

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/314404514>

# Ferroresonancia en Sistemas de Distribución Eléctrica Rural: Análisis y Predicción

Technical Report · April 2015

CITATIONS

0

READS

1,998

1 author:



[Ignacio Lucas Avila Mangano](#)

Universidad Nacional de Mar del Plata

5 PUBLICATIONS 2 CITATIONS

SEE PROFILE

# Ferroresonancia en Sistemas de Distribución Eléctrica Rural: Análisis y Predicción

I. L. Avila Mangano<sup>1</sup>, G. F. di Mauro<sup>2</sup>, and J. A. Suárez<sup>3</sup>

**Abstract**—La ferresonancia es uno de los fenómenos transitorios más destructivos y estudiados en la historia de los sistemas de potencia. Este tipo de perturbación genera tasas anormales de armónicos, sobretensiones y sobrecorrientes que no solo degradan la calidad de la energía sino que también son en general peligrosos y pueden causar daños en el equipamiento. Este trabajo presenta el desarrollo de una herramienta computacional para el estudio de la ferresonancia desde el punto de vista de la teoría de sistemas dinámicos no lineales, por medio de simulaciones en el dominio del tiempo utilizando un programa de transitorios electromagnéticos. La herramienta desarrollada vincula ATP-EMTP, MATLAB y LabVIEW. Las simulaciones son realizadas por ATP-EMTP. MATLAB es utilizado para efectuar el pre-procesamiento de los datos de entrada, controlar la ejecución del ATP y generar los resultados. LabVIEW es utilizado como una Interfaz Gráfica de Usuario o GUI. Se presenta un ejemplo de la utilización de esta herramienta, en el cual una línea de distribución rural típica del área de influencia de la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMDP), que alimenta un transformador que cumple con los requerimientos de la normativa nacional, experimenta ferresonancia. Varios estudios fueron realizados, incluyendo análisis de sensibilidad, y se presentan los resultados más significativos.

**Palabras Clave** — Bifurcación, EMTP, ferresonancia, sistemas no lineales, calidad de la energía, transitorios en sistemas de potencia.

## I. INTRODUCCIÓN.

### A. La Ferresonancia en los Sistemas de Potencia

Ferresonancia es un término generalmente aplicado a una gran variedad de complejos fenómenos que involucran la interacción entre capacidades e inductancias no lineales. Es un tipo de perturbación que genera armónicos, sobretensiones y

sobrecorrientes que no solo degradan la calidad de la energía, sino que también pueden resultar peligrosos y causar daños en el equipamiento (transformadores, cables de potencia, descargadores de sobretensión, etc.) y en los aparatos eléctricos de los consumidores.

Los sistemas de potencia presentan varios escenarios bajo los cuales la ferresonancia puede ocurrir, ya que usualmente están compuestos por un gran número de inductancias no lineales (transformadores de potencia, transformadores de tensión, reactores), así también como de capacidades (capacidad propia de los cables o de las líneas de transmisión y distribución, bancos de capacitores serie o paralelo, capacitores de reparto en interruptores de potencia).

Generalmente el desarrollo de un circuito ferresonante se debe a la reconfiguración de una sección particular de la red ocasionada por algún tipo de evento de conmutación. Específicamente en los sistemas de distribución trifásicos, una de las formas más comunes en la que la ferresonancia es iniciada es cuando un transformador levemente cargado o en vacío, se alimenta únicamente por una o dos fases. En este caso, la inductancia resultante es la compleja combinación de las inductancias no lineales de las columnas del núcleo del transformador, y la capacidad es la correspondiente a las líneas conectadas. Esta situación se puede dar fácilmente debido a la apertura de algún fusible, la operación unipolar de reconectores o seccionadores, o en la conexión y desconexión de transformadores utilizando procedimientos de conmutación unipolares [1].

### B. La Ferresonancia en los Sistemas de Distribución Rural

El amortiguamiento juega un rol vital en la ocurrencia de la ferresonancia, ya que atenúa las corrientes y las tensiones ferresonantes. Algo de amortiguamiento está presente en la impedancia resistiva de la fuente y en las pérdidas del transformador, pero la mayor parte de ésta es la debida a la carga conectada en el secundario del mismo. Cuanto menor sea la carga del transformador, menor será el amortiguamiento del sistema y más probable será la ocurrencia de la ferresonancia. Por lo tanto, una línea altamente capacitiva y un transformador en vacío o levemente cargado, son los prerequisites para su aparición [1]-[3].

Particularmente los sistemas de distribución rural se caracterizan por la conjunción de las condiciones antes mencionadas, siendo uno de los escenarios donde la ferresonancia es más probable de suceder [4]: largas líneas que alimentan a cargas altamente estacionales o binarias, como las utilizadas con fines de irrigación, que resultan en la

Este trabajo fue financiado por la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMDP) bajo el programa de becas de investigación 2014.

<sup>1</sup>I. L. Avila Mangano, estudiante de Ingeniería Eléctrica, Ayudante de Trabajos Prácticos en las cátedras Materiales Eléctricos y Transmisión de la Energía Eléctrica. Integrante del grupo LAT (Laboratorio de Alta Tensión), Dto. Eléctrica, Facultad de Ingeniería, UNMDP. e-mail: ignacioavila@fi.mdp.edu.ar

<sup>2</sup>G. F. di Mauro, Ingeniero Electricista, Profesor Adjunto de las cátedras Transmisión de la Energía Eléctrica y Distribución de la Energía Eléctrica. Integrante del grupo LAT (Laboratorio de Alta Tensión), Dto. Eléctrica, Facultad de Ingeniería, UNMDP. Director de la Beca de Estudiante Avanzado 2014. e-mail: gdimauro@fi.mdp.edu.ar

<sup>3</sup>J. A. Suárez, Ingeniero Electricista, Profesor Titular de las cátedras Mediciones Eléctricas I e Instrumentación Avanzada. Director del grupo LAT (Laboratorio de Alta Tensión), Dto. Eléctrica, Facultad de Ingeniería, UNMDP. Co-director de la Beca de Estudiante Avanzado 2014. e-mail: jsuarez@fi.mdp.edu.ar

operación en vacío o con poca carga del transformador por largos periodos de tiempo. Como se verá más adelante, el presente trabajo está destinado al estudio de la ferresonancia en tales sistemas.

### *C. La Ferresonancia desde el punto de vista de los Sistemas No Lineales*

Pese a la gran cantidad de literatura disponible hoy en día la ferresonancia continúa siendo un fenómeno pobremente comprendido, en general no tenido en cuenta en los estudios de los sistemas de potencia, y su aparición es usualmente percibida como aleatoria. Esta impredecibilidad y falta de comprensión se debe principalmente a su complejo comportamiento no lineal, lo que hace que se la siga considerando un “fenómeno”, temido por la mayoría de los operadores de los sistemas de potencia.

Debido a las no linealidades involucradas, la aplicación de matemática lineal convencional no es del todo apropiada para el estudio de la ferresonancia. En general los ingenieros pueden manejar las no linealidades usando aproximaciones lineales en el entorno de los puntos de interés, pero esto no es posible en el caso de la ferresonancia, ya que cálculos linealizados no la advertirían.

Al ser un fenómeno no lineal, el estudio de la ferresonancia debe realizarse desde el punto de vista de los sistemas dinámicos no lineales y caóticos. En este tipo de sistemas pequeñas variaciones en los parámetros del modelo o en las condiciones iniciales pueden evolucionar a soluciones de largo plazo completamente diferentes [5], [6]. De hecho una de las principales diferencias entre la ferresonancia y la resonancia lineal es la coexistencia de varias respuestas estables de régimen permanente para un conjunto dado de parámetros de la red, siendo las condiciones iniciales (flujo remanente en el núcleo del transformador, instante de conmutación, etc.) el factor que determina qué solución final resultará [2], [3]. Debido a esta alta sensibilidad a las condiciones iniciales y a los parámetros del sistema, la ocurrencia de la ferresonancia parece ser de naturaleza aleatoria y su predicción resulta ser una tarea de gran dificultad.

Antes de 1990 la mayoría de las publicaciones dedicadas a la ferresonancia hacían prácticamente ningún uso de los métodos de la dinámica no lineal. Durante la década de los 90, hubo una “explosión” de trabajos vinculando la ferresonancia a la teoría y técnicas de la dinámica de sistemas no lineales. Kieny [7], [8] aplicó la teoría de bifurcaciones a un circuito ferresonante por primera vez. Araujo [9] identificó tres tipos de estados ferresonantes en una ecuación simplificada del fenómeno: periódico, cuasi-periódico, y caótico. También se señaló la importancia que tienen las pérdidas del transformador en la determinación del estado ferresonante final. Mork [2], [10], [11] realizó importantes contribuciones en la vinculación de la ferresonancia con la dinámica no lineal y la teoría del caos por medio de ensayos de laboratorio en transformadores reales y simulaciones en el dominio del tiempo utilizando ATP-EMTP. En [12] Mozzafari demostró que la probabilidad de la ocurrencia de un estado caótico aumenta a medida que las

pérdidas disminuyen y que la no linealidad de la magnetización del transformador aumenta. En [13]-[15] se expuso la alta sensibilidad a las condiciones iniciales y a los parámetros del sistema del estado ferresonante final, utilizando gráficos de los dominios de atracción. Bodger [16] utilizó EMTDC para simular un circuito ferresonante y obtener diagramas de bifurcaciones, mapas de Poincaré y trayectorias del plano de fase. A fines de los 90’ Ferraci [3] presentó un excelente reporte técnico introductorio a la ferresonancia desde el punto de vista de la dinámica no lineal. Jacobson proporciona una extensa revisión de la literatura ferresonante desde 1907 hasta 1999 [7] a la cual el lector es remitido para un análisis detallado.

Durante aquellos años la teoría de sistemas dinámicos no lineales demostró ser la herramienta apropiada para el estudio de la ferresonancia dando una visión más profunda del fenómeno y proporcionando técnicas adecuadas para su análisis, caracterización y control. Conceptos tales como atractores, proyecciones del plano de fase, secciones o mapas de Poincaré, diagramas de bifurcaciones y dominios de atracción, proporcionan el marco apropiado para la discusión y el estudio de la ferresonancia. Se halla fuera del objetivo de este trabajo brindar una introducción detallada de tales conceptos y técnicas. El lector que no se encuentra familiarizado con dichos términos es remitido a [5] y [6] para una amplia introducción.

### *D. Modos Ferresonantes*

La ferresonancia es normalmente clasificada en cuatro modos en base a su comportamiento en régimen permanente, es decir luego que el transitorio inicial haya acabado, ya que resulta dificultoso diferenciar el estado transitorio normal de los transitorios ferresonantes [3]. La utilización de varias herramientas derivadas de la teoría de sistemas no lineales tales como los planos de fase, las secciones de Poincaré y los espectros de frecuencia, permiten la identificación de los diferentes estados ferresonantes. Éstos son:

- 1) Modo fundamental: Las señales son periódicas con periodo igual al periodo del sistema. El espectro de la señal es discontinuo con armónicos múltiplos de la frecuencia industrial. El plano de fase muestra una trayectoria cerrada en un único bucle y la sección de Poincaré se reduce a un solo punto.
- 2) Modo sub-armónico: Las señales son periódicas con cierto periodo  $nT$  que es un múltiplo entero del periodo del sistema  $T$ . El espectro es discontinuo con armónicos múltiplos de  $f_0/n$ , donde  $f_0$  es la frecuencia industrial. El plano de fase consiste en  $n$  bucles que forman una trayectoria cerrada y la sección de Poincaré revela  $n$  puntos. Este modo se conoce como  $n$ -periódico.
- 3) Modo cuasi-periódico: Las señales no son periódicas y el espectro de frecuencia es discontinuo. La trayectoria del plano de fase nunca se cierra sobre sí misma y la sección de Poincaré revela una órbita continua cerrada.
- 4) Modo caótico: Las señales no son periódicas y los correspondientes espectros de frecuencia son

continuos. La trayectoria del plano de fase nunca se cierra sobre sí misma pero es atraída y permanece en cierta región del plano donde parece "vagar". Tal región es usualmente conocida como atractor extraño. La sección de Poincaré muestra un conjunto de puntos dentro de este atractor y exhibe características de geometría de fractales. Las soluciones para este tipo de modo, pese su aperiodicidad, no solo son deterministas sino que también acotadas.

#### *E. La Alta Sensibilidad de la Ferroresonancia a las Condiciones Iniciales y los Parámetros del Sistema: Diagramas de Bifurcaciones*

Como ya ha sido notado, los sistemas no lineales se caracterizan por una extrema sensibilidad a los parámetros de entrada: cambios considerablemente pequeños pueden resultar en soluciones de largo plazo completamente diferentes. Este hecho aplica no solo a los parámetros del sistema sino que también a las condiciones iniciales. La coexistencia de varias soluciones estables de régimen permanente para un conjunto dado de parámetros del sistema, hace que dos trayectorias que comienzan muy juntas entre sí, es decir con condiciones iniciales prácticamente iguales, puedan divergir rápidamente una de la otra, siendo imposible cualquier correlación entre las formas de onda a largo plazo.

Si un parámetro del sistema o condición inicial es variado gradualmente pueden ocurrir repentinas transiciones desde una solución estable de régimen permanente a otra. Estos cambios abruptos en la naturaleza cualitativa del estado de operación final del sistema son conocidos como bifurcaciones. En términos de la teoría de ferroresonancia una bifurcación es esencialmente un salto de un modo ferroresonante a otro.

Los diagramas de bifurcaciones son herramientas derivadas de la teoría de sistemas no lineales, que se utilizan como una alternativa a los métodos paramétricos tradicionales para comprender y analizar el comportamiento de los mismos. Consisten en la presentación en un plano de la ubicación de todas las bifurcaciones a medida que el valor de un parámetro, usualmente conocido como parámetro de control, es variado cuasi estáticamente. Específicamente, el diagrama de bifurcaciones es un gráfico de la magnitud de una variable del sistema en régimen permanente, es decir luego de la extinción del transitorio, muestreada una vez por ciclo de la frecuencia fundamental (a la misma tasa que la sección de Poincaré) versus el valor del parámetro de control. El diagrama resultante es sencillo de interpretar: áreas con un único valor indican la existencia de un modo fundamental, con dos valores de un modo 2-periodico, etc., y áreas borrosas indican ferroresonancia caótica.

Dos técnicas son utilizadas generalmente para la construcción de los diagramas de bifurcaciones. Una se basa en el principio de la continuación y la otra en simulaciones en el dominio del tiempo, conocida usualmente como el método de la fuerza bruta [3], [18]. El método de la fuerza bruta consiste en la ejecución de muchas simulaciones, seguidas de un análisis en el dominio de la frecuencia de la respuesta final en régimen permanente para determinar su magnitud y periodicidad.

La utilización de programas de transitorios electromagnéticos para la aplicación del método de la fuerza bruta permite la modelización exacta de los componentes individuales y la configuración de la red, ya que no existe la necesidad de reducir el sistema a un equivalente adecuado para su representación por expresiones analíticas. En [10] un programa de transitorios electromagnéticos fue utilizado por primera vez para generar diagramas de bifurcaciones variando lentamente el parámetro de control en una única simulación. Este procedimiento reduce el esfuerzo computacional y permite observar características de "histéresis" en la ferroresonancia dependiendo si el parámetro de control aumenta o decrece. A pesar de la menor carga de procesamiento de datos y el reducido esfuerzo computacional, esta metodología ha sido dejada de lado. En cambio, el enfoque que prevaleció [16], [17], [19]-[26] y que es utilizado en este trabajo es correr una simulación diferente para cada valor del parámetro de control. La ventaja de este procedimiento es que el evento de conmutación puede ser simulado en cada caso y por lo tanto los diferentes modos ferroresonantes iniciados por el transitorio de conmutación pueden ser detectados.

El diagrama de bifurcaciones es una herramienta valiosa ya que condensa en una única y coherente ilustración el estado de operación final del sistema a medida que el parámetro de control es modificado. Puede ser utilizado como una "hoja de ruta" para detectar los diferentes modos ferroresonantes que son probables de ocurrir e indicar las zonas de seguridad en las que el parámetro estudiado debe ser operado.

## II. ALGORITMO DE VINCULACIÓN GENERAL ENTRE ATP-EMTP Y MATLAB

### *A. Expandiendo las Capacidades Individuales a través de un Algoritmo de Vinculación.*

El ATP-EMTP es un veloz y confiable programa extensamente utilizado para simular la mayoría de los transitorios electromagnéticos en sistemas de potencia, basado en la regla de integración trapezoidal, que es una rutina robusta y numéricamente estable. Su paquete incluye varios programas de soporte, que si bien no son de simulación, están destinados a asistir al usuario en el procesamiento de los datos necesarios para efectuar las mismas. Por otro lado, MATLAB es un lenguaje de programación de alto nivel y un potente entorno interactivo de simulación, ampliamente usado para múltiples propósitos en distintas ramas de la ciencia y tecnología.

Un enlace entre ATP y MATLAB puede ser establecido antes, durante y luego de la simulación, para aprovechar las capacidades individuales de ambos y potenciarlas. De hecho varios trabajos en el pasado han explotado esta posibilidad [27]-[30].

En esta sección se desarrolla un algoritmo de vinculación general entre ATP y MATLAB basado en el trabajo realizado en [27]. El objetivo principal es utilizar ATP-EMTP para efectuar las simulaciones y aprovechar las capacidades de MATLAB para pre-procesar los datos de entrada, controlar la ejecución del ATP y post-procesar los resultados.



secciones de la red, es decir agrupar ciertos elementos de la misma, crear un módulo que los contenga y guardarlo en el disco como un archivo diferente. Cualquiera de los módulos así creados puede ser incluido en un archivo de datos de simulación tantas veces como sea necesario a través del comando \$INCLUDE, ingresando como argumento la ruta del archivo donde está almacenado el módulo [31].

A continuación se presenta un algoritmo específico para adquirir un control flexible de la generación de los archivos de datos de líneas aéreas a ser incluidos en las simulaciones. El correspondiente diagrama de flujo se presenta en la Fig. 2

En este caso el archivo de plantilla .atp describiendo la geometría de la línea debe ser específicamente creado de acuerdo a las reglas impuestas por los requerimientos de la rutina Line Constants [31]. Hasta la ejecución del ATP, el algoritmo es el mismo que el previamente presentado, difiriendo únicamente en la estructura del archivo .atp y el tipo de datos que el usuario debe ingresar. Luego de la ejecución de la rutina Line Constants, ATP genera un conjunto de archivos incluyendo el denominado "punch file" de extensión .pch, que es el de interés. Luego el algoritmo continúa como sigue:

1. MATLAB abre el archivo .pch y crea uno nuevo con extensión .dbm usando el cuerpo del primero como la representación de la red del módulo. Este nuevo archivo debe respetar las reglas definidas por la rutina Data Base Module [31].
2. El archivo .dbm es ejecutado por *tpbig.exe* que es llamado nuevamente por MATLAB.
3. Luego de la ejecución de la rutina Data Base Module, ATP genera un nuevo archivo .pch. Finalmente MATLAB lo renombra a extensión .lib.

El algoritmo finaliza con la creación de un archivo .lib obtenido de la ejecución de la rutina Data Base Module. Dicho archivo contiene toda la información referente a la línea en el formato adecuado para su implementación en un archivo de datos de simulación ingresando su ruta como argumento del comando \$INCLUDE.

En el caso particular de estudios de ejecución múltiple, el resultado es un conjunto de módulos .lib que deberán ser incluidos en un archivo de datos de simulación. Esta inclusión puede hacerse automáticamente a través el primer algoritmo presentado, utilizando la ruta del archivo .lib ingresada en el comando \$INCLUDE como el parámetro variable.

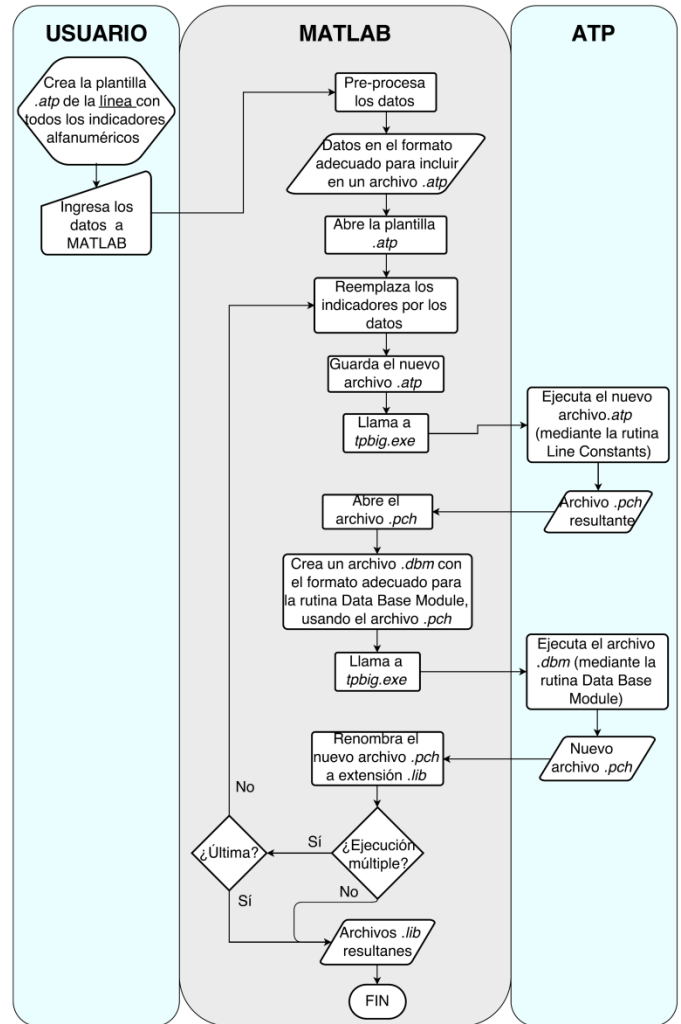


Fig. 2. Diagrama de flujo del algoritmo de vinculación entre ATP y MATLAB para la creación de archivos de línea .lib.

### III. HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL ESTUDIO DE LA FERRORESONANCIA

#### A. Estructura Básica del Programa

En la sección precedente se presentaron dos algoritmos de vinculación general entre ATP y MATLAB. En esta sección dichos algoritmos serán utilizados para el diseño de una herramienta computacional destinada al estudio de la ferroresonancia en sistemas trifásicos de distribución rural, desde el punto de vista de la dinámica no lineal y a través de simulaciones en el dominio del tiempo realizadas por ATP.

La herramienta presentada vincula ATP-EMTP, MATLAB y LabVIEW. Las simulaciones son llevadas a cabo por ATP. MATLAB se encarga de pre-procesar los datos de entrada, controlar la ejecución del ATP y generar los resultados. LabVIEW es utilizado como una interfaz gráfica de usuario (GUI), se comunica con MATLAB a través del MATLAB Script, permite el ingreso de datos y muestra los resultados. Solo el panel frontal de LabVIEW es visible al usuario, mientras que todo el proceso de simulación y manipulación de datos ocurre en segundo plano.

Esta herramienta ha sido específicamente desarrollada para

el análisis de la ocurrencia de ferresonancia luego de un evento de conmutación en una línea radial trifásica que alimenta un único transformador de distribución. Los usuarios pueden modificar cualquier parámetro, realizar estudios de simulación única o múltiple y guardar los resultados. Además pueden generar archivos de líneas y transformadores para utilizar en sus simulaciones y almacenarlos en una librería para futuros usos.

Pese a que la configuración analizada es sencilla (un único transformador alimentado por una línea de distribución), la metodología propuesta y las herramientas desarrolladas pueden ser adaptadas fácilmente a casos más complejos mediante la simple modificación del archivo plantilla utilizado.

El panel frontal de LabVIEW consiste en un "Tab Control" que contiene tres pestañas principales: 1) Generación de Línea; 2) Simulación; y 3) Resultados. De acuerdo a la pestaña seleccionada el usuario dispone de diferentes controles e indicadores que sirven de comunicación con el programa.

### B. Pestaña de Generación de Líneas

La pestaña de generación de líneas ha sido desarrollada específicamente para crear archivos de datos de líneas aéreas utilizando el algoritmo presentado en la Fig. 2. Estos archivos son los que posteriormente serán requeridos en la pestaña de simulación.

El archivo de plantilla .atp con el formato adecuado para su ejecución por la rutina Line Constant y con los correspondientes indicadores alfanuméricos ha sido previamente creado.

El usuario debe ingresar la longitud y altura de la línea, la resistencia y diámetro de los conductores, la resistividad del terreno, la frecuencia a la cual computar los parámetros dependientes de la frecuencia, y seleccionar una cruceta normalizada [32] o ingresar la geometría de una definida por él. Si el usuario desea realizar un estudio de sensibilidad también deberá ingresar el número de simulaciones y la cota inferior y superior del parámetro variable. En este caso el programa asume una variación lineal entre dichas cotas.

Una vez que el usuario cargó todos los datos de entrada y da lugar al comienzo de la ejecución, LabVIEW procesa tales datos y los envía al entorno de trabajo de MATLAB (*workspace*), donde el algoritmo de enlace entre ATP y MATLAB para la generación de archivos .lib, indicado en la Fig. 2, es iniciado y llevado a cabo por un conjunto de funciones y scripts de MATLAB.

El proceso finaliza con la creación de un único o un conjunto de archivos .lib que contienen toda la información de la línea en el formato adecuado para su implementación en un archivo de datos de simulación. Estos módulos se almacenan en una carpeta previamente seleccionada por el usuario y de esta manera éste puede crear fácilmente una librería de líneas de acuerdo a sus necesidades.

Luego, cuando el usuario selecciona la línea de distribución en la pestaña de simulación, éste debe hacerlo indicando la ruta al archivo .lib creado por este proceso.

### C. Pestaña de Simulación.

La pestaña de simulación ha sido específicamente desarrollada para otorgar al usuario un control flexible de la ejecución del ATP utilizando el algoritmo descripto en la Fig. 1.

Como ya se ha mencionado, el caso de ferresonancia analizado consiste en la conmutación de una línea de distribución que alimenta un único transformador trifásico de distribución. El archivo .atp a ser utilizado como plantilla ha sido creado de acuerdo a tal escenario. El mismo incluye un equivalente de red, un interruptor controlado en el tiempo, una línea aérea trifásica y un transformador de distribución con su correspondiente carga, como puede observarse en la Fig. 3.



Fig. 3. Topología de la red implementada en archivo plantilla .atp.

La topología indicada en la Fig. 3 es característica de los sistemas de distribución tipo rural, ya que en éstos es común encontrar transformadores ubicados al final de largas líneas derivación que abastecen a un pequeño grupo de usuarios o inclusive a un único consumidor. En estas redes no es extraño que se dé la situación en la que el transformador se encuentre con poca carga o en vacío durante largos periodos de tiempo. Como ya se ha indicado tal contexto es extremadamente propicio para la ocurrencia de la ferresonancia.

Volviendo sobre el uso de la herramienta en sí, el usuario debe ingresar al panel frontal los datos básicos de configuración (número de simulaciones, paso, tiempo total de simulación) y todos los parámetros del sistema (tiempos de conmutación, carga del transformador, impedancias del equivalente de red, etc.). También debe seleccionar la línea y el transformador a incluir en la simulación desde una biblioteca previamente creada, definir el tipo de estudio (simulación simple o múltiple) y comenzar con la ejecución.

En el caso de estudios de sensibilidad realizados sobre cualquier parámetro que no sea la línea de distribución, la cota inferior y superior del parámetro variable deben ser otorgadas y, de la misma manera que en la pestaña de construcción de líneas, el programa asume una variación lineal entre éstas. Si se desea realizar un estudio de sensibilidad sobre un parámetro de la línea, el usuario debe seleccionar la ruta a la carpeta donde el conjunto de archivos .lib con el parámetro variable fue previamente creado.

Como ocurre en la pestaña de generación de líneas, luego de un procesamiento preliminar, LabVIEW envía al entorno de trabajo de MATLAB los datos necesarios y llama varias funciones y scripts que inician el algoritmo de enlace indicado en la Fig. 1. Durante este periodo de tiempo el control de la ejecución recae sobre MATLAB y ATP, y el usuario solo debe esperar hasta que el proceso de simulación finalice. El tiempo consumido en esta etapa depende principalmente de las capacidades de procesamiento de la computadora utilizada y los datos de configuración seleccionados como el tiempo total de simulación, el paso temporal y el número de simulaciones.

Una vez que el proceso se ha completado el control de la ejecución retorna a LabVIEW y consecuentemente al usuario.

#### D. Pestaña de Resultados.

Finalmente ingresando a la pestaña de resultados el usuario puede seleccionar entre varios gráficos típicamente utilizados para estudiar la ferresonancia desde el punto de vista de los sistemas no lineales. Se puede elegir graficar formas de onda, espectros de frecuencia, trayectorias del plano de fase, mapas de Poincaré y diagramas de bifurcaciones. En forma similar al funcionamiento de las otras pestañas, el usuario ingresa las características del gráfico deseado que luego son enviadas al entorno de trabajo de MATLAB, éste realiza el procesamiento y grafica los resultados en una ventana emergente.

La pestaña de resultados tiene la posibilidad de manejar simulaciones realizadas previamente a través de un control que permite al usuario cargar proyectos guardados con anterioridad.

#### E. La Modelización de los Componentes de la Red.

En la simulación de transitorios electromagnéticos la selección de los modelos de los componentes y la determinación de la zona del sistema a ser representada deben realizarse considerando el contenido frecuencial del transitorio estudiado. En el caso de la ferresonancia tal contenido varía desde 1 Hz hasta 1 kHz [33], [34], y de acuerdo a la clasificación más aceptada [35] este rango cae dentro de la categoría de las denominadas oscilaciones de baja frecuencia. En los últimos años varios documentos han sido desarrollados y se pueden utilizar como directrices para la modelización de la ferresonancia [35]-[37]. A continuación se presenta un análisis detallado de los modelos seleccionados para representar cada componente de la red.

1) *El Área Estudiada y el Equivalente de Red:* Al simular ferresonancia los principales componentes que deben ser modelados en detalle son la línea de transmisión o distribución y el transformador. De acuerdo a [1] y [34] partes de la red aguas arriba del interruptor pueden ser modeladas mediante un equivalente de red compuesto por una fuente ideal de tensión acompañada con su impedancia equivalente de Thevenin de régimen permanente. En este trabajo se opta por utilizar un elemento RL mutuamente acoplado, como es sugerido por [36]. La ventaja de este tipo de representación es que los datos de entrada requeridos son las correspondientes impedancias de secuencia positiva y negativa ( $R_0$ ,  $X_0$ ,  $R_1$ ,  $X_1$ ) [31]. Este hecho permite modelar las características de puesta a tierra de la red, que son de importancia ya que la ferresonancia usualmente incluye modos de propagación por tierra.

2) *Interruptor Controlado:* El evento de conmutación es realizado por tres interruptores independientes controlados por tiempo. El usuario debe definir qué fases van a conmutar y los correspondientes tiempos de actuación.

3) *Línea de Distribución:* En [1] se sugiere utilizar un equivalente PI acoplado para representar líneas al simular ferresonancia. La evaluación realizada en [38] muestra que una línea de transmisión basada en una representación tipo PI es lo suficientemente precisa para este fin. Por lo tanto, en este trabajo, la línea de distribución es representada por el modelo

PI nominal [49]. Así cuando el usuario crea el módulo de una línea a través de la pestaña de creación de líneas el modelo PI nominal es automáticamente utilizado.

4) *Transformador de Distribución:* Un modelo del transformador topológicamente correcto es utilizado [33], [39]. Este tipo de modelos son derivados utilizando el principio de la dualidad [40], [41] y resultan en representaciones que incluyen los efectos de saturación en cada rama individual del núcleo, el acoplamiento magnético entre fases y los efectos de dispersión.

Específicamente se utiliza el modelo "híbrido" del transformador implementado en ATPDraw [42]-[47]. Desafortunadamente el programa requerido para generar el modelo híbrido del transformador en el adecuado formato .atp, a partir de los datos del mismo, se encuentra embebido en ATPDraw. Para superar este problema una librería de transformadores de distribución típicos de acuerdo a la normativa local [48] ha sido desarrollada y se encuentra disponible al usuario en la forma archivos .txt. Si el usuario desea utilizar un transformador diferente a aquellos incluidos en la librería otorgada puede ingresar los datos de éste directamente en ATPDraw, construir el archivo .atp y copiar la parte del texto concerniente al modelo del transformador en un nuevo archivo .txt ubicado en la librería. De esta forma el usuario puede crear una galería propia y utilizar el programa no solo para los transformadores disponibles sino para cualquiera que pueda requerir.

4) *Carga del Transformador:* Una carga trifásica simétrica se conecta al secundario del transformador. Ésta se representa por tres ramas RL en paralelo y en conexión estrella aterrizada [36]. El usuario debe ingresar únicamente el factor de potencia de la carga y su consumo como un porcentaje de la potencia nominal del transformador.

### IV. DESARROLLO DE UNA LIBRERÍA DE TRANSFORMADORES

#### A. Motivación

Con el objetivo de desarrollar una herramienta para el estudio, caracterización y predicción de la ferresonancia ha surgido la necesidad de crear una galería modular de transformadores. Como es sabido, en la simulación de transitorios electromagnéticos, la determinación o estimación de los parámetros de los elementos de la red resulta ser la tarea más difícil y demandante [33], [37]. En el caso particular de la ferresonancia, esta labor es aún más exigente debido a la gran sensibilidad de la misma con los parámetros del sistema. Específicamente el modelo del transformador utilizado y sus características repercuten enormemente en los resultados obtenidos, ya que el origen de la ferresonancia es justamente la naturaleza no lineal éste.

El estudio de los modelos de los transformadores, su implementación en los programas de simulación y la determinación de los parámetros en base a los resultados de ensayos normalizados es una materia que continua en discusión y constante cambio [39], [46].

En los últimos años han surgido modelos de transformadores topológicamente correctos basados en el principio de la dualidad entre circuitos magnéticos y

eléctricos. Si bien este principio es conocido desde hace más de medio siglo [40], recién en la última década se ha extendido su uso y ha llegado a los paquetes de simulación tradicionales [44]. Las grandes cualidades de estos modelos los hacen los más adecuados para la simulación de transitorios de baja frecuencia, sobre todo para aquellos en que ocurre un desequilibrio de fases, como es el caso de la ferresonancia. En contrapartida a las prestaciones que ofrece aparece la dificultad de determinar exactamente sus parámetros en base a los datos normalmente disponibles, como son los resultados de los ensayos normalizados. Sin duda las investigaciones futuras deben ir en el sentido de validar y mejorar estos modelos, haciéndolos más precisos y fáciles de utilizar, principalmente en lo que respecta a la estimación de los parámetros.

En la presente sección se presenta el desarrollo de una librería de transformadores, acorde a las normativas locales, a los efectos de facilitar la simulación de transitorios electromagnéticos. Debido a la complejidad involucrada, este estudio no aspira a ser de ninguna manera completo o definitivo. Según el conocimiento de los autores es la primera vez que se intenta crear una biblioteca de tales características en el ámbito de la Republica Argentina, razón por la cual se pretenden sentar las bases para futuras investigaciones. Sin dudas el mejoramiento de los modelos de transformadores utilizados, y la creación de bibliotecas cada vez más confiables, resultará en una enorme simplificación de la labor desarrollada por aquellos que se encargan de efectuar simulaciones de transitorios electromagnéticos, obteniendo resultados más precisos y en menor tiempo.

El modelo de transformador utilizado es el denominado híbrido, actualmente implementado en ATPDraw. Como ya se mencionó, el código fuente para la creación de dicho modelo no es de libre acceso y por tanto para la creación de las librerías es necesario ingresar los datos en el programa, extraer el archivo de texto resultante y guardarlo en el disco, todo en forma manual.

### B. Conceptos básicos

En esta subsección se establecen las definiciones y ecuaciones básicas necesarias para la comprensión de los conceptos desarrollados.

1) *Manejo de las Componentes Magnetizante y de Pérdidas*: Como es sabido, la corriente de vacío de un transformador se suele interpretar como la superposición de dos componentes: una activa que representa las pérdidas en el núcleo, y otra reactiva inductiva, en cuadratura con la primera, que siendo no disipativa, representa la fuerza magnetomotriz necesaria para generar el flujo. En términos matemáticos, debido a la ortogonalidad de ambas componentes:

$$I_0 = \sqrt{I_m^2 + I_p^2} \quad (1)$$

Dado los resultados del ensayo de vacío para cierta tensión i-ésima ( $U_{ex i}, I_{0 i}, P_{0 i}$ ), la denominada componente de pérdidas se obtiene de la siguiente relación:

$$I_{p i}[A] = \frac{P_{0 i}[kW]}{\sqrt{3} \cdot U_{ex i}[kV]} \quad (2)$$

Por lo que la componente magnetizante resulta:

$$I_{m i}[A] = \sqrt{(I_{0 i}[A])^2 - (I_{p i}[A])^2} \quad (3)$$

2) *Expresiones en Términos Porcentuales*: Una dada magnitud cualquiera  $X$  se expresa en términos porcentuales de cierto valor base  $X_B$  a través de la relación:

$$X[\%] = \frac{X}{X_B} \cdot 100 \quad (4)$$

En el caso particular de los transformadores es común que los resultados de los ensayos se expresen porcentualmente. Por regla general se adoptan los valores base como los nominales:

$$S_B[kV] = S_n[MVA] \quad (5)$$

$$U_B[kV] = U_n[kV] \quad (6)$$

$$I_B[A] = I_n[A] = 1000 \cdot \frac{S_n[MVA]}{\sqrt{3} \cdot U_n[kV]} \quad (7)$$

La tensión de excitación porcentual queda definida como:

$$U_{ex i}[\%] = \frac{U_{ex i}[kV]}{U_B[kV]} \cdot 100 = \frac{U_{ex i}[kV]}{U_n[kV]} \cdot 100 \quad (8)$$

La corriente de vacío en porcentual:

$$\begin{aligned} I_{0 i}[\%] &= \frac{I_{0 i}[A]}{I_B[A]} \cdot 100 = \frac{I_{0 i}[A] \cdot \sqrt{3} \cdot U_n[kV]}{10 \cdot S_n[MVA]} \\ &= \frac{I_{0 i}[A] \cdot \sqrt{3} \cdot U_n[V]}{10 \cdot S_n[kVA]} \end{aligned} \quad (9)$$

La componente de pérdidas porcentual:

$$\begin{aligned} I_{p i}[\%] &= \frac{I_{p i}[A]}{I_B[A]} \cdot 100 = \frac{P_{0 i}[kW] \cdot U_n[kV]}{10 \cdot U_{ex i}[kV] \cdot S_n[MVA]} \\ &= \frac{10 \cdot P_{0 i}[W]}{U_{ex i}[\%] \cdot S_n[kVA]} \end{aligned} \quad (10)$$

Operando convenientemente sobre (3) se obtiene:

$$\begin{aligned} I_{m i}[\%] &= \frac{I_{m i}[A]}{I_B[A]} \cdot 100 = \frac{\sqrt{(I_{0 i}[A])^2 - (I_{p i}[A])^2}}{I_B[A]} \cdot 100 \\ &= \sqrt{(I_{0 i}[\%])^2 - (I_{p i}[\%])^2} \end{aligned} \quad (11)$$

3) *Conversión de los Valores Obtenidos del Ensayo de Vacío:* Dado los resultados del ensayo de vacío para cierta tensión  $i$ -ésima ( $U_{ex\ i}, I_{0\ i}, P_{0\ i}$ ), la separación de las componentes se realiza aplicando las ecuaciones (10) y (11):

$$I_{p\ i}[\%] = \frac{10 \cdot P_{0\ i}[W]}{U_{ex\ i}[\%] \cdot S_n[kVA]} \quad (10)$$

$$I_{m\ i}[\%] = \sqrt{(I_{0\ i}[\%])^2 - \left( \frac{10 \cdot P_{0\ i}[W]}{U_{ex\ i}[\%] \cdot S_n[kVA]} \right)^2} \quad (11)$$

De esta forma, si se tiene un conjunto de  $n$  resultados del ensayo de vacío, cada uno a un nivel diferente de tensión, aplicando las ecuaciones (10) y (11) para separar las componentes activas y reactivas, se obtiene un conjunto de  $n$  ternas: ( $U_{ex\ i}, I_{p\ i}, I_{m\ i}$ ).

Debe recordarse que en (1) a (11) las corrientes y tensiones se expresan en términos RMS y son el promedio de los valores medidos en las tres fases.

### C. La modelización del Núcleo en el Modelo Híbrido

En el modelo híbrido cada una de las secciones del núcleo del transformador es representada mediante un paralelo RL. Justamente este tipo de representación justifica la aplicación de las ecuaciones precedentes ya que permite separar la corriente de vacío en sus componentes de pérdida y magnetizante. La corriente de pérdidas se asocia a la resistencia y la componente magnetizante a la inductancia. Se nota que en este aspecto el modelo híbrido no se diferencia en nada respecto de los métodos tradicionales; su característica distintiva es cómo se conectan entre sí las diferentes secciones del núcleo.

Como es sabido cuando una bobina con núcleo de hierro empieza a saturar, tanto la componente magnetizante como de pérdidas aumentan su valor. Por tal motivo, idealmente, a los efectos de considerar ambas variaciones, el equivalente eléctrico debe conformarse por elementos variables con la corriente, como el indicado en la Fig. 4.

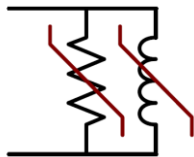


Fig. 4. Equivalente eléctrico de cada sección del núcleo.

1) *Implementación de las Pérdidas Nucleares:* El modelo híbrido implementado en ATPDraw asume que las pérdidas en cada sección del núcleo, son proporcionales al volumen de ésta y al cuadrado de la tensión RMS aplicada (coeficiente de Steinmetz  $n=2$ ).

Por el momento, las resistencias del núcleo, modeladoras de las pérdidas de éste, se asumen constantes y se las determina en base al valor de pérdidas ingresado para el 100% de la tensión nominal (si los resultados del ensayo para este nivel de tensión no han sido ingresados, se utiliza una

interpolación lineal). Es decir, que el equivalente eléctrico de cada sección del núcleo es el representado en la Fig. 5.

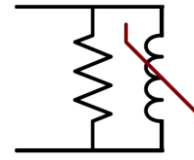


Fig. 5. Equivalente eléctrico de cada sección del núcleo utilizado en el modelo híbrido de ATPDraw

2) *Implementación de la Saturación Magnética:* Como se observa en la Fig. 5, la resistencia del equivalente eléctrico se considera constante, pero no así la inductancia. Si se ingresa al ATPDraw un conjunto de  $n$  ternas del ensayo de vacío ( $U_{ex\ i}, I_{0\ i}, P_{0\ i}$ ), mediante la aplicación de las ecuaciones (10) y (11), se obtiene un conjunto de  $n$  ternas ( $U_{ex\ i}, I_{p\ i}, I_{m\ i}$ ).

Los  $n$  pares ( $U_{ex\ i}, I_{m\ i}$ ), se utilizarán en la correspondiente rutina de conversión, para obtener los  $n$  pares de valores instantáneos de enlace de flujo y corriente ( $\lambda_i, i_i$ ) y así, previo ajuste a la ecuación de Frolich, construir la curva de saturación magnética que se implementará mediante una función lineal por tramos a través de los elementos no lineales típicos de ATP [42]-[47].

Por tanto, las pérdidas  $P_{0\ i}$ , ingresadas en una secuencia de  $n$  puntos del ensayo de vacío, se utilizan para poder efectuar la separación a través de las ecuaciones (10) y (11), obtener así la componente magnetizante  $I_{m\ i}$  y construir la curva de saturación magnética. Únicamente el valor de pérdidas correspondiente a 100% de la tensión nominal  $P_{0\ (U_n)}$  se usa para obtener las resistencias equivalentes del núcleo en el modelo dual.

Se observa entonces, que el único valor de pérdidas de vacío que tiene una importancia en sí mismo, es el correspondiente a 100% de la tensión nominal, mientras que todos los demás valores ingresados en una secuencia de  $n$  puntos cumplen un rol utilitario, al servicio de la construcción de la curva de saturación magnética, permitiendo separar la componente magnetizante de la de pérdidas.

### D. Disposiciones de la Norma IRAM 2250.

La norma IRAM 2250 aplica a transformadores trifásicos de distribución en baño de aceite, de enfriamiento natural (ONAN) con tensión primaria de 13,2 kV o 33 kV y tensión secundaria de 400 V. Las potencias contempladas van desde 25 kVA a 2500 kVA. Ésta es la norma por excelencia que aplica a los transformadores para propósitos generales usualmente encontrados en las redes de distribución. En el caso particular que concierne a este trabajo, interesan únicamente los transformadores con tensión nominal primaria de 13,2 kV, excluyéndose los transformadores de 33 kV. Sin embargo nada impide aplicar los conceptos aquí desarrollados a este tipo de transformadores o a cualquier otro cuyos datos se encuentren normalizados.

Esta norma, indica los valores nominales del ensayo de vacío a tensión nominal y de cortocircuito a 75 C. Dichos valores se reproducen en la Tabla I para las potencias típicamente encontradas en las redes de distribución.

TABLA I  
VALORES NOMINALES DEL ENSAYO DE VACÍO A  $U_n$  Y DE CORTOCIRCUITO A 75 [C] SEGÚN IRAM 2250

| $S_r$ [kVA] | $I_0$ [% $I_r$ ] | $P_0$ [W] | $U_{cc}$ [% $U_r$ ] | $P_{cc}$ [kW] |
|-------------|------------------|-----------|---------------------|---------------|
| 25          | 3.5              | 160       | 4                   | 0.6           |
| 63          | 2.9              | 270       | 4                   | 1.35          |
| 100         | 2.5              | 350       | 4                   | 1.75          |
| 160         | 2.3              | 500       | 4                   | 2.5           |
| 250         | 2.1              | 700       | 4                   | 3.5           |
| 315         | 2                | 850       | 4                   | 4.25          |
| 630         | 1.8              | 1450      | 4                   | 7.25          |
| 1000        | 1.7              | 2000      | 5                   | 10.5          |

Esta misma norma impone un límite superior a la corriente de vacío, cuando la tensión primaria se incrementa en un 5% sobre la tensión nominal. Dicho límite es de 2,2 veces la corriente en vacío establecida la Tabla I. No establece nada, sin embargo, acerca de las pérdidas de vacío para este nivel de tensión.

#### E. Aplicación de la Norma IRAM 2250

Para la construcción de una librería modular de transformadores acorde a IRAM 2250 la representación en cortocircuito de los mismos es directa a partir de los valores indicados en la Tabla I. En el caso de temperaturas diferentes de la de referencia se deberán aplicar los factores de corrección pertinentes.

Sin embargo la representación del núcleo del transformador a partir de las limitaciones que impone la norma adquiere una dificultad notable si se desea considerar la naturaleza no lineal del mismo. Esto se debe a que para los transformadores de distribución no existe un ensayo de vacío normalizado para tensiones superiores a la nominal. Efectivamente para lograr una representación de la saturación magnética es menester poseer al menos dos puntos del ensayo de vacío a diferentes valores de tensión. El primer punto será el correspondiente a tensión nominal y el segundo a un 1.05 de ese valor.

A efectos de lograr una representación de la característica no lineal del núcleo del transformador los datos del ensayo de vacío a 105% de la tensión nominal, a ingresar, deben incluir tanto las pérdidas como la corriente, es decir la terna  $(1,05U_n, I_{0(1,05U_n)}, P_{0(1,05U_n)})$ . Sin embargo, nada dice la norma para estos valores, la única condición que impone es que la corriente de vacío no supere en 2,2 veces el valor indicado en la Tabla I cuando la tensión aumenta un 5%. Por tal motivo, se ha llegado aquí a un punto de inflexión, donde para una misma potencia de transformador se deberán generar varios modelos a los efectos de cubrir la mayor gama de posibilidades.

Se observa que al considerar las pérdidas mediante resistencias constantes el valor de  $P_{0(1,05U_n)}$  queda fijado por el correspondiente  $P_{0(U_n)}$ . Por tanto la magnitud que realmente interesan variar es  $I_{m(1,05U_n)}$ .

El objetivo entonces será generar varios modelos de transformadores con diferentes curvas de saturación magnética, pasando desde lo más saturado posible hasta una característica lineal. Todos estos modelos deberán estar en

correspondencia con lo indicado por IRAM 2250. De esta forma se pretende facilitarle al usuario la tarea de determinación de los parámetros, ofreciéndole un conjunto de transformadores con características magnéticas diferentes pero que cumplan con las condiciones estipuladas por la norma

De esta forma, se generarán modelos de transformadores para distintos valores de  $I_{m(1,05U_n)}$ . La expresión de tal valor resulta:

$$I_{m(1,05U_n)}[\%] = \sqrt{(I_{0(1,05U_n)}[\%])^2 - \left(\frac{10 \cdot P_{0(1,05U_n)}[W]}{105 \cdot S_n[kVA]}\right)^2} \quad (12)$$

1) *Pérdidas de Vacío a 1.05 de  $U_n$* : Se decide adoptar  $P_{0(1,05U_n)}$  como:

$$P_{0(1,05U_n)} = \left(\frac{1,05}{1}\right)^2 P_{0(U_n)} \quad (13)$$

Esta decisión está fundada en darle al ingreso de datos un sentido físico real. Dentro de ciertos límites se suele plantear que las pérdidas en el núcleos dependen linealmente con el cuadrado de la inducción (coeficiente de Steinmetz igual a 2), de ahí que esa dependencia se traslade al cuadrado de la tensión RMS, y bajo estas suposiciones, una resistencia constante, es un buen modelador de las pérdidas nucleares ( $P = U^2/R$ ). Sin embargo es sabido que las pérdidas en el hierro no siguen una relación sencilla con la inducción y que aumentan más fuertemente que con el cuadrado de ésta, sobre todo al entrar en el codo de saturación. Dicho esto, la ecuación (13) se justifica ya que plantear que las pérdidas aumentan con el cuadrado de la tensión RMS, es plantear la mínima dependencia posible entre ambas variables. Dichas pérdidas no podrían ser nunca menores a las indicadas en (13), por lo que impone una cota inferior.

Con el valor definido en (13) y reemplazando en (1), la componente de pérdidas al 105% de la tensión nominal resulta:

$$I_{p(1,05U_n)}[\%] = \frac{10 \cdot (1,05)^2 \cdot P_{0(U_n)}[W]}{105 \cdot S_n[kVA]} = 1,05 \cdot I_{p(U_n)}[\%] \quad (14)$$

La relación (14) pone en otros términos lo manifestado anteriormente, que es que bajo la suposición planteada por (13) las pérdidas nucleares siguen una relación cuadrática con la tensión, o lo que es lo mismo, la corriente sigue una relación lineal con ésta ( $I = U/R$ ). Bien se podría haber impuesto en primer lugar la condición (14), para luego arribar a la (13).

Reemplazando en (12) se obtiene:

$$I_{m(1,05U_n)}[\%] = \sqrt{(I_{0(1,05U_n)}[\%])^2 - \left(\frac{(1,05) \cdot P_{0(U_n)}[W]}{10 \cdot S_n[kVA]}\right)^2} \quad (15)$$

2) *Corriente de Vacío a 1.05 de Un*: Como se ha mencionado previamente, se desea obtener una secuencia  $I_{m(1,05 Un)j}$ . Surge la incógnita de qué valores límite se deberán considerar en  $I_{m(1,05 Un)j}$  y cómo generar la mencionada secuencia, cuestión que se trata a continuación.

a) *Corriente magnetizante máxima a 1.05 de Un*: La máxima corriente de vacío a 105% de la tensión nominal es la impuesta por la norma de 2,2 veces el valor indicado en la Tabla I. Es decir:

$$I_{0(1,05 Un)max} = 2,2 \cdot I_{0(Un)} \quad (16)$$

Este valor se puede asociar a cierta corriente magnetizante máxima, a través de (15):

$$\begin{aligned} I_{m(1,05 Un)max}[\%] &= \\ &= \sqrt{\left(I_{0(1,05 Un)max}[\%]\right)^2 - \left(\frac{(1,05) \cdot P_{0(Un)}[W]}{10 \cdot S_n[kVA]}[\%]\right)^2} \\ I_{m(1,05 Un)max}[\%] &= \sqrt{\left(2,2 \cdot I_{0(Un)}[\%]\right)^2 - \left(\frac{(1,05) \cdot P_{0(Un)}[W]}{10 \cdot S_n[kVA]}[\%]\right)^2} \quad (17) \end{aligned}$$

Se puede observar que esta corriente magnetizante es efectivamente una cota superior, ya que la corriente de vacío  $I_{0(1,05 Un)}$  es la máxima permitida por la norma, y las pérdidas  $P_{0(1,05 Un)}$  se supone que siguen una dependencia lineal con el cuadrado de la tensión, a través del factor  $(1,05)^2$ , lo que representa su mínima variación posible, ya que al saturar, ésta será aún más acentuada.

b) *Corriente magnetizante mínima a 1.05 de Un*: De los valores del ensayo de vacío a tensión nominal  $(U_n, I_{0(Un)}, P_{0(Un)})$ , es posible obtener la corriente magnetizante a tensión nominal:

$$I_{m(Un)}[\%] = \sqrt{\left(I_{0(Un)}[\%]\right)^2 - \left(\frac{10 \cdot P_{0(Un)}[W]}{100 \cdot S_n[kVA]}\right)^2} \quad (18)$$

De la misma forma que se ha considerado para las pérdidas, la mínima corriente magnetizante es la que se obtiene de considerar una variación lineal de ésta con la tensión, hecho que como es sabido no se cumple cuanto más saturado esté el núcleo. Por tanto podemos obtener una corriente magnetizante mínima a 105% de  $U_n$ :

$$I_{m(1,05 Un)min} = 1,05 \cdot I_{m(Un)} \quad (19)$$

c) *Secuencia de corriente magnetizante a 1.05 de Un*: A partir de (17) y (19) se tiene los valores extremos de corriente magnetizante a 1.05 de  $U_n$ . Para cada tipo de transformador se generará un barrido lineal entre dichos valores, de forma de obtener 10 modelos distintos. La secuencia se construye como sigue:

$$I_{m(1,05 Un)j} = a(j-1) + b \quad (20)$$

Siendo  $j$  el número de modelo considerado.

Imponiéndose para  $j = 1$ :

$$I_{m(1,05 Un)j=1} = I_{m(1,05 Un)min} = b$$

$$b = I_{m(1,05 Un)min} \quad (21)$$

Y para  $j = 10$ :

$$I_{m(1,05 Un)j=10} = I_{m(1,05 Un)max} = a(10-1) + b$$

$$a = \frac{I_{m(1,05 Un)max} - I_{m(1,05 Un)min}}{9} \quad (22)$$

Con la aplicación de las ecuaciones (20) a (22), variando  $j$ , se genera la secuencia de valores de  $I_{m(1,05 Un)j}$ . Dicha secuencia contempla un rango de variación lineal desde el valor máximo indicado en (17) hasta el mínimo en (19). De esta manera se obtendrá un conjunto de representaciones del núcleo del transformador partiendo desde la máxima saturación permitida por la norma hasta una característica completamente lineal.

d) *Secuencia de corriente de vacío a 1.05 de Un*: Luego de determinar la secuencia de valores  $I_{m(1,05 Un)j}$ , ésta se vuelve a componer con la parte activa, para obtener la correspondiente secuencia de  $I_{0(1,05 Un)}$ , mediante la ecuación (12):

$$\begin{aligned} I_{0(1,05 Un)j} &= \\ &= \sqrt{\left(I_{m(1,05 Un)j}[\%]\right)^2 + \left(\frac{(1,05)P_{0(Un)}[W]}{10 \cdot S_n[kVA]}[\%]\right)^2} \quad (23) \end{aligned}$$

Esta última secuencia, conjuntamente con el valor de (13), define para cada potencia de transformador, un grupo de 10 modelos a implementar y simular.

La creación de esta última secuencia se debe efectuar ya que en ATPDraw al usuario se le exige ingresar el par  $(I_{0(1,05 Un)}, P_{0(1,05 Un)})$  y no  $(I_{m(1,05 Un)}, P_{0(1,05 Un)})$ .

#### F. Resultados obtenidos

El procedimiento previamente explicado se aplicó a los transformadores comúnmente encontrados en las redes de distribución. Los resultados se presentan en las tablas II, III y IV para un transformador de 100 kVA.

TABLA II  
ENSAYO DE VACÍO A  $U_n$   
TRANSFORMADOR DE 100 [kVA]

|                  |     |
|------------------|-----|
| $I_{0(Un)} [\%]$ | 2.3 |
| $P_{0(Un)} [W]$  | 2.1 |
| $I_p(Un) [\%]$   | 2   |
| $I_m(Un) [\%]$   | 1.8 |

TABLA III  
ENSAYO DE VACÍO A  $1,05U_n$   
TRANSFORMADOR DE 100 [kVA]

|                            |         |
|----------------------------|---------|
| $P_0 (1,05 U_n)$ [W]       | 385.875 |
| $I_p (1,05 U_n)$ [%]       | 0.3675  |
| $I_0 (1,05 U_n)_{max}$ [%] | 5.5     |
| $I_0 (1,05 U_n)_{min}$ [%] | 2.625   |
| $I_m (1,05 U_n)_{max}$ [%] | 5.48771 |
| $I_m (1,05 U_n)_{min}$ [%] | 2.59915 |

TABLA IV  
SECUENCIAS CORRIENTE DE MAGNETIZACIÓN Y DE VACÍO  
TRANSFORMADOR DE 100 [kVA]

| Modelo Número ( $j$ ) | $I_m (1,05 U_n)_j$ [%] | $I_0 (1,05 U_n)_j$ [%] |
|-----------------------|------------------------|------------------------|
| 1                     | 2.59915                | 2.62500                |
| 2                     | 2.92010                | 2.94313                |
| 3                     | 3.24105                | 3.26182                |
| 4                     | 3.56200                | 3.58091                |
| 5                     | 3.88295                | 3.90030                |
| 6                     | 4.20390                | 4.21994                |
| 7                     | 4.52485                | 4.53975                |
| 8                     | 4.84581                | 4.85972                |
| 9                     | 5.16676                | 5.17981                |
| 10                    | 5.48771                | 5.50000                |

Estas secuencias fueron luego ingresadas en ATPDraw a efectos de obtener el correspondiente archivo *.atp* con el modelo del transformador incorporado. Inspeccionando tal archivo se puede observar, como era de esperarse, que todos los modelos son exactamente iguales salvo en la representación de las inductancias variables del núcleo. En todos los casos éstas se modelan con elementos no lineales tipo 98 [31].

Para el modelo número 4 de dicho transformador los pares de valores instantáneos de enlace de flujo y corriente ( $\lambda_i$ [Vs],  $i_i$ [A]) obtenidos para el yugo y las columnas se presentan en la Tabla V.

TABLA V  
PUNTOS DE LA CURVA DE ENLACE DE FLUJO – CORRIENTE INSTANTÁNEA  
TRANSFORMADOR DE 100 [kVA] – MODELO NÚMERO 4

| $i_i$ [A] | $\lambda_{i-columna}$ [Vs] | $\lambda_{i-yugo}$ [Vs] |
|-----------|----------------------------|-------------------------|
| 0         | 0                          | 0                       |
| 0.408434  | 0,5557549                  | 0,3627935               |
| 0.816869  | 0,7570981                  | 0,5557549               |
| 1.633738  | 0,9245872                  | 0,7570981               |
| 3.267477  | 1,0395957                  | 0,9245872               |
| 6.534955  | 1,1085820                  | 1,0395957               |
| 13.06991  | 1,1467145                  | 1,1085820               |
| 26.13982  | 1,1669642                  | 1,1467145               |
| 52.27964  | 1,1777310                  | 1,1669642               |
| 104.5592  | 1,1839385                  | 1,1777310               |
| 209,1185  | 1,1859546                  | 1,1797471               |

En al Fig. 6 se grafican las curvas enlace de flujo-corriente correspondientes a la Tabla V.

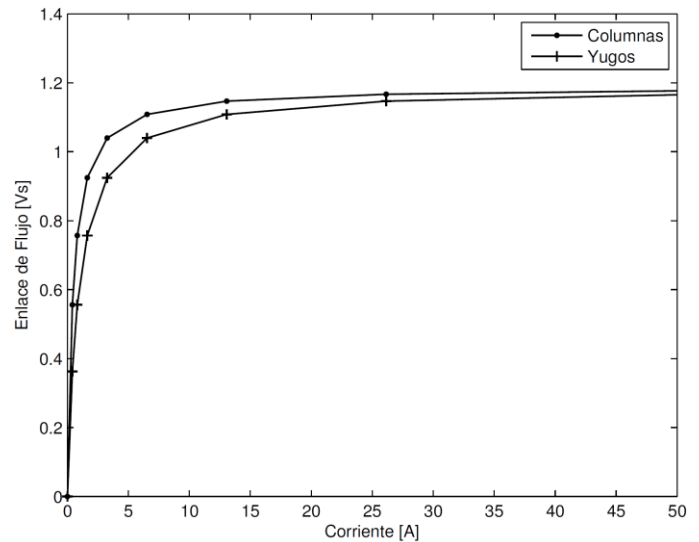


Fig. 6. Curva enlace de flujo-corriente para el modelo número 4 del transformador de 100 [kVA].

Mediante el procedimiento descrito se crearon los modelos de los transformadores en el adecuado formato para su implementación en un archivo de simulación *.atp*. Éstos son los que se encuentran en la librería de transformadores otorgada por defecto en el programa desarrollado para el estudio de la ferresonancia.

## V. EJEMPLO DE APLICACIÓN

### A. Características de la Red.

En esta sección la herramienta desarrollada se aplica al estudio de la ocurrencia de ferresonancia en un sistema de distribución típico de la zona rural que roda a la Universidad Nacional de Mar del Plata. El transformador modelado es de conformidad con las normas nacionales [48] y es uno de los contenidos en la librería básica otorgada al usuario. Es un transformador en conexión Dyn11 con núcleo de tres columnas apilado. Los valores nominales y del ensayo de cortocircuito se presentan en la Tabla VI. Los valores del ensayo de vacío se presentan en la Tabla VII.

TABLA VI  
VALORES NOMINALES Y ENSAYO DE CORTOCIRCUITO

|                                |          |
|--------------------------------|----------|
| Potencia Nominal [kVA]         | 100      |
| Tensión Nominal [kV]           | 13.2/0.4 |
| Tensión de Cortocircuito [%]   | 4        |
| Pérdidas de Cortocircuito [kW] | 1.75     |

TABLA VII  
ENSAYO DE VACÍO

| Tensión [%] | Corriente de Vacío [%] | Pérdidas de Vacío [kW] |
|-------------|------------------------|------------------------|
| 100         | 2.5                    | 0.35                   |
| 105         | 3.5809                 | 0.3859                 |

La configuración de la línea es típica de sistemas de distribución rural en el ámbito de la Provincia de Buenos Aires. Es una línea de conductor de aleación de aluminio de 25 mm<sup>2</sup>, montada sobre una cruceta normalizada en

disposición horizontal coplanar. Los datos de la línea se presentan en la Tabla VIII

TABLA VIII  
DATOS DE LA LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN

|                                                  |        |
|--------------------------------------------------|--------|
| Longitud de la línea [km]                        | 9      |
| Resistividad del terreno [ohm.m]                 | 40     |
| Altura promedio de los conductores [m]           | 7.25   |
| Diámetro del conductor de [cm]                   | 0.65   |
| Resistencia DC del conductor [ohm/km]            | 1.31   |
| Cruceta.                                         | MN-107 |
| Distancia media entre conductores adyacentes [m] | 0.81   |

Como este es un ejemplo genérico, se asume potencia de cortocircuito infinita aguas arriba del interruptor, es decir se supone que el equivalente de red posee impedancia despreciable y es reducido a una fuente ideal de tensión.

La línea se encuentra operando en régimen de trabajo normal cuando los interruptores ubicados en las fases A y B se abren mientras que el ubicado en la fase C permanece cerrado. Se ajusta que no haya corriente marginal en los interruptores, es decir que la apertura tiene lugar tan pronto como la corriente pase por cero luego de haberse enviado la orden de conmutación [31]. Varios estudios fueron realizados bajo ese escenario y los resultados se presentan en las secciones siguientes.

#### B. Influencia de la Carga del Transformador

Se realizó un estudio de sensibilidad variando la carga del transformador desde 0 a 1.2 % de su potencia nominal. Se ejecutó un número total de 240 simulaciones con un paso de 0.005 % o 5 VA entre cada una de ellas. En todas las simulaciones se tomó un factor de potencia igual a 0.8, y la orden de conmutación se envió a los 50 ms. Los diagramas de bifurcaciones resultantes se presentan en la Fig. 7

Puede observarse que con carga menores a un 1 % varios estados ferresonantes pueden ocurrir, produciendo sobretensiones que alcanzan aproximadamente 3 pu en régimen permanente. Es llamativo y vale la pena hacer notar que existe una brecha en la ocurrencia de la ferresonancia para cargas comprendidas entre 0.32 y 0.4 %. Fuera de los límites de este "hueco" las sobretensiones ferresonantes vuelven a aparecer abruptamente.

Para una carga de 0.1 % las formas de onda resultantes se muestran en la Fig. 8. El espectro de frecuencia presentado en la Fig. 9 contiene armónicos múltiplos de la frecuencia industrial, la trayectoria del plano de fase en la Fig. 10 forma un único bucle cerrado y la sección de Poincaré en la Fig. 11 consiste de un solo punto. Puede notarse fácilmente, mediante la inspección de estas figuras, que luego de un largo transitorio el sistema se estabiliza en un modo de ferresonancia fundamental. Es también interesante notar que durante el estado transitorio, las sobretensiones ferresonantes pueden alcanzar valores mucho mayores que aquellos presentes en el régimen permanente, es decir, mayores que aquellos obtenidos del diagrama de bifurcaciones.

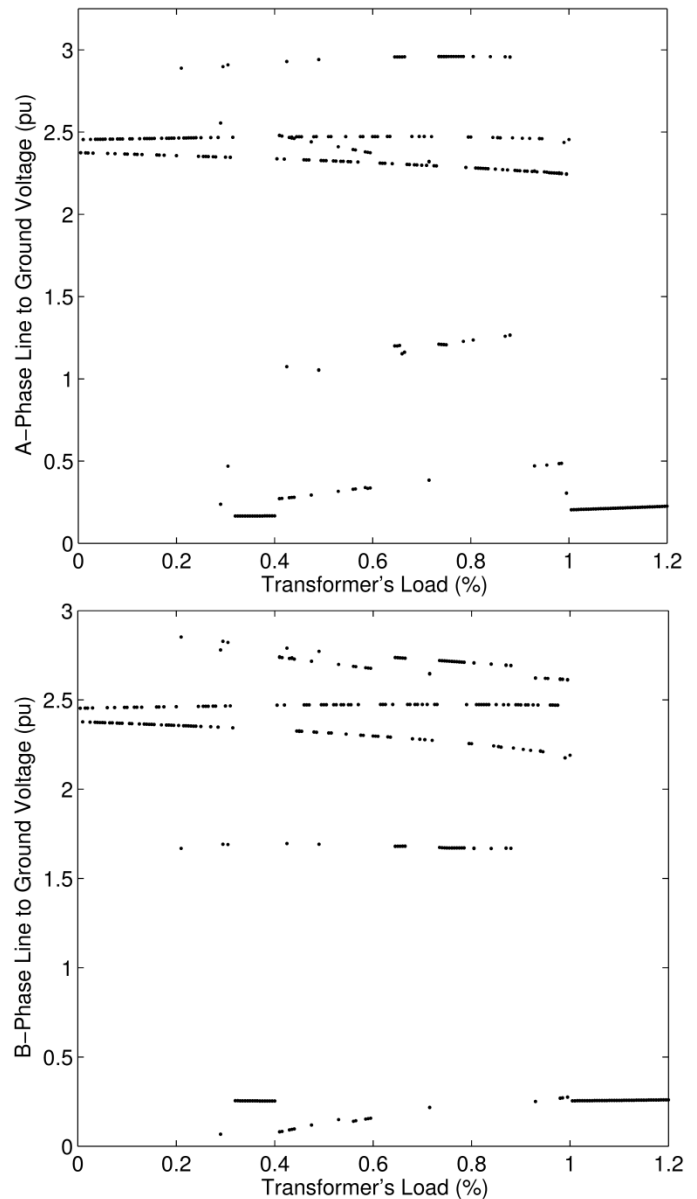


Fig. 7. Diagramas de bifurcaciones variando la carga del transformador.

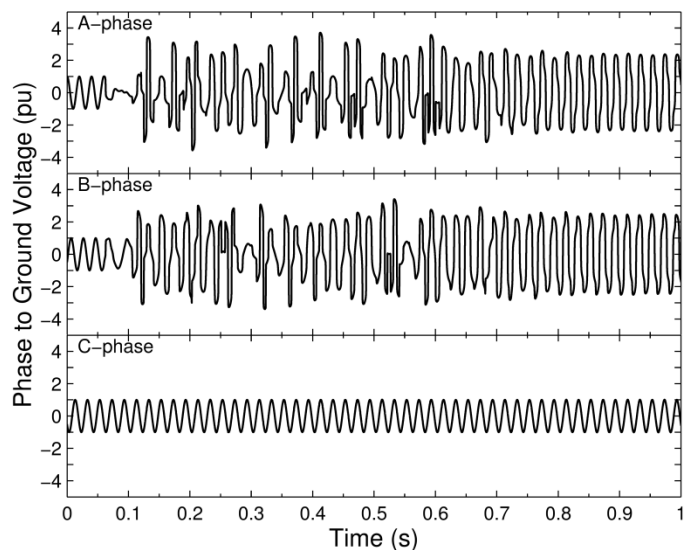


Fig. 8. Forma de onda de las tensiones para una carga de 0.1 [%].

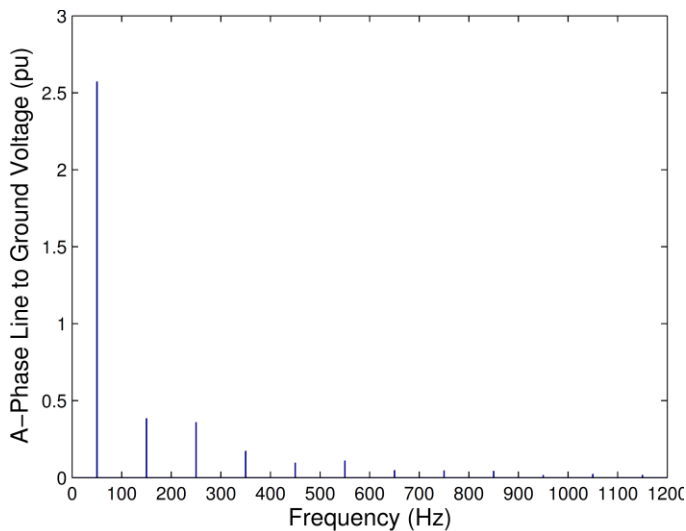


Fig. 9. Espectro de frecuencia de la tensión para una carga de 0.1 [%].

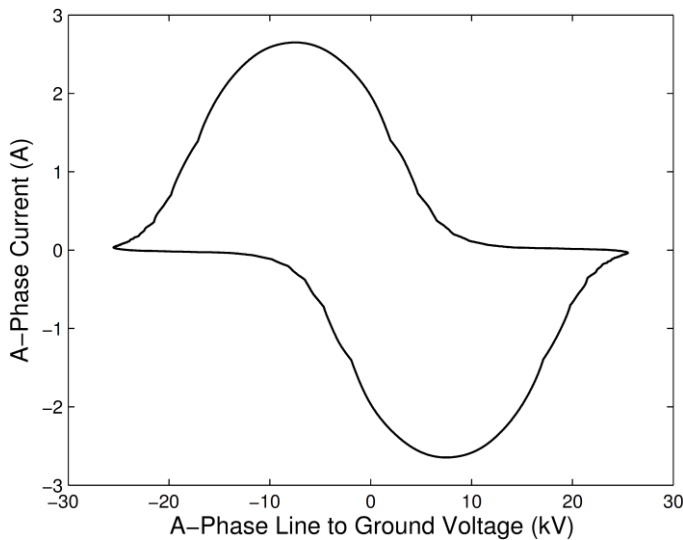


Fig. 10. Plano de fase para una carga de 0.1 [%].

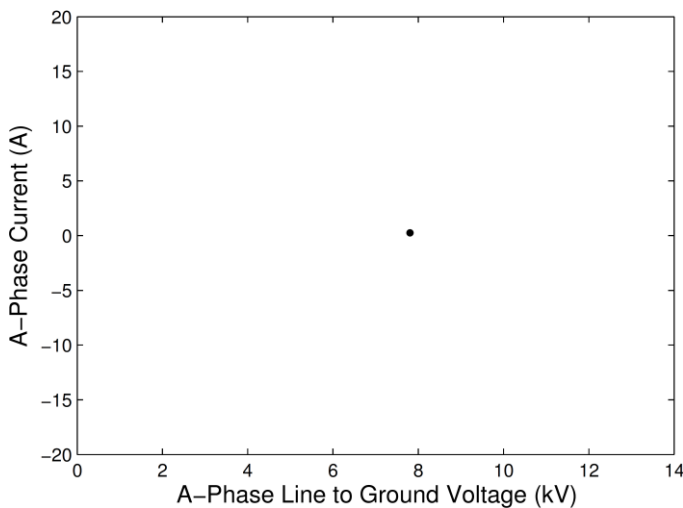


Fig. 11. Sección de Poincaré para una carga de 0.1 [%].

Los diagramas de bifurcaciones revelan claramente la existencia de varios estados de ferroresonancia sub-armónica. El más evidente es el estado 2-periodico resultante para cargas

comprendidas entre 0.735 y 0.785 %. Las formas de onda, el espectro de frecuencia, el plano de fase y las secciones de Poincaré obtenidos para una carga de 0.75 % se presentan en las Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14 y Fig. 15, respectivamente. Inspeccionando las formas de onda se puede observar que las tensiones de las fases A y B poseen un periodo que es el doble del correspondiente a la fase C. El espectro de frecuencia contiene una componente fundamental de 25Hz y sus armónicos múltiplos, el plano de fase consiste de dos bucles formando una trayectoria cerrada, y el mapa de Poincaré contiene dos puntos. Por lo tanto este es evidentemente un régimen ferroresonante sub-armónico 2-periodico.

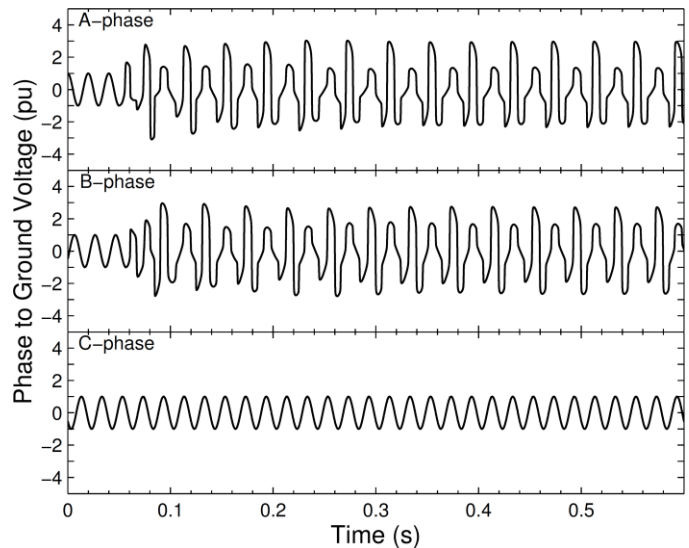


Fig. 12. Forma de onda de las tensiones para una carga de 0.75 [%].

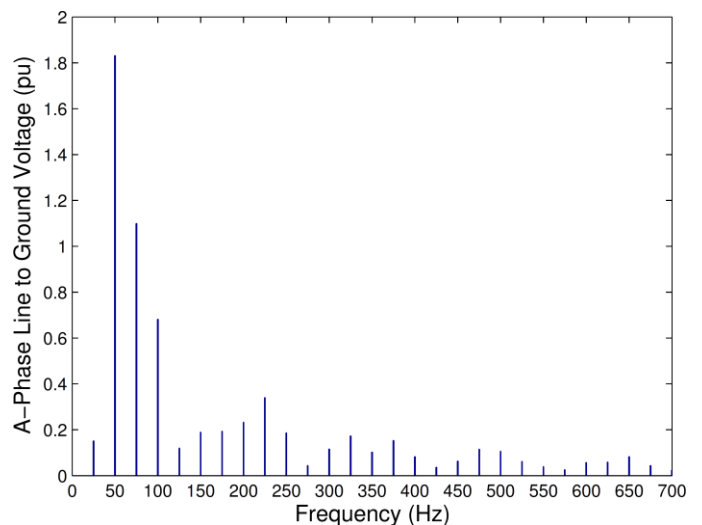


Fig. 13. Espectro de frecuencia de la tensión para una carga de 0.75 [%].

Para cargas mayores a un 1 % la ferroresonancia parece desaparecer completamente. Es digno de notar el hecho que dentro de una estrecha banda de 0.015 % o 15 VA tres estados diferentes y claramente definidos tienen lugar. Esta situación puede observarse en la Fig. 16. Para una carga de 0.995 % se establece un estado sub-armónico de periodicidad 2, para una carga de 1 % la ferroresonancia es de modo fundamental, y cuando la carga es de 1.005 % desaparecen las sobretensiones

ferroresonantes. Aunque se presentan únicamente las formas de onda para la fase A, la misma conclusión se aplica para la fase B.

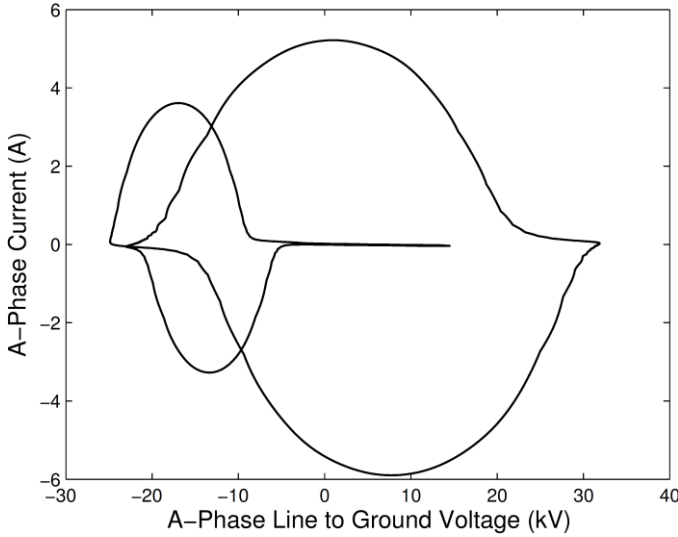


Fig. 14. Plano de fase para una carga de 0.75 [%].

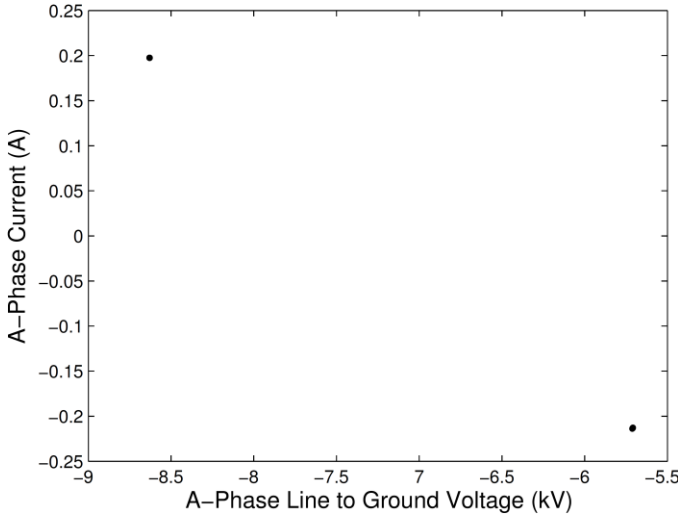


Fig. 15. Sección de Poincaré para una carga de 0.75 [%].

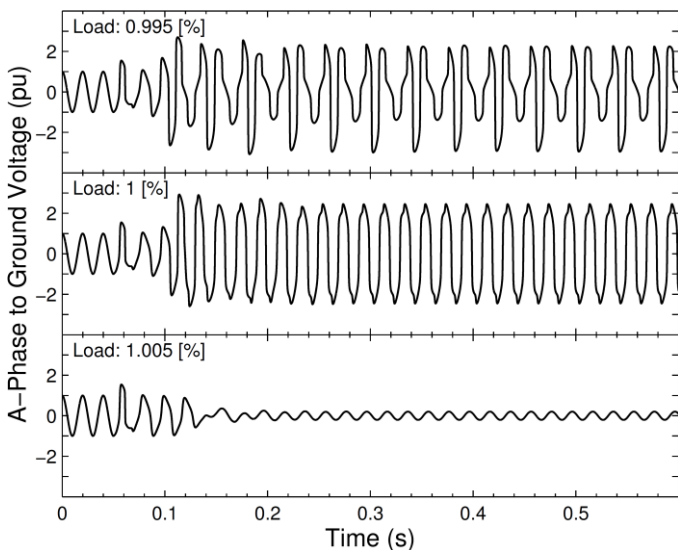


Fig. 16. Forma de onda de las tensiones para una carga de 0.995, 1.000, y 1.005 [%].

### C. Influencia del Instante de Conmutación.

Un estudio de sensibilidad fue realizado variando el tiempo en que es enviada la orden de conmutación entre 0.05 y 0.09 s con un paso de 0.0001 s, lo que lleva a un número total de 400 simulaciones. En todos los casos se tomó una carga de 1 % con factor de potencia 0.8. El diagrama de bifurcaciones resultante se presenta en la Fig. 17.

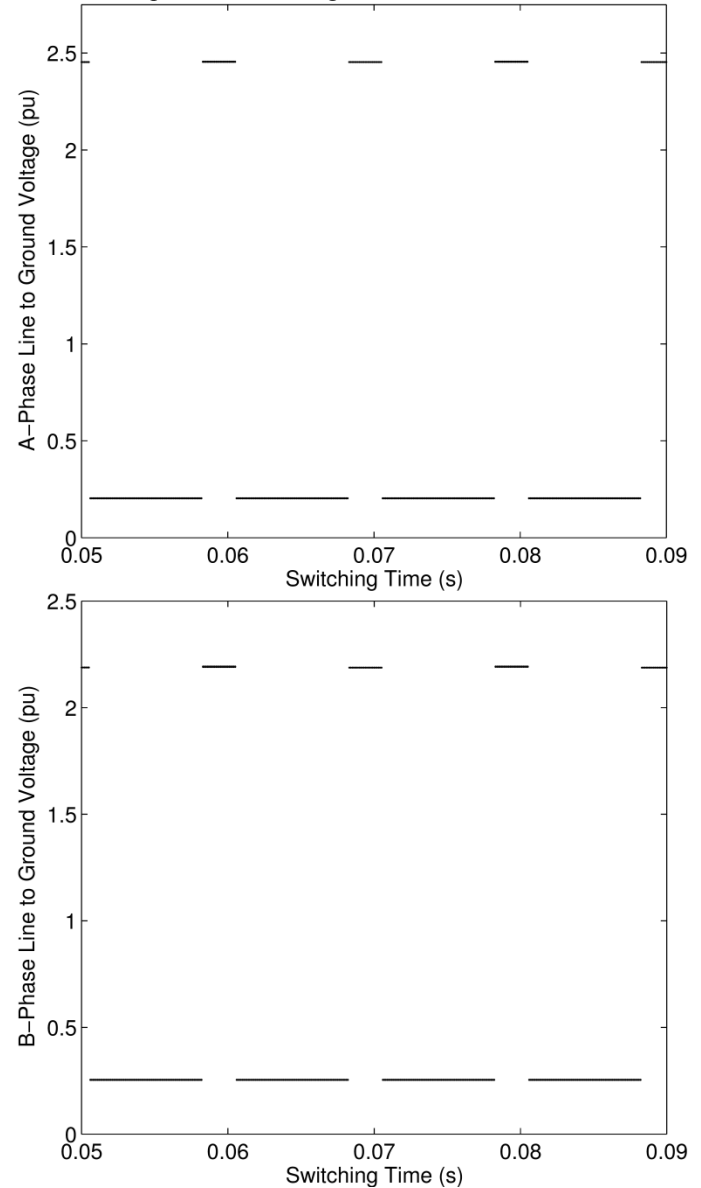


Fig. 17. Diagrama de bifurcaciones variando el tiempo de la orden de conmutación.

De acuerdo a la teoría de sistemas no lineales el instante de conmutación juega un papel fundamental en la determinación del estado final, ya que la mayoría de las condiciones iniciales quedan definidas indirectamente por este parámetro. El instante de conmutación define en qué dominio de atracción el conjunto de condiciones iniciales "cae", determinando de esta manera el atractor final al cual el sistema evolucionará. La Fig. 17 muestra este comportamiento en la red estudiada, revelando la coexistencia de al menos dos atractores para el conjunto de parámetros dado, uno que produce sobretensiones ferroresonantes y otro que no. Como era de esperarse, el

diagrama de bifurcaciones exhibe un periodo de 20 ms correspondiente a un ángulo de  $2\pi$  para la frecuencia industrial de 50 Hz.

#### D. Influencia de la Altura de los Conductores.

Como se mencionó previamente la herramienta desarrollada permite realizar análisis de sensibilidad sobre cualquier parámetro de la línea a través del algoritmo presentado en la Fig. 2. Aprovechando esta posibilidad un estudio de sensibilidad fue realizado variando la altura promedio de los conductores entre 6 y 8.25 m con un paso de 0.005 m y un número total de 450 simulaciones. Se toma una carga de 1 % con factor de potencia 0.8, y la orden de conmutación se envía a los 0.05 s. El diagrama de bifurcaciones resultante se presenta en la Fig. 18

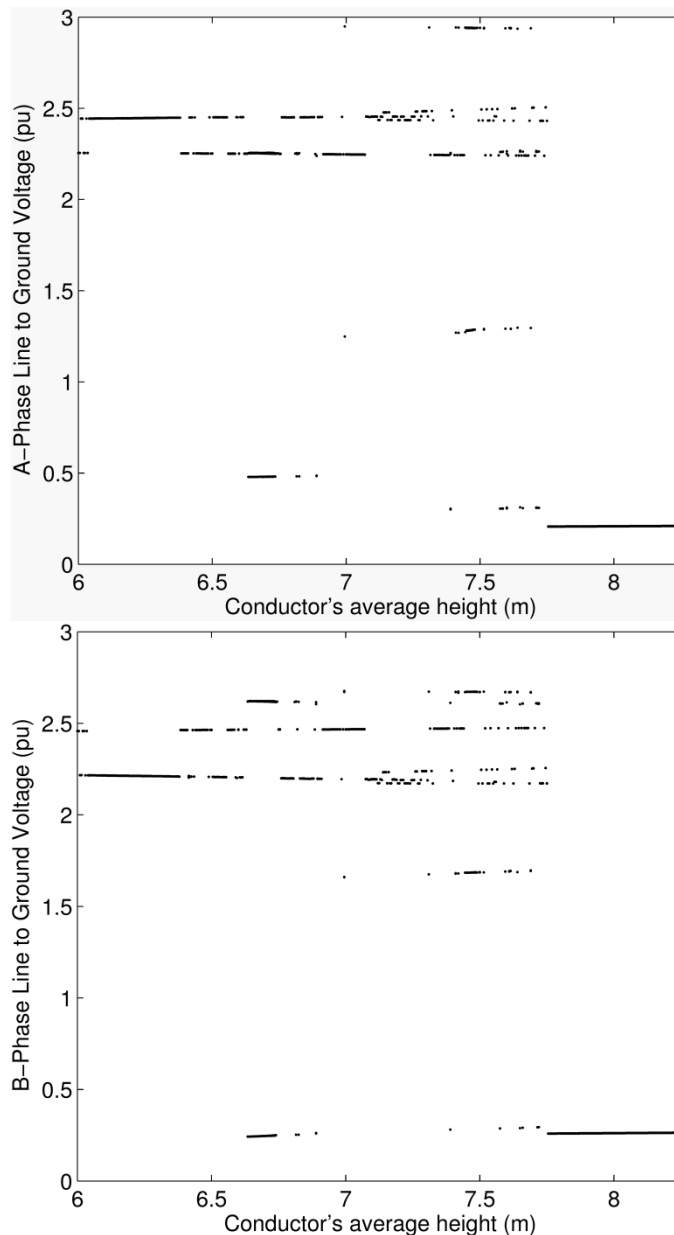


Fig. 18. Diagramas de bifurcaciones variando la altura promedio de los conductores.

Como ocurrió en el estudio de sensibilidad realizado sobre la carga del transformador, la Fig. 18 revela la existencia de varios estados ferroresonantes diferentes, tanto fundamentales como sub-armónicos.

Variando la altura promedio de los conductores el usuario puede modelar la variación de la flecha del conductor, pues por definición [31], [49]:

$$h_{promedio} = h_{en\ el\ poste} - (2/3).flecha \quad (24)$$

Ya que la altura del conductor en el poste es un valor constante, las variaciones de la altura promedio provienen de las ocurridas en la flecha debido a las diferentes condiciones climatológicas.

Como puede observarse en la Fig. 18, y como era de esperarse considerando el comportamiento no lineal de la ferroresonancia, inclusive pequeñas variaciones en la altura de los conductores pueden producir soluciones finales completamente diferentes incluyendo estados ferroresonantes y no ferroresonantes. Estas variaciones están asociadas con la oscilación de la flecha producida por las condiciones variables del clima. Por lo tanto es posible que una red experimente ferroresonancia o no dependiendo de tales condiciones al momento de la ocurrencia del evento de conmutación.

Para el conocimiento de los autores, este trabajo representa la primera vez que la ferroresonancia es vinculada a posibles variaciones en la altura de los conductores debido a las condiciones climatológicas. Efectivamente la altura de los conductores afecta las matrices de inductancia y capacidad de la línea y por lo tanto tiene un profundo impacto en la definición de la ocurrencia de la ferroresonancia. Sin embargo, hasta este trabajo, este hecho no había sido explícitamente estudiado ni mencionado.

## VI. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha desarrollado un programa destinado al estudio de la ferroresonancia en sistemas de distribución rural. Para realizarlo se estableció un mecanismo de vinculación entre ATP-EMTP y MATLAB a los efectos de potenciar sus capacidades individuales. Se aprovecharon las prestaciones gráficas de LabVIEW y se lo utilizó para establecer el entorno gráfico de comunicación. Se crearon las herramientas adecuadas para facilitar al usuario la construcción de los planos de fase, secciones de Poincaré, espectros de frecuencia y diagramas de bifurcaciones. Se desarrolló una librería de transformadores acorde a la normativa local de forma de poder utilizarla con el programa o con cualquier otro tipo de estudio de transitorios electromagnéticos.

Finalmente se presentó un ejemplo de aplicación, donde una red local, que alimenta un transformador, experimenta ferroresonancia luego de la conmutación de dos de sus fases. Se logró establecer por primera vez un vínculo directo entre las condiciones climatológicas y la aparición de la ferroresonancia.

## VII. REFERENCIAS

- [1] IEEE Working Group on Modeling and Analysis of Systems Transients Using Digital Programs "Modeling and analysis guidelines for slow transients – Part III: The study of ferroresonance," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 15, issue 1, pp. 255-265, Jan 2000.
- [2] B. A. Mork, "Ferroresonance and chaos – Observation and simulation of ferroresonance in a five-legged core distribution transformer," Ph.D. dissertation, North Dakota State Univ., North Dakota, U.S., 1992.
- [3] P. Ferracci, *Ferroresonance*. Cahier Technique no.190, Groupe Schneider, 1998.
- [4] E. C. Lister, "Ferroresonance on Rural Distribution Systems," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. IA-9, issue 1, pp. 105-111, Jan. 1973.
- [5] J. M. T. Thompson and H. B. Stewart, *Nonlinear Dynamics and Chaos*. New York, NY, USA: John Wiley and Sons, 2002.
- [6] F. C. Moon, *Chaotic Vibrations. An Introduction for Applied Scientists and Engineers*. New York, NY, USA: John Wiley and Sons, 2004.
- [7] C. Kieny, "Application of the bifurcation theory in studying and understanding the global behavior of a ferroresonant electric power circuit," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 6, issue 2, pp. 866-872, Apr. 1991.
- [8] C. Kieny, "Ferroresonance study using Galerkin method with pseudo-arc-length continuation method," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 6, issue 4, pp. 1841-1847, Oct. 1991.
- [9] A. E. A. Araujo, J. R. Marti, and A. C. Soudack, "Ferroresonance in power systems: Chaotic behavior," *IEEE Proc. C – Gener. Transm. Distrib.*, vol. 140, issue 3, pp. 237-240, May 1993.
- [10] B. A. Mork and D. L. Stuehm, "Application of nonlinear dynamics and chaos to ferroresonance in distribution systems," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 9, issue 2, pp. 1009-1017, Apr. 1994.
- [11] B. A. Mork and D. L. Stuehm, "Five-legged wound-core transformer model: derivation, parameters, implementation and evaluation," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 14, issue 4, pp. 1519-1526, Oct. 1999.
- [12] S. Mozaffari, S. Henschel, and A. C. Soudack, "Chaotic ferroresonance in power transformers," *IEEE Proc. – Gener. Transm. Distrib.*, vol. 142, issue 3, pp. 247-250, May 1995.
- [13] S. Mozaffari, "Chaotic ferroresonance in power transformers," Ph.D. dissertation, Dept. of Elect. Eng., Univ. of British Columbia, Vancouver, Canada, 1996.
- [14] S. Mozaffari, M. Sameti, and A. C. Soudack, "Effect of initial conditions on chaotic ferroresonance in power transformers," *IEEE Proc. – Gener. Transm. Distrib.*, vol. 144, issue 5, pp. 456-460, Sep. 1997.
- [15] A. C. Soudack and S. Mozaffari, "Chaos in a Power Transformer," in *Proc. 1997 Control of Oscillations and Chaos International Conf.*, pp. 117-120.
- [16] P. S. Bodger, G. D. Irwin, D. A. Woodford, and A. M. Gole, "Bifurcation route to chaos for a ferroresonant circuit using an electromagnetic transient program," *IEEE Proc. – Gener. Transm. Distrib.*, vol. 143, issue 3, pp. 238-242, May 1996.
- [17] D. A. N. Jacobson, "Field testing, modeling and analysis of ferroresonance in a high voltage power system," Ph.D. dissertation, Dept. of Elect. and Comp. Eng., Univ. of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada, 2000.
- [18] T. S. Parker and L. O. Chua, *Practical Numerical Algorithms for Chaotic Systems*. New York, NY: Springer-Verlag, 1989.
- [19] D. A. N. Jacobson, D. R. Swatek, and R. W. Mazur, "Mitigating potential transformer ferroresonance in a 230 kV converter station," in *Proc. 1996 IEEE Transmission and Distribution Conf.*, pp. 269-275.
- [20] J. A. Corea Araujo, F. González-Molina, J. A. Martínez-Velasco, J. A. Barrado-Rodrigo, and L. Guasch-Pesquer, "Tools for characterization and assessment of ferroresonance using 3-D bifurcation diagrams," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 29, issue 6, pp. 2543-2551, Dec. 2014.
- [21] J. A. Corea Araujo, F. González-Molina, J. A. Martínez-Velasco, J. A. Barrado-Rodrigo, and L. Guasch-Pesquer, "Tools for ferroresonance characterization," *EEUG Conference*, pp. 1-12, 2012.
- [22] J. A. Corea Araujo, F. González-Molina, J. A. Martínez-Velasco, J. A. Barrado-Rodrigo, and L. Guasch-Pesquer, "An EMTTP-based analysis of the switching shift angle effect during energization/de-energization in the final ferroresonance state," in *Proc. Int. Conf. Power Systems Transients*, Paper No. IPST13-019, July 2013.
- [23] J. A. Corea Araujo, F. González-Molina, J. A. Martínez-Velasco, J. A. Barrado-Rodrigo, and L. Guasch-Pesquer, "Ferroresonance analysis using 3D bifurcation Diagrams," in *Proc. 2013 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-5.
- [24] P. Sakarung, "Bifurcation diagram generation with PSCAD/EMTDC and multiple Poincare map," *RMUTP Research Journal*, vol. 4, no. 2, pp. 146-157, Sep. 2010.
- [25] P. Sakarung and S. Chatratana, "Application of PSCAD/EMTDC and chaos theory to power system ferroresonance analysis," in *Proc. Int. Conf. Power Systems Transients*, Paper No. IPST05-227, June 2005.
- [26] P. Sakarung, "Bifurcation diagram with electromagnetic transient program (EMTP) for ferroresonance analysis," in *Proc. 2010 Int. Conf. on Electrical Engineer/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, pp. 289-292.
- [27] A. Holdyk, J. Holboell, "Implementation of the parametric variation method in an EMTTP program," in *Proc. Int. Conf. Power Systems Transients*, Paper No. IPST13-133, July 2013.
- [28] G. D. Guidi-Venerdini and F. E. Pérez-Yauli, "MATLAB Program for Systematic Simulation over a Transmission Line in Alternative Transients Program," in *Proc. Int. Conf. Power Systems Transients*, Paper No. IPST13-068, July 2013.
- [29] J. J. Mora, J. C. Bedoya, and J. Meléndez, "Extensive Events Database Development using ATP and Matlab to Fault Location in Power Distribution Systems," in *Proc. 2006 IEEE Power and Energy Society Transm. Distrib. Conf. and Expo. Latin America*, pp. 1-6.
- [30] N. Zhang, and M. Kezunovic, "Implementing an Advanced Simulation Tool for Comprehensive Fault Analysis," in *Proc. 2005 IEEE Power and Energy Society Transm. Distrib. Conf. and Expo. Asia and Pacific*, pp. 1-6.
- [31] Can/Am EMTTP Users Group, *ATP Rule Book*, 1987.
- [32] IRAM 9540, "Crucetas y brazos de madera para líneas aéreas de energía y telecomunicaciones," ed1, 3-04-1987.
- [33] J. A. Martínez-Velasco, *Power System Transients. Parameter Determination*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2010.
- [34] A. Gole, J. A. Martínez-Velasco, and A. Keri (eds.), *Modeling and Analysis of Power System Transients Using Digital Programs*, IEEE Power & Energy Society – Technical Report 7, IEEE Catalog No. 99TP133-0, 1999.
- [35] CIGRE WC 33.02, *Guidelines for Representation of Network Elements when Calculating Transients*, CIGRE Brochure 39, 1990.
- [36] IEC/TR 60071-4, "Insulation Co-ordination – Part 4: Computational guide to insulation co-ordination and modeling of electrical networks," ed1.0, 23-06-2004.
- [37] J. A. Martínez-Velasco, *Transient Analysis of Power Systems. Solution Techniques, Tools, and Applications*, IEEE Power & Energy Society - Special Publication, IEEE Catalog No. 11TP255E, 2011.
- [38] Swee Peng Ang, "Ferroresonance simulation studies of transmission systems," Ph.D. dissertation, School of Elect. and Electron. Eng., Univ. of Manchester, Manchester, UK, 2010.
- [39] J. A. Martínez, B. A. Mork, "Transformer modeling for low- and mid-frequency transients – A review," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 20, issue 2, pp. 1625-1632, April 2005.
- [40] E. C. Cherry, "The Duality between Electric and Magnetic Circuits and the Formation of Transformer Equivalent Circuits," *Proc. Physical Soc. London*, vol. 62B, pp.101-111, Feb. 1949.
- [41] C. Saldana and G. Calzolari, "Analysis of core type transformer models based on the principle of duality in electromagnetic transients studies," in *Proc. Int. Conf. Power Systems Transients*, Paper No. IPST97-014, June 1997.
- [42] B. A. Mork, F. Gonzalez, D. Ischenko, D. L. Stuehm, and J. Mitra, "Hybrid transformer model for transient simulation – Part I: Development and parameters," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 22, issue 1, pp. 248-255, Jan. 2007.
- [43] B. A. Mork, F. Gonzalez, D. Ischenko, D. L. Stuehm, and J. Mitra, "Hybrid transformer model for transient simulation – Part II: Laboratory measurements and benchmarking," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 22, issue 1, pp. 256-262, Jan. 2007.
- [44] H. K. Høidalen, B. A. Mork, F. Gonzalez, D. Ischenko, and N. Chiesa, "Implementation of the Hybrid Transformer Model in ATPDraw," in *Proc. Eur. EMTTP-ATP Conf., Warsaw, Poland, 2005*.
- [45] H. K. Høidalen, B. A. Mork, F. Gonzalez, D. Ischenko, and N. Chiesa, "Implementation and Verification of the Hybrid Transformer Model in ATPDraw," in *Proc. Int. Conf. Power Systems Transients*, Paper No. IPST07-047, June 2007.
- [46] H. K. Høidalen, N. Chiesa, A. Avendano, and B. A. Mork, "Developments in the hybrid transformer model – Core modeling and optimization," in *Proc. Int. Conf. Power Systems Transients*, Paper No. IPST11-019, June 2011.

- [47] N. Chiesa, "Power Transformer Modelling: Advanced Core Model," M.Sc. Thesis, Politecnico di Milano, Italy, 2005.
- [48] IRAM 2250, "Transformadores de distribución. Características y accesorios normalizados," ed3.0, 27-09-2013.
- [49] H. W. Dommel, *EMTP Theory Book*, 2 ed. Portland, OR, USA: Bonneville Power Administration, April 1996
- [50] M. Val Escudero, I. Dudurych, and M. A. Redfern, "Characterization of ferroresonance modes in HV substation with CB grading capacitors," in *Proc. Int. Conf. Power Systems Transients*, Paper No. IPST05-146, June 2005.

## VIII. APÉNDICE

### A. Exposición Sintética de la Labor Desarrollada

La labor desarrollada en el marco de la beca de investigación categoría estudiante avanzado se puede resumir en los siguientes ítems:

- Extensa recopilación, análisis y selección de la bibliografía disponible sobre ferroresonancia. Se trabajó sobre libros de texto, normas nacionales e internacionales (IRAM, IEC, IEEE) y publicaciones especializadas en la materia.
- Estudio pormenorizado del fenómeno en cuestión. Se determinaron sus orígenes, condicionantes y consecuencias.
- Se determinó el enfoque más adecuado para analizar la ferroresonancia: la teoría de sistemas no lineales y caóticos. Se estudió profundamente ésta rama de la física a efectos de adquirir el conjunto de conocimientos necesarios para abordar la materia.
- Se tuvo un primer acercamiento al estudio de los transitorios electromagnéticos a través de la utilización del ATPDraw (Preprocesador gráfico de ATP)
- Se avanzó en el estudio de la simulación de transitorios electromagnéticos a través del aprendizaje en forma autodidacta del funcionamiento de ATP-EMTP. Sobre este particular cabe mencionar la gran cantidad de conocimientos adquiridos, que me han permitido ganar un profundo entendimiento sobre el funcionamiento de las redes eléctricas de potencia, los transitorios electromagnéticos en general y las técnicas de modelización y simulación por computadora, etc.
- Se estudiaron las técnicas más adecuadas para efectuar la simulación de la ferroresonancia mediante ATP-EMTP, acorde a los datos usualmente disponibles en las bases de datos de las empresas distribuidoras. Se puso especial énfasis a la determinación de los modelos de línea y transformador que resultan más apropiados para la simulación del fenómeno.
- Se desarrolló una librería de transformadores acorde a la legislación nacional. Se obtuvieron diferentes modelos con diferentes curvas de saturación.
- Se trabajó sobre un caso de ferroresonancia real ocurrido sobre la red de una empresa cooperativa de la zona de influencia de la UNMDP. Se estudiaron las técnicas de simulación más apropiadas a efectos de intentar replicar el fenómeno ocurrido. Nuevamente se hizo especial hincapié en el análisis y validez de los modelos de líneas y de transformadores implementados. Se utilizaron los

modelos de transformadores desarrollados previamente. Se concluyó que el fenómeno ocurrido efectivamente puede haber sido ferroresonancia.

- Se realizaron exhaustivos procesos de validación, acorde a las limitaciones propias de los recursos disponibles, que permitieron ganar cierto nivel de confianza en los resultados obtenidos.
- Se estudiaron las técnicas más convenientes para establecer una vinculación entre ATP-EMTP y MATLAB.
- Se desarrollaron los métodos de vinculación entre ATP-EMTP y MATLAB.
- Se desarrolló una herramienta computacional para el estudio de la ferroresonancia desde el punto de vista de los sistemas no lineales, aprovechando las técnicas de vinculación desarrolladas entre ATP-EMTP y MATLAB. Se incorporó a LabVIEW como entorno gráfico de comunicación con el usuario.
- Se aplicó la herramienta desarrollada al estudio de un caso de ferroresonancia hipotético, con un transformador acorde a la normativa vigente y una línea utilizada por una empresa distribuidora de la zona de influencia de UNMDP
- Se estudió profundamente el caso indicado, demostrándose la gran sensibilidad de la ferroresonancia a las condiciones iniciales y a los parámetros de la red. En este particular, vale la pena mencionar que se estableció por primera vez una relación directa entre la ocurrencia de la ferroresonancia y las condiciones climatológicas al momento de ocurrir la apertura de las fases. Tal relación se establece a través de la variación en la altura de los conductores.

### B. Grado de Cumplimiento del Plan de Trabajo

El plan de trabajo se ha cumplido en su totalidad. Sin embargo vale la pena mencionar que el objetivo primitivo de generar una metodología capaz de predecir ferroresonancia en base a los datos que usualmente disponen las empresas distribuidoras de energía resulta ser una tarea monumental y de una dificultad formidable. La cantidad y complejidad de los desafíos a superar para lograr tal cometido hacen que no sea aventurado enunciar que aquella persona que lo consiga habrá resuelto en gran medida la mayor parte de los problemas abiertos de la simulación de transitorios electromagnéticos. La extrema sensibilidad de la ferroresonancia a los parámetros del sistema y la gran dificultad que conlleva determinar estos parámetros en forma precisa en base a los datos usualmente disponibles, hace que la predicción de la ferroresonancia continúe siendo prácticamente imposible.

### C. Objetivos Alcanzados

Teniendo en cuenta las consideraciones realizadas previamente se puede decir que se han alcanzado satisfactoriamente los objetivos planteados en el plan de trabajo:

- Analizar los factores que conlleven a la ocurrencia de la ferroresonancia en sistemas de distribución del tipo rural,

teniendo en cuenta la tipología de redes locales.

- Analizar el comportamiento de la red en cuanto a la presencia de la ferresonancia, en función de su topología y maniobras de operación, con la asistencia de programas de simulación de sistemas eléctricos de potencia.
- Elaborar una metodología que permita la predicción de la ferresonancia basada en información almacenada en los sistemas de las empresas distribuidoras.
- Brindar recomendaciones pertinentes para tratar de eliminar o mitigar las consecuencias del fenómeno de ferresonancia.

#### *D. Hipótesis Confirmadas o Refutadas*

La hipótesis básica ha sido confirmada:

- En los sistemas de distribución de energía eléctrica locales existen las condiciones necesarias para la aparición de sobretensiones a causa de ferresonancia.

La segunda hipótesis ha sido confirmada solo parcialmente:

- Información almacenada en base de datos de distribuidoras de energía eléctrica puede ser utilizada para el análisis de las condiciones que llevan a la ferresonancia.

Esta última hipótesis requiere de un análisis detallado. Sin duda la información almacenada en las bases de datos de las empresas distribuidoras constituye un elemento fundamental para el estudio de la ferresonancia y configura en gran medida la fuente principal de datos a utilizar. Desde este punto de vista la hipótesis es confirmada. Sin embargo, si lo que se pretende es poder determinar la posible aparición de ferresonancia utilizando únicamente la información disponible en dichas bases, la hipótesis debe refutarse de pleno. Como ya se ha mencionado, el nivel de confianza de los resultados obtenidos decrece rápidamente a medida que aumenta la incertidumbre de los parámetros utilizados para simular ferresonancia. El estado del arte actual no es de modo alguno capaz de predecir ferresonancia en base a los pocos datos generalmente disponibles.

#### *E. Métodos y Técnicas Empleados*

Los métodos y técnicas empleados se pueden resumir de la siguiente manera:

- Selección y estudio de la bibliografía de ferresonancia.
- Modelado de redes de distribución eléctrica mediante el ATP-EMTP.
- Validación de los modelos utilizados en las simulaciones para representar los componentes de la red.
- Desarrollo de una librería de transformadores acorde a la normativa local.
- Simulación de redes de distribución eléctrica mediante el ATP-EMTP.
- Establecimiento de una método de vinculación entre ATP-EMTP y MATLAB.
- Utilización de LabVIEW como entorno gráfico de la herramienta desarrollada.