

Aplicaciones informáticas para análisis de huecos de tensión

Juan A. Martínez Velasco^{1*}, Jacinto Martín Arnedo²

¹ *Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España*

² *ITC2, L'Hospitalet de Llobregat, España*

* *Correo electrónico: martinez@ee.upc.edu*

(Recibido: Abril 24 de 2008- Aceptado: Noviembre 24 de 2008)

RESUMEN

Este artículo resume las características más importantes de las aplicaciones informáticas desarrolladas por los autores para el análisis de huecos de tensión en redes de distribución con generación convencional distribuida mediante el ATP (Alternative Transients Program), una herramienta informática originalmente desarrollada para la simulación de procesos transitorios en sistemas eléctricos de potencia. El objetivo final es determinar las características (fundamentalmente, magnitud y duración) de los huecos de tensión que se pueden originar en cualquier nudo de la red, obtener la distribución estadística de estas características y estimar los índices de calidad de servicio que caracterizan la red en estudio frente a huecos de tensión. Las prestaciones del ATP permiten reproducir con precisión el proceso transitorio asociado a la aparición de huecos de tensión. Aunque este programa no dispone de todos los modelos que son necesarios para un estudio riguroso ni para el procesamiento de los resultados que es necesario obtener para estimar índices de calidad de servicio, sí dispone de prestaciones que permiten a los usuarios desarrollar nuevos modelos e implantar procedimientos para predicción estocástica de huecos de tensión mediante el método de Monte Carlo. El artículo resume las características de la librería de módulos y procedimientos implantados en ATP, así como de las aplicaciones informáticas externas que permiten procesar los resultados obtenidos con ATP y obtener la distribución estadística de huecos de tensión en cualquier nudo de la red en estudio o índices de calidad de servicio que caracterizan un nudo o toda la red.

PALABRAS CLAVE: Distribución de energía eléctrica, Generación distribuida, Hueco de tensión, Método de Monte Carlo, Simulación, EMTP.

ABSTRACT

This paper summarizes the main characteristics of the software tools developed by the authors for voltage sag studies in distribution networks with embedded conventional generation using the ATP (Alternative Transients Program), a software package originally developed for transient simulation of power systems. The final goal is to determine the characteristics (basically, magnitude and duration) of the voltage sags that can be originated at any node of a network, obtain the statistical distribution of these characteristics and assess voltage sag indices either for a given node or for the entire distribution network. The capabilities available in ATP allow users to accurately reproduce the transients associated to voltage sags in power networks. Although ATP built-in models cannot cover all the components that are required for a rigorous voltage sag study, its capabilities can be used to develop the models and procedures that can be needed for a stochastic prediction of voltage sags based on a Monte Carlo simulation. This paper summarizes the scope of modules and procedures implemented in ATP, as well as the characteristics of the software tools developed to process the results derived from an ATP study aimed at obtaining the probability density of voltage sags characteristics at a given node or at assessing voltage sag indices.

PALABRAS CLAVE: Electric power distribution, Distributed generation, Voltage sag, Monte Carlo method, Simulation, EMTP.

1. INTRODUCCIÓN

El mejor medio para estimar la frecuencia y las características de los huecos de tensión que se originan en una red de transporte o distribución es la instalación de monitores. Sin embargo, el tiempo de monitorización necesario para que los valores estimados sean suficientemente precisos es muy largo [1]. La alternativa más realista es la simulación mediante computador.

Las características de los huecos de tensión pueden ser reproducidas de forma rigurosa mediante simulación y utilizando métodos estadísticos que permitan incorporar el carácter aleatorio de las causas que originan estos fenómenos [1] - [6]. La calidad de los resultados dependerá de la calidad de los modelos y de las predicciones estadísticas empleadas en los cálculos.

En el análisis de huecos de tensión mediante simulación es necesario tener en cuenta algunos aspectos fundamentales; por ejemplo, que los huecos de tensión son fenómenos de naturaleza aleatoria asociados a transitorios de baja y media frecuencia, o que los cortocircuitos constituyen la causa más importante de huecos de tensión en las redes de transporte y distribución.

El objetivo final de un estudio sobre huecos de tensión en una determinada red será generalmente la evaluación de índices de calidad de servicio. Las técnicas de simulación más rigurosas son aquellas que se basan en el dominio del tiempo, ya que permiten reproducir con precisión el comportamiento de un componente o sistema durante un proceso transitorio, siempre que los modelos empleados sean suficientemente precisos.

El objetivo de este artículo es el de resumir las características más importantes de las herramientas de simulación desarrolladas por los autores para el estudio de huecos de tensión en redes de distribución mediante el paquete de simulación ATP (Alternative Transients Program) [7], una de las versiones más utilizadas del EMTP (Electro-Magnetic Transients Program) [8]. El trabajo se basa en la aplicación del método de Monte Carlo y en la utilización de las prestaciones disponibles en el paquete ATP.

La evaluación estadística de huecos de tensión y la

estimación de índices de calidad de servicio requiere del empleo de varias herramientas de cálculo y procesamiento de resultados. No existe actualmente en el mercado ninguna aplicación que realice el cálculo estadístico de huecos de tensión mediante simulaciones en el dominio del tiempo y que al mismo tiempo incorpore las prestaciones necesarias para post-procesar los resultados y obtener la densidad de probabilidad de huecos de tensión en un determinado nudo de la red o los distintos índices de calidad de servicio que caracterizan la red en estudio [9] - [11].

Las prestaciones necesarias para obtener los valores mencionados (p.e., estimar los índices de calidad de servicio en una red de distribución mediante el ATP) se pueden esquematizar de la forma indicada en la Figura 1.

Las tareas realizadas para conseguir estos objetivos han sido básicamente las siguientes:

- a. Desarrollo e implantación de modelos de componentes no disponibles en el programa ATP.
- b. Desarrollo e implantación de un procedimiento para predicción estocástica de huecos de tensión mediante el ATP.
- c. Desarrollo de procedimientos para obtener las distribuciones estadísticas de los huecos de tensión y estimar el número de interrupciones que estos pueden provocar en cualquier nudo de la red, a partir de los resultados obtenidos en la tarea anterior.
- d. Desarrollo de un procedimiento para calcular los índices de calidad de servicio mediante procesa-miento de los resultados obtenidos con ATP.

Con las herramientas desarrolladas se pueden distinguir dos etapas bien diferenciadas en el estudio de una red: (1) la simulación de los procesos transitorios mediante ATP, utilizando los módulos específicamente desarrollados para el estudio de huecos de tensión; (2) el procesamiento de los resultados utilizando tanto las prestaciones disponibles en el paquete ATP como las aplicaciones desarrolladas para obtener las distribuciones estadísticas de huecos de tensión, visualizar las

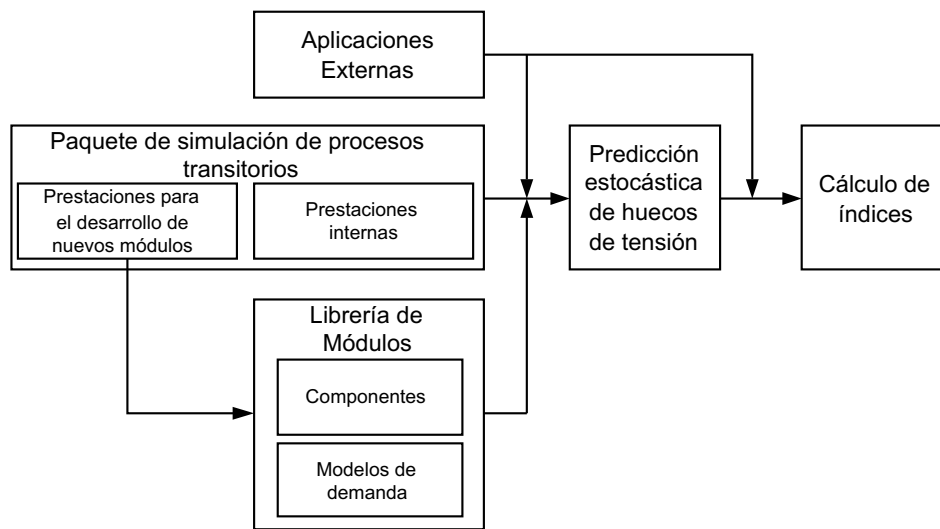


Figura 1. Tareas de cálculo y procesamiento de información en estudios de huecos de tensión.

características de los huecos de tensión resultantes frente a las curvas de aceptabilidad de los equipos sensibles, y estimar índices de calidad de servicio. El resto del artículo está dividido básicamente en dos secciones. La Sección 2 resume las prestaciones de las herramientas desarrolladas por los autores para analizar redes de distribución mediante el paquete ATP, mientras que la Sección 3 presenta tres ejemplos ilustrativos de los tipos de estudios que se pueden realizar con estas herramientas.

2. APLICACIONES INFORMÁTICAS PARA ANÁLISIS DE HUECOS DE TENSIÓN.

2.1 Simulación de procesos transitorios

Actualmente es posible utilizar varios programas tipo EMTP (EMTP-RV, ATP, EMTDC, Micro-Tran) para la simulación de procesos transitorios en sistemas eléctricos de potencia [12].

Los resultados de las simulaciones pueden ser empleados en la selección del nivel de aislamiento de los componentes del sistema en estudio, en la selección de pararrayos o en la optimización de la estrategia de control de un convertidor estático. Se ha dedicado un gran esfuerzo a la implantación de nuevos modelos y a la mejora de su precisión. Además, las ventajas del entorno Windows han

motivado el desarrollo de potentes procesadores gráficos que pueden facilitar el manejo de estas herramientas.

En la actualidad los programas tipo EMTP son paquetes basados en un pre-procesador gráfico que crea y edita el archivo de entrada, y en un post-procesador que visualiza los resultados obtenidos en la simulación y se han almacenado en el archivo de salida. A esto hay que añadir la implantación de nuevas prestaciones, por ejemplo la opción de ejecución múltiple o el enlace en tiempo real con otras herramientas, que amplían de forma significativa el campo de aplicaciones de este tipo de programas [13].

El paquete de simulación ATP es uno de los más conocidos de la familia EMTP y es utilizado en un amplio espectro de aplicaciones: simulaciones en el dominio del tiempo y de la frecuencia; análisis estadísticos y de sensibilidad; selección de componentes; desarrollo de modelos y herramientas de cálculo hechas a medida [7]. Está formado por al menos tres programas: el pre-procesador ATPDraw para creación y edición de archivos de entrada; el procesador TPBIG para simulaciones en el dominio del tiempo y de la frecuencia; y un post-procesador gráfico para visualizar los resultados [7].

El ATP dispone de varias rutinas de apoyo que pueden ser utilizadas para crear el código EMTP de componentes como líneas aéreas o transformadores. Además, permite representar los principales

componentes de un sistema de potencia y dispone de dos opciones, TACS y MODELS, para representar sistemas de control. Las prestaciones de estas dos opciones pueden ser útiles para representar también sistemas de protección o dispositivos de medida.

Actualmente es posible aprovechar las prestaciones de varios programas para diseñar un paquete de simulación a medida y destinado a una aplicación muy particular. Esto también es posible con el ATP, ya sea mediante el desarrollo de librerías, mediante el desarrollo de un sistema abierto que utilice en tiempo real las prestaciones de otros programas, por ejemplo MATLAB, o mediante el desarrollo de un nuevo paquete de simulación que incluya entre otros el ATP [7].

1.2 Simulación de huecos de tensión

El objetivo de esta parte del trabajo es disponer de una herramienta que permita representar todos los componentes que son necesarios para obtener las características de los huecos de tensión que se pueden originar en una red de distribución con generación distribuida. Los modelos disponibles en ATP no cubren todos los modelos que son necesarios para esta tarea; sin embargo, las prestaciones de ATP pueden ser empleadas en el desarrollo de módulos que sirvan para representar componentes no disponibles o para facilitar la representación de otros componentes. Así, por ejemplo, Data Base Module es una rutina auxiliar que puede ser muy útil en el desarrollo de componentes complejos. Con la opción '\$PARAMETER', los usuarios pueden ampliar el campo de aplicación de Data Base Module mediante la creación de módulos muy potentes y flexibles, que pueden facilitar sensiblemente la tarea de los usuarios. Una muestra del alcance que pueden tener estas prestaciones en estudios de calidad de servicio ha sido presentada en [14].

La Tabla I presenta una muestra representativa de los módulos desarrollados para el estudio de huecos de tensión en redes de distribución. La tabla presenta tanto el icono como la función de los módulos clasificados según el tipo de tarea que realizan. Obsérvese que los nuevos módulos permiten representar componentes no disponibles en ATP (p.e., dispositivos de protección) pero

también ejecutar un procedimiento de cálculo estadístico de huecos de tensión mediante el método de Monte Carlo, o un estudio de sensibilidad que determine la influencia de algún parámetro de la red en los huecos de tensión.

TOP (The Output Processor) es un programa desarrollado en entorno Windows que lee datos en una gran variedad de formatos y los transforma en gráficos de alta calidad [15]. Las prestaciones de este programa permiten que un usuario maneje datos de varios tipos de fuentes, visualice los datos en forma de tablas y gráficos, presente oscilogramas en varias ventanas simultáneamente, mueva, dimensione y disponga las ventanas en la pantalla, realice operaciones matemáticas con los datos leídos mediante la opción "TOPCalc", formatee las variables mostradas en una ventana según sus preferencias, o exporte los datos en pantalla en una gran variedad de formatos. Este programa puede ser empleado como post-procesador gráfico y para realizar otras tareas como el análisis armónico de Fourier.

Para el procesamiento de los resultados obtenidos con el método de Monte Carlo o mediante un estudio de sensibilidad se han desarrollado aplicaciones en EXCEL y ACCESS, que permiten visualizar los resultados de un estudio y automatizar el cálculo de índices de calidad de servicio [16].

La aplicación implantada en ACCESS permite que el usuario:

- seleccione la información que desea procesar (características de los huecos, demanda de potencia en los nudos de consumo, estadísticas de los cortocircuitos)
- escoja el tipo de resultado que desea visualizar: densidad de probabilidad de huecos de tensión, función de distribución acumulada de huecos de tensión, representación de todos los eventos frente a una curva de aceptabilidad (por defecto la curva ITIC).

Con esta aplicación se puede escoger tanto la fase como el nudo de la red en el que se quieren

averiguar los huecos de tensión originados durante el intervalo de tiempo analizado con el método de Monte Carlo. Además, también puede presentar los resultados de la potencia consumida en cualquier nudo de la red, siempre que haya sido computada durante la ejecución del estudio con ATP.

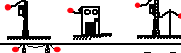
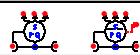
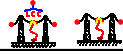
Con el objetivo de poder analizar los resultados que son necesarios para obtener índices de calidad de servicio se han desarrollado dos aplicaciones implantadas en EXCEL que permiten estimar respectivamente los índices *SARFI* y *ASIDI* [5], [9], [10]. Con estas aplicaciones el usuario puede seleccionar la tensión de referencia o la curva de referencia para el cálculo de índices *SARFI*, o puede escoger entre consultar el valor del índice para cierto nudo de interés o para toda la red. La definición y las características de los índices *SARFI* se presentan en el Anexo de este artículo. Para más información sobre estos índices ver [5], [6], [9], [10], [11], [16], [17].

3. EJEMPLOS

Los siguientes ejemplos presentan una muestra del alcance de los estudios que se pueden realizar con la librería de módulos desarrollados para ATP y de las tareas implantadas tanto en EXCEL como en ACCESS para post-procesado de datos. En concreto, los ejemplos presentan:

- la aplicación de los módulos implantados en ATP para representar dispositivos de pro-tección y demanda agregada
- la aplicación de los procedimientos desarrollados para predicción estocástica de huecos de tensión y cálculo de índices de calidad de servicio.

Tabla I – Librería de módulos para análisis de huecos de tensión

Aplicación	Módulo	Descripción
Representación de componentes de red		Equivalente de red
		Estaciones transformadoras
		Líneas aéreas y cables subterráneos
		Cortocircuitos
		Dispositivos de protección
		Modelos avanzados de demanda (dependencia de V, curva de aceptabilidad)
		Medidores de potencia activa y reactiva, y de energía
		Medidores de magnitud, duración y salto de fase de los huecos de tensión
		Registro de medidas en archivos auxiliares
Análisis estocástico		Cálculo de índices
		Generación aleatoria de cortocircuitos
		Cortocircuito en una posición aleatoria dentro de un tramo de línea aérea
		Aplicación del método de las distancias críticas a un tramo de línea aérea
		Aplicación del método de barrido de cortocircuitos
		Registro de los efectos de cada cortocircuito en un determinado nudo

3.1 Ejemplo 1: Dispositivos de protección

La Figura 2 muestra el diagrama de la red en estudio generado mediante ATPDraw, y en el que se han añadido la descripción de los principales componentes. Se trata de una red de distribución con generación local. El objetivo es estudiar los huecos de tensión que se pueden originar en la red teniendo en cuenta la influencia de la generación distribuida, el comportamiento de los dispositivos de protección tanto de la red como del generador. La Figura 3 muestra algunas de las curvas de actuación de los dispositivos de protección del generador, concretamente de los relés de tensión, mientras que la Figura 4 presenta las características de los dispositivos de protección de la línea repartidora principal (relé de sobreintensidad) y la línea lateral afectada (fusibles) en el caso que aquí se estudia. De estas características se deduce que las protecciones han sido ajustadas para que en caso de cortocircuito temporal se puedan salvar los fusibles (fuse saving).

La simulación de este caso se puede llevar a cabo directamente desde ATPDraw (ver Figura 2), desde donde también se puede acceder al programa TOP, la aplicación utilizada en este trabajo para visualizar los resultados gráficos correspondientes a una simulación en el dominio del tiempo.

En este ejemplo se ha simulado un cortocircuito trifásico franco (resistencia nula) con contacto a tierra en los terminales de media tensión del transformador de distribución que alimenta la demanda L05. La duración del cortocircuito es de 200 ms. Dada la localización del cortocircuito, los ajustes de las protecciones involucradas y la coordinación entre dispositivos de protección que pueden actuar, ver Figura 4, se puede predecir que primero actuará la característica rápida del relé de sobreintensidad instalado en el inicio de la línea repartidora, y que, dada duración del cortocircuito, actuarán los fusibles que protegen la línea lateral que alimenta la demanda L05. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5, que presenta las intensidades de corriente a través de los fusibles F_L05, que protegen la línea afectada.

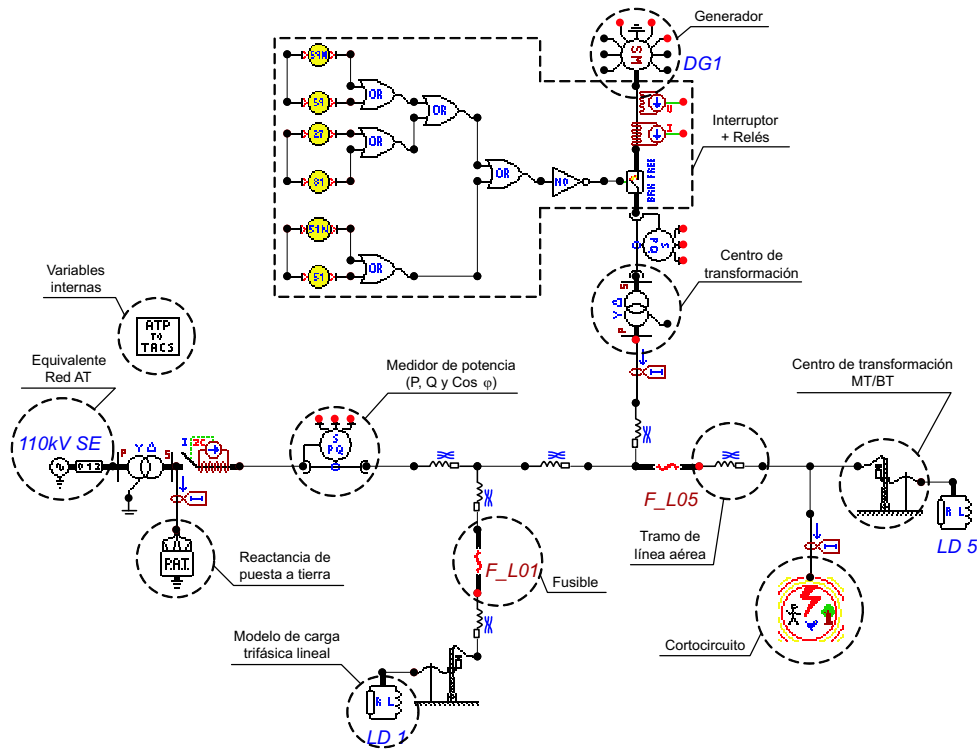


Figura 2 Ejemplo 1: Diagrama de red en estudio.

3.2 Ejemplo 2: Modelo de la demanda

El modelo de demanda utilizado en los análisis de huecos de tensión puede ser importante en la evaluación de índices basados en la energía no suministrada [5]. La librería desarrollada incluye varios modelos capaces de reproducir diferentes aspectos de la demanda, principalmente la dependencia con respecto a la tensión, el comportamiento dinámico y la sensibilidad frente a huecos de tensión mediante la incorporación de curvas de tolerancia (CBEMA, ITIC, semi-ITIC) [6], [18].

La Figura 5 muestra el diagrama generado con ATPDraw para este ejemplo. La demanda de potencia en los dos nudos de consumo es la misma, y en ambos casos está formada al 50% por una componente estática y otra componente dinámica, siendo ambas componentes dependientes de la tensión. Además, en cada nudo y para cada componente de la demanda, se ha considerado un 50% de demanda sensible a huecos de tensión, cuya tolerancia es representada mediante la curva ITIC.

La simulación de este ejemplo permite comprobar el efecto de un cortocircuito bifásico a tierra localizado en un nudo de carga sobre la demanda del otro nudo. El cortocircuito es entre las fases A y B, con una resistencia entre fases de $5\ \Omega$ y una duración de 400 ms. Las Figuras 7 y 8 muestran algunos resultados. Se puede comprobar, por ejemplo, como evoluciona la parte de la demanda de potencia activa y reactiva que depende de la tensión en el nudo localizado en el extremo de la línea sana mura la falta y como evoluciona una vez esta ha sido despejada. La simulación de este ejemplo permite comprobar el efecto de un cortocircuito bifásico a tierra localizado en un nudo de carga sobre la demanda del otro nudo. El cortocircuito es entre las fases A y B, con una resistencia entre fases de $5\ \Omega$ y una duración de 400 ms. Las Figuras 7 y 8 muestran algunos resultados. Se puede comprobar, por ejemplo, como evoluciona la parte de la demanda de potencia activa y reactiva que depende de la tensión en el nudo localizado en el extremo de la línea sana mura la falta y como evoluciona una vez esta ha sido despejada.

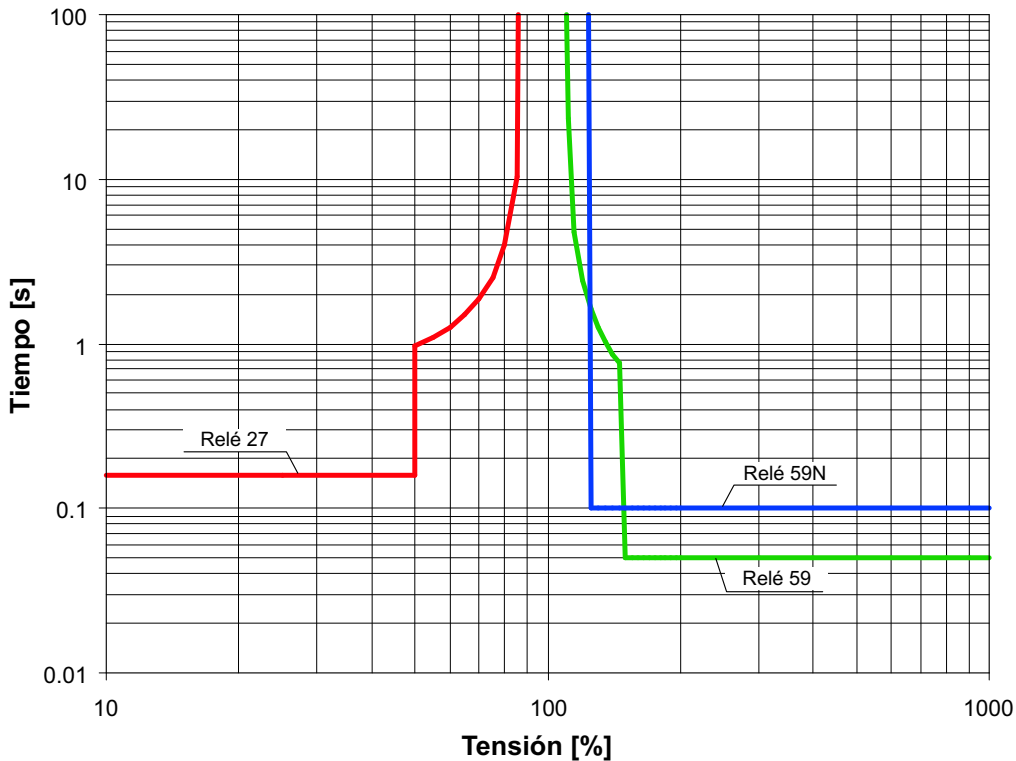


Figura 3 Ejemplo 1: Curvas de las protecciones de mínima y máxima tensión de la conexión red-generador.

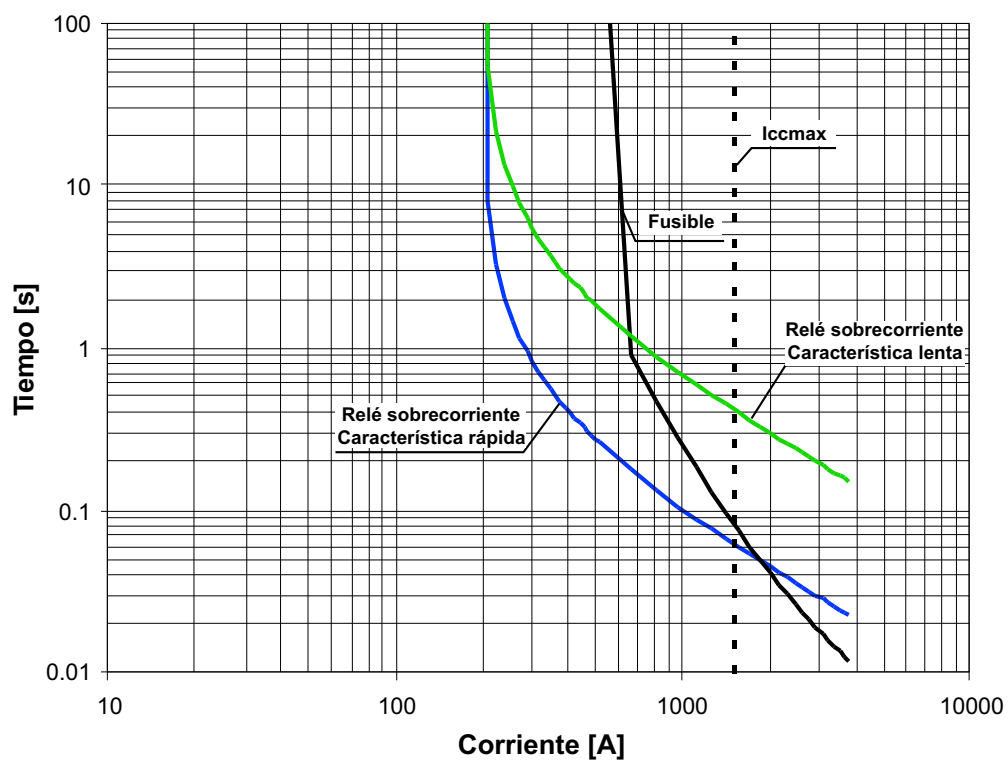


Figura 4 Ejemplo 1: Curvas de las protecciones de sobrecorriente instaladas en la línea principal (relé de sobreintensidad) y en la línea en falta (fusible).

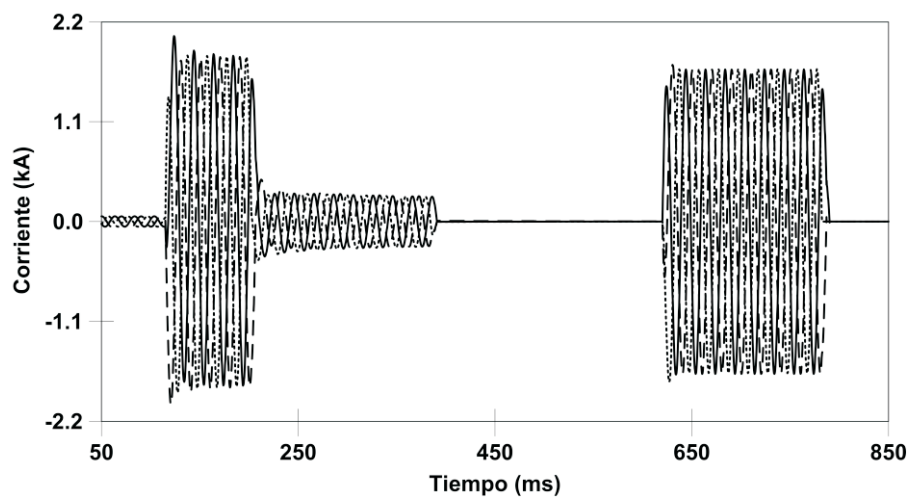


Figura 5 Ejemplo 1: Corrientes en el fusible F_L05.

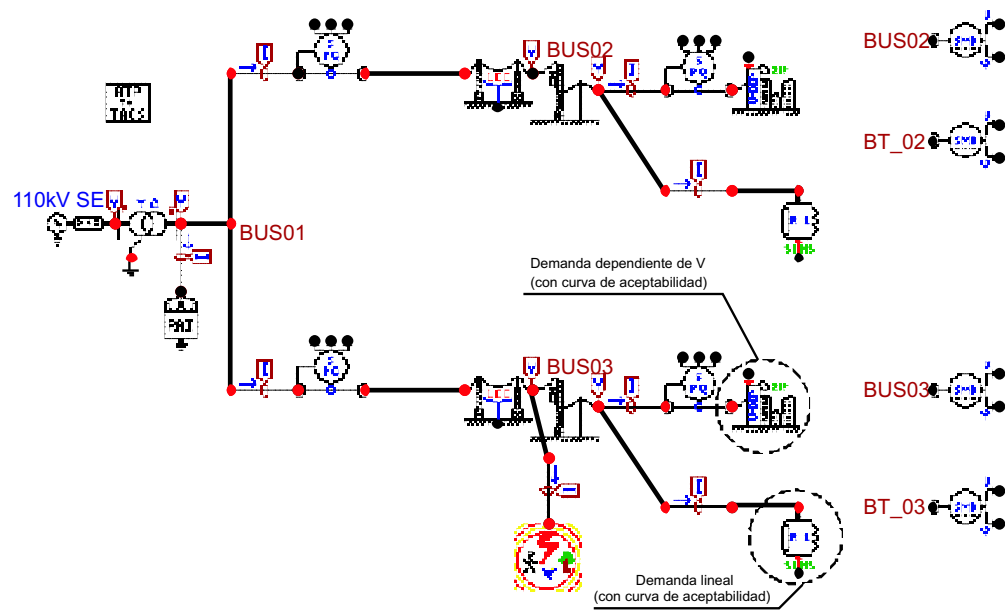


Figura 6 Ejemplo 2: Diagrama de la red en estudio.

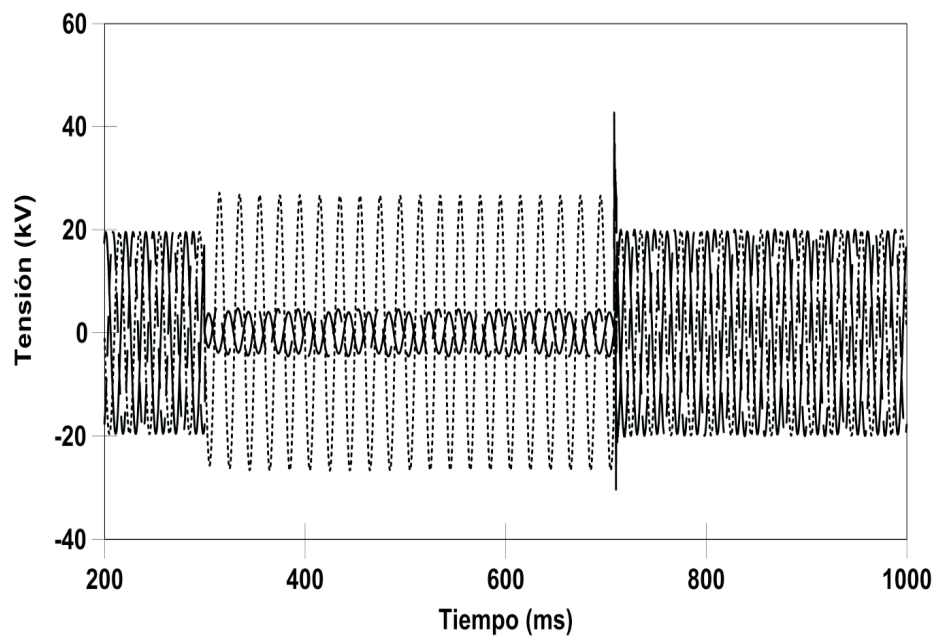


Figura 7 Ejemplo 2: Tensiones instantáneas en el nudo en cortocircuito.

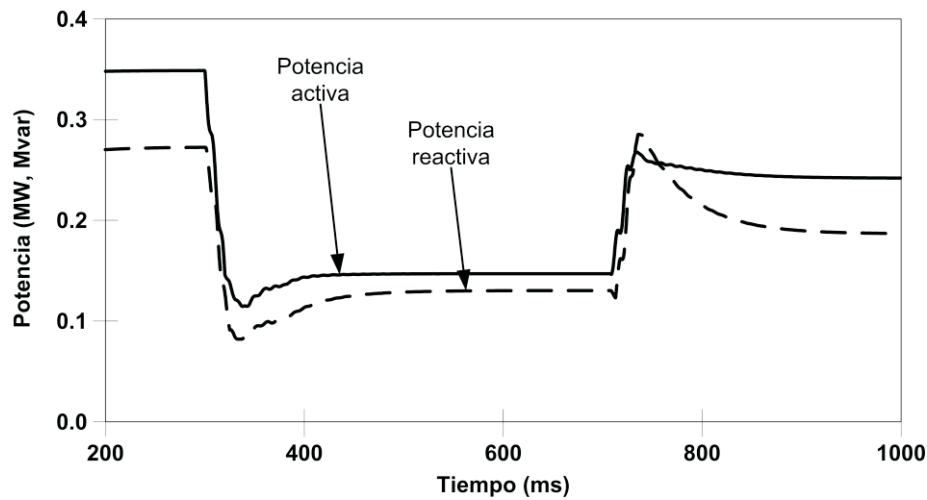


Figura 8 Ejemplo 2: Potencia activa y reactiva correspondiente a la demanda de la línea sana.

3.3 Ejemplo 3: Predicción estocástica de huecos de tensión y evaluación de índices

Los módulos presentados en los dos ejemplos anteriores fueron desarrollados para la simulación de casos concretos, es decir para analizar la respuesta de una red a un determinado evento. Con el presente ejemplo se pretende mostrar la aplicación de los módulos desarrollados para la realización de estudios estocásticos en redes de distribución mediante la aplicación del método de Monte Carlo.

La Figura 9 muestra el diagrama de la red en estudio generado con ATPDraw. Se trata de una red con dos líneas repartidoras y sin generación distribuida. Obsérvese que el icono empleado para representar los tramos de línea aérea permite que se puedan originar cortocircuitos en cada tramo, ya que el estudio se realiza suponiendo que la probabilidad de que se origine un cortocircuito es uniforme en toda la red. Las características de actuación de los dispositivos de protección instalados en la red se muestran en la Figura 10.

Los resultados obtenidos con la aplicación del método de Monte Carlo se guardan en varios

archivos de texto. En ellos se almacenan los valores correspondientes a las variables de salida escogidas por el usuario, principalmente las características de los huecos de tensión y las potencias activa y reactiva en cada nudo de consumo.

Para el análisis de estos resultados se recurre a las aplicaciones descritas en la sección anterior. Las Figuras 11 y 12 muestran la distribución de huecos de tensión en ambos lados de un mismo transformador de distribución. La Figura 11 muestra la distribución de huecos de tensión en el lado de baja tensión, mientras que la Figura 12 muestra la distribución acumulada de huecos de tensión en el lado de media tensión.

La Figura 13 muestra la severidad de los eventos ocurridos en el nudo considerado tomando la curva *ITIC* como referencia. Mediante esta opción se puede visualizar rápidamente la severidad de los huecos de tensión originados en un determinado nudo durante el intervalo de tiempo seleccionado. La aplicación permite visualizar los huecos en cada fase o en las tres fases simultáneamente, y seleccionar la curva de sensibilidad con la que se quieren comparar.

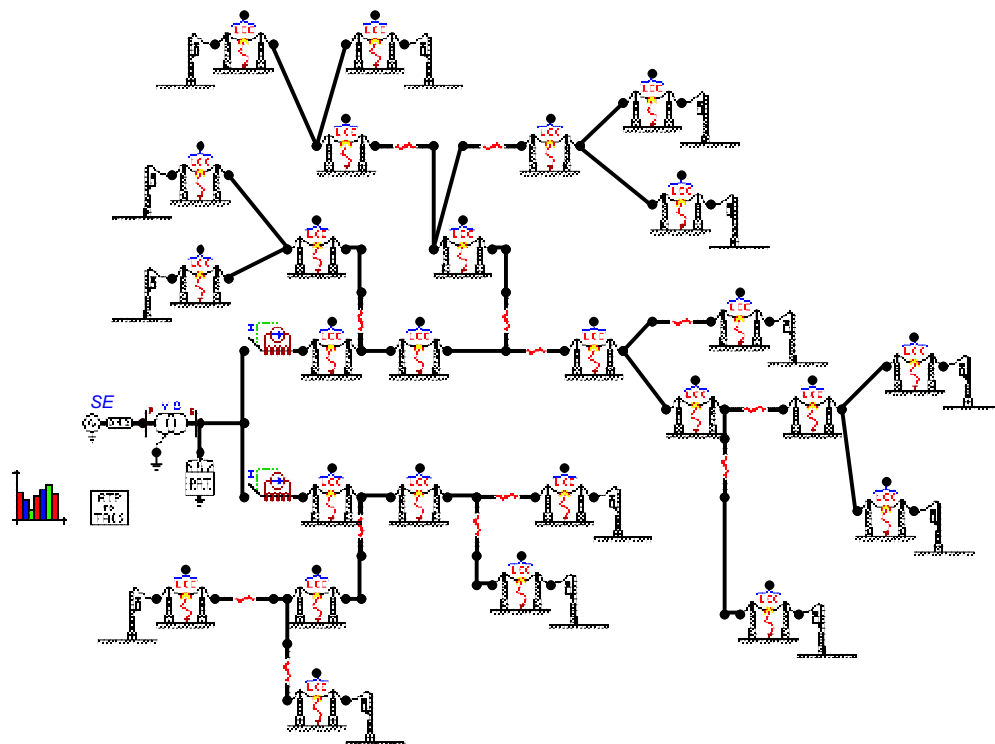


Figura 9 Ejemplo 3: Diagrama de la red en estudio.

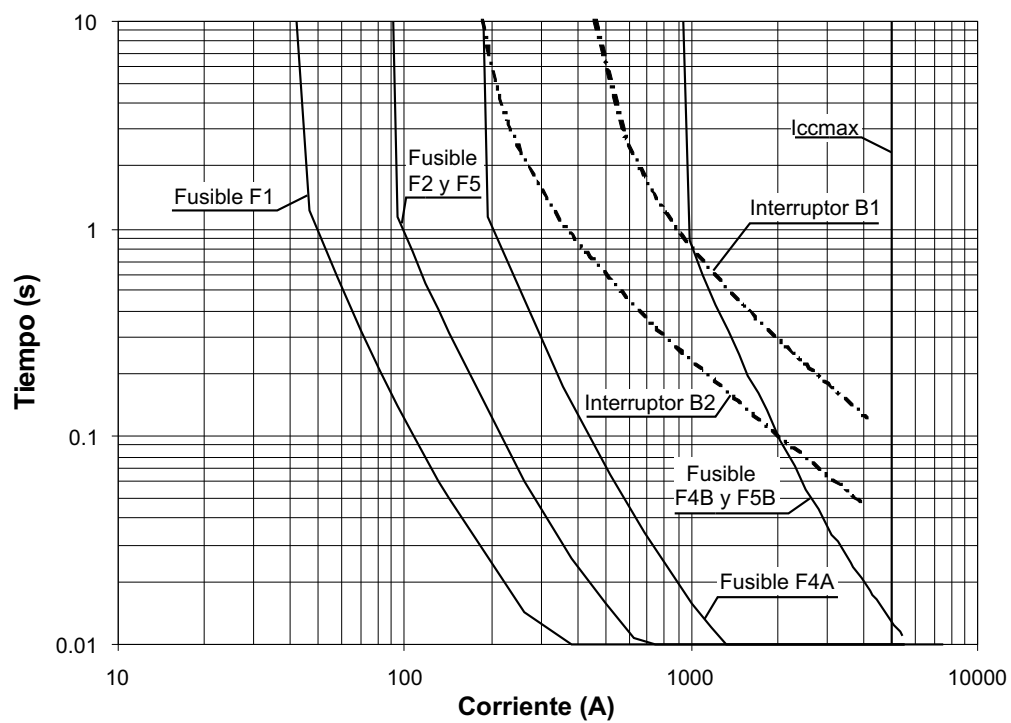


Figura 10 Ejemplo 3: Curvas de actuación de los dispositivos de protección.

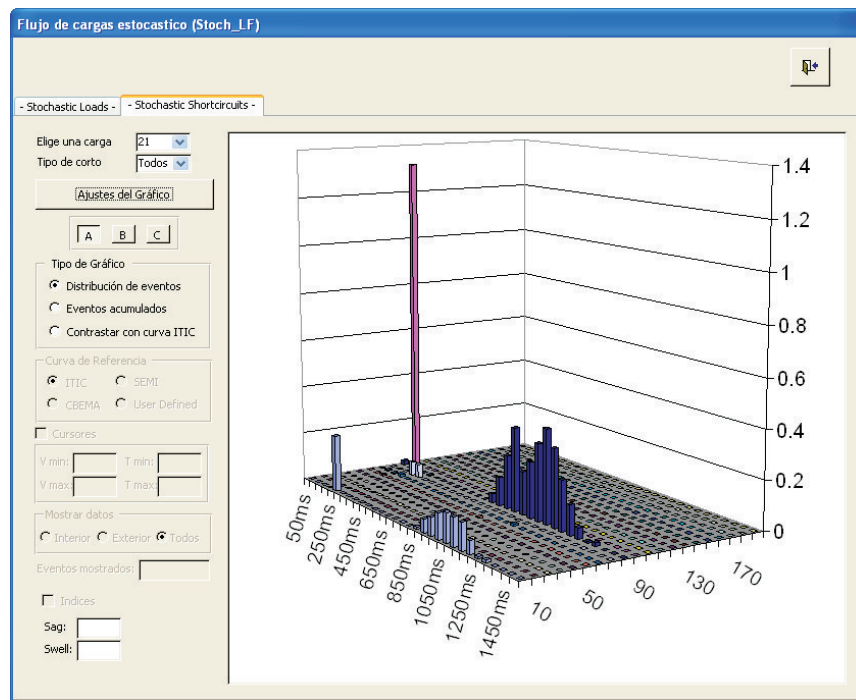


Figura 11 Ejemplo 3: Distribución estadística de huecos de tensión en el nudo 7 - lado BT.

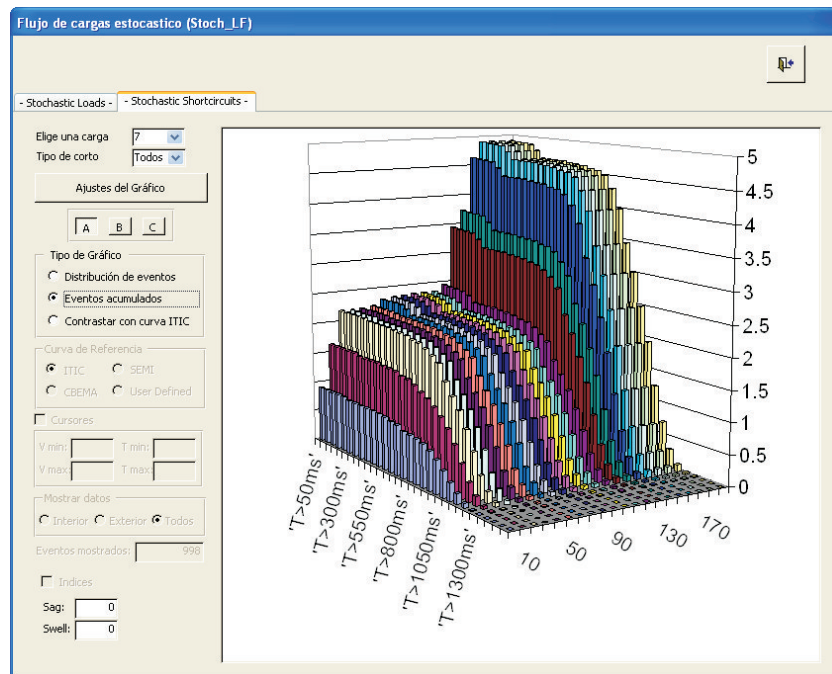


Figura 12 Ejemplo 3: Distribución acumulada de huecos de tensión en el nudo 7 - lado MT.

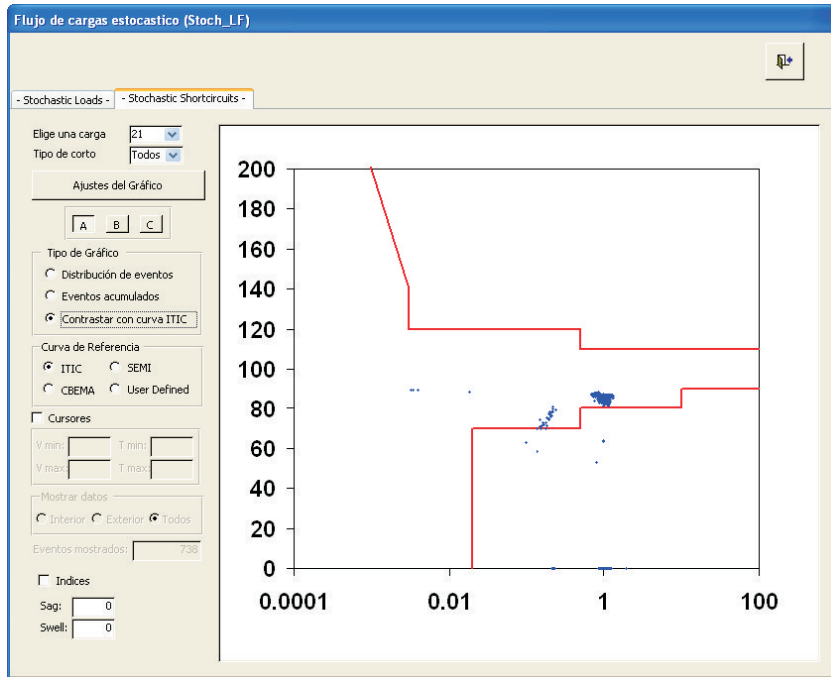


Figura 13 Ejemplo 3: Severidad de los huecos respecto a la curva ITIC en el nudo 7 - lado BT.

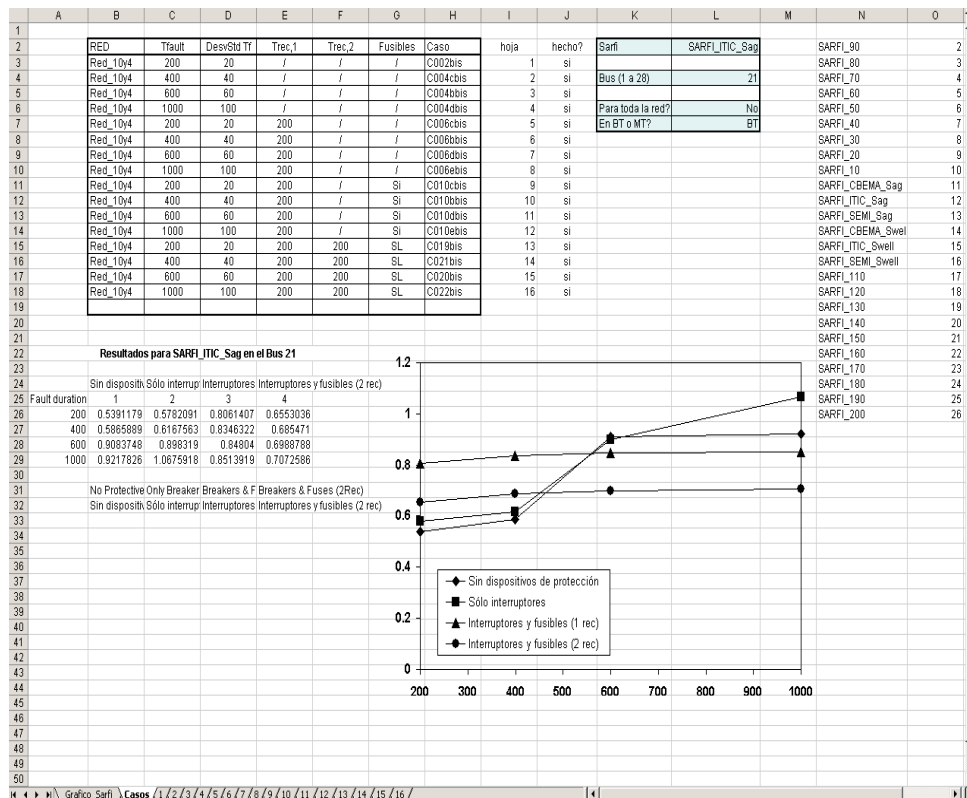


Figura 14 Ejemplo 3: Evaluación del índice SARFI en el nudo 7 - lado BT.

La Figura 14 muestra como utilizar la aplicación desarrollada en EXCEL para evaluar el número de eventos dentro de rangos de magnitud y duración determinados, y estimar los índices SARFI para un determinado nudo de la red.

4 AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado con el apoyo del Ministerio de Investigación y Ciencia, Referencia ENE2005-08568/CON. En este artículo se presenta una versión actualizada de las herramientas desarrolladas durante la realización de la tesis doctoral del segundo autor.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M.H.J. Bollen, *Understanding Power Quality Problems. Voltage Sags and Interruptions*, IEEE Press, 2000, New York.
- [2] J.A. Martinez y J. Martin-Arnedo, "Voltage sag stochastic prediction using an electromagnetic transients program", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19, no. 4, pp. 1975-1982, Octubre 2004.
- [3] J.A. Martinez y J. Martin-Arnedo, "Voltage sag studies in distribution networks. Part I: System modeling", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1670-1678, Julio 2006.
- [4] J.A. Martinez y J. Martin-Arnedo, "Voltage sag studies in distribution networks. Part II: Voltage sag assessment", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1679-1688, Julio 2006.
- [5] J.A. Martinez y J. Martin-Arnedo, "Voltage sag studies in distribution networks. Part III: Voltage sag index calculation", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1689-1697, Julio 2006.
- [6] CIGRE Task Force C4.102 (J.A. Martinez-Velasco, Convener), "Voltage Dip Evaluation and Prediction Tools", *CIGRE Brochure 372*, Febrero 2009.
- [7] J.A. Martínez Velasco y J. Martín Arnedo, "El ATP. Una herramienta para análisis y diseño de sistemas eléctricos", *Energía*, no. 175, pp. 127-134, Noviembre/Diciembre 2003.
- [8] H.W. Dommel, *Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)*, Bonneville Power Administration, Portland, 1986.
- [9] IEEE P1564, "Recommended Practice for the Establishment of Voltage Sag Indices", Draft 6, Enero 2004.
- [10] Joint WG CIGRE C4.07/CIRE, "Power Quality Indices and Objectives", Technical Brochure 261, Octubre 2004.
- [11] D.L. Brooks, R.C. Dugan, M. Wacławski y A. Sundaram, "Indices for assessing utility distribution system RMS variation performance", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 13, no. 1, pp. 254-259, Enero 1998.
- [12] J. Mahseredjian, V. Dinavahi, y J.A. Martinez, "Simulation tools for electromagnetic transients in power systems: Overview and challenges", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 22, no. 3, pp. 1657-1669, Julio 2007.
- [13] S. Filizadeh, M. Heidari, A. Mehrizi-Sani, J. Jatskevich, y J.A. Martinez, "Techniques for interfacing electromagnetic transient simulation programs with general mathematical tools", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 23, no. 4, pp. 2610-2622, Octubre 2008.
- [14] J.A. Martinez-Velasco y J. Martin-Arnedo, "EMTP modular library for power quality analysis", *IEEE Budapest Power Tech'99*, 29 Agosto - 2 Septiembre, 1999, Budapest.
- [15] T. Grebe y S. Smith, "Visualize system simulation and measurement data", *IEEE Computer Applications in Power*, vol. 12, no. 3, pp. 46-51, Julio 1999.
- [16] J. Martín Arnedo, "Predicción Estocástica de Huecos de Tensión Mediante Simulación Digital", Tesis Doctoral, Junio 2005, UPC, Barcelona.
- [17] J.A. Martinez Velasco and J. Martín Arnedo, "Predicción estocástica de huecos de tensión en redes de distribución", *Energía*, no. 191, pp. 79-86, March/April 2006.
- [18] J.A. Martinez, J. Martin-Arnedo y J.V. Milanovic, "Load modeling for voltage dip studies", *IEEE PES General Meeting*, Julio 2003, Toronto.

ANEXO

Varios índices han sido propuestos para evaluar el comportamiento de una red frente a huecos de tensión [9] - [11]. Entre los valores generalmente proporcionados por los índices se encuentran la frecuencia y la duración de los eventos, la energía no suministrada durante cada evento, o el coste y la severidad de las perturbaciones. En la referencia [10] se puede encontrar un exhaustivo análisis de índices de calidad de servicio en sistemas de potencia, incluidas sus ventajas y desventajas.

En este anexo se analiza el tipo de índices que proporcionan la frecuencia de eventos. El índice *SARFI* (*System Average RMS Variation Frequency Index*) ha sido propuesto para estimar el número medio de eventos que verá cada usuario (huecos de tensión, sobretensiones o interrupciones) durante el periodo de tiempo analizado, normalmente un año. Este índice se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$SARFI = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} N_i}{N_T} \quad (A1)$$

donde n_s representa el número de eventos, N_i es el número de usuarios que experimenta un evento y N_T es el número total de usuarios en la red.

Cuando la estimación de este índice se realiza a partir de datos obtenidos mediante simulación es necesario tener presente que si sólo se consideran defectos en la red de distribución en media tensión, todos los usuarios conectados a un nudo en baja tensión experimentarán el mismo evento simultáneamente. En tal caso el valor del índice *SARFI* para cualquier nudo se corresponde con el número de huecos de tensión que tienen lugar en el periodo simulado.

El índice es escalable, es decir se puede obtener tanto para un determinado nudo como para toda la red en estudio. La siguiente expresión proporciona el índice para toda la red:

$$SARFI = \frac{\sum_{j=1}^{n_n} N_j \cdot SARFI_{(j)}}{N_T} \quad (A2)$$

donde n_n corresponde al número de nudos de carga, N_j es el número de usuarios conectados a cada nudo j y $SARFI_{(j)}$ es el valor de este índice evaluado en el nudo j .

Se han propuesto dos tipos de índice *SARFI*: *SARFI_x* y *SARFI_{curva}*. El primero corresponde al número de huecos de tensión que se hallan fuera del límite marcado por el $x\%$ de la tensión de referencia, mientras que el segundo corresponde a los que se hallan fuera de los límites marcados por una curva de sensibilidad, es decir, en la zona no admisible.

El cálculo del índice *SARFI_x* depende del umbral de tensión x escogido, ya que el área de funcionamiento aceptable para un equipo sensible se halla delimitada por una curva inferior (huecos) y otra superior (sobretensiones). Por ejemplo, *SARFI₁₁₀* proporciona el número de eventos cuya tensión retenida es superior al 110% de la tensión de referencia, mientras que *SARFI₆₀* proporciona el número de eventos cuya tensión retenida es inferior al 60% de la tensión de referencia.