

MONOGRAFICO

SIMULACION:

UNA HERRAMIENTA DE APOYO A LA INGENIERIA



La utilización de la simulación en los procesos y fases del ciclo de vida de un sistema es cada día más incuestionable y necesaria. Su uso nos permite un profundo conocimiento de los sistemas sin que éstos tengan que estar concluidos, permitiendo de esta forma poder adoptar las decisiones adecuadas respecto a modificaciones durante las fases de diseño, con el fin de obtener los objetivos de nivel de prestaciones así como un conocimiento previo de su comportamiento. La utilización sistemática de herramientas de simulación produce a la larga una economía en los sistemas y una reducción de riesgos en las tomas de decisiones durante las fases tempranas. Las tecnologías relacionadas con los sistemas de telecomunicación han sido pioneras en la utilización de modelos y herramientas de simulación para el apoyo la planificación y diseño tanto de redes como de sistemas complejos.

Actualmente la simulación se aplica en numerosas áreas de actividad, que se extienden desde el apoyo al diseño de subsistemas electrónicos hasta procesos y escenarios económicos, pasando por el soporte a la planificación de grandes redes, simuladores de entornos para ayuda al entrenamiento, la simulación de amenazas y riesgos y los juegos de guerra.

En España existe una gran actividad en materia de simulación, donde hay organizaciones y compañías con un importante nivel de conocimiento y cultura, pudiéndose considerar que es una de las pocas tecnologías en las que mantenemos una posición de primera línea en cuanto a capacidades y conocimientos.

En este número de BIT presentamos contribuciones de tres áreas de actividad relacionadas con nuestra profesión, en las que existe un profundo conocimiento y utilización de las técnicas de simulación. *bit*



La simulación en los Sistemas de Energía Eléctrica

❖ *Antonio Conejo y Jaime Román*

Los sistemas de energía eléctrica se componen de los tres bloques constitutivos básicos que se describen a continuación. El sistema de generación está constituido por centrales térmicas (nucleares, de carbón y de fuel-oil) e hidráulicas; aunque también puede incluir centrales de bombeo, eólicas, solares y productores inde-

pendientes (industrias que ocasionalmente inyectan energía eléctrica en el sistema). El sistema de transporte está constituido por líneas eléctricas de 380, 220 y 132 kV. Por último los sistemas de distribución están constituidos por líneas de tensión diversa en torno a los 20 kV. La energía eléctrica generada por el sistema de

de generación se suministra a través de las líneas del sistema de transporte a los sistemas de distribución a los que están conectados los centros de consumo (ver figura).

Un sistema de energía eléctrica es un sistema dinámico en el sentido de que evoluciona continuamente en el tiempo produciendo la energía necesaria para satisfacer la demanda.

Este sistema dinámico, que es el más grande de todos los construidos por el hombre, ha de mantener continuamente un equilibrio preciso: la energía generada en cualquier instante debe ser igual a la energía consumida más la degradada en pérdidas.

En este contexto dos conjuntos de condiciones son relevantes:

- Los sistemas de energía eléctrica deben ser explotados de la forma más económica posible y con un nivel de fiabilidad adecuado.

- Los sistemas de energía eléctrica deben explotarse manteniendo márgenes adecuados que permitan un funcionamiento técnicamente seguro.

Estas condiciones han de prevalecer a lo largo del tiempo, de ahí el interés del uso de la simulación en el estudio de los sistemas de energía eléctrica.

En sentido amplio, se entenderá por simulación la reproducción del funcionamiento del sistema eléctrico a lo largo del tiempo por medio de un modelo lógico-matemático apropiado que se encuentra implantado en un ordenador.

Esta reproducción de funcionamiento proporciona valiosa información para:

- Mejorar la explotación del sistema.
- Determinar planes óptimos de ampliación de la capacidad de cada uno de los sistemas constitutivos: generación, transporte y distribución.
- Determinar el diseño más adecuado de alguna parte de estos sistemas constitutivos.
- Evaluar la respuesta del sistema o parte de él ante diferentes condiciones de funcionamiento que son de interés.

Coste y fiabilidad

La evaluación de los costes y la fiabilidad de un sistema de energía eléctrica mediante simulación está íntimamente ligada a la utilización de modelos que permitan representar el sistema.

Los modelos de explotación para sistema de energía eléctrica pueden dividirse desde el punto de vista del transporte de energía en *modelos de nudo único* y *modelos de generación-red*.

Los modelos de nudo único sólo representan la generación y la demanda y permiten asignar producciones a cada central en los diversos escenarios que se consideren durante la planificación. Sin embargo, no tienen en cuenta las posibles res-

tricciones que puedan aparecer en el transporte de energía desde las mismas centrales hasta los centros de consumo. Estos modelos permiten, al no tener en cuenta restricciones de red, un modelo más detallado de la generación, especialmente en lo referente a costes de producción. Estos modelos se encuadran dentro de los estudios de planificación de la ampliación y explotación del sistema generador.

Los modelos de generación-red consideran conjuntamente los sistemas de generación y transporte. Estos modelos permiten verificar que el funcionamiento conjunto de los sistemas de generación y de transporte es adecuado desde un punto de vista técnico-económico, evaluando deficiencias y costes del sistema. Los modelos de explotación de generación-red también suelen ser denominados de producción generación-red o de cobertura. Estos modelos son utilizados en el contexto de la planificación, tanto de la ampliación como de la explotación, por lo que cubren períodos de explotación que pueden ir desde horas y semanas, hasta el año completo, aunque el tratamiento de los distintos períodos es diverso.

Un modelo de explotación generación-red ha de representar los siguientes elementos básicos del sistema: grupos de generación y elementos de transporte (líneas y transformadores de transporte). Asociados a los anteriores elementos los siguientes aspectos pueden ser considerados: disponibilidad, restricciones de explotación, costes, políticas de explotación, otros elementos exógenos al sistema. Es necesario también representar la demanda del sistema de forma adecuada, desagregada por nudos de carga. El nivel de información que desee obtenerse del modelo determinará el nivel de detalle del modelado, existiendo una relación entre este nivel de detalle y la viabilidad informática del modelo.

De forma general pueden distinguirse seis grandes componentes básicos en este tipo de modelos:

- Submodelo de disponibilidad.
- Submodelo de generación.
- Submodelo de red.
- Submodelo de demanda.
- Submodelo de políticas de operación y costes.
- Módulo de análisis.

El conjunto de los cinco submodelos permite representar los diversos elementos y factores enunciados anteriormente y el módulo de análisis extraer la información deseada a cerca de la explotación conjunta de los sistemas de generación y transporte. En los modelos existentes esta división es a veces teórica, no estando los modelos físicamente diferenciados aunque las características y funciones de los mismos sí están recogidas.

Una vez contruidos los modelos, la evaluación de la explotación de un sistema puede realizarse desde un punto de vista determinista. Este punto de vista permite un análisis detallado de un pequeño número de escenarios seleccionados de acuerdo con la experiencia de los analistas. En estos escenarios el sistema ha de funcionar correctamente. La evaluación es realizada de acuerdo a criterios tipo "funcionamiento adecuado"/"funcionamiento no adecuado". Este tipo de evaluación ha sido y todavía es tradicional en muchas compañías eléctricas.

La evaluación de la explotación basada en simulaciones probabilistas es la evolución natural

de los estudios de tipo determinista. Los métodos probabilistas permiten una evaluación consistente de las diferentes alternativas sometidas a estudio. Estos métodos tienen en cuenta la naturaleza estocástica del comportamiento de los sistemas y sus componentes, pueden considerar la mayoría de los estados que puedan darse en la explotación del sistema y variaciones en los parámetros del mismo, y sus políticas de explotación pueden ser correctamente evaluadas.

En la simulación estocástica, tradicionalmente conocida como método de Monte Carlo, los estados a analizar son generados de forma aleatoria, mediante el muestreo de las distribuciones de probabilidad de disponibilidad asociadas a los elementos del sistema. Cada estado suele representar una hora de la explotación del sistema, durante la cual se considera que no varían las condiciones del sistema (funcionamiento estático). Los métodos de simulación permiten un modelado muy detallado de las distintas políticas de explotación del sistema y sobre todo de los costes de explotación. Dentro de los modelos de simulación el muestreo puede realizarse de forma completamente aleatoria o secuencial (cronológica). El muestreo secuencial permite la representación de correlaciones temporales que en un sistema con alto contenido de generación hidroeléctrica afectan de forma significativa la explotación.

Existe una amplia lista de modelos de explotación generación-red presentados en la literatura de fiabilidad y planificación de sistemas de energía eléctrica. Puede afirmarse que prácticamente cada compañía eléctrica importante, universidad o grupo de investigación en sistemas de energía eléctrica ha desarrollado su propio modelo. Los que siguen son algunos de los más conocidos. el modelo **SECRET** [1] desarrollado y mejorado por ENEL (Ente Nazionale per L'Energia Elettrica, de Italia) durante las últimas dos décadas. Los modelos **MEXICO** y **MERIDA** [2] desarrollados por EDF (Electricité de France, de Francia) para la estimación de la fiabilidad de su red de transporte. El modelo **ESCORT** [3] de la NGC (National Grid Company, del Reino Unido), desarrollado para el análisis de refuerzos de red, pero que también es utilizado como herramienta de análisis de la explotación. El modelo **CREAM** [4] basado en técnicas de simulación de Monte Carlo, ha sido desarrollado para el EPRI (Electric Power Research Institute, de EE.UU.) como alternativa a modelos previos del mismo EPRI basados en la selección de contingencias. El segundo autor desarrolló un modelo [5] de simulación estocástica secuencial que incorpora un tratamiento mejorado de las correlaciones temporales que se dan en la explotación del sistema y un tratamiento estadístico de los resultados de la simulación de la explotación.

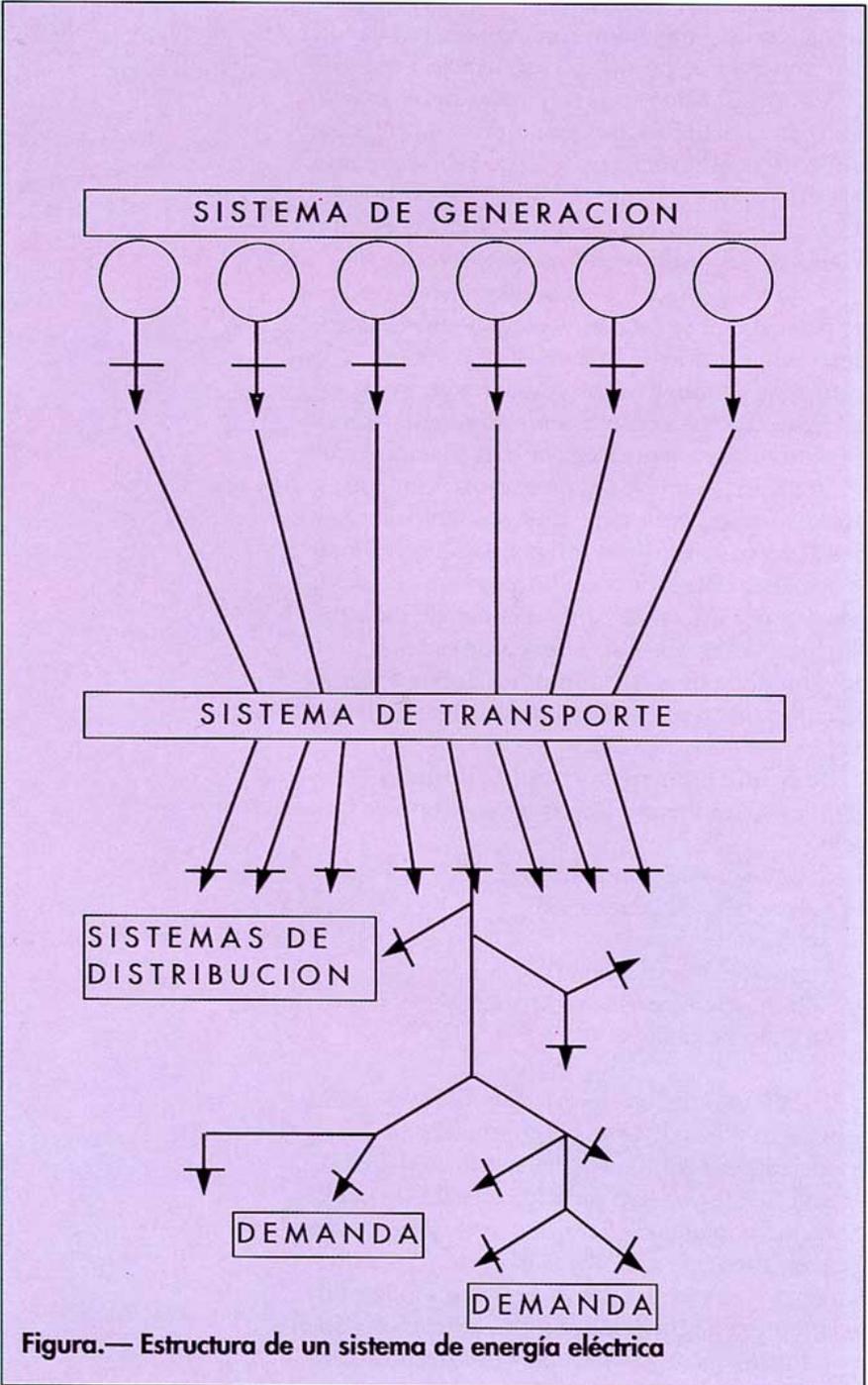


Figura.— Estructura de un sistema de energía eléctrica

Seguridad y estabilidad

Diversos modelos de simulación están disponibles para que los operadores y analistas del sistema puedan analizar la seguridad y estabilidad del mismo. Estos modelos suelen tener diferentes características en función de la rapidez (constante de tiempo) de los fenómenos estudiados. Pueden agruparse en los dos apartados que aparecen a continuación.

(1) Simulación de la dinámica “rápida” del sistema que típicamente requiere el modelado de la red, las cargas, los generadores y sus sistemas de excitación. Esta simulación es útil al estudiar:

- Transitorios rápidos debidos a descargas atmosféricas o a maniobras de conexión/desconexión de aparellaje.
- Transitorios menos rápidos debidos a faltas (fase-fase, fase-tierra, doble fase tierra y trifásica).
- Propagación de perturbaciones electromagnéticas conducidas a través de la red (armónicos, fluctuaciones de tensión, desequilibrios).

Las descargas atmosféricas producen transitorios de tensión de gran magnitud y constantes de tiempo muy rápidas (micro y milisegundos). Las maniobras de conexión-desconexión originan también transitorios de tensión rápidos y de gran magnitud. El modelo **EMTP** [6] desarrollado inicialmente para el EPRI es un modelo estándar para este tipo de simulaciones.

Las faltas o averías originan perturbaciones de gran magnitud de potencia activa con constantes de tiempo menores (del orden de segundos) que las de las perturbaciones atmosféricas. Tanto el modelo **EMTP** como el modelo **PSS/E** [7] de PTI de EE.UU. son modelos estándares para este tipo de simulaciones.

Las perturbaciones eléctricas conducidas a través de la red son producidas en su mayoría por consumidores no lineales. La magnitud de la perturbación suele estar en relación directa con la potencia consumida y las constantes de tiempo son menores que la de las faltas. No existe un modelo de uso generalizado para analizar este tipo de perturbaciones, sin embargo el **EMTP** que es un modelo de aplicación general a transitorios pueden utilizarse.

(2) Simulación de la dinámica “lenta” (constantes de tiempo del orden de minutos) del sistema que requiere el modelado de la red, las cargas, los generadores, los sistemas de excitación de los mismos, las turbinas hidráulicas y térmicas con sus equipos de regulación y el sistema de protección. El estudio de esta dinámica “lenta” tiene interés para detectar posibles problemas de:

- Estabilidad a largo plazo.
- Estabilidad de tensión.
- Estabilidad en la "política" de control de tensión.

nes.

El modelo **PSS/E** es un modelo estándar para este tipo de simulaciones. También el modelo **EUROSTAG** [8] de EDF y el modelo **FPSS** [9] de Vattenfall (Compañía Nacional de Electricidad de Suecia).

La inestabilidad a largo plazo aparece como resultado del comportamiento dinámico de elementos de dinámica lenta o muy lenta como son las calderas de las centrales térmicas, reactores de centrales nucleares y el control de generación automático (AGC).

La inestabilidad de tensiones, de importancia cada vez mayor, surge como resultado de una distribución inadecuada de los recursos de potencia reactiva en redes de transporte que funcionan cerca de su capacidad límite de transporte de potencia activa.

El control del perfil de tensiones en un sistema de energía eléctrica se lleva a cabo usualmente de una forma descentralizada en el tiempo y a veces también en el espacio. Los criterios de coordinación de los distintos niveles de control jerárquicos pueden plantear problemas de inestabilidad.

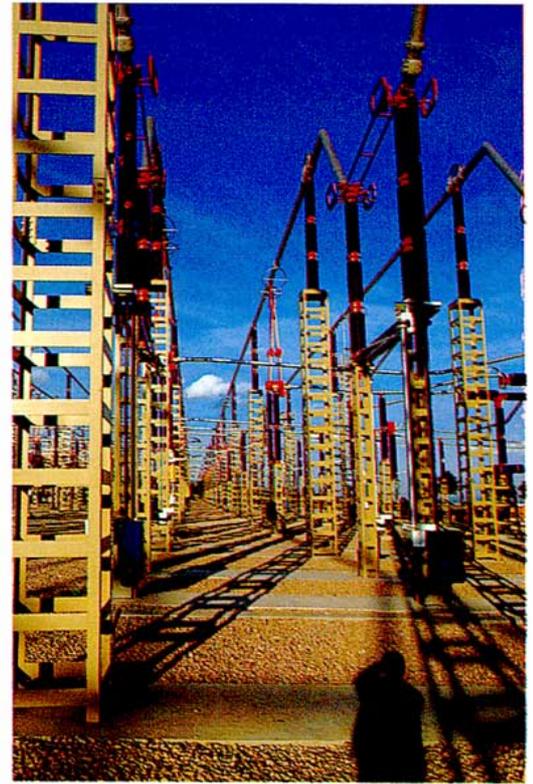
Las necesidades en cuanto a rapidez de cálculo de estos modelos de simulación varían sustancialmente en función del nivel de detalle del modelado de los elementos considerados y de que el modelo/herramienta se conciba como ayuda en tiempo real al operador o como elemento de estudio.

Enseñanza y entrenamiento

Los modelos de simulación son una herramienta importante de entrenamiento en los centros de control de la explotación de las compañías eléctricas. Mediante su uso los operadores son capaces de desarrollar la experiencia adecuada que en el futuro les permitirá enfrentarse con éxito a situaciones de “peligro” real para el sistema de energía eléctrica bajo su control.

Conclusiones

La simulación es una herramienta de valor fundamental en la explotación, la planificación, el



“Los métodos probabilistas permiten una evaluación consistente de diferentes alternativas sometidas a estudio”

control y el análisis técnico de los sistemas de energía eléctrica.

Se emplea tanto en análisis de seguridad, estabilidad y control, como para estimar costes de explotación e índices de fiabilidad.

Sin los modelos lógico-matemáticos desarrollados para simular el comportamiento de los sistemas de energía eléctrica, sería muy difícil, si no imposible, la explotación adecuada de los mismos. La complejidad y dinámica de estos sistemas hacen que las evaluaciones y análisis de la explotación de los mismos sólo pueda realizarse de forma consistente utilizando técnicas de simulación.



Bibliografía

- [1] Bertoldi O., Saalvaderi L., Scalcino S., "Monte Carlo Approach in Plannign Studies: An Application to IE-EE RTS", IEEE Transactions on Power Systems, Vol 3, Nº 3, August 1988, pp. 1146-1154.
- [2] Dodu J.C., Merlin A., "Recent Improvements of the Mexico Model for Probabilistics Planning Studies". International Journal of Electrical Power & Energy System, 1979, pp. 46-56.
- [3] Dunnet R.M., Macqueen F.J., "Transmission Planning By Monte Carlo Optimazation". Proceedings of the 10th PSCC, Graz, Austria, 1990, pp. 24-31.
- [4] EPRI, "Development of a Composite System Reliability Evaluation Program". Electric Power Research Institute. Technical Report EPRI EL-6926, Vols. 1-4, August 1990.
- [5] Allan R.N., Román J., "Reability Assessment of Generation System Containing Multiple Hydro Plant Using Simulation Techniques", IEEE Power Engineering Society 1989 Winter Power Meeting, New York.
- [6] EPRI, "Electromagnetic Transients Program (EMTP)". Electric Power Research Institute, Technical Report



Antonio Conejo
Es Doctor en Ingeniería Eléctrica por la Universidad Politécnica de Estocolmo (Kungliga Tekniska Högskolan), Suecia, M.S., también en Ingeniería Eléctrica por el Massachusetts Institute of Technology (MIT), EE.UU., e Ingeniero Industrial por ICAI. Actualmente es Investigador en el Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) de la Universidad Pontificia Comillas y Profesor en la misma Universidad.



Jaime Román
Es Doctor y M.Sc. en Ingeniería Eléctrica por la Universidad de Manchester (UMIST), Reino Unido, e Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid. Actualmente es Investigador Propio en el Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) de la Universidad Pontificia Comillas y Profesor de doctorado en la misma Universidad.



- EPRI EL-6768, 1990.
- [7] Power Technologies, Inc. "PSS/E Program Package". Schenectady, New York.
- [8] Electricité de France, "Long Term Dynamics". CIGRE TF-38-02/08. January 1992.
- [9] Edström A., Walve K., Andersson G., "Models and Algorithm for a Fast Power System Simulator". Proceedings of the 10th PSCC, Graz, Austria, 1990, pp. 735-741.

