

El transport d'energia elèctrica: complexitat, fragilitat i apagades

(Institut d'Estudis Catalans - Dijous, 22 de juny de 2006)

Martí Rosas i Casals

Càtedra UNESCO de Sostenibilitat, Universitat Politècnica de Catalunya
EUETIT, Colom, 1. 08222 Terrassa, Espanya
A/e: rosas@mmt.upc.edu

Laboratori de Sistemes Complexos, Universitat Pompeu Fabra
Dr. Aiguader, 80. 08003 Barcelona, Espanya

1. Introducció

El tipus de vida que actualment portem tendeix a associar el benestar a un augment en el consum de matèria, d'informació i, en conseqüència, d'energia. L'exigència de disposar d'una font energètica fiable en qualsevol punt de l'espai i del temps ha transformat un particular vector energètic, no emmagatzemable, com és l'electricitat i la infraestructura que ens permet generar-ne, transportar-ne, distribuir-ne i consumir-ne en elements essencials per al desenvolupament de la societat moderna. Tot i això, l'augment recent de notícies referides al funcionament deficitari de la xarxa elèctrica i a algunes grans apagades ha fet créixer la preocupació per la integritat estructural, la seguretat de subministrament i la veritable eficàcia d'aquest sistema de complexitat i fragilitat, pel que sembla, cada cop més elevades.

En l'esforç per entendre les relacions i interdependències entre els diferents elements que formen aquest sistema, i amb la previsió que els processos de desregularització n'augmentin la dificultat de gestió, en alguns treballs d'investigació s'ha començat a proporcionar resposta a algunes preguntes molt fonamentals: les grans apagades i les fallides en cascada són inevitables o bé són resultat de la nostra incapacitat per a comprendre simultàniament les dimensions territorial, social, econòmica i tècnica d'aquestes xarxes? Es pot reduir l'aparent fragilitat de la xarxa elèctrica simplement augmentant-ne i reforçant-ne l'«esquelet» en forma de noves i més completes infraestructures o cal una comprensió veritablement orgànica, i no tan jeràrquica, de les relacions dinàmiques que hi esdevenen?

En aquest sentit, aquesta xerrada vol mostrar alguns dels resultats que han permès començar a donar resposta als interrogants anteriors i presentar altres preguntes que van sorgint en aquest procés de comprensió del sistema complex que és la xarxa de transport de l'energia elèctrica.

2. Complexitat estructural i dinàmica

La xarxa elèctrica és el sistema dinàmic creat per l'ésser humà més connectat, estès i complex del món. Malgrat que les apagades són difícils de predir i prevenir, la concepció generalitzada que és difícil simular el comportament de la xarxa per identificar i corregir una bona part de les vulnerabilitats del sistema no és del tot correcta. Amb les potències de càlcul actuals, models dinàmics de la xarxa de més de quaranta mil línies (fins a cent mil) es poden resoldre amb certa facilitat. El problema rau en el nombre gairebé infinit de contingències amb les quals ens podem trobar i que es poden esdevenir en moments en què l'estat del sistema no és del tot conegut. En aquestes condicions, no és possible predir acuradament com es propagarà una determinada pertorbació i els models perden fiabilitat.

Si bé l'estudi acurat del comportament dinàmic de la xarxa és important i essencial per a aconseguir un bon disseny i un bon funcionament, existeixen altres metodologies d'estudi que,

des de fa uns quants anys, i prescindint de bona part d'aquesta precisa definició dinàmica tan necessària, han trobat en l'estudi dels fenòmens topològics i estructurals uns resultats sorprenents. Aquesta aproximació científica recent rep el nom de «ciència de les xarxes complexes», i utilitza eines com ara l'anàlisi estadística i la teoria de grafs per a caracteritzar certes propietats dels sistemes, entesos aquí com a conjunts formats per un elevat nombre d'elements units per determinades interaccions (això és, xarxes). En aquest sentit, hom intenta situar-se en un nivell superior des d'on observa el sistema i l'intenta caracteritzar, sense necessitat d'una definició acurada de cadascun dels elements que el formen (figura 1).

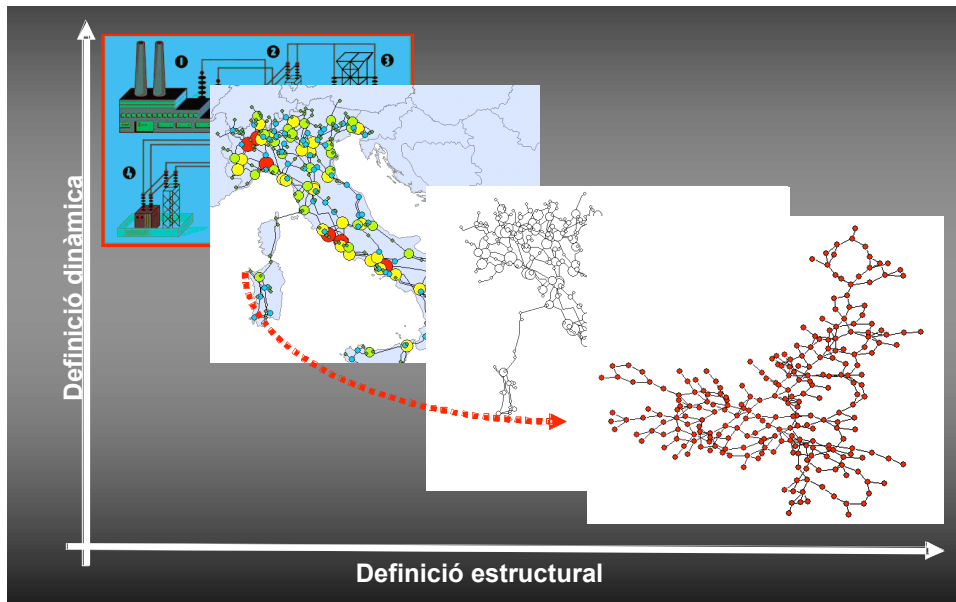


FIGURA 1. Una elevada definició estructural implica una baixa definició dinàmica i a l'inrevés.

Un dels principals motius subjacents al fet de voler caracteritzar la forma i l'estructura d'una xarxa és el que afirma que l'estructura sempre afecta la funció [1]. Així com la topologia dels vincles socials afecta la transmissió de la informació o de les malalties, la topologia de la xarxa elèctrica afecta l'estabilitat i la resistència en la transmissió de l'electricitat. Per tant, sembla coherent pensar que si aconseguim conèixer bé aquesta «anatomia», podrem conèixer millor els fenòmens dinàmics que hi esdevenen. Lamentablement, en molts casos ens trobem amb un seguit de complicacions que dificulten la tasca.

1. *Complexitat estructural.* Partim d'un fet molt recurrent: el sistema de connexions d'una xarxa (això és, les relacions entre els diferents vèrtexs) pot ser a vegades molt difícil d'esbrinar.
2. *Evolució.* El diagrama de connexió d'una xarxa no és constant al llarg del temps: a Internet, pàgines i enllaços es creen i es destrueixen cada minut.
3. *Diversitat d'enllaços.* Els enllaços o vèrtexs entre els diferents nodes poden tenir diferents pesos, direccions, sentits i signes.
4. *Complexitat dinàmica.* Els nodes poden ser sistemes dinàmics no lineals, amb un comportament al llarg del temps descrit per complicades funcions temporals.
5. *Diversitat nodal.* Pot haver-hi molts tipus diferents de nodes, amb funcions específiques molt diferents dins d'una mateixa xarxa.

6. *Metacomplikacions*. Les diferents complicacions descrites s'influencien mútuament. Un primer exemple seria el de l'estructura actual de la xarxa elèctrica, que depèn del seu creixement al llarg dels anys i, per tant, és un cas en què l'evolució de la xarxa [2] afecta la topologia [1]. N'és un segon exemple la base de la memòria i l'aprenentatge, que se sustenta, en part, en el reforçament de la interconnexió d'un grup de neurones quan treballen conjuntament per «llençar» un determinat senyal nerviós de manera repetida. En aquest cas, la dinàmica nodal [4] afecta el pes de les connexions [3].

Tot i que en alguns casos aquestes complicacions esmentades són gairebé impossibles d'esbrinar o solucionar, l'evolució de la ciència de les xarxes complexes com més va més ho permet [2, 3].

3. Fragilitat i apagades

Malgrat que les apagades de grans dimensions són fenòmens poc probables, comporten un cost elevat als usuaris i a la societat en general, així com a les companyies elèctriques. A causa de la complexitat i la manca d'eines estadístiques que permetin un estudi complet del sistema, no resulta fàcil valorar correctament aquest risc, i en especial el risc financer, producte del cost associat a un esdeveniment i la seva probabilitat d'ocurrència (figura 2).

Majors apagades històriques						
Any	Dia - Mes	Zona	Afectats (milions)	Pèrdues		Durada (hores)
				(MW)	(milions \$)	
1965	9/10 - Novembre	NE - EEUU	30		100 \$	13
1967	5 - Juny	NE - EEUU	5			
1977	13 - Juliol	NE - EEUU (Nova York)	9		135 \$	
1994	14 - Desembre	O - EEUU	1,5	5.020		
1996	2 - Juliol	O - EEUU	3			
	11 - Agost		7,5			
2003	14 - Agost	NE - EEUU / Canadà	50	60.000	6.000 \$	15
	23 - Setembre	Suècia / S - Dinamarca	5			
	28 - Setembre	Itàlia	57			9
	10 - Novembre	Xile	15	1.100		
2004	12 - Juliol	Grècia	3,5			5
2005	25 - Maig	Moscú	10			24
	18 - Agost	Illa de Java, Indonèsia	100			7
	Agost - Octubre	Florida, EEUU	1,3			200

FIGURA 2. Relació de les apagades històriques més importants, amb milions de persones afectades, pèrdues (en MW i milions de dòlars) i durada màxima.

Tot i que s'acostuma a explicar el motiu d'una apagada de manera simplista, associant el fenomen a una o dues causes principals, la veritat és que són fruit de contingències múltiples i poc probables, però amb interaccions complexes. Els operadors de la xarxa s'exposen de cop i volta a una allau de senyals d'alarma i, sovint, a molt poca informació per a actuar, amb el benentès que tinguin l'autoritat per a fer-ho. En general, la propagació d'una pertorbació inclou una combinació dels fenòmens següents:

- Caiguda de línies en cascada, per efecte d'un traspàs de la càrrega d'una d'aquestes línies a alguna de les veïnes.

- Caiguda de línies que porta, a la vegada, a la caiguda d'equips (per exemple, generadors i transformadors).
- Generació de l'efecte illa a causa de la inestabilitat de la freqüència. El desequilibri entre generació i càrrega fa que la freqüència es desviï del seu valor nominal i generi més caigudes d'equips.
- Pèrdues de sincronia.
- Problemes de col·lapse o inestabilitat de voltatge, que normalment passen quan la transmissió d'energia s'incrementa per un conflicte entre la utilització de fonts llunyanes o properes als punts de consum.

Els models que permeten simular el comportament de la xarxa a fenòmens com els esmentats anteriorment poden ser relativament senzills si hom té en consideració algunes aportacions de la física estadística. Simular la resposta d'una xarxa davant la pèrdua d'un o més elements constitutius rep el nom d'«anàlisi de la fragilitat». La *fragilitat* es pot estudiar des de dos punts de vista: *estàtic* i *dinàmic*. A la vegada es poden realitzar dos tipus de simulacions: *fallides aleatòries* (quan els nodes o arestes que desapareixen ho fan de manera aleatòria) i *fallides selectives* (quan els nodes que desapareixen són els de major grau).¹ En una anàlisi de fragilitat estàtica, s'observa l'evolució de la connectivitat global de la xarxa i com es redueix la mida del component connex en el procés de pèrdua de nodes. En aquest sentit, i com a indicador de la robustesa de la xarxa, aquest tipus d'anàlisi ha proporcionat un resultat sorprenent (figura 3): l'heterogeneïtat de la distribució de grau (això és, la presència simultània en una xarxa de nodes amb molts enllaços i nodes amb pocs enllaços) porta associada una elevada fragilitat als atacs selectius, però, al mateix temps, una elevada resistència a les fallides aleatòries [4, 5].

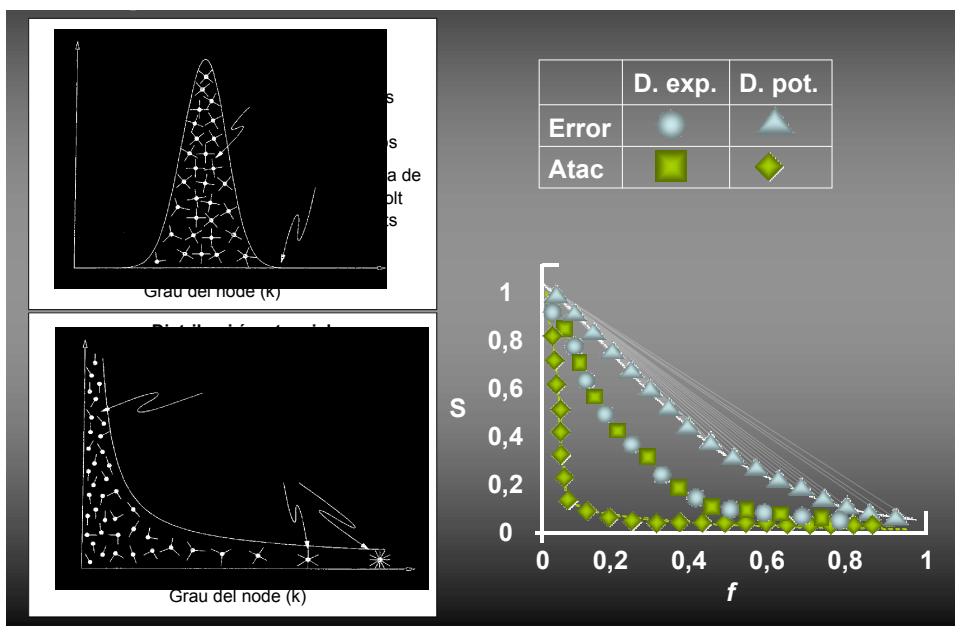


FIGURA 3. Fragilitat estàtica en funció de la distribució de grau. Per a una xarxa amb distribució de grau exponencial, la variació percentual de la mida de la xarxa S en funció de la fracció de nodes eliminats f segueix una mateixa evolució, tant pel cas de fallides aleatòries (\square) com d'atacs selectius (\triangle). Per a una xarxa amb distribució de grau potencial, aquesta variació es mostra clarament diferent per a un cas i per a un altre: per a una mateixa fracció f de nodes eliminats, la disminució de la mida del component connex de la xarxa és molt més dramàtica en el cas d'atac selectiu (\downarrow) que en el de fallida aleatòria (ρ).

1. Nombre d'arestes que es connecten a un node i que enllacen, a la vegada, amb els nodes primers veïns.

L'estudi de la fragilitat dinàmica és més difícil, ja que s'hi afegeix el comportament temporal de l'energia que es transporta al llarg de les arestes. Els treballs realitzats fins avui [6-8] demostren que les tendències observades en l'anàlisi estàtica augmenten i es confirmen en el cas de l'anàlisi dinàmica. S'observa, en general, que les fallides en cascada poden ocórrer amb molta més facilitat si la xarxa presenta una distribució de grau molt heterogènia o bé el node eliminat es troba entre els de grau més alt. Aquests resultats contradiuen la concepció generalitzada que associa la robustesa de la xarxa elèctrica a l'augment de línies, estacions i noves infraestructures. En general, la introducció de nous elements o redundàncies (en forma de noves línies que connecten els mateixos nodes, per exemple) augmenta la fragilitat dinàmica del sistema en introduir nous elements que poden, al mateix temps, fer fallida. Però, a més, si aquests nous elements no s'introdueixen acuradament, podem generar un procés de jerarquització de la xarxa que, malgrat que la faci possiblement més robusta a les fallides aleatòries, la faci especialment fràgil als atacs premeditats o a les fallides dels nodes més connectats.

4. Inevitabilitat

Tot i que les grans apagades poden esdevenir fenòmens particularment rellevants en un determinat punt de l'espai i el temps, paradoxalment, i vistes des d'una perspectiva històrica i estadística més àmplia, no són menys probables que un terratrèmol a Califòrnia: tard o d'hora, i per molts esforços que hom pugui fer, el desastre sobrevindrà inesperadament.

Els models anteriors proporcionen indicacions generals dels complexos i dramàtics efectes produïts per l'elevat grau de connexió de la xarxa elèctrica, però són excessivament simples quan es tracta de modelar apagades reals. En aquest sentit, des de principis dels anys noranta, i fruit del treball de matemàtics, enginyers i físics, s'han desenvolupat dos models basats en sengles teories de fallida de sistemes. La primera, desenvolupada per John Doyle a l'Institut de Tecnologia de Califòrnia (Caltech), assegura que, si bé el disseny de la xarxa és adequat per a protegir-la de fallides petites i comunes, no ho és necessàriament per a protegir-la de les importants i menys freqüents [9]. La segona explicació competidora, proposada per Benjamin A. Carreras, Ian Dobson i David Newman, del Laboratori Nacional d'Oak Ridge, veu les apagades com una sorprenent força constructiva que realimenta, de manera inconscient, el modelatge de la xarxa al llarg d'anys i fins i tot dècades [10]. Les apagades fomentarien així la inversió per a reduir la fragilitat dels sistemes sobrecarregats, buscant sempre la solució de compromís que augmentés el retorn de capital de les inversions i disminuís el cost de la distribució de l'energia. Indirectament, però, aquest fet afavoriria la introducció de noves càrregues en el sistema, que l'empenyerien de nou cap a una estat *crític* propens a la fallida.

Tant Doyle com l'equip de Carreras, Newman i Dobson van estudiar la relació existent entre la distribució estadística de les fallides a la xarxa elèctrica dels Estats Units i la seva magnitud (en MW perduts) des del 1984 fins ara. S'observa que la freqüència real de grans fallides és molt més elevada que la que estadísticament li correspondria pel fet de tractar-se d'un fenomen essencialment aleatori: en comptes d'ajustar una corba *exponencial*, com seria el cas d'un fenomen explicat amb una campana de Gauss (o normal), la corba que millor s'ajusta decau molt més lentament. És una corba de tipus *potencial*, en la qual la probabilitat d'una apagada es relaciona amb la seva magnitud a partir d'un exponent constant. (Aquestes corbes són, qualitativament, com les mostrades a l'esquerra de la figura 3.)

Curiosament, les distribucions de freqüències en forma de llei potencial són firma dels sistemes complexos, en els quals les relacions i interdependències entre els diferents elements que els componen donen lloc a propietats difícilment explicables a partir de la seva individualitat. I molt més important: aquestes propietats són un producte *natural* i *inevitable* dels mateixos sistemes. Trobem casos similars en els terratrèmols, els focs forestals i, en general, en el procés de fallida de molts sistemes dinàmics reals [11]. La corba predeia amb exactitud la fallida del 14

d'agost de 2003 a la costa est dels Estats Units i n'afirmava la freqüència: cada trenta-cinc anys. L'última gran apagada havia estat el 9 de novembre de 1965, exactament trenta-vuit anys abans.

Quina d'aquestes dues teories explica millor el mecanisme existent rere de les grans apagades és, ara per ara, motiu d'un intens debat. Doyle entén que la noció de forces oposades i en lluita, mantinguda per l'equip de Carreras, Newman i Dobson és, en enginyeria, l'equivalent al creacionis-me en ciències de l'evolució i en qüestiona fins i tot els mètodes estadístics. Però en ambdós casos es coincideix en un fet: les grans fallides són un fenomen natural i inevitable de la xarxa elèctrica, i per a eliminar-les cal renovar-ne completament la manera d'operar.

Si això és així, potser la millor opció és resignar-se i, en tot cas, preparar-se per al desastre. Aquesta tercera «escola de pensament» ve de la mà de Sarosh N. Talukdar, Jay Apt i Lester B. Lave, de la Universitat Carnegie Mellon a Pittsburgh [12]. Aquest pragmatisme busca *sobreviure* més que no pas *prevenir*, i assegura que el problema és molt més fonamental, ja que està en la impossibilitat d'establir un punt fix que confirmi que el risc de fallida ha estat disminuït efectivament. Amb aquesta impossibilitat, cal plantejar-se quines accions s'han d'emprendre per a minimitzar les conseqüències del desastre. De fet, des d'una òptica complementària, un grau de preparació més alt per a sobreviure al fenomen de les apagades podria disminuir la freqüència de les més grans. Una de les solucions proposades és la de la desconexió voluntària (o «dispersió de càrrega») d'una part de la xarxa, i crear «illes energètiques» quan el sistema està sobrecarregat, si aquesta part està preparada per a resistir una apagada petita [13]. Un cas similar seria el de la crema controlada de parts de bosc per evitar grans focs forestals. És clar que, a causa de la rapidesa del fenomen, aquest aïllament s'hauria de portar a terme de la manera més automàtica possible. Els detectors existeixen i s'han implementat a bastament a la indústria, però la inversió és considerable.

5. Electricitat i mercat

Per descomptat que la idea d'acceptar la inevitabilitat de les apagades és refusada per una immensa majoria de polítics, empresaris i enginyers d'empresa, que creuen que tota resposta als problemes d'integritat de la xarxa passa per fer-la físicament més robusta, augmentant els quilòmetres de línia i el nombre de subestacions, millorant les tècniques de simulació, de regulació en temps real i, sobretot, dels aspectes reguladors. De fet, els models anteriors suggereixen que, malgrat que tot això es faci (i es faci correctament), les apagades succeiran. I succeiran més sovint del que hom es pot esperar.

Tot i això, tothom sembla estar d'acord que una bona part del problema també se l'endú l'actual sistema de control i gestió de la xarxa, juntament amb les noves regles que imposa el mercat de l'energia. Les antigues estructures empresarials de l'àmbit de l'energia, basades en la regulació, el monopoli i la verticalitat, han deixat pas a noves formes empresarials que separen les activitats de generació, transmissió i distribució, i que han vist en el comerç de l'electricitat un bé de consum més que no pas un servei essencial o una necessitat. Sobretot en el cas dels Estats Units, es donen simultàniament un seguit de fenòmens preocupants que han portat el sistema a un estat crític, però a la vegada de control més difús i menys coordinat:

- Noves centrals generadores situades a zones amb regulacions ambientals laxes o baix cost de mà d'obra han fet que el flux total d'energia entre punts productors i generadors s'hagi incrementat de manera dramàtica i hagi sobrecarregat les línies.
- La informació necessària per a predir l'estrès del sistema i reaccionar-hi correctament (com ara informació bàsica en la quantitat de flux energètic) comença a desaparèixer i és tractada per les companyies com a informació secreta a causa de la competitivitat.
- La separació entre companyies de generació i de transmissió ha comportat una potència reactiva inadequada que les companyies de generació no cobren en generar, tot i que les companyies transmissores necessiten per a estabilitzar el voltatge i augmentar l'estabilitat del sistema.

Algunes veus proposen la implantació genèrica de sistemes de control electrònics de línies de corrent continu que permetin alliberar i reduir les variacions de voltatge de les línies de corrent altern en moment de màxim estrès, tot i que la implantació d'aquests nous dissenys tecnològics a la xarxa de transport, en aquest moment de desregulació, sembla una utopia. Una altra proposta és simplement augmentar i expandir la capacitat de transmissió bo i relaxant les constriccions mediambientals que limiten la construcció de noves infraestructures i fent que el consumidor sigui particip de l'augment del cost. Una última proposta seria tornar a canviar les «regles del joc» per tal que estiguessin d'acord amb la física i la dinàmica de la xarxa. Sembla clar que mentre la desconexió entre l'economia i la física de la xarxa continuï existint, hi continuarà havent apagades.

6. Reptes

Els reptes que cal afrontar en aquest marc de desafiament econòmic, tecnològic i científic no permeten un procés de pensament lineal ni unívoc. La naturalesa complexa de la xarxa de transport d'energia elèctrica fa que els reptes siguin variats i d'àmbits diferents. Destaquem els següents:

- *Tecnològics*. En l'àmbit tecnològic, caldria implantar sistemes de control i regulació adequats que permetin alliberar, reduir i gestionar les variacions de voltatge de les línies de corrent altern en moment de màxim estrès. A més, caldria:
 - Millorar els programes de manteniment.
 - Definir la desconexió voluntària d'una part de la xarxa si aquesta part està preparada per a resistir una apagada petita (_ illes energètiques).
- *Polítics i econòmics*. En l'àmbit polític, caldria «connectar» de nou els aspectes econòmics (mercat liberalitzat) amb els físics (que consideren la xarxa com una única màquina que funciona en sincronia). A més, caldria:
 - Tenir públic accés a la informació i a les dades relatives al flux energètic, a les apagades i a la xarxa en general, i que no estiguin filtrades per qüestions de competitivitat entre empreses ni de lliure competència.
 - Augmentar la inversió en R+D de les empreses del sector de l'energia, que no arriba al 0,5 % dels seus beneficis (de les més baixes de tot el sector industrial), sense parlar d'aspectes relacionats amb el manteniment, la millora del sistema de transmissió, de la fiabilitat dels seus components, així com dels sistemes de seguretat i protecció, que no pot ser mai un objectiu assolible sense els recursos adequats.
- *Científics*. La xarxa elèctrica és un sistema que funciona a múltiples escales temporals i espacials, per la qual cosa intentar solucionar-ne els problemes amb formes de pensament lineal, parcial o excessivament simplista és inadequat. La xarxa s'ha de repensar i definir com un tot, amb la implementació conjunta i coordinada de mesures que incloguin aspectes relacionats amb:
 - Planificació
 - Operació
 - Manteniment
 - Regulació
 - Impactes en el medi natural i social

Cal, en resum, una nova aproximació al concepte de *xarxa* com un tot que, d'una manera equilibrada, defineixi mesures de planificació, operació i manteniment, que inclogui els aspectes de cost, impacte i risc per a cada una, i que forci que el sistema operi en les condicions per a les quals s'ha dissenyat i estudiat i no en d'altres de les quals es desconeixen les conseqüències.

Referències

1. STROGATZ, S. H. «Exploring complex networks». *Nature* (2001), p. 268-276.
2. BARABÁSI, A.-L. *Linked. The New Science of Networks*. Cambridge, MA: Perseus Publishing, 2002.
3. WATTS, D. J. *Six Degrees. The Science of a Connected Age*. Nova York: W. W. Norton & Company, Inc., 2003.
4. CRUCITTI, P. [et al.]. «Efficiency of scale-free networks: error and attack tolerance». *Physica A*, núm. 320 (2003), p. 622-642.
5. ALBERT, R.; JEONG, H.; BARABÁSI, A.-L. «Error and attack tolerance of complex networks». *Nature*, núm. 406 (2000), p. 378-382.
6. MOTTER, A. E.; LAI, Y.-C. «Cascade-based attacks on complex networks». *Physical Review E*, núm. 66 (2002), p. 065102R.
7. CRUCITTI, P.; LATORA, V.; MARCHIORI, M. «A model for cascading failures in complex networks». *Physical Review E*, núm. 69 (2004), p. 045104R.
8. KINNEY, R. [et al.]. «Modeling cascading failures in the North American power grid». *European Physical Journal B*, núm. 46 (2005), p. 101-107.
9. CARLSON, J. M.; DOYLE, J. «Highly optimized tolerance: A mechanism for power laws in designed systems». *Physical Review E*, núm. 60 (2)(1999), p. 1412-1427.
10. CARRERAS, B. A. [et al.]. «Critical points and transitions in an electric power transmission model for cascading failure blackouts». *Chaos*, núm. 12 (4)(2002), p. 985-994.
11. BAK, P. *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality*. Nova York: Springer Verlag, 1999.
12. TALUKDAR, S. N. [et al.]. «Cascading Failures: Survival Versus Prevention». *The Electricity Journal* (novembre 2003), p. 25-31.
13. MOTTER, A. E. «Cascade control and defense in complex networks». *Physical Review Letters*, núm. 93 (2004), p. 098701.