un paradigma cliente-servidor en el que los investigadores de universidades o empresas puedan obtener datos del sistema por medio de una interfase, para probar sus algoritmos o *hardware* sin necesidad de conocer datos confidenciales de las redes de distribución donde se realicen las pruebas. Por otro lado, los operadores de la red pueden actualizar y mejorar sus modelos de simulación con el fin de que el usuario en el servidor pueda tener acceso a datos más confiables.

Finalmente, la forma propuesta para designar los nodos permite de manera eficiente a los operarios de la red acceder a información variada del sistema, facilitando la actualización de información de las redes, o la mejora en los modelos de elementos que conforman el sistema.

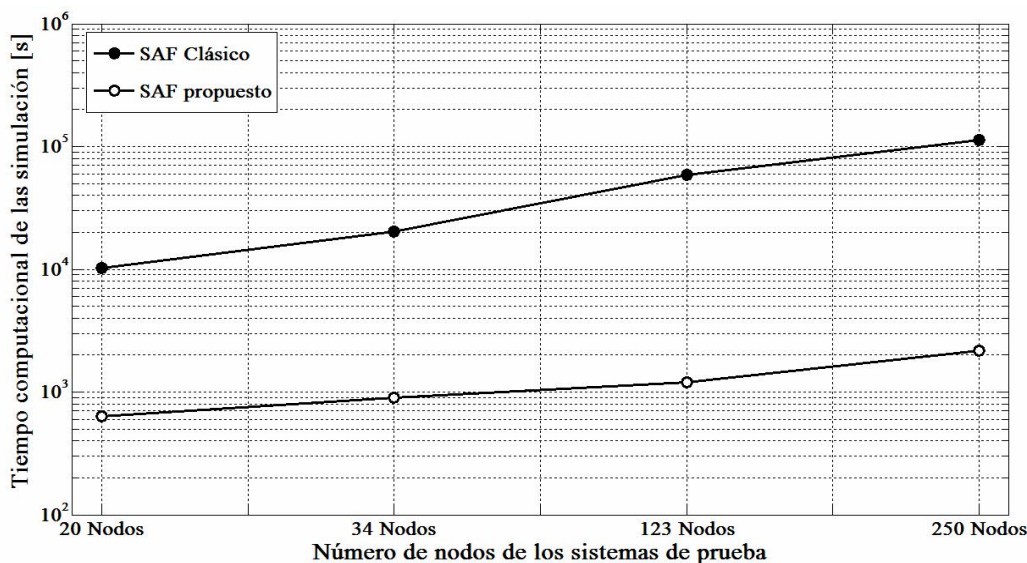


Figura 6. Comparación de los tiempos de simulación para cada sistema de potencia analizado

Figure 6. Simulating time comparison considering each one of the analyzed power systems

5. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta un enfoque de simulación automática de fallas (SAF) en paralelo y se compara con la metodología SAF basada en un enfoque clásico que realiza simulaciones de forma continua. Se muestra como el enfoque SAF clásico presenta un alto tiempo computacional especialmente para sistemas de gran tamaño, mientras que en el SAF propuesto este tiempo de simulación se disminuye de manera considerable.

Este tipo de aproximaciones permiten realizar simulaciones más eficientes, lo cual es especialmente importante en aquellos casos donde se requiere de un gran tamaño de la base de fallas, tal como es el caso de las técnicas del campo de la computación suave (Redes neuronales artificiales, máquinas de soporte vectorial, entre otras).

Las bases de datos generadas a partir de este tipo de simulaciones son utilizadas para ajustar varias herramientas asociadas a la localización de fallas en redes de distribución.

REFERENCIAS

- [1] SUNG-BAE C. Practical Applications of Soft Computing in Engineering. World Scientific Publishing Company. 440 pp. 2001.
- [2] SUZUKI Y., OVASKA S., FURUHASHI T ROY. R., DOTE Y. Soft Computing in Industrial Applications. Springer; 1 Edition. 670 pp. 26, 2000.
- [3] REUSCH B. Computational Intelligence, Theory and Applications (Advances in Soft Computing). Springer; 1 Edition. 832 pp. 19, 2006.
- [4] MORA-FLÓREZ J., MORALES-ESPAÑA G., AND PÉREZ-LONDOÑO S. Learning-based strategy for reducing the multiple estimation problem of fault zone location in radial power Systems. IET Generation, Transmission & Distribution. 2009. Vol. 3, N. 4, pp. 346-356.
- [5] SVOBODNY T. Mathematical Modeling for Industry and Engineering. Prentice-Hall. 534 pp. 1998.

- [6] GONEN T., Electrical Power Distribution System Engineering, McGraw-Hill Publisher, Second Edition. 856 pp. New York, 1986.
- [7] MORA-FLOREZ J., BARRERA-NUÑEZ V., CARRILLO-CAICEDO G. Fault Location in Power Distribution Systems Using a Learning Algorithm for Multivariable Data Analysis. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007. Vol. 22, N. 3. pp. 1715-1721.
- [8] PHILIPSON L., LEE WILLIS H. Understanding Electric Utilities and De-Regulations. CRC. 2 Edition. 520 pp. 2005.
- [9] SIDHU T., HFUDA M., SACHDEV M.. Generating relay model for protection studies. IEEE computer applications in power systems, pp. 33-38. 1998.
- [10] SIDHU T., SELVY M., DAS A. A client-server paradigm for protection studies. IEEE transactions on industry applications. pp. 303-308. 1985.
- [11] MORA-FLÓREZ J., BEDOYA-GRISALES J., MELÉNDEZ-FRIGOLA J. Extensive events database development using atp and matlab to fault location in power distribution systems. IEEE PES TyD LA. Venezuela. pp. 1-6. 2006.
- [12] MORA-FLÓREZ J., BEDOYA-CEBALLOS J., MELÉNDEZ-FRIGOLA J. Implementación de protecciones y simulación automática de eventos para localización de fallas en sistemas de distribución de energía. Ingeniería y competitividad, Vol. 8, pp. 5-14. 2006.
- [13] ATP. Alternative transient program rulebook. Comité Argentino de Usuarios del EMTP/ATP_CAUE. 2002.
- [14] MOORE H., Matlab for Engineers. The Prentice Hall Engineering Source. 2nd ed. 2008.
- [15] DAGENHART J. The 40- Ground-Fault Phenomenon. IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 36. pp 30-32. 2000.
- [16] IEEE Distribution planning working group report. Radial distribution test feeders. IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 6, N. 3, pp 975-985. 1991.