

SIMULACIÓN DE TRANSITORIOS HIDROMECAÑICOS EN CENTRALES HIDROELÉCTRICAS UTILIZANDO *BOND GRAPHS*

Adair Martins¹, Geraldo Lúcio Tiago Filho² y Roberto Laurent³

¹ Departamento Ciencias de la Computación, FAEA, UNCo, Argentina
e-mail: amartins@uncoma.edu.ar

² Instituto de Recursos Naturais, UNIFEI, Brasil
e-mail: tiago@unifei.edu.br

³ Departamento de Electrotecnia, FI, UNCo, Argentina
e-mail: rlaurent@uncoma.edu.ar

Palabras clave: *Bond Graphs*, Simulación, Transitorios Hidromecánicos, Rechazo de Carga, Centrales Hidroeléctricas

Resumen. *En este artículo se presenta la simulación de transitorios hidromecánicos en centrales hidroeléctricas aprovechando las facilidades de modelado del intercambio de potencia entre los componentes del sistema y las analogías entre los subsistemas hidráulico, mecánico y eléctrico implícitas en la metodología de Bond Graphs. Se muestra como la tubería forzada puede ser representada como un circuito eléctrico y la turbina como un transformador no lineal. La efectividad de la metodología es validada a través de la simulación de un caso de rechazo total de carga de la central Santa Clara (Brasil). Los resultados obtenidos con Bond Graphs son comparados con las simulaciones realizadas con programas especializados.*

1 INTRODUCCIÓN

El fenómeno transitorio de variación de presión y de caudal que ocurre a lo largo de un conducto forzado ocasionado por la acción de una válvula u otro elemento de control del sistema hidráulico es denominado comúnmente golpe de ariete. El conocimiento de este fenómeno transitorio es fundamental para el dimensionamiento técnico y económicamente adecuado de los sistemas hidráulicos¹. En el caso de una central hidroeléctrica además de la variación de presión interesa la variación de velocidad del grupo turbina y generador, especialmente cuando ocurre un rechazo total de carga². Un rechazo total de carga significa abrir el interruptor principal del generador, lo que separa el generador de la red, por lo que la potencia mecánica de la turbina resulta en un aumento de velocidad de la unidad. El regulador de velocidad en este caso debe cerrar el distribuidor controlando el aumento de velocidad en el nivel garantizado y de ajuste de protecciones, pero la velocidad de cierre debe estar limitada para evitar que el aumento de presión supere también el nivel garantizado. En síntesis, es necesario optimizar el transitorio hidromecánico.

Uno de los métodos más utilizados para la simulación de transitorios hidráulicos es el denominado método de las características, introducido en la década de 1960 por Streeter¹. Las ecuaciones diferenciales parciales fundamentales de la cantidad de movimiento y de la continuidad que modelan una tubería, son expresadas en forma de diferencias finitas e integradas numéricamente. Los programas computacionales basados en este método resultan pocos flexibles y tienen la desventaja de estar limitados a casos particulares y de presentar dificultades para modelar la interacción entre los diferentes dominios de energía, por ejemplo: hidráulico, mecánico, eléctrico, etc., en una central hidroeléctrica. Su principal mérito es la precisión por considerar el conducto forzado con parámetros distribuidos.

Un método que no presenta estas limitaciones y que viene siendo utilizado en forma creciente en los últimos años para este fin es la técnica denominada en inglés *Bond Graphs* (BG)³⁻¹². Esta técnica de modelado y simulación de carácter universal se basa en el concepto de analogías entre sistemas de distinta naturaleza física con los sistemas eléctricos. Proporciona una visualización gráfica de las interacciones entre los distintos componentes del sistema y suministra implícita y sistemáticamente el modelado matemático del sistema en forma de variables de estado, facilitando el uso de recursos computacionales para la simulación, que se realiza directamente de esta representación gráfica. Existe actualmente un gran número de programas comerciales disponibles en el mercado que permiten usar este método. Entre los que poseen versiones *demo* disponibles en la *Web* se destacan 20-SIM, SYMBOLS2000 y POWERDYNAMO¹³. En este trabajo fue utilizado el programa 20-SIM por su facilidad de uso, bajo costo e interfaz amigable con el usuario.

A continuación se describe brevemente la técnica de BG y se discute su aplicación en el modelado de un sistema hidroeléctrico aislado compuesto por un embalse, conducto forzado, turbina, regulador de velocidad y carga. Se muestra la aplicación del modelo a la simulación de un rechazo total de carga en la central hidroeléctrica Santa Clara, Brasil¹². Los resultados son comparados con los obtenidos con el programa especializado SIPROHS de la empresa VOITH SIEMENS.

2 LA TECNICA DE *BOND GRAPHS*

Un modelo de *Bond Graphs* está formado por componentes o subsistemas conectados por enlaces o conexiones (*bonds*) que representan el flujo de potencia entre ellos. Con una media flecha se indica el sentido de la potencia que fluye y con una barra vertical (barra causal) la relación entre causa y efecto entre dos elementos. En esencia los BG capturan los fenómenos de intercambio de energía cuantificándolos instantáneamente de acuerdo a la potencia en juego en el sistema. La potencia $p(t)$ es obtenida por el producto de las dos variables: esfuerzo $e(t)$ y flujo $f(t)$. Esta técnica se basa en las analogías de los sistemas de distinta naturaleza física con los sistemas eléctricos, lo que permite la construcción de modelos complejos con sólo nueve elementos básicos. Estos elementos son los siguientes:

- Fuentes de potencia: fuentes de esfuerzo **Se** (tensión, presión, torque, fuerza etc.) y fuentes de flujo **Sf** (corriente, caudal, velocidad angular, velocidad lineal, etc.).
- Disipadores de potencia: resistores **R** (resistencia eléctrica, resistencia de fluido, fricción viscosa, etc.).
- Acumuladores de energía: capacitancia **C** (capacitancia eléctrica, capacitancia de fluido, momento de inercia, masa, etc.) e inertancia **I** (inductancia eléctrica, inertancia de fluido, rigidez recíproca de rotación o translación, etc.).
- Transductores: transformadores **TF** (transformador, pistón hidráulico, caja de engranajes, etc.) y giradores **GY** (generador y motor eléctrico, etc.). En general estos componentes acoplan sistemas de distinta naturaleza física, los transformadores se caracterizan por un módulo, relación de transformación, “**m**”, y los giradores por un módulo “**r**”.
- Vínculos: vínculo “**1**” (generalización de la Ley de Kirchhoff de tensiones) y vínculo “**0**” (generalización de la Ley de Kirchhoff de corrientes)

Los distintos componentes pueden ser modificados automáticamente durante la simulación para representar funciones del tiempo o no linealidades, en este caso se habla de componentes modulados. Por ejemplo: fuente modulada **MSe**, resistencia modulada **MR** y transformador modulado **MTF**.

Esta técnica es especialmente apta para modelar los componentes de un sistema entre los que existe flujo de potencia, por ejemplo: embalse (fuente de presión), conducto forzado, turbina, generador y transformador en una central hidroeléctrica, y se puede combinar con diagramas de bloques y otras técnicas para modelar los componentes donde interesa solamente el flujo de señales, por ejemplo: regulador de velocidad y de tensión en una central hidroeléctrica.

3 MODELO DEL SISTEMA HIDROELECTRICO AISLADO CON BG Y 20-SIM

Se considera aquí el caso particular de operación de un sistema hidroeléctrico aislado, o sea, sin líneas de interconexión con otros sistemas eléctricos. Esta condición es útil para

determinar el ajuste adecuado de algunos parámetros críticos del regulador de velocidad. Para la mayoría de los estudios de un sistema aislado basta con considerar la respuesta instantánea de las líneas de distribución locales y del generador con su sistema de excitación. Con estas simplificaciones la carga eléctrica puede considerarse como una carga mecánica conectada directamente en el eje de la turbina. Del generador solamente es necesario tener en cuenta su momento de inercia agrupado con el de la turbina y el volante de inercia. El esquema de BG en “palabras” de la figura 1 ilustra el caso, las medias flechas indican el sentido del flujo de potencia entre componentes y las flechas enteras el flujo de señales de control.

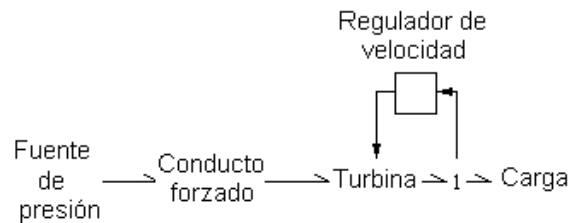


Figura 1: *Bond Graphs* en “palabras” de un sistema hidroeléctrico aislado

En la figura 2 se muestra el modelo detallado de un sistema hidroeléctrico aislado representado con BG y el programa 20-SIM. Está constituido por la fuente de presión, conducto forzado, turbina, rendimiento de la turbina, inercia del sistema, carga eléctrica equivalente y regulador de velocidad.

En la figura 2 se puede observar la fuente de presión **Se** y a continuación el conducto forzado discretizado con un único circuito equivalente π ^{11,12}. La utilización de circuitos equivalentes π (o **T**) es común para obtener modelos aproximados de líneas de transmisión de energía eléctrica para simular fenómenos de baja frecuencia^{14,15}. Este circuito está formado por la inercia total **I** en serie (vínculo “1”) con la resistencia modulada total **MR** y la mitad de la capacitancia total **C** en paralelo (vínculo “0”) en el extremo derecho. La resistencia está modulada con el valor absoluto del caudal, sensor de flujo “**f**” y $|x|$, para modelar su no linealidad. La mitad de la capacitancia del circuito equivalente π que correspondería al extremo izquierdo fue despreciada por estar en paralelo con la fuente ideal de presión. Si se requiere mayor precisión pueden utilizarse varios circuitos equivalentes en serie. Para maniobras de válvulas lentas está demostrado que bastan uno o dos circuitos para obtener buenos resultados prácticos¹².

En la metodología de BG, una turbina es un transductor, o conversor de potencia entre dos dominios de energía, entre el hidráulico y el mecánico en este caso. Como ya se indicó los Transductores pueden ser del tipo girador o transformador, y se caracterizan por ser ideales desde el punto de vista de rendimiento. Utilizando las ecuaciones constitutivas para el girador y transformador se puede demostrar que la mejor representación de la turbina es como un transformador modulado **MTF**¹². El módulo “**m**” de este transformador es función esencialmente de la inversa de la apertura del distribuidor $1/y$, pero también depende de la presión (sensor de esfuerzo “**e**”, \sqrt{x} y constante de la turbina **K**) y de la velocidad de la turbina, como está representado en la figura 2 Las pérdidas de potencia de la turbina,

hidráulicas, volumétricas y mecánicas, se encuentran disponibles generalmente como el rendimiento en función del caudal y de la velocidad y pueden ser agrupadas como pérdidas de torque solamente. Esto se puede representar como una fuente inversa de torque **MSe** modulada con el caudal y la velocidad por medio de funciones en forma de tablas, como se muestra en la figura 2.

La inercia mecánica, momento de inercia agrupado del generador, turbina y volante de inercia, se representa directamente con una inercia **I** en un vínculo "1". En el mismo vínculo se incluye la carga eléctrica equivalente mediante una fuente de torque inversa modulada **MSe**, para tener en cuenta las variaciones de carga.

Finalmente, el regulador de velocidad se modela mediante diagramas de bloques que incluyen funciones de transferencia y no linealidades.

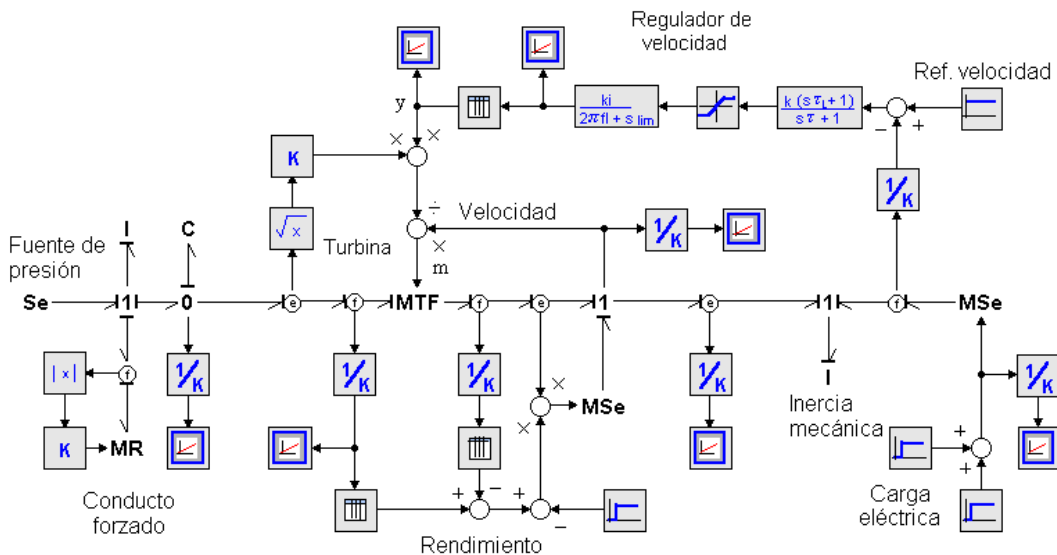


Figura 2: Bond Graphs de un sistema hidroeléctrico aislado modelado con 20-SIM

4 SIMULACIÓN DEL RECHAZO TOTAL DE CARGA EN LA CENTRAL HIDROELECTRICA SANTA CLARA

Las tres unidades de la central hidroeléctrica Santa Clara totalizando una capacidad instalada de 60 MW entraron en operación comercial durante el año 2002. La hidroeléctrica está localizada sobre el río Mucuri, cerca del municipio de Nanuque en Minas Gerais, Brasil. Una vista panorámica de la central se puede ver en la figura 4. La empresa VOITH SIEMENS suministró el equipamiento electromecánico y realizó estudios de ajuste del regulador de velocidad y de rechazos de carga para optimizar su desempeño con el programa de simulación especializado SIPROHS desarrollado por Voith Heidenheim. Este programa permite modelar y simular transitorios de sistemas hidráulicos con estructura arbitraria, posee una librería de módulos con los que pueden ser descriptos todos los componentes típicos; una

turbina, por ejemplo, puede ser modelada separando sus componentes: caja espiral, tubo de succión, etc.

La empresa facilitó gentilmente parte de los datos y resultados de estos estudios para verificar el modelo con BG desarrollado en este trabajo. Suministró información básica sobre altura bruta y neta, conducto forzado, turbina caja espiral, tubo de succión y regulador de velocidad. Los resultados de las simulaciones para comparación pueden ser visualizados en la figura 4 y figura 5.



Figura 3: Vista panorámica de la central hidroeléctrica Santa Clara (MG-Brasil)

En la figura 4 se muestra la simulación del rechazo total de carga realizada con el programa SIPROHS. En la simulación la máquina permanece durante los cinco primeros segundos en la condición de potencia nominal, a los cinco segundos se desconecta el generador de la red y el regulador de velocidad inicia el cierre del distribuidor. El tiempo de cierre del distribuidor es de 5 segundos, tiempo determinado para atender las condiciones garantizadas de sobrevelocidad y sobrepresión.

La simulación realizada con BG y con el programa 20-SIM se muestra en la figura 5. En esta simulación se utilizó el modelo de la figura 2 presentado anteriormente, agregando las inertancias de la caja espiral y del tubo de succión. Por no contar con la información, se adoptaron datos típicos para el rendimiento de la turbina en función del caudal y velocidad. En la figura 5 se observa que no se incluye el oscilograma de la presión en el tubo de succión debido a que su efecto está implícito en el modelo de la turbina con BG.

Se puede observar una muy buena correlación entre los oscilogramas de las dos figuras, la sobrevelocidad con BG es prácticamente la misma que con el SIPROHS, 370,7 rpm (44,2 %) versus 382 rpm (48,6 %), y la sobrepresión un poco menor, 69,0 m (36,1 %) versus 70,1 m (38,3 %).

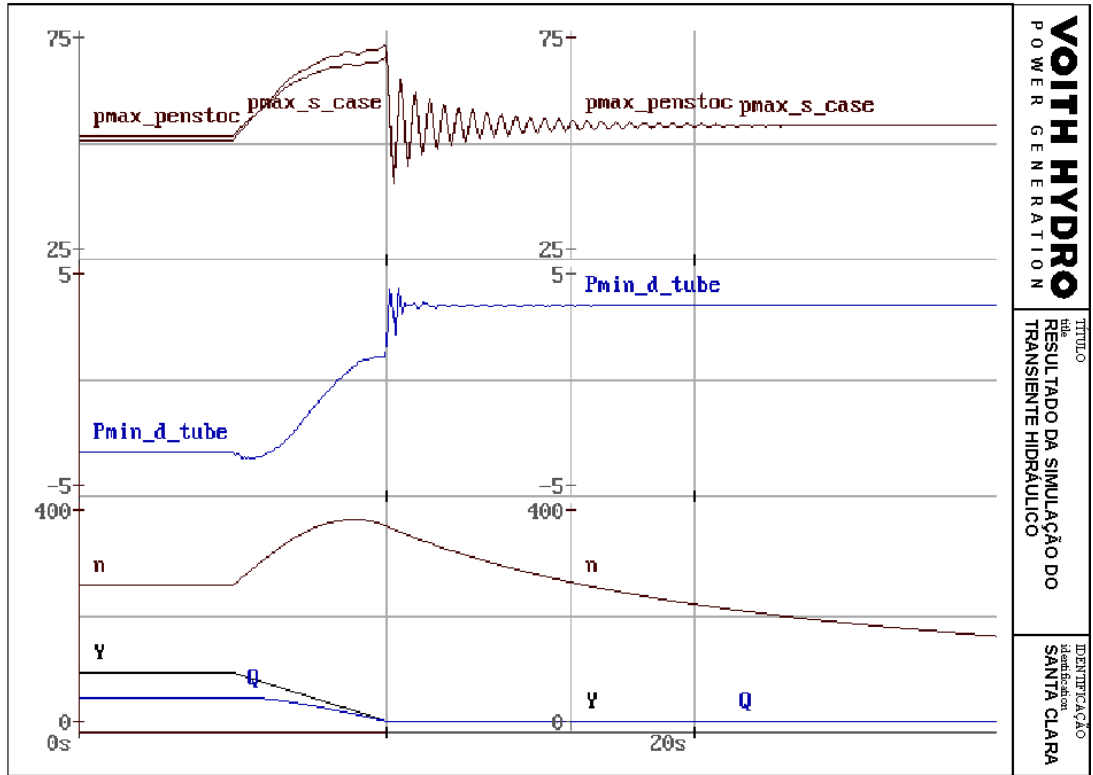


Figura 4: Simulación del rechazo total de carga en la Hidroeléctrica Santa Clara con SIPROHS

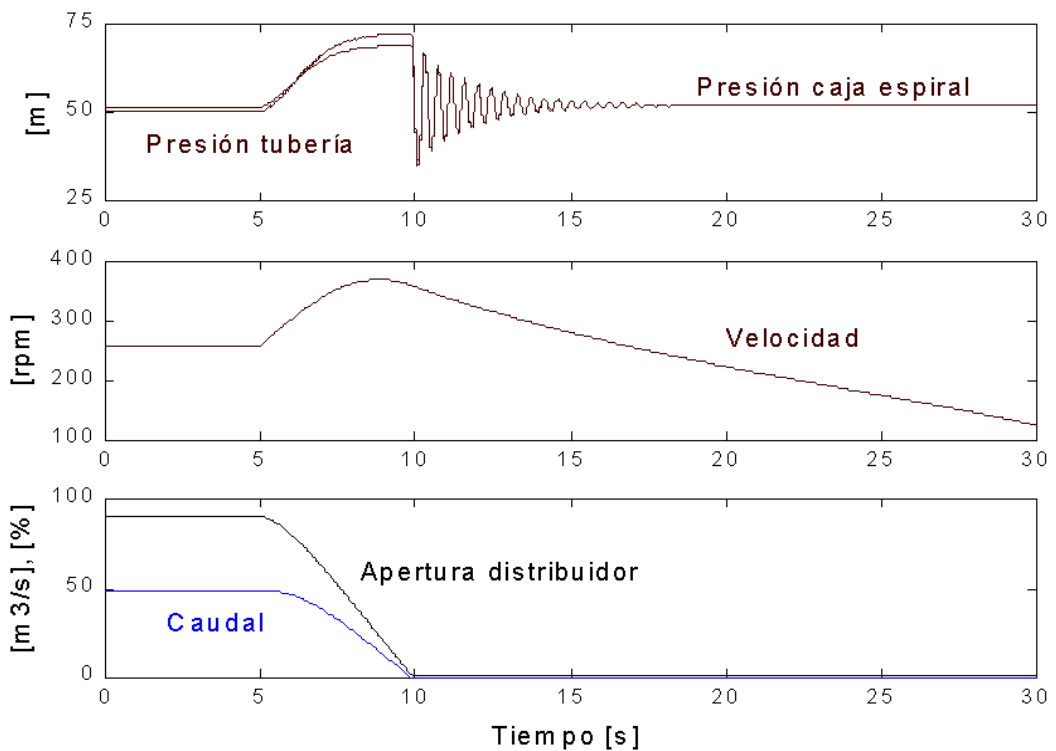


Figura 5: Simulación del rechazo total de carga en la Hidroeléctrica Santa Clara con 20-SIM

6 CONCLUSIONES

El entorno gráfico de los simuladores basados en la metodología de *Bond Graphs* ha evolucionado notablemente en los últimos años tornándola una herramienta muy eficiente y de carácter universal para simular sistemas donde ocurren intercambios de energía entre componentes de naturaleza física distinta.

Se discutió el modelado con *Bond Graphs* de un sistema hidroeléctrico aislado considerando el conducto forzado discretizado con circuitos equivalentes π , la turbina como un transformador modulado no lineal y el regulador de velocidad con diagramas de bloques. El modelo fue validado con la simulación de un caso de rechazo total de carga en la central hidroeléctrica Santa Clara, Brasil. Los resultados prácticamente coincidieron con los obtenidos por la empresa VOITH SIEMENS con un programa especializado.

La metodología se mostró muy flexible y eficiente para representar los diversos componentes y detalles no lineales. Está claro que posee un gran potencial para modelar máquinas de conversión de energía (turbina, generador, transformador, etc.) y para la simulación de los diversos transitorios que pueden ocurrir en centrales hidroeléctricas.

7 REFERENCIAS

- [1] E.B.Wylie y V.L Streeter, *Fluids Transients*, McGraw-Hill, (1990).
- [2] Z. Souza, A. Santos y E. Bortoni, *Centrais Hidrelétricas – Estudos para Implantação*, Eletrobrás, Brasil, (1999).
- [3] D. C. Karnopp, D. L. Margolis y R.C. Rosenberg, *System Dynamics Modeling and Simulation of Mechatronic Systems*, John Wiley & Sons Inc., (2000).
- [4] R. Rosenberg y D. Karnopp, *Introduction to Physical System Dynamics*, McGraw- Hill, New York, (1983).
- [5] D. C. Karnopp y R. C. Rosenberg, *System Dynamics: A Unified Approach*, John Wiley, (1975).
- [6] J. U. Thoma, *Introduction to Bond Graphs and their Applications*, Pergamon Press, Oxford, Great Britain, (1975).
- [7] M. Speranza Neto, F. Scofano Neto y F.R. Da Silva, "O Tratamento da Dinâmica de Sistemas Térmicos e Fluidos através da Técnica Generalizada dos Grafos de Ligação", ENCIT, (1992).
- [8] G. L.Tiago Filho, "Aplicação do Método dos Gráficos de Ligações na Simulação de uma Válvula de Alívio, Anti-Golpe de Aríete, Auto Operada", Tese de Doutorado, EPUSP, Brasil, (1994).
- [9] I. L. De Carvalho, "Avaliação da Aplicabilidade do Método dos Gráficos de Ligações no Estudo de Escoamentos Transitórios em Conduitos Forçados", Dissertação de Mestrado, EFEI, Brasil, (1995).
- [10] G. L. Tiago Filho, A. Martins y R. Laurent, "O Uso da Técnica dos Grafos de Ligação na Simulação de Sistemas Hidráulicos em Regime Transitorio", Mecánica Computacional, Vol. XXI, pp. 495-507, Santa Fé/Paraná, Argentina, (2002).

- [11] A. Martins, G. L. Tiago Filho y R. Laurent, "*Bond Graphs* versus Mediciones de Laboratorio y el Método de las Características en la Simulación del Golpe de Ariete", Revista PCH Notícias & SHP News, pp. 20-21, Ano 5, N° 19, Brasil, (2004).
- [12] A. Martins, "O Uso da Técnica dos Grafos de Ligação para a Simulação de Centrais Hidrelétricas em Regime Transitório", Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Brasil, (2004).
- [13] E. Kofman y S. Junco, "Un Ambiente Computacional para la Modelización de Sistemas Dinámicos no Lineales con Bond Graphs", RPIC, Argentina, (1999).
- [14] J. J. Grainger y W. D. Stevenson Jr., *Análisis de Sistemas de Potencia*, McGrawHill, México, (1996).
- [15] H. W. Dommel, *EMTP Theory Book*, Microtran Power System Analysis Corporation, Vancouver, Canadá, (1996).