

# MODELADO Y SIMULACIÓN DEL CIRCUITO GENERADOR DE IMPULSOS PARA EL ENSAYO DE TRANSFORMADORES

Francisco Carmona, Jorge E. Jiménez, Francisco Vázquez  
Dpto. de Informática y Análisis Numérico. Edif. Albert Einstein (C-2).  
Campus Rabanales. 14071. Córdoba, jjimenez@uco.es

## Resumen

El ensayo de impulso es uno de los más importantes de cuantos se realizan a los transformadores. Consiste en aplicar una descarga eléctrica de alta tensión y de corta duración sobre cada una de las bornas del transformador. La forma de la onda depende de los elementos pasivos del circuito y de la carga inicial de unos condensadores. Con el fin de que el régimen transitorio cumpla con las exigencias de la normativa, hay que ir probando valores de los distintos parámetros hasta obtener los adecuados. El proceso de cambio de parámetros, ensayo-error, es tedioso de realizar en la práctica porque los elementos son de un tamaño físico considerable y se ubican en una torre de varios metros de altura, debiendo cambiarse de forma manual. Se propone en este documento una metodología que permite calcular los parámetros manipulables del circuito haciendo uso de herramientas informáticas.

**Palabras Clave:** Transformador, ensayo, impulso, EcosimPro, optimización.

## 1 INTRODUCCIÓN

Existen numerosos ensayos que se aplican a los transformadores de potencia, cada uno con un objetivo particular. El ensayo de impulso imita los efectos de un rayo eléctrico procedente de una tormenta que cae sobre las líneas de distribución conectadas al transformador. Los organismos de normalización, como son IEC (del inglés International Electrotechnical Commission) o IEEE (del inglés International Electrical and Electronic Engineering), han definido la forma de onda estándar de la tensión que debe ser aplicada a las bornas del transformador. Existen diferentes tipos, pero las más importante es la *onda completa* mostrada en Figura 1, porque las demás se derivan de ésta.

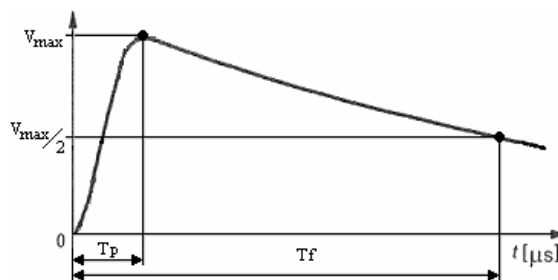


Figura 1: Onda completa de los ensayos de impulso.

El valor máximo de tensión se suele denominar BIL (del inglés Basic Impulse Level), pero su valor no afecta a la forma de onda, solo a la amplitud. Cada normativa proporciona ciertos valores posibles, en función de la tensión nominal de las bornas del transformador.

Alcanzar esta forma de onda es prácticamente imposible porque cada transformador tiene diferentes características. Por tanto las diferentes normativas proporcionan tolerancias de acuerdo con los dos puntos que identifican la onda: el tiempo de pico  $t_p$  hasta alcanzar el valor máximo y el tiempo de cola  $t_f$  cuando la tensión se reduce al 50% del valor de pico. De esta manera, la forma de onda a obtener se caracteriza por:

- Frente:  $t_p = 1,2 \mu s$  con tolerancia  $\pm 30\%$
- Cola:  $t_f = 50 \mu s$  con tolerancia  $\pm 20\%$

No obstante estas restricciones no siempre se alcanzan en la práctica, por lo que existen otras condiciones complementarias para cuando las anteriores no se consiguen.

La ecuación matemática de la forma de onda es la indicada en (1), donde los coeficientes  $A$ ,  $\alpha$  y  $\beta$  pueden calcularse a partir de los datos de la curva; es decir, de su amplitud, tiempo de pico y de cola..

$$V(t) = A \cdot (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

El aspecto del impulso en los terminales del transformador depende del circuito eléctrico usado para el ensayo, que se comenta en el siguiente apartado, donde existen ciertos parámetros cuyo valor es fijo y otros que son manipulables. Cada uno afecta a la onda, por lo que es necesario escoger los valores adecuados para cada transformador que cumplen con las tolerancias.

Los elementos que forman el circuito eléctrico necesario para el impulso se colocan en un dispositivo de tamaño considerable. Es necesario un operario situado en un montacargas para cambiarlos. Por tanto el procedimiento manual de ensayo-error para averiguar los valores apropiados es muy lento en la práctica.

Así pues es interesante comprobar el comportamiento del circuito para diferentes valores de los parámetros manipulables. Para ello, puede implementarse una metodología que se encargue de calcularlos haciendo uso de herramientas informáticas.

En este documento se describe cómo es posible implementar una metodología. En principio se detalla el modelo eléctrico del sistema que incluye el generador, transformador, divisor e influencias de los cables de conexión. Después se examina el problema en términos matemáticos con el fin de exponer las posibles vías para resolver el problema. A continuación se expone el proceso que se ha seguido para implementar la metodología y las herramientas informáticas que se han usado.

## 2 ESQUEMA ELÉCTRICO

En Figura 2 se muestra el circuito eléctrico necesario para realizar el ensayo. Como puede verse, está dividido en cuatro bloques que se describen en las siguientes secciones. Este circuito es una aproximación, ya que existen otros efectos difíciles de modelar pero que son menos relevantes:

- **Conexión a tierra:** las inductancias de los cables de conexión representan una impedancia significativa debido a las altas frecuencias a las que se produce el impulso. Las corrientes del impulso poseen elevadas amplitudes que pueden desembocar en grandes diferencias de potencial, produciendo condiciones desfavorables. Así pues, la conexión a tierra del laboratorio de ensayos se diseña siguiendo reglas básicas que incluyen características que afectan al sistema, como la inductancia de las interconexiones y la resistencia y capacidad de la toma de tierra.

- **Lazos de Corriente:** debido a los lazos de alta corriente que se producen cerca de los dispositivos de

medida, éstos no poseen un comportamiento ideal en los regímenes transitorios de alta frecuencia.

- **Compatibilidad Electromagnética:** existe un campo electromagnético debido a las elevadas corrientes que se producen durante el impulso. Su distribución no es uniforme debido a los ángulos que forman las uniones de los cables. Este efecto es significativo puesto que el resultado del ensayo depende del lugar donde se localicen los dispositivos.

- **Otros:** los niveles de tensión tan elevados (del orden de MV) y las descargas parciales que se producen durante el impulso, afectan al comportamiento lineal del sistema.

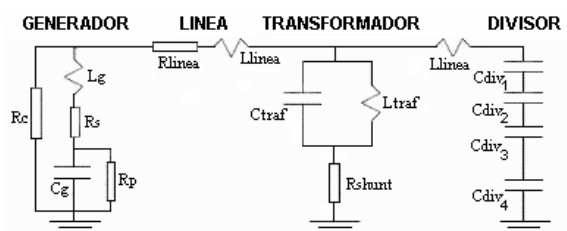


Figura 2: Circuito usado para los ensayos de impulso.

### 2.1 GENERADOR DE IMPULSOS

El generador de impulso suele ser el tipo Marx, denominado así porque fue diseñado en 1923 por el profesor Edwin Marx en Braunschweig, Alemania. Básicamente consiste en un conjunto de condensadores que se cargan en paralelo y se descargan serie. De esta manera, la tensión de salida será la suma de las existentes en los condensadores individuales.

Su equivalente eléctrico es el representado en el primer módulo de Figura 2 pero en realidad está compuesto por una torre vertical que engloba varios pisos, cada uno de los cuales está formado por condensadores, resistencias y esferas de conexión. Estas últimas son las encargadas de cambiar de la carga a la descarga mediante el flujo o no de la corriente a través de ellas. Se trata, por tanto, de una red eléctrica en la cual pueden cambiarse las resistencias y conectarse los pisos en serie o paralelo con el fin de modificar la tensión de salida de la misma. Los valores de los elementos de cada piso deben ser iguales ya que en caso contrario las tensiones de cada piso no podrían sumarse, siendo muy difícil poder configurarlo. Los parámetros de cada piso son:

- $r_p$ : resistencia paralelo de cada piso.
- $r_s$ : resistencia serie de cada piso.
- $r_c$ : resistencia de carga conectada entre pisos .
- $c_s$ : capacidad del condensador de cada piso.
- $l_g$ : inductancia serie parásita de cada piso.

- $V_{cgo}$ : carga inicial de cada condensador.

En el esquema equivalente agrupando los pisos se tienen los siguientes parámetros:

- $n$ : número de pisos conectados en serie.
- $m$ : número de pisos conectados en paralelo.
- $R_p$ : resistencia paralelo total.
- $R_s$ : resistencia serie total.
- $R_c$ : resistencia de carga total.
- $C_g$ : capacidad total del generador.
- $L_g$ : inductancia total del generador.
- $V_{cgo}$ : carga inicial de los condensadores.

Las ecuaciones necesarias para obtener el valor referido al generador, usando parámetros de cada piso, son las enumeradas de (2) a (6).

$$R_p = n \cdot r_p \quad (2)$$

$$R_s = n \cdot r_s \quad (3)$$

$$R_c = (n - 1) \cdot r_c \quad (4)$$

$$L_g = n \cdot l_g \quad (5)$$

$$C_g = m \cdot c_g / n \quad (6)$$

Estas ecuaciones pueden variar según datos de catálogo del generador. Hay que indicar lo siguiente:

- La resistencia de carga en este caso no existe si sólo hay un piso conectado en serie, pasando a ser circuito abierto pero no cortocircuito, que es lo que se deriva de usar (4) si no se tiene en cuenta.

- La inductancia parásita se ha considerado en serie con  $r_s$ , pero en realidad su modelo no está claro y podría dispersarse por distintas partes del piso.

- El parámetro  $n$  de las ecuaciones (2) a (5) podría estar dividido por  $m$  para otros generadores.

## 2.2 LÍNEA

Es frecuente conectar elementos para el ajuste del impulso en serie entre el generador y la borna del transformador y en paralelo con alguno de los dos dispositivos, de ahí que a este bloque también se le suele denominar circuito de control de la forma de onda.

La inductancia  $L_{linea}$  de Figura 2 es parásita y existe por el mero hecho de usar un cable para unir el generador con el transformador. Depende de las características y de la longitud del cable, alrededor de 1  $\mu$ H por cada metro, pero el tamaño de los

dispositivos empleados (transformador, divisor y generador) hace que deban usarse varios metros. Como puede verse, existen dos inductancias  $L_{linea}$  debido a las dos uniones que existen en el circuito.

Esta inductancia provoca oscilaciones de alta frecuencia en la forma de onda del impulso puesto que existen dos dispositivos con propiedades capacitivas. Por tanto es preferible usar un cable tan corto como sea posible, puesto que a mayor longitud más oscilatoria es la respuesta. Al ser inevitable usar varios metros de cable, se añade la resistencia  $R_{linea}$  para atenuar las oscilaciones a la entrada del transformador. A veces es necesario también conectar una pequeña resistencia  $R_d$  de varios cientos de ohmios entre el transformador y el divisor para amortiguar la oscilación de ese lado del circuito.

Como se puede ver en Figura 2, no se han considerado elementos conectados en paralelo ni la resistencia  $R_d$  entre el transformador y divisor.

## 2.3 TRANSFORMADOR

No existe un modelo general para transformadores de potencia, depende de su utilidad. Para el análisis es común un modelo equivalente en forma de red que se construye a partir de elementos discretos de inductancias y capacidades. Se asume que estos elementos poseen características pasivas y lineales. La topología de la red y el tamaño de los elementos dependen de la geometría y propiedades del transformador.

Una implementación de un modelo que considere los datos por arrollamientos provocaría una ralentización excesiva durante la optimización que se va a implementar, puesto que se resuelve por métodos numéricos iterativos. Además, el modelo de altas frecuencias se usa para el análisis, en la fase de diseño, de la distribución de tensiones y esfuerzos debidos a los impulsos que debe de soportar.

Por tanto, para el objetivo de este estudio, puede y debe usarse un modelo más simple. Una capacidad en paralelo con una inductancia es el mostrado en la Figura 2. Los valores de ambos elementos tienen que estar referidos a altas frecuencias, considerándolos totales entre la borna ensayada y la tierra.

Durante el ensayo de impulso se mide el valor de la corriente que circula por el transformador para saber si existen fallos. Para ello se coloca una resistencia denominada  $R_{shunt}$  entre la tierra y el resto de las bornas. Aunque su utilidad práctica sea la medición, modifica el comportamiento del circuito, por lo que es posible escoger diferentes valores para obtener una respuesta u otra. Los organismos de estandarización

proporcionan límites superiores para esta resistencia: 450  $\Omega$  de acuerdo con IEEE y 400  $\Omega$  según IEC.

## 2.4 CIRCUITO DE MEDIDA

El circuito de medida de tensión del impulso debe reproducir la amplitud y forma de la onda del impulso a una tensión reducida con la mayor exactitud posible. Los componentes básicos que lo forman son conexiones de alimentación, divisor de tensión, cables de medida de tipo coaxial con resistencias de terminación y un sistema de registro.

La onda de tensión debe reducirse a un nivel que pueda ser medido por el sistema de registro, para lo que se utiliza un divisor de tensión. Éste es el componente que tiene mayor influencia en la forma de onda del impulso, el cual consiste en una primera impedancia  $Z_1$  y una segunda  $Z_2$  que definen la relación de reducción de la amplitud. Existen distintos diseños de divisores de tensión (fabricados de resistencias, capacidades o una combinación de ambas) que se utilizan según la forma del impulso que se necesite, ya que no siempre será la *onda completa*, pero de forma general suelen emplearse divisores capacitivos donde las impedancias son condensadores como se muestra en Figura 2.

Las características de los cables de mediada y del sistema de registro (osciloscopio) son propias de cada fabricante, pero su influencia es mínima y depende mucho de su antigüedad.

## 3 ANÁLISIS MATEMÁTICO

Basándose en el modelo eléctrico, va a explicarse el problema de configurar el circuito de ensayos de impulso en términos matemáticos.

El fin de encontrar la solución al valor de los parámetros es no tener que resolver el problema de forma práctica, donde se estaría ejecutando una secuencia tal que se eligen unos parámetros y según el resultado se prueban otros, labor que para este caso concreto es muy lenta y tediosa.

Es importante mencionar que lo que se pretende es estudiar un sistema de evolución libre ya que no existen entradas. Los datos son parámetros y condiciones iniciales (en este caso la tensión de carga un condensador) y la salida es una expresión directa de variables del sistema. En términos de variables de estado sería decir que no existe la matriz B ni D y la salida es única, por tanto C es un vector.

Se desea saber la configuración idónea de la red; es decir, obtener el valor de los parámetros para que la salida posea una forma específica. Al no haber

variables de entradas la solución de este problema desde el punto de vista de control óptimo no es posible ya que no habría ningún elemento sobre el que actuar de forma continua o discreta. La complejidad radica en que sólo se puede actuar sobre algunos parámetros manipulables.

Las ecuaciones que describen el funcionamiento de los elementos eléctricos son siempre diferenciales lineales de primer orden para cada inductancia o condensador. Por tanto se puede asegurar que el sistema es resoluble pudiendo así obtener la variable deseada (o salida) a partir de los datos. Sería posible pensar en obtener una resolución analítica. De esta forma se tiene una complejidad muy elevada ya que se obtendría la familia de curvas de salida en función de todos los parámetros de la red. Al ser tantas variables, esta labor, aparte de tediosa, puede no ser conveniente ya que las expresiones de su valor serían muy complejas.

Para resolver el problema hay que obtener en primer lugar el valor de las variables del sistema en función de los parámetros. Posteriormente se debe despejar el valor de éstos ya que la salida es una variable conocida y, por tanto pasaría a tratarse como un dato. Pueden darse dos situaciones conflictivas: que obtener la solución al sistema de ecuaciones diferenciales sea muy compleja de forma analítica y que no sea posible despejar los parámetros debido a las complicadas igualdades que impone la salida: variables dependientes del tiempo en todo el sistema de ecuaciones. Resolver este último problema de forma numérica, mediante algoritmos dedicados a la resolución de sistemas de ecuaciones, puede ser imposible porque no está garantizado que exista una solución exacta.

Como se ha descrito, se presenta muy complicado o imposible expresar de forma analítica la curva de salida del sistema (tensión en la borna del transformador) a partir de los parámetros eléctricos de la red, ya que se está intentando obtener las condiciones iniciales y parámetros necesarios para una salida específica.

Por tanto, para resolver el sistema de forma analítica sería necesario simplificar el circuito. De esta manera los resultados pueden no ser fiables, y además otro inconveniente es la imposibilidad de modelar influencias no necesariamente de tipo eléctrico. En consecuencia, en la resolución numérica que se propone en el apartado siguiente, será interesante plantear la metodología de forma que se pueda crear un modelo de complejidad creciente que sea mejorable a partir de datos experimentales.

## 4 RESOLUCIÓN NUMÉRICA

Como se ha comentado en el apartado anterior, la tensión a analizar es una variable del modelo del sistema, que se desea cumpla con unas restricciones exigidas por normativas; es decir, se parezca lo más posible a una gráfica concreta. Para poder estimar la diferencia de ambas según el juego de parámetros con el que se desee probar, es necesario simular el sistema de ecuaciones del modelo. Por lo tanto es necesario el uso de varias herramientas numéricas, entre ellas la de integración.

Para la estimación de parámetros, de forma que la salida sea la correcta, es preciso recurrir a técnicas de optimización. Como es sabido, se trata de algoritmos iterativos que tratan de hallar el valor de las variables de decisión (parámetros del sistema) con el objeto de maximizar o minimizar una determinada función objetivo. Se tendría por tanto un esquema como el de Figura 3.

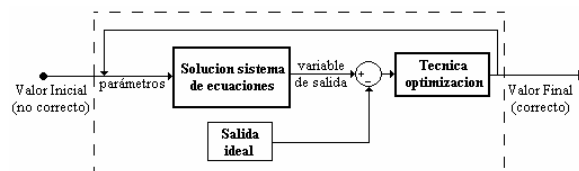


Figura 3: Esquema de la estrategia para obtener el valor adecuado de los parámetros.

Existen dos posibles formas de implementar mediante software esta metodología:

a) Una *implementación integrada*, que haga uso de un único programa informático que pueda resolver sistemas de ecuaciones y realizar optimización. En él se desarrollaría todo el proceso. Las ventajas principales son la simplicidad por ser un software único y la mayor consistencia en los enlaces entre las diferentes aplicaciones a usar.

b) Una *implementación enlazada*, usando programas independientes para el modelado, para la optimización y para la representación de resultados. Un posible esquema de la estructura de esta implementación se muestra en Figura 4. Se podría hacer uso de programas que desarrollen más de un apartado, por ejemplo el núcleo y el entorno. También es posible dividir los bloques en más de uno, por ejemplo, que el modelado y la resolución sean secciones independientes.

La gran ventaja del segundo tipo de implementación es el empleo de herramientas específicas para la resolución de cada subproblema, mientras que el mayor inconveniente es la comunicación o interacción entre dichas herramientas, cuestión que

debe ser solventada por el programador para el desarrollo de una aplicación concreta.

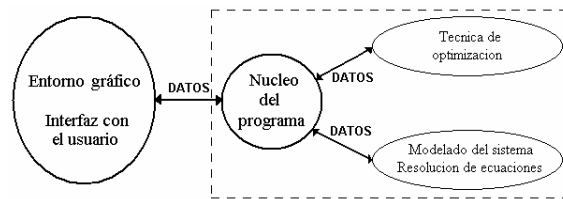


Figura 4: Esquema de una estructura posible para la implementación enlazada.

La opción elegida fue la segunda de las anteriores, empleando software independiente para cada uno de los bloques de Figura 4. A partir de estas herramientas se construyó una aplicación, integrada por los siguientes bloques funcionales:

### 4.1 MODELADO Y SIMULACIÓN

En primer lugar se ha de implementar un bloque que resuelva de forma numérica el conjunto de ecuaciones diferenciales del modelo, para cualquier valor de los parámetros. La herramienta elegida fue EcosimPro, de la compañía E. A. International. Las razones para su elección fue la posibilidad de realizar simulaciones de modelos orientados a objetos (lo que permite simular modelos de complejidad creciente constituidos por sistemas de DAEs) y la generación eficiente de código de simulación de cada modelo en C++, que puede ser enlazado con otras librerías escritas en este lenguaje u otras herramientas que lo generen o integren. En Figura 5 se muestra el circuito implementado en EcosimPro a partir de la librería eléctrica, el cual se simula a partir de las ecuaciones de funcionamiento de sus componentes.

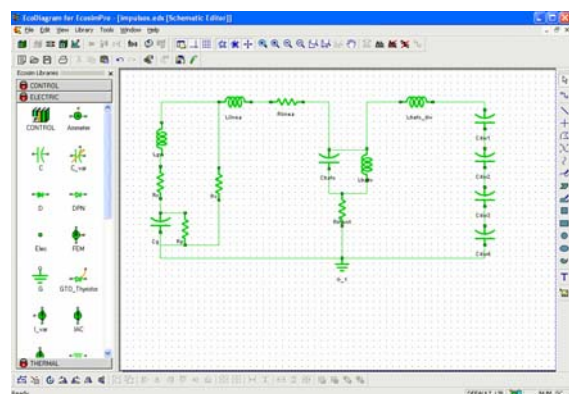


Figura 5: Modelo eléctrico creado en EcosimPro.

### 4.2 NÚCLEO

El núcleo es el motor de cálculo numérico de la aplicación. Se ha desarrollado en C++ por la velocidad de ejecución del código compilado y

porque, de esta forma, se consiguen integrar plenamente las herramientas de optimización y de simulación.

### 4.3 OPTIMIZACIÓN

Este bloque trata de calcular el valor idóneo de los parámetros para conseguir que la variable de salida cumpla con las tolerancias exigidas en la normativa.

Para una eficaz optimización es necesaria una adecuada elección de la función objetivo y del algoritmo a usar, aspectos que se describen en los siguientes subapartados. También hay que imponer las restricciones oportunas, que serán los límites superiores e inferiores para los elementos eléctricos pasivos. Además se incluye otra restricción no-lineal que se deriva del uso de bloques en serie y en paralelo ya que el total, que es la multiplicación de ambos, no debe de sobrepasar cierto límite.

#### 4.3.1 Función objetivo

En este caso particular se pretende igualar la tensión de salida a una ideal que se especifica. Se podría pensar en utilizar el método de mínimos cuadrados del error producido, que era válido en su versión más simple pero fue necesario modificarlo para una mejor optimización. Los pasos que se siguieron hasta llegar a la función objetivo definitiva fueron:

1. Una posibilidad es minimizar alguna medida de distancia entre la localización de los puntos ideales y los obtenidos, ponderada según la escala de cada eje. Esta idea hizo pensar en primar más, de forma discreta, la parte de los puntos característicos que toda la gráfica.

2. Después de probar distintos pesos para partes de la gráfica, se llegó a la conclusión de que es mucho más importante la cresta que la cola. Se debe a que el error acumulado durante la cresta es pequeño respecto a la cola, por ser menos instantes de tiempo.

3. La ponderación mejoraba si se multiplicaba de forma distinta cada punto del error; es decir, dependiente del instante de tiempo. Se tenía por tanto una ponderación “continua” donde pesaba más el intervalo del tiempo de pico que el de cola.

4. Es la gráfica ideal la que mejor ponderaba la función de coste: cada instante del error se multiplicaba por el valor de la salida ideal en ese instante.

5. La optimización seguía pesando mucho la cola, por lo que para mejorarla se disminuyó su valor. Para ello se normalizó la salida ideal (el máximo era la unidad) y se elevó exponencialmente cada punto. Así la cola no pesaba demasiado poco ni en exceso.

6. El error producido poseía dimensiones muy elevadas, del orden de miles de millones, lo que dificultaba el cálculo por parte del algoritmo de optimización. Se solucionó introduciendo un factor que disminuya todo el error a una escala adecuada.

7. En cada paso de la optimización se necesitan los resultados de EcosimPro para calcular la función objetivo, donde van variando los parámetros manipulables del circuito. Se producía un error debido a que existen ciertos valores de los elementos pasivos de la red eléctrica con los que no se puede simular, como el cero en los condensadores. Aunque eran a su vez restricciones, la optimización podía pedir su coste en la función objetivo con el fin de hacer cálculos internos. Para solucionar esto se introdujeron eventos discretos: asignar un valor muy elevado a la función para los parámetros imposibles sin llegar a simular.

8. Otro evento discreto que se introdujo, para mejorar la optimización, fue disminuir el coste de la función objetivo cuando se cumplan las tolerancias exigidas en la normativa. De esta manera se pueden ponderar cuantas características adicionales se deseen añadir a las tolerancias.

#### 4.3.2 Algoritmo a emplear

Los algoritmos de los que se ha dispuesto son de búsqueda de mínimos locales. El inconveniente principal de éstos es la necesidad de disponer de un punto inicial a partir del cual buscar el óptimo, por lo que puede suceder que la solución sea la mejor entre las cercanas pero no la global. En este apartado se va a explicar qué algoritmo se ha usado.

Se pretende implementar una optimización de varias variables, pertenecientes a un modelo regido por un sistema de ecuaciones diferenciales, donde se incluyen límites para las variables y una restricción no-lineal. El uso de un método que acepte estas características posibilita ampliaciones en el modelo de complejidad creciente que se pretende elaborar.

Una propiedad que caracteriza a los algoritmos es el uso de jacobianos y gradientes que expresan, de manera simbólica, el valor de las derivadas de la función objetivo y de las restricciones en cada instante. Estos valores pueden ser solicitados de forma explícita por el algoritmo o estimarse a partir de diferenciación de evaluaciones de la función. En este caso particular no son posibles de calcular, ya que serán dependientes del resultado del modelo en EcosimPro, y hacer aproximaciones precisas, además de la complejidad que conlleva, no es conveniente porque se limitarían posibles ampliaciones. Por tanto

hay que escoger algún algoritmo que sea capaz de estimar los jacobianos y gradientes.

Esta condición, junto con la de incluir una restricción no-lineal, limita mucho las posibilidades de elección entre distintos algoritmos. El más conveniente para este caso, según la bibliografía trabajada y las posibilidades de la librería C de NAG, es el SQP (del inglés Sequential Quadratic Programming) denominado método de programación secuencial cuadrática.

#### 4.4 ENTORNO GRÁFICO

Visual Basic es el programa elegido para generar la interfaz con el usuario y el entorno gráfico debido a su mayor compatibilidad con Visual C++, por ser ambos programas del paquete software Microsoft Visual Studio. Éste no es un punto crucial del desarrollo de la aplicación, por lo que su uso es perfectamente válido a pesar de que puedan existir otros con más potencia.

El entorno gráfico debe proporcionar al usuario las opciones adecuadas para un correcto uso de las funciones a implementar. En este sentido debe permitir modificar los parámetros manipulables, realizar simulaciones, optimizar, obtener los puntos de las gráficas, visualizarlas y abrir y guardar archivos con todos los datos necesarios.

## 5 RESULTADOS

Siguiendo las indicaciones anteriores, se ha elaborado una aplicación para simular el circuito y obtener los parámetros óptimos. La ventana principal con la interfaz gráfica se muestra en Figura 6.



Figura 6: Ventana principal de la interfaz gráfica.

Desde ella se puede acceder a otra donde modificar los parámetros fijos del circuito y otras características. Para los resultados obtenidos, que se

muestran a continuación, se han usado los siguientes datos comunes:

- Inductancia del generador:  $L_g = 5 \mu\text{H}/\text{banco}$
- Capacidad del generador:  $C_g = 0,5 \mu\text{F}/\text{banco}$
- Resistencia de carga:  $R_c = 2000 \Omega/\text{banco}$
- Número de bancos del generador:  $N_{\text{bancos}} = 18$
- Tensión máx. de carga:  $MV_{\text{gen}} = 200 \text{ kV}/\text{banco}$
- Inductancia del cable:  $L_{\text{linea}} = 0,1 \mu\text{H}/\text{m}$
- Longitud del cable:  $long_{\text{linea}} = 15 \text{ m}$
- Capacidades del divisor:  $C_{\text{div}1} = C_{\text{div}2} = C_{\text{div}3} = 5,65 \text{ nF}$  y  $C_{\text{div}4} = 1239 \text{ nF}$

Los parámetros de integración son:

- Tiempo de inicio:  $t_{\text{ini}} = 0 \mu\text{s}$
- Tiempo de finalización:  $t_{\text{fin}} = 100 \mu\text{s}$
- Tiempo de paso:  $t_{\text{paso}} = 0,1 \mu\text{s}$

Por defecto se tendrán los siguientes parámetros variables, que servirán como punto de inicio para la optimización:

- Bancos conectados en serie:  $N_{\text{serie}} = 4$
- Bancos conectados en paralelo:  $N_{\text{paral}} = 2$
- Resistencia shunt:  $R_{\text{shunt}} = 200 \Omega$
- Tensión de carga:  $V_{\text{Cgo}} = 150 \text{ kV}/\text{banco}$
- Resistencia serie:  $R_s = 12 \Omega/\text{banco}$
- Resistencia paralelo:  $R_p = 160 \Omega/\text{banco}$
- Resistencia de línea:  $R_{\text{linea}} = 70 \Omega$

Todos los resultados se muestran junto a la salida ideal y la que proporciona el punto inicial para la optimización. Por tanto se representarán tres señales en la misma imagen, donde el color azul indica la ideal, el rojo la salida para los valores anteriores y el verde la óptima obtenida. Podría darse el caso de tener que elevar un poco la tensión de carga para que las gráficas coincidan, lo que no sería problema porque no afecta a los tiempos.

### 5.1 EJEMPLO PRIMERO

Si el valor de los parámetros del transformador es  $C_{\text{trafo}} = 2,55 \text{ nF}$  y  $L_{\text{trafo}} = 10 \text{ mH}$ , se obtienen las gráficas mostradas en Figura 7. Los parámetros que consiguen obtener este resultado son:

- $N_{\text{serie}} = 5$
- $N_{\text{paral}} = 3$
- $R_{\text{shunt}} = 188,33 \Omega$
- $R_s = 0 \Omega/\text{banco}$
- $R_p = 501,76 \Omega/\text{banco}$
- $R_{\text{linea}} = 74,92 \Omega$
- $V_{\text{Cgo}} = 128,268 \text{ kV}/\text{banco}$

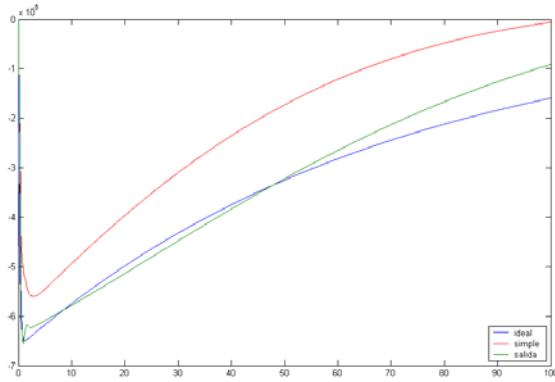


Figura 7: Resultados del primer ejemplo.

Los tiempos característicos para los valores iniciales eran:  $t_p = 2,8 \mu s$  y  $t_f = 33,9 \mu s$ . Después de la optimización son:  $t_p = 0,9 \mu s$  y  $t_f = 49,1 \mu s$ .

## 5.2 EJEMPLO SEGUNDO

La finalidad de este ejemplo es demostrar que un aumento del valor de  $C_{trafo}$  produce un tiempo de pico más lento. Si en el ejemplo anterior se modifica  $C_{trafo} = 7,75 \eta F$ , se obtienen las gráficas mostradas en Figura 8 y los siguientes parámetros:

- $N_{serie} = 4$
- $N_{paral} = 2$
- $R_{shunt} = 207,17 \Omega$
- $R_s = 2,07 \Omega/\text{banco}$
- $R_p = 538,83 \Omega/\text{banco}$
- $R_{linea} = 37,99 \Omega$
- $V_{cgo} = 160,122 \text{ kV}/\text{banco}$

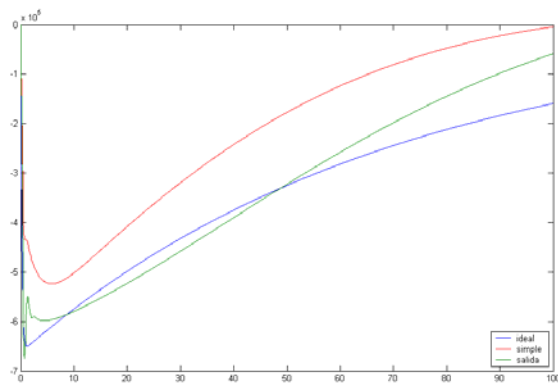


Figura 8: Resultados del segundo ejemplo.

Los tiempos para los valores iniciales eran:  $t_p = 5,8 \mu s$  y  $t_f = 37,3 \mu s$ . Aplicada la optimización pasan a valer:  $t_p = 0,7 \mu s$  y  $t_f = 47,8 \mu s$ .

Como puede verse, el óptimo se puede calcular, pero la aproximación que se consigue no es muy exacta. Se debe a que  $7,75 \eta F$  es muy elevado para  $C_{trafo}$ .

## 5.3 EJEMPLO TERCERO

Ahora se va a exhibir cómo un aumento en  $L_{trafo}$  produce una respuesta temporal en la cola más constante. Si en el primer ejemplo se cambia  $L_{trafo} = 20 \text{ mH}$ , se obtienen las gráficas mostradas en Figura 9 y los siguientes parámetros:

- $N_{serie} = 4$
- $N_{paral} = 4$
- $R_{shunt} = 233,74 \Omega$
- $R_s = 0,52 \Omega/\text{banco}$
- $R_p = 67,55 \Omega/\text{banco}$
- $R_{linea} = 56,65 \Omega$
- $V_{cgo} = 163,035 \text{ kV}/\text{banco}$

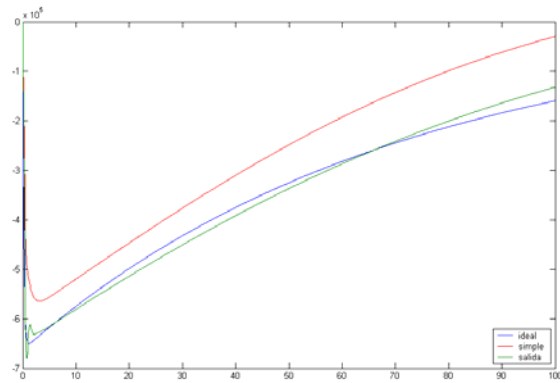


Figura 9: Resultados del tercer ejemplo.

Los tiempos para los valores iniciales eran:  $t_p = 3,1 \mu s$  y  $t_f = 44,4 \mu s$ . Concluida la optimización se obtienen:  $t_p = 0,8 \mu s$  y  $t_f = 49,4 \mu s$ .

Los efectos que produce la variación de la  $L_{trafo}$  son los más difíciles de atenuar. Con valores pequeños no se consigue mantener la cola durante el tiempo necesario, ya que al ser muy pequeña se asemeja a un cortocircuito. Cuando se poseen valores dispares de esta inductancia se actúa de otras formas, por ejemplo variando el circuito de ensayos.

## 6 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha desarrollado una herramienta que emplea una metodología basada en técnicas de simulación y optimización numéricas para la estimación de los parámetros, que equivalen a los elementos manipulables un circuito eléctrico, para el ensayo de impulso de un transformador conforme a la norma IEEE Std C57.98-1993. Dicha herramienta posee un interfaz gráfico (GUI) para una mejor interacción con el usuario.

La estrategia de optimización empleada es una variación de la suma de mínimos cuadrados, sobre



una función objetivo que tiene en cuenta la desviación de la salida del modelo matemático con la salida que debe tener el sistema según la norma.

Los resultados obtenidos mejoran las soluciones conseguidas con los procedimientos existentes a pie de fábrica (ensayo y error) permitiendo además, gracias al desarrollo de una herramienta software diseñada específicamente, el que un operador pueda calcular automáticamente los parámetros necesarios para el ensayo.

Como ampliación futura, puede realizarse un análisis más completo del circuito modelando más características y, por tanto, aproximándose más a la realidad. De esta forma, manteniendo la metodología, el proceso resulta fácilmente mejorable ampliando el modelo a partir de datos experimentales, cuya obtención es complicada. Usando nuevos y mejores métodos de optimización también se pueden conseguir resultados más adecuados ya que la optimización es local y funciona con números reales. Éste último problema impide usar correctamente la variable que es el número de bancos a colocar en serie o en paralelo e implementar valores fijos de resistencias, con sus posibles formas de conectarse en serie o en paralelo.

### Agradecimientos

Nos gustaría mostrar nuestro más sincero agradecimiento al personal de ABB Power Technology, S.A. (Fábrica de Córdoba) y, en especial, al Dr. D. José Ignacio Guisado por el planteamiento del problema y la documentación técnica facilitada.

### Referencias

- [1] ABB AG., (2003) Testing of Power Transformers. *Lightning impulse and switching impulse test*, pp. 161-198, Pro print GMBH, Düsseldorf.
- [2] Del Vecchio et al., (2002), IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 17, *Determining Ideal Impulse Generator Settings from Generator-Transformer Circuit Model*, pp 142-148
- [3] Guisado, J.I., (1966) Aportación al estudio de la protección de los transformadores contra descargas atmosféricas. Ensayos de impulso. Tesis Doctoral.
- [4] IEEE Std 4-1978, ANSI/IEEE Standard Techniques for High Voltage Testing.
- [5] IEEE Std C57.12.00-2000, IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed

Distribution, Power, and Regulating Transformers.

- [6] IEEE Std C57.12.90-1999 IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers.
- [7] IEEE Std C57.98-1993, IEEE Guide for Transformer Impulse Tests.
- [8] IEEE Std C57.138-1998, IEEE Recommended Practice for Routine Impulse Test for Distribution Transformers.
- [9] Microsoft Developer Network Library (MSDN) for Visual Studio 6.0.
- [10] <http://www.ecosimpro.com>
- [11] <http://www.nagclib.org>