

ANÁLISIS DEL SISTEMA ELÉCTRICO VENEZOLANO DESDE LA PERSPECTIVA DE LA TEORÍA DE REDES COMPLEJAS

CLAUDIO M. ROCCO S.

Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Ciclo Básico

e-mail: crocco@cantv.net

Recibido: diciembre de 2007

Recibido en forma final revisado: marzo de 2008

RESUMEN

En este trabajo se estudia el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) desde la perspectiva de la teoría de grafos y de los desarrollos recientes para comprender la estructura de redes complejas. Entre los resultados preliminares, se muestra que el SEN puede ser considerado, desde el punto de vista topológico, como una red «single-scale». Esto implica que el comportamiento de la distribución acumulada del número de conexiones en cada nodo presenta un comportamiento tipo exponencial. Esta característica sugiere que el SEN puede soportar satisfactoriamente la pérdida aleatoria de algunos nodos (o subestaciones) pero puede ser vulnerable a la pérdida de algunos nodos particulares. Se presentan resultados basados en medidas que evalúan el papel sobresaliente de los nodos de la red, tales como Conectividad e Intermediación. Se evalúa mediante un modelo sencillo el efecto cascada ante la pérdida de nodos de la red.

Palabras Clave: Planificación de sistemas eléctricos, sistemas complejos, topología de redes, vulnerabilidad

ANALYSIS OF THE VENEZUELA ELECTRIC POWER GRID THROUGH COMPLEX NETWORK CONCEPTS

ABSTRACT

In this paper, we study the National Electric Power Systems (NEPS) using a graph-based approach and recent advances in mapping the topology of complex networks. We show that NEPS can be considered as a single-scale network. Indeed, we find that the cumulative degree distribution follows an exponential distribution. This fact means that NEPS can withstand the random loss of several nodes (or substations) but it is vulnerable in case of losing particular nodes. Results based on node importance, such as connectivity and betweenness, are presented. Finally a simple model allows the evaluation of cascading effects due to loss of nodes.

Keywords: Power system planning, complex systems, network topology, Vulnerability

INTRODUCCIÓN

A medida que un sistema de potencia evoluciona en el tiempo se hace más importante conocer el comportamiento emergente que puede surgir. Los análisis tradicionales se basan en modelos tales como flujo de carga y estabilidad que consideran los procesos electromagnéticos que ocurren en dichos sistemas. Estas simulaciones requieren mucho tiempo de cómputo.

En este trabajo se estudia el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) desde la perspectiva de la teoría de grafos y de los desarrollos recientes para comprender la estructura de redes complejas. No se consideran los detalles de los procesos electromagnéticos que se desarrollan y sólo se toman en cuenta las propiedades topológicas de la red. La idea es

demostrar que la estructura de la red asociada al sistema de potencia proporciona información sobre la vulnerabilidad de éste ante la ocurrencia de fallas o eventos en cascada. Este modelo simplificado representa un escenario optimista de las características del SEN (Alber *et al.*, 2004): las consecuencias antes la ocurrencia de fallas serán evidentemente superiores.

Estudios de esta naturaleza se han realizado para diversos sistemas eléctricos en Europa y Estados Unidos (Albert *et al.*, 2004; Crucitti *et al.*, 2004 y Rosato *et al.*, 2007). Sin embargo, a nuestro mejor entendimiento, este tipo de estudio no ha sido realizado con anterioridad en Venezuela.

El trabajo está organizado de la siguiente manera: la primera sección presenta algunas definiciones y una pequeña reseña

cronológica del desarrollo de redes complejas; la segunda sección muestra los resultados preliminares obtenidos del estudio del SEN; y finalmente la tercera sección presenta las conclusiones del estudio.

DEFINICIONES Y NOTACIÓN

La teoría de grafos es el marco natural para el análisis de las redes complejas. Un grafo no dirigido (o un grafo dirigido) $G=(N,L)$ está definido por los dos conjuntos N y L , tales que $N \neq \emptyset$ y L es el conjunto de pares no ordenados (pares ordenados en el caso de grafos dirigidos) de elementos de N . Los elementos de $N \equiv \{n_1, n_2, \dots, n_N\}$ se denominan nodos (o vértices o puntos) mientras que los elementos de $L \equiv \{l_1, l_2, \dots, l_K\}$ se denominan enlaces (o aristas o líneas). La referencia a un nodo se realiza por su posición i en el conjunto N . En un grafo no dirigido cada uno de los enlaces está definido mediante un par de nodos i y j y se denotará como (i,j) o l_{ij} . En un grafo dirigido el orden del par de nodos es importante ya que en estos grafos el enlace l_{ij} se refiere a la conexión que va desde el nodo i hasta el nodo j . En estos grafos $l_{ij} \neq l_{ji}$.

Una forma útil de representar un grafo es a través de la matriz de conectividad A . El elemento a_{ij} de esta matriz cuadrada de dimensión $N \times N$, toma el valor de 1 si existe el enlace l_{ij} y 0 en otro caso. La diagonal principal de esta matriz contiene valores nulos (Boccaletti *et al.*, 2006).

Conectividad

Se denomina a k_i el grado o conectividad de un nodo, definido como el número de enlaces incidentes en el nodo i y calculado, en términos de la matriz de conectividad como:

$$k_i = \sum_{j \in N} a_{ij}$$

(en grafos dirigidos se puede adicionalmente diferenciar entre grado de entrada o salida, al contabilizar los enlaces que llegan o que salen del nodo i).

La caracterización más elemental de un grafo se obtiene analizando la distribución de la conectividad $P(k)$, definida como la probabilidad que un nodo seleccionado de acuerdo con una distribución de probabilidad uniforme, tenga conectividad k . Los nodos que presentan valores altos de conectividad constituyen los llamados «hubs» (Boccaletti *et al.*, 2006).

Tipos de Redes

Varios estudios de redes reales han sugerido que éstas se han

generado a partir de procesos de crecimiento no supervisado que poseen características topológicas comunes. De hecho, redes en biología, sociología, telecomunicaciones y la www, que describen sistemas y fenómenos diferentes, muestran similitudes en sus estructuras topológicas (Rosato *et al.*, 2007).

En 1998 Watts y Strogatz (1998) mostraron que la topología de ciertas redes no era ni regular ni aleatoria sino más bien correspondía a una situación intermedia entre estos dos extremos. Esta clase de redes fue bautizada con el nombre de redes «small worlds» en analogía con el fenómeno de pequeños mundos observado en los sistemas sociales. Éstas redes están caracterizadas por una distribución de conectividad que posee una moda claramente definida (Latorra *et al.*, 2003).

Sin embargo, Barrabási *et al.*, (2003) encontraron que muchas redes no siguen las características de las redes de Watts y Strogatz. Una de las características más resaltante entre las redes estudiadas por Barrabási *et al.*, es la presencia de una topología de red con una distribución de conectividad que sigue una ley de potencia del tipo $k^{-\gamma}$, con $2 < \gamma < 3$ (Rosato *et al.*, 2007). Estas redes, denominadas «scale-free», están caracterizadas por ser redes en las que nodos con alta y baja conectividad coexisten simultáneamente. La existencia de redes «scale-free» ha sido justificada porque el crecimiento de la red se realiza incorporando nuevos nodos que se conectan con preferencia a los nodos existentes de más alta conectividad (Amaral *et al.*, 2004).

Se ha demostrado numérica y analíticamente que estas redes poseen una gran habilidad para recuperarse rápidamente ante la pérdida aleatoria de nodos (propiedad de resiliencia o «volver al estado inicial», originariamente usado para referirse a la cualidad de elasticidad y plasticidad de una sustancia), pero son vulnerables a la pérdida específica (esto es, no aleatoria) de nodos de alta conectividad (Amaral *et al.*, 2004).

Estudios posteriores han mostrado que redes clasificadas inicialmente como «scale-free» presentan ciertas características particulares por lo que se ha generado una clasificación más detallada de estas redes. En efecto, el estudio de la distribución de la conectividad y en particular la forma de las colas de las distribuciones, ha permitido clasificar las redes en «scale-free», «broad scale» y «single scale». Estas últimas, caracterizadas por una cola con decaimiento exponencial, surgen cuando la inclusión de nuevos nodos en la red se ve afectada, entre otras razones, por alguna restricción física en los nodos de más alta conectividad ya existentes (por ejemplo la capacidad

limitada del nodo existente) (Amaral *et al.*, 2004).

A manera de ejemplo, Watts y Strogatz (1998) encontraron evidencias contundentes del fenómeno de «small worlds» en el sistema eléctrico del Sur de California. Posteriormente Barrabási *et al.*, (2003) lo clasificaron como una red «scale-free» y finalmente Amaral *et al.*, (2004) lo clasifican como una red «single scale».

Camino más corto, diámetro e intermediación

Los caminos más cortos entre dos nodos (también conocidos como rutas geodésicas) proporcionan información valiosa para caracterizar a un grafo. En general todos los caminos más cortos (obtenidos por ejemplo mediante el algoritmo de Dijkstra o mediante procedimientos de búsqueda profunda) se almacenan en la matriz D , cuyos elementos d_{ij} representan la longitud de la ruta geodésica entre los nodos i y j . El máximo valor de d_{ij} define el diámetro del grafo. Cuando se considera exclusivamente la matriz de conectividad, los valores de d_{ij} representan el número de enlaces que existen entre los nodos i y j . Si por ejemplo se utilizan las distancias físicas entre los nodos i y j , entonces los elementos d_{ij} representan la longitud de la ruta más corta entre los nodos i y j .

La longitud promedio de los caminos más cortos, denominada Longitud Característica del Camino (LCC) es una medida que representa la separación promedio entre dos nodos del grafo y está definida por:

$$LCC = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j \in N, i \neq j} d_{ij} \quad (\text{Boccaletti } et al., 2006)$$

En ciertas ocasiones es conveniente trabajar con el concepto de Eficiencia (E) del grafo, definido como la media armónica de las longitudes geodésicas:

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j \in N, i \neq j} \frac{1}{d_{ij}} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j \in N, i \neq j} e_{ij}$$

donde:

e_{ij} es definida como la eficiencia entre los nodos i y j .

La eficiencia es un indicador de la capacidad de tráfico de una red (qué tan bien se comunican los nodos en la red) y permite considerar aquellos grafos en los que existen nodos que no están conectados. La eficiencia E está altamente correlacionada con $1/LCC$ ya que un valor alto de LCC corresponde a un valor bajo de eficiencia (Porta *et al.*, 2006).

La comunicación de dos nodos no adyacentes j y k (o sea de dos nodos que no tienen conexión directa) depende del número de nodos que se encuentran en los caminos que van desde j hasta k . Por tanto, una medida de la importancia de un nodo en particular se puede obtener contando el número de veces que ese nodo pertenece a las rutas geodésicas. Esta medida se denomina Intermediación del nodo («betweenness») o carga y se calcula para el nodo i como:

$$b_{ij} = \sum_{j,k \in N, j \neq k} \frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}}$$

donde:

$n_{jk}(i)$ es el número de caminos más cortos que conectan a los nodos j y k y que pasan por el nodo i , mientras n_{jk} es el número de caminos más cortos entre los nodos j y k .

En el caso que nos ocupa, se supone que la potencia eléctrica es enviada a través de los caminos más cortos que se originan en los nodos de generación y llegan a los nodos de distribución. Por tanto la intermediación o carga de una subestación de transmisión puede ser considerada como una variable proxy del flujo que circula por la subestación (Crucitti *et al.*, 2004).

Vulnerabilidad y efectos cascada

Los sistemas de potencia se han desarrollado como redes interconectadas que permiten que la potencia pueda ser transferida desde generadores ubicados a gran distancia de las cargas. Esta característica deseable también permite la propagación de eventos locales a través de toda la red (Kinney *et al.*, 2005).

El primer enfoque para estudiar la vulnerabilidad del sistema de potencia, denominado análisis estático de fallas, consiste en remover un determinado número de elementos del sistema y evaluar cómo se afecta su desempeño. Como resultado de este enfoque, se llegó a la conclusión que remover un determinado número de elementos del sistema produce importantes consecuencias. Por ejemplo, se menciona que el colapso del sistema de potencia analizado en Albert *et al.*, (2004) ocurre si se pierde alrededor del 2 % de las subestaciones.

En muchos sistemas reales, la falla de un solo elemento puede ocasionar el colapso del sistema, debido a la dinámica de redistribución de flujos y a ciertos eventos de protección que se generan en el sistema. Para considerar estos efectos se han propuesto modelos sencillos que permiten evaluar, no sólo las consecuencias en la topología de la red, sino

el efecto de sobrecarga que se genera en los elementos del sistema y el posible efecto cascada.

El modelo que se utiliza en este trabajo fue desarrollado por Crucitti *et al.*, (2004). El modelo considera que cada nodo posee una capacidad C_i , definida como la máxima carga que un nodo puede manejar: $C_i = \alpha L_i(0)$, donde $\alpha \geq 1$ es el factor de tolerancia y $L_i(0)$ es la carga del nodo en condiciones normales, esto es, antes de la ocurrencia de cualquier perturbación en el sistema.

La salida de un nodo marca el inicio de la dinámica de redistribución de flujos en la red. En efecto, el evento puede ocasionar cambios en las rutas más cortas (rutas más eficiente) y por tanto definir nuevos valores de carga en cada nodo y, posiblemente, generar que algunos nodos estén sobrecargados. Para evaluar la eficiencia de la red ante esta redistribución del flujo a lo largo de un período de tiempo, se define la siguiente regla de actualización de e_{ij} :

$$e_{ij}(t+1) = \begin{cases} e_{ij}(0) \frac{C_i}{L_i(t)} & \text{si } L_i(t) > C_i \\ e_{ij}(0) & \text{si } L_i(t) \leq C_i \end{cases}$$

donde:

el índice j se refiere a los primeros vecinos de nodo i y $L_i(t)$ es la carga del nodo i en el tiempo t . Inicialmente $e_{ij}(0) = 1$ si existe un enlace entre los nodos i y j , cero en otro caso

(lo que equivale a decir que todos los enlaces funcionan perfectamente). Dependiendo del nodo que se encuentre fuera de servicio en cada t , esta regla ocasiona una reducción en la eficiencia E y la posible definición de nuevas rutas eficientes. En general la simulación se extiende hasta que el comportamiento de la eficiencia E alcance su estado estacionario.

EL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL (SEN)

El SEN, analizado en este artículo, está constituido por 635 nodos (o subestaciones) y 1179 enlaces (entre líneas de transmisión y transformadores) y es representado mediante un grafo (Figura 1 obtenida mediante el software Pajek (Batagelj *et al.*, 2007) y su correspondiente matriz de conectividad. Las subestaciones se dividen en tres tipos: Generación, Transmisión y Distribución. El SEN se considera como un grafo conectado y por tanto, en principio, puede suponerse que la potencia de cualquier generador puede ser llevada a cualquier centro de distribución. En la Figura 1 sólo se muestra la topología sin ninguna referencia geográfica. Por razones de seguridad, se omiten los nombres de las subestaciones.

Para el SEN, la conectividad promedio es de 3.71, con valores entre 1 y 14, mientras que el diámetro del SEN es de 33 (máximo número de enlaces entre dos nodos). La longitud promedio de los caminos más cortos es 12.17 y la eficiencia resultante es de 0.10156.



Figura 1. Grafo asociado al SEN

La Figura 2 muestra la distribución acumulada de la conectividad de los nodos $P(k) = \sum_{k>K} P(k)$. Como se ha visto en otras redes, no existe un nodo o un grupo de nodos específicos que prevalezca sobre el resto y el mejor ajuste corresponde a una ecuación del tipo exponencial con $P(k) \sim e^{-0.42k}$.

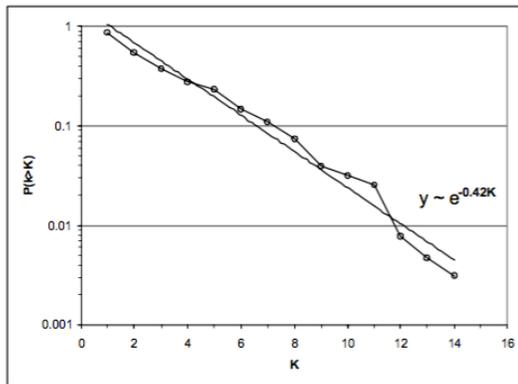


Figura 2. Distribución acumulada de la conectividad y ajuste a una exponencial

La Figura 3 muestra, en un gráfico log-log, que la distribución acumulada de conectividad no se ajusta tan bien a una ley de potencia, por lo que el SEN puede ser considerada como una red «single scale». Otros sistemas de potencia han sido también clasificados de esta forma (Alber *et al.*, 2004; Crucitti *et al.*, 2004; Rosato *et al.*, 2007 y Kiney *et al.*, 2005).

Si se supone que cualquier generador puede suministrar potencia a cualquier subestación de distribución a través del camino más eficiente, se puede calcular la carga (o intermediación) en cada nodo.

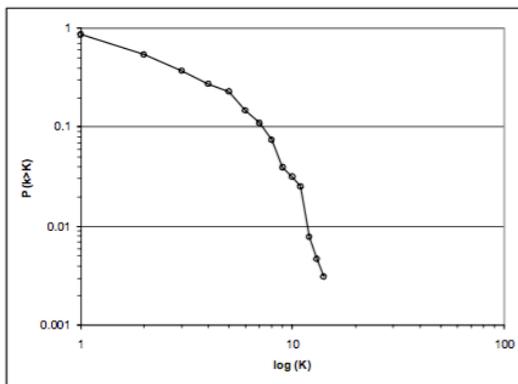


Figura 3. Distribución acumulada de la conectividad en escala log-log

La Figura 4 muestra la distribución de carga para los nodos. Se puede observar que aproximadamente 84 % de las subestaciones participan en hasta 6000 rutas geodésicas

pero 2 % de las subestaciones hacen parte de 25000 o más rutas. Estas subestaciones, que no necesariamente presentan alta conectividad (o sea, no son consideradas como «hubs»), juegan un papel importante en la red.

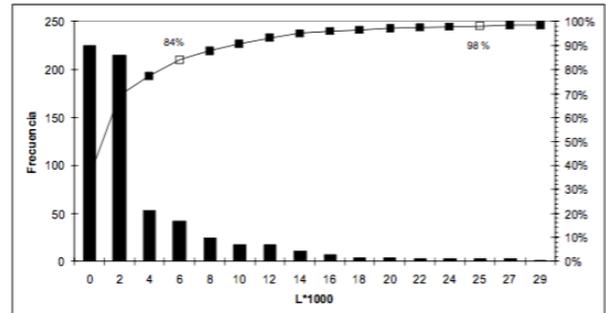


Figura 4. Histograma de intermediación (carga) y valores acumulados

La Figura 5 muestra sobre el grafo que representa el SEN, los nodos que presentan mayores valores de intermediación o carga. El tamaño del nodo es proporcional a la carga que éste maneja.

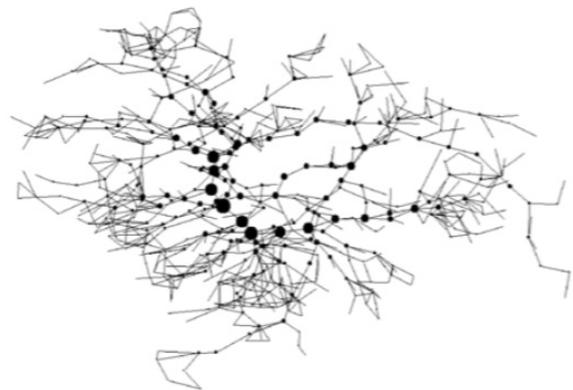


Figura 5. Intermediación de los nodos

La Figura 6 muestra la distribución acumulada de carga $P_{cum}(L) = \sum_{L>L'} P(L')$. Esta distribución puede ajustarse a una distribución de potencia de la forma $P_{cum}(L) \sim (2774+L)^{-1.22}$. Esto significa que si bien la red es muy homogénea en cuanto a conectividad, la red presenta una alta heterogeneidad en cuanto a la carga de los nodos: la mayoría de los nodos manejan cargas pequeñas, pero hay algunos nodos que manejan cargas extremadamente altas. Y son precisamente las fallas en estos nodos que pueden iniciar un efecto cascada. Este comportamiento ha sido observado en otros sistemas de potencia (Alber *et al.*, 2004; Crucitti *et al.*, 2004; Rosato *et al.*, 2007; Kiney *et al.*, 2005).

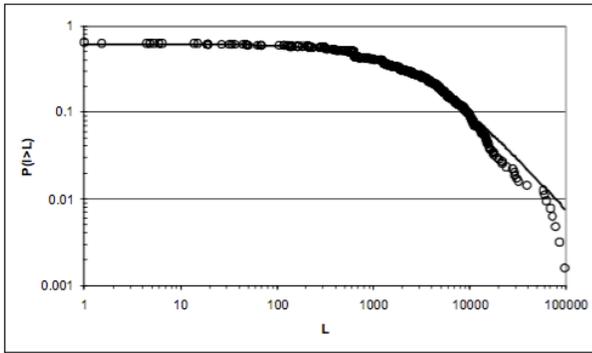


Figura 6. distribución acumulada de carga $P_{cum}(L)$

Por otra parte, la Figura 7 muestra la relación entre la conectividad y la carga en los nodos. Es interesante notar que si bien uno de los nodos de mayor conectividad posee el mayor grado de intermediación, estas variables no están altamente correlacionadas (el coeficiente de correlación de Pearson es 0.47). De hecho se puede observar que existen nodos con alta conectividad y baja intermediación, y nodos con relativa baja conectividad y alta intermediación. Los nodos que aparecen en la parte superior de la Figura 7 deben ser considerados como nodos importantes.

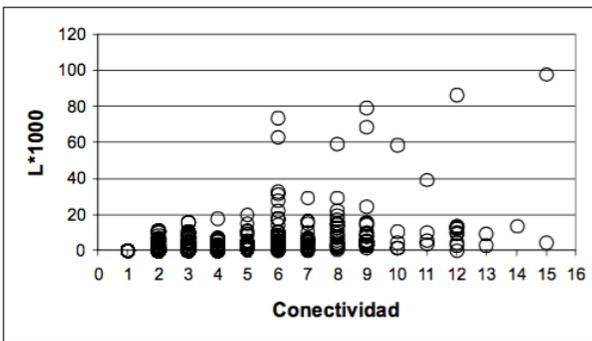


Figura 7. Relación entre conectividad y carga en los nodos

Por último, la Figura 8 muestra los resultados de la simulación del modelo de eventos en cascada en la topología del SEN, en función del parámetro de tolerancia α .

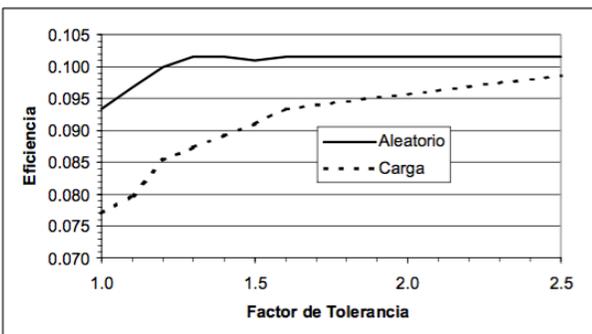


Figura 8. Eficiencia vs Factor de tolerancia α

Esta Figura muestra el valor final de la Eficiencia (valor en estado estacionario) para dos tipos de fallas: Selección aleatoria de nodos y selección en función de la carga del nodo. Como se esperaba, y debido a la alta heterogeneidad de la carga en los nodos, el comportamiento del sistema ante fallas aleatorias de los nodos es más estable que ante fallas de nodos específicos.

Un resultado parecido se obtiene cuando la salida de los nodos se realiza en función de su conectividad o de su carga. Este hecho recalca que no es sólo la conectividad de los nodos la que afecta mayoritariamente el desempeño del SEN, sino la combinación de conectividad y alta intermediación o carga.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha mostrado que la topología del SEN desempeña un papel importante en la capacidad que éste tiene de soportar fallas. Los resultados preliminares indican que el SEN es robusto ante fallas aleatorias en los nodos, pero su desempeño se degrada si las fallas ocurren en los nodos de alta intermediación. El modelo de eventos en cascada utilizado es una simplificación de lo que realmente sucedería en un sistema de potencia. El objetivo de este trabajo era mostrar que la topología del SEN juega un papel fundamental en la caracterización del mismo y que su análisis debe ser incluido en cualquier tipo de modelo (Crucitti *et al.*, 2004). De hecho, los estudios de la topología pueden ser útiles para realizar evaluaciones «rápidas» de vulnerabilidad que permitan determinar situaciones de alto riesgo y proponer medidas preventivas de diseño (por ejemplo en la planificación de expansiones) u operativas (mediante la definición de esquemas de vigilancia y protección de las instalaciones). Sin embargo es conveniente aclarar que la robustez de las redes y cómo se propagan las fallas no es una consecuencia sólo de la topología de la red sino de una relación compleja entre la topología de la red y su dinámica (Simonsen *et al.*, 2007).

REFERENCIAS

ALBERT R., ALBERT I., NAKARADO G. «Structural Vulnerability of the North America Power Grid», (Physical Review E number 69, 2004, pages 025103R:1-4).

AMARAL L.A.N., OTTINO J. M. «Complex Networks», (The European Physical Journal B number 38, 2004, pages 147-162).

BARRABASÍ A-L. «Linked», (A Plume book, 2003).

- BOCCALETTI S., LATORA V., MORENO Y., CHAVEZ M., HWANG D.U. «Complex networks: Structure and dynamics», (Physics Reports number 424, 2006, pages 175-308).
- BATAGELJ V., MRVAR A., Pajek software, <http://vlado.fmf.uni-lj.si/pub/networks/pajek/>. (2007).
- CRUCITTI P., LATORA V., MARCHIORI M. «A topological analysis of the Italian electric power grid», (Physica A number 338, 2004, pages 92-97).
- CRUCITTI P., LATORA V., MARCHIORI M. «Model for cascading failures in complex networks», (Physical Review E number 69, 2004, pages 045104:1-4).
- KINNEY R., CRUCITTI P., ALBERT R., LATORA V. «Modeling cascading failures in the North American power grid», (The European Physical Journal B number 46, 2005, pages 101-107).
- LATORA V., MARCHIORI M. «Economic small-world behavior in weighted networks», (The European Physical Journal B number 32, 2003, pages 249-263).
- PORTA S., CRUCITTI P., LATORA V. «The network analysis of urban streets: a primal approach», (Environment and Planning B: Planning and Design number 33, 2006, pages 705-725).
- ROSATO V., BOLOGNA S., TIRITICCO F. «Topological properties of high-voltage electrical transmission networks», (Electric Power Systems Research number 77, 2007, pages 99-105).
- SIMONSEN I., BUZNA L., PETERS K., BORNHOLDT S., HELBING D. «Stationary Network Load Models Underestimate Vulnerability to Cascading Failures», (arXiv:0704.1952v1, 2007).
- WATTS D. J., STROGATZ S. H. «Collective dynamics of «small-world» networks», (Nature number 393, 1998, pages 440-442).

