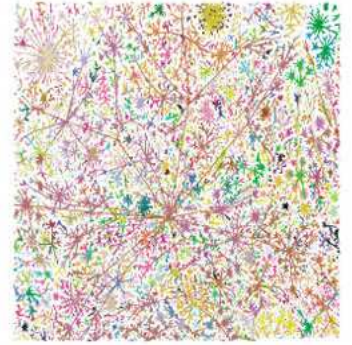


A Internet, mapeada na página oposta, é uma rede sem escalas onde alguns sites (detalhe ao lado) têm um número aparentemente ilimitado de conexões com outros. Este mapa, feito em 6 de fevereiro de 2003, traça os caminhos mais curtos de um web site experimental para cerca de 100 mil outros, usando cores parecidas para endereços similares



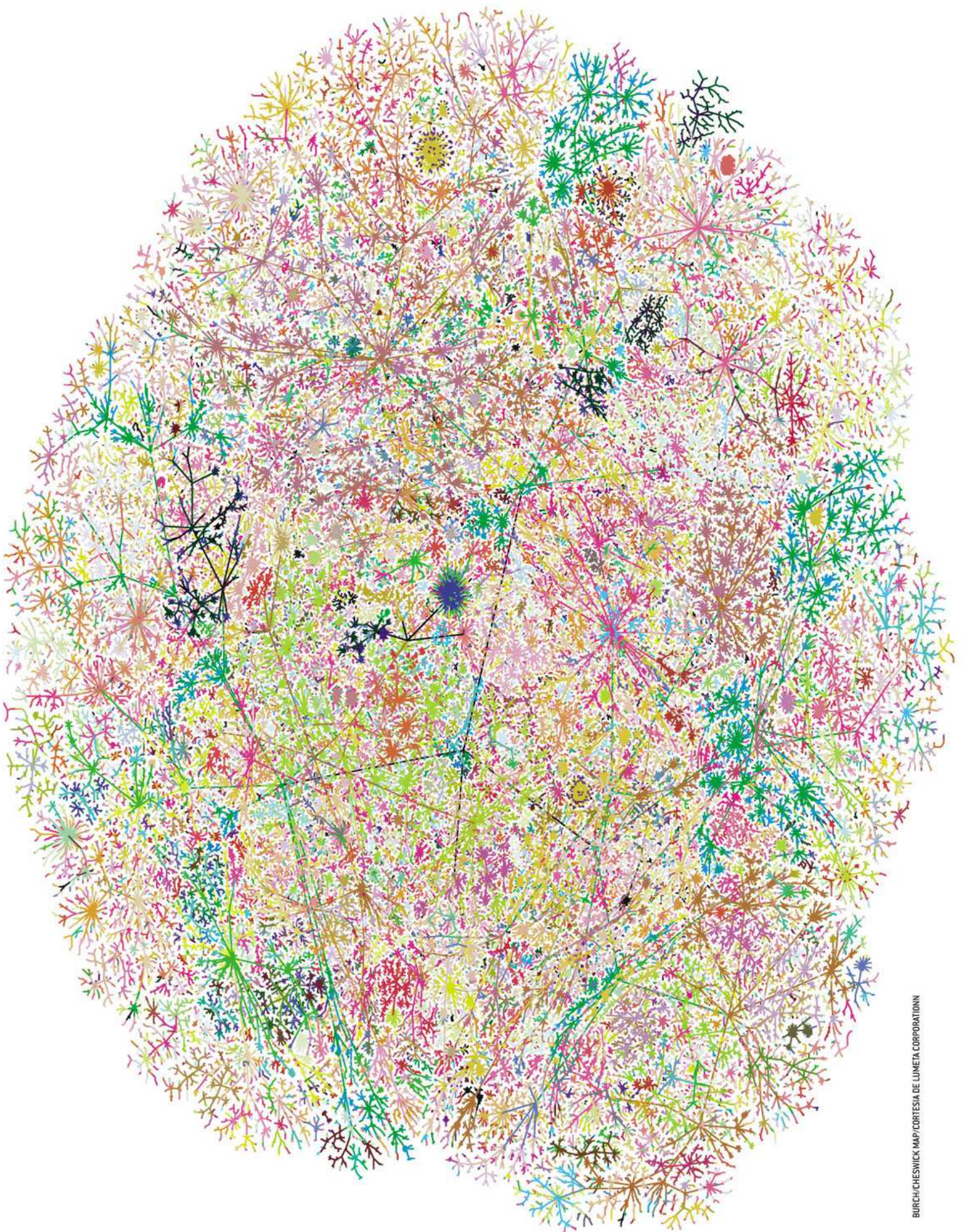
Redes sem escala

Cientistas descobriram recentemente que a arquitetura subjacente a vários sistemas complexos é governada pelos mesmos princípios organizadores. Essa descoberta tem implicações importantes para um conjunto de resultados, do desenvolvimento de medicamentos à segurança na Internet

Por Albert-László Barabási e Eric Bonabeau

AS REDES ESTÃO EM TODA PARTE. O cérebro é uma rede de células nervosas conectadas por axônios e as próprias células são redes de moléculas ligadas por reações bioquímicas. As sociedades também são redes, constituídas por pessoas unidas por amizades, laços familiares e profissionais. Em uma escala mais ampla, redes alimentares e ecossistemas podem ser representados como redes de espécies. E redes permeiam a tecnologia: a Internet, as redes de energia elétrica e os sistemas de transporte são apenas alguns exemplos. A própria linguagem que usamos para transmitir essas idéias é uma rede, formada por palavras conectadas por padrões sintáticos.

Mas, apesar da importância e do alcance das redes, os cientistas nunca compreenderam muito bem suas estruturas e propriedades. De que maneira as interações entre nós defeituosas em uma rede genética complexa resultam em câncer? Como a difusão ocorre tão rapidamente em certos sistemas sociais e de comunicação, causando epidemias de doenças e vírus de computador? Como algumas redes continuam a funcionar, após o colapso da maioria de seus nós?



BURCH/CHESWICK MAP/CORTESIA DE LUMETA CORPORATION

Pesquisas recentes começam a responder a essas perguntas. Nos últimos anos, estudiosos de diversas áreas descobriram que muitas redes – a World Wide Web, o sistema metabólico de uma célula ou os atores de Hollywood – são dominadas por uma quantidade relativamente pequena de nós conectados a muitos outros pontos. As redes que contêm esses nós importantes, chamados “pólos de convergência e irradiação”, costumam ser chamadas de “sem escala”, o que significa que certos pólos têm uma quantidade aparentemente ilimitada de links e nenhum nó se parece com os demais. Essas redes também apresentam comportamentos previsíveis: são resistentes a defeitos acidentais, porém extremamente vulneráveis a ataques coordenados.

Essas descobertas alteraram drasticamente aquilo que pensávamos conhecer sobre o complexo mundo interconectado que nos cerca. Não explicados por teorias preexistentes de redes, os pólos oferecem provas convincentes de que vários sistemas complexos possuem uma arquitetura rígida, governada por leis fundamentais – leis que parecem aplicar-se igualmente a células, computadores, linguagens e à sociedade. Além disso, esses princípios organizadores têm implicações significativas no desenvolvimento de medicamentos mais eficazes, na defesa da Internet contra os *hackers* e na contenção de epidemias letais, entre outras aplicações.

Por mais de 40 anos, a ciência tratou todas as redes complexas como sendo completamente aleatórias. Esse paradig-

ma tem suas raízes na obra de dois matemáticos húngaros, Paul Erdős e Alfréd Rényi. Em 1959, visando descrever as redes observadas nas comunicações e nas ciências biológicas, Erdős e Rényi sugeriram que esses sistemas poderiam ser efetivamente modelados com eficácia conectando seus nós a links posicionados aleatoriamente. A simplicidade dessa abordagem e a elegância de alguns dos teoremas desses pesquisadores revitalizaram a teoria dos gráficos, levando ao campo da matemática que se concentra em redes aleatórias.

Redes sem Escala

UMA PREVISÃO IMPORTANTE da teoria de redes aleatórias diz que, apesar da localização randômica dos links, o sistema resultante será profundamente democrático: a maioria dos nós terá aproximadamente a mesma quantidade de conexões. De fato, em uma rede aleatória os nós obedecem a uma distribuição de Poisson, em forma de sino, e os nós com um número de links significativamente superior ou inferior à média são extremamente raros. As redes aleatórias são denominadas exponenciais, porque a probabilidade de que um nó esteja conectado a k outros pontos diminui exponencialmente para grandes k .

Assim, em 1998, quando – juntamente com nossos colegas Hawoong Jeong e Réka Albert da University of Notre Dame – embarcamos em um projeto para mapear a World Wide Web, esperávamos encontrar uma rede aleatória. Eis o motivo: as pessoas seguem seus próprios interesses para decidir a que sites elas irão vin-

cular seus documentos da Web, e dada à diversidade de interesses de todas as pessoas e à enorme quantidade de páginas entre as quais é possível escolher, o padrão de conexões resultante deveria parecer razoavelmente aleatório.

Mas, nossas medições, no entanto, contrariaram essa expectativa. Para esse projeto, tínhamos criado um software que saltava de uma página da Web para outra e registrava todos os links que conseguia. Embora esse robô virtual tenha explorado apenas uma minúscula fração de toda a Web, o mapa criado por ele nos revelou uma informação surpreendente: um punhado de páginas extremamente conectadas estão essencialmente mantendo a coesão da World Wide Web. Mais de 80% das páginas em nosso mapa possuíam menos de quatro links, mas uma pequena minoria, menos de 0,01% de todos os nós, tinha mais de mil links. Um levantamento posterior revelou um documento referenciado em mais de dois milhões de outras páginas!

Ao contar quantas páginas da Web possuem exatamente k links, descobrimos que a distribuição obedecia à denominada lei exponencial: a probabilidade de qualquer nó estar conectado a k outros nós era proporcional a $1/k^n$. O valor de n para links chegando a um nó era aproximadamente dois, de modo que, por exemplo, qualquer nó tinha uma probabilidade cerca de quatro vezes maior que seu vizinho de possuir somente metade da quantidade de links chegando ao nó. As leis exponenciais são bem diferentes das distribuições em forma de sino que caracterizam redes aleatórias. Em especial, uma lei exponencial não tem um pico, como uma curva em forma de sino; ela é descrita por uma função continuamente decrescente. Quando plotada em escala logarítmica dupla é uma linha reta (*ver ilustração pág. 67*). Diferentemente da distribuição democrática dos links nas redes aleatórias, as leis exponenciais descrevem sistemas onde alguns pólos de convergência e irradiação, como Yahoo e Google, predominam.

Resumo/ *Redes sem Escala*

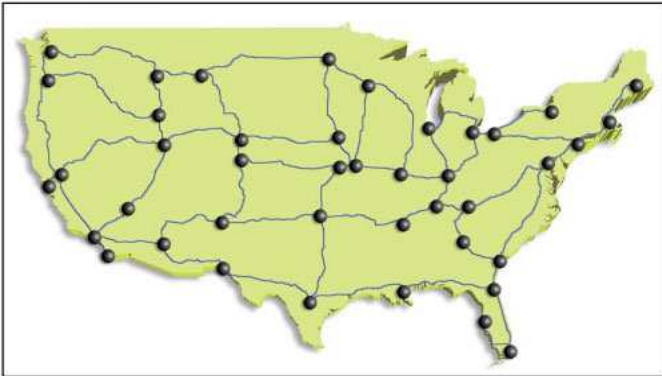
- Muitos sistemas complexos apresentam uma importante propriedade em comum: certos nós possuem uma quantidade enorme de conexões com outros nós, enquanto a maioria dos nós tem poucas conexões. Os nós mais visitados, denominados pólos de irradiação e convergência, podem ter centenas, milhares ou mesmo milhões de links. Nesse sentido, a rede parece não ter uma escala.
- As redes sem escala têm algumas características importantes. Por exemplo: são resistentes a falhas acidentais, mas vulneráveis a ataques coordenados.
- A compreensão dessas características pode levar ao surgimento de novas aplicações em muitas áreas. Por exemplo: cientistas da computação podem ser capazes de criar estratégias mais eficazes para evitar que vírus de computador incapacitem uma rede como a Internet.

REDES ALEATÓRIAS E REDES SEM ESCALA

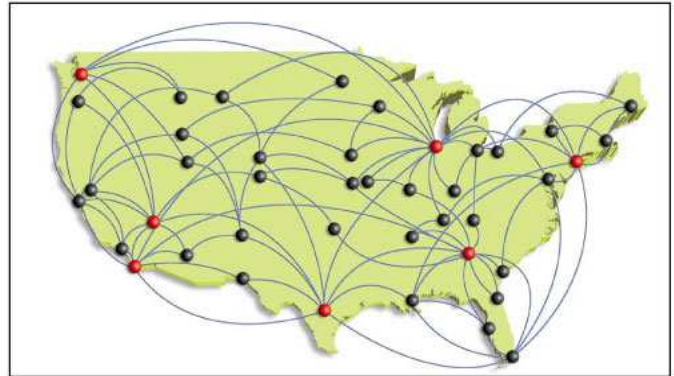
AS REDES ALEATÓRIAS, que se assemelham ao sistema rodoviário dos Estados Unidos (*simplificado no mapa à esquerda*), são formadas por nós com conexões estabelecidas aleatoriamente. Em sistemas como esse, os nós obedecem uma distribuição em forma de sino (*gráfico à esquerda*), onde a maioria dos nós possui aproximadamente a mesma quantidade de links. Em contraste, as redes sem escala, como o sistema de linhas aéreas dos Estados Unidos (*simplificado no mapa à direita*), contêm muitos

pólos (*vermelho*) — nós com uma quantidade muito grande de links. Neste caso, os nós obedecem a uma lei exponencial (*gráfico ao centro*), isto é: a maior parte dos nós possui um pequeno número de conexões e alguns têm uma quantidade imensa de links. Nesse sentido, o sistema não tem "escala". A característica que define esse tipo de rede é o fato de que a distribuição dos links, se plotada em um gráfico com ambos os eixos na escala logarítmica (*gráfico à direita*), resulta em uma linha reta.

Rede Aleatória



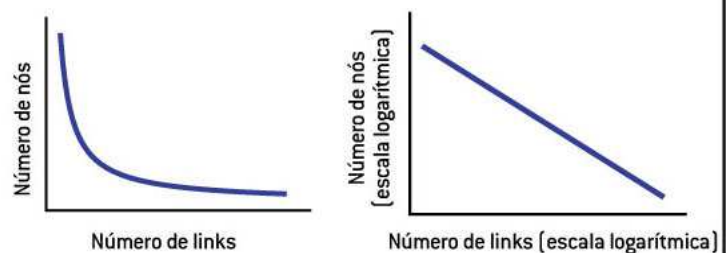
Rede sem Escala



Distribuição em Forma de Sino



Distribuição Segundo uma Lei Exponencial



Os pólos são simplesmente proibidos em redes aleatórias. Quando começamos a mapear a Web, esperávamos que os nós seguissem uma distribuição em forma de sino, como no caso da altura das pessoas. Em vez disso, descobrimos alguns nós que desafiavam explicações evidentes (quase como se tivéssemos nos deparado com uma quantidade significativa de pessoas com 30 metros de altura), o que nos levou a criar o termo "sem escala".

Há Muitas Redes sem Escala

NOS ÚLTIMOS ANOS, pesquisadores descobriram estruturas sem escala em uma quantidade espantosa de sistemas. Michalis Faloutsos da University of California, Petros Faloutsos da University of Toronto

e Christos Faloutsos da Carnegie Mellon University analisaram a estrutura física da Internet. Esses três irmãos cientistas da computação investigaram os roteadores conectados por linhas ópticas, ou baseadas em algum outro tipo de comunicação, e descobriram que a topologia dessa rede também é sem escala.

Pesquisadores também descobriram que algumas redes sociais são sem escala. Uma colaboração entre cientistas da Boston University e da Stockholm University, por exemplo, demonstrou que uma rede de relacionamentos sexuais entre pessoas na Suécia seguia uma lei exponencial: embora a maioria das pessoas tivesse apenas uma pequena quantidade de parceiros sexuais em suas vidas, alguns deles (os

pólos de convergência e irradiação) tinham centenas. Um estudo recente realizado por Stefan Bornholdt da University of Kiel na Alemanha concluiu que a rede de pessoas conectadas por e-mail também é sem escala.

Mark Newman da University of Michigan, em Ann Arbor, examinou colaborações entre cientistas de várias disciplinas, inclusive físicos e cientistas da computação, e descobriu que essas redes também eram sem escala, corroborando um estudo sobre matemáticos e neurologistas que conduzimos. Curiosamente, um dos maiores pólos de irradiação da comunidade matemática é o próprio Erdős, que escreveu mais de 1.400 ensaios com nada menos que 500 co-autores.

As redes sem escala podem ocorrer no mundo empresarial. Walter W. Powell da Stanford University, Douglas R. White da University of California em Irvine, Kenneth W. Koput da University of Arizona e Jason-Owen Smith da University of Michigan estudaram a formação de redes de parcerias no setor de biotecnologia nos Estados Unidos e descobriram pólos de irradiação bem definidos. Pesquisadores na Itália analisaram profundamente a rede. Usando dados coletados pelo Pharmaceutical Industry Database da Università di Siena, que fornece informações para quase 20.100 mil acordos de P&D entre mais de 7.200 organizações, os pesquisadores descobriram que os pólos de irradiação detectados por Powell e seus colegas eram, na verdade, parte de uma rede sem escala.

Até mesmo a rede de atores de Hollywood – popularizada pelo jogo *Six Degrees* de Kevin Bacon, onde os jogadores tentam conectar atores a Bacon por meio dos filmes nos quais atuaram juntos – é sem escala. Uma análise quantitativa dessa rede mostrou que ela é dominada por pólos de irradiação. Embora a maioria dos atores tenha apenas uma pequena quantidade de links com outros, um grupo de atores, entre eles Rod Steiger e Donald Pleasence, têm milhares de conexões.

Tratando de uma questão mais séria, as redes sem escala estão presentes no campo da biologia. Com Zoltán Oltvai, um biólogo especializado em células que trabalha na Northwestern University, en-

contramos uma estrutura sem escala nas redes metabólicas celulares de 43 organismos diferentes, pertencentes aos três domínios da vida, entre elas a *Archaeoglobus fulgidus* (uma arqueobactéria), a *Escherichia coli* (uma eubactéria) e o *Caenorhabditis elegans* (um eucarionte). Nessas redes, as células queimam os alimentos rompendo moléculas complexas para liberar energia. Cada nó é uma determinada molécula e cada link é uma reação bioquímica. Descobrimos que a maior parte das moléculas participa apenas de uma ou duas reações, mas algumas delas (os pólos de irradiação), como a água e a adenosina trifosfato, desempenham algum papel na maioria delas.

Descobrimos que a rede de interação protéica das células também é sem escala. Em uma rede desse tipo, duas proteínas estão “conectadas” se sabemos que elas interagem entre si. Quando investigamos o fermento de Baker, uma das mais simples células eucarióticas (que contêm núcleo), com milhares de proteínas, descobrimos uma topologia sem escala: embora a maior parte das proteínas interaja com apenas uma ou duas outras, algumas são capazes de prender-se fisicamente a um número enorme. Encontramos um resultado semelhante na rede de interação protéica de um organismo muito diferente do fermento, uma bactéria simples chamada *Helicobacter pylori*. De fato, quanto mais os cientistas estudavam as redes, mais encontravam estruturas sem escala. Essas

descobertas levantaram uma questão importante: Como podem sistemas tão fundamentalmente diferentes como a célula e a Internet terem a mesma arquitetura e obedecer às mesmas leis? Além de serem sem escala, essas diversas redes também compartilham uma propriedade fascinante: por razões ainda desconhecidas, o valor de n no termo k^n da lei exponencial tende a ficar entre dois e três.

Os Ricos Ficam mais Ricos

TALVEZ UMA QUESTÃO MAIS BÁSICA seja por que a teoria de redes aleatórias não é capaz de explicar a existência dos pólos de irradiação e convergência. Uma análise mais detalhada da obra de Erdős e Rényi revela duas razões. Ao desenvolver seu modelo, eles partiram do pressuposto de que tinham em mãos um levantamento completo dos nós antes de colocarem os links. Em contraste, a quantidade de documentos na Web nunca é constante. Em 1990 a Web tinha apenas uma página. Agora ela tem mais de três bilhões. A maioria das redes se expandiu de forma semelhante. Graças à natureza crescente das redes reais, os nós mais antigos tiveram maiores oportunidades para adquirir links.

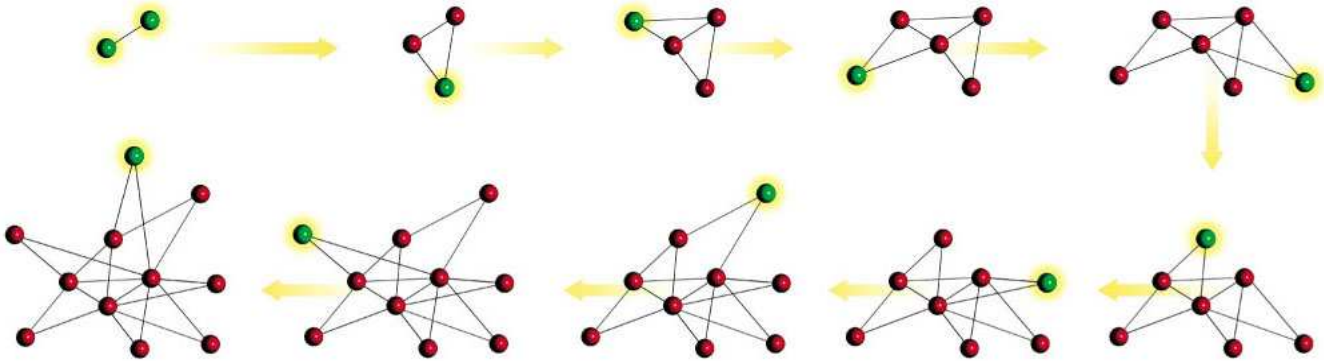
Além disso, os nós não são todos iguais. Ao decidir onde conectar suas páginas na Web, as pessoas podem escolher entre alguns bilhões de locais. Entretanto, a maioria de nós conhece apenas uma minúscula fração de toda a Web, e esse subconjunto tende a incluir os sites mais conectados, porque eles são mais fáceis de encontrar. Pelo simples ato de se conectarem a esses nós, as pessoas exercem e reforçam uma propensão a utilizá-los. Esse processo de “vinculação preferencial” também ocorre em outras circunstâncias. Em Hollywood, os atores mais conectados têm maior probabilidade de serem escolhidos para novos papéis. Na Internet, os roteadores mais conectados, que em geral têm maior largura de banda, são mais procurados por novos usuários. No setor de biotecnologia americano, empresas bem estabelecidas como a Genzyme tendem a

Exemplos de Redes sem Escala

REDE	NÓS	LINKS
Metabolismo celular	Moléculas envolvidas na queima de alimentos para liberar energia	Participação na mesma reação bioquímica
Hollywood	Atores	Atuando no mesmo filme
Internet	Roteadores	Conexões ópticas e outras conexões físicas
Rede reguladora de proteínas	Proteínas que ajudam a regular as atividades de uma célula	Interações entre proteínas
Colaboração em pesquisas	Cientistas	Co-autoria de ensaios
Relacionamentos sexuais	Pessoas	Contato sexual
World Wide Web	Páginas da Web	URLs

NASCIMENTO DE UMA REDE SEM ESCALAS

NESTES QUADROS, uma rede sem escala cresce por incrementos, passando de dois a 11 nós. Ao decidir onde estabelecer um link, um novo nó (verde) prefere unir-se a um nó existente (vermelho) que já possui muitas outras conexões. Esses dois mecanismos básicos — crescimento e vinculação preferencial — levarão o sistema a ser dominado por pólos, nós com grande quantidade de links.



atrair mais alianças, o que aumenta ainda mais sua atratividade em futuras parcerias. Da mesma forma, os artigos mais citados na literatura científica estimulam ainda mais pesquisadores a ler e citá-los.

Esses dois mecanismos — crescimento e vinculação preferencial — ajudam a explicar a existência dos pólos de convergência e irradiação: eles surgem quando os novos nós tendem a ligar-se aos sites mais conectados, e assim, com o passar do tempo, esses locais populares adquirem mais links que seus vizinhos menos conectados. E esse processo em que “os ricos ficam mais ricos” geralmente favorece os nós mais antigos, que têm maior probabilidade de se tornarem pólos de convergência e irradiação. Juntamente com Réka Albert utilizamos simulações e cálculos em computador para mostrar que uma rede em crescimento com vinculação preferencial na verdade se tornará sem escala e a distribuição de seus nós obedecerá a uma lei exponencial. Embora esse modelo teórico seja simplista e deva ser adaptado a situações específicas, parece confirmar nossa explicação para o fato de as redes sem escala serem tão onipresentes no mundo real.

O crescimento e a vinculação preferencial podem até mesmo ajudar a explicar a presença de redes sem escala em sistemas biológicos. Andreas Wagner da University of New Mexico e David A. Fell da

Oxford Brookes University, na Inglaterra, descobriram, por exemplo, que as moléculas mais conectadas na rede metabólica da *E. coli* costumam ter uma história evolutiva antiga: acredita-se que algumas delas sejam remanescentes do chamado mundo do RNA (a etapa evolutiva anterior ao surgimento do DNA), e que outras sejam componentes das mais antigas trajetórias metabólicas. Curiosamente, o mecanismo da vinculação preferencial tende a ser linear. Em outras palavras, um novo nó tem uma probabilidade duas vezes maior de se vincular a um nó existente que possua duas vezes mais conexões que o seu vizinho. Sidney Redner e seus colegas na Boston University investigaram diferentes tipos de vinculação preferencial e descobriram que, se o mecanismo for mais rápido que linear, um pólo de convergência e irradiação tenderá a ficar com a maior parte das conexões. Em situações do tipo “o vencedor leva tudo”, como essa, a rede acaba ficando com uma topologia em forma de estrela com um pólo central.

À medida que a humanidade fica cada vez mais dependente das redes de energia elétrica e de comunicação, surge uma

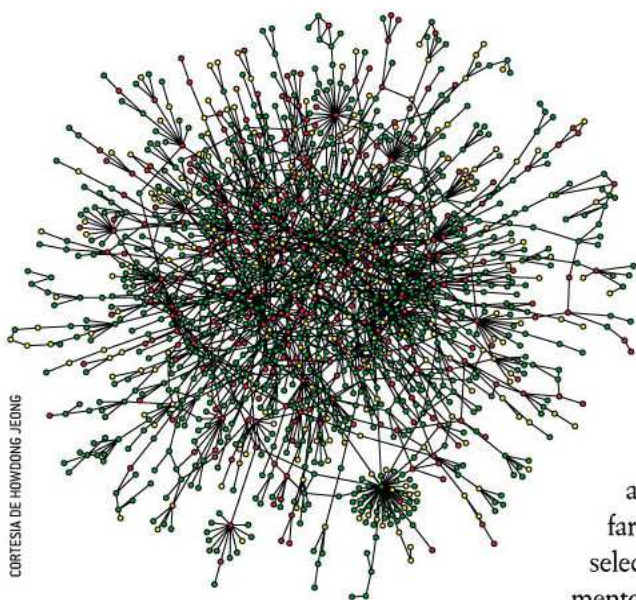
preocupação frequentemente citada: qual a confiabilidade exata desses tipos de rede? A boa notícia é o fato de que os sistemas complexos podem ser espantosamente resistentes a falhas acidentais. Ainda que, a todo momento, centenas de roteadores apresentem defeitos rotineiramente na Internet, a rede raramente sofre grandes interrupções. Um grau semelhante de resistência caracteriza os sistemas vivos: as pessoas raramente notam as conseqüências de milhares de erros em suas células, desde mutações a proteínas mal replicadas. Qual a origem dessa robustez?

Um Calcanhar-de-aquiles

A INTUIÇÃO NOS DIZ que o colapso de uma quantidade substancial de nós resultará na fragmentação inevitável de uma rede. Isso certamente é verdadeiro para redes aleatórias: se uma fração crítica de nós é removida, esses sistemas se rompem formando ilhas minúsculas e incomunicáveis. No entanto, simulações de redes sem escala contam uma história diferente: até 80% dos roteadores da Internet selecionados aleatoriamente podem falhar e, ainda assim, os remanescentes formarão um agrupa-

OS AUTORES

ALBERT-LÁSZLÓ BARABÁSI e ERIC BONABEAU estudam o comportamento e as características de inúmeros sistemas complexos, da Internet a colônias de insetos. Barabási é professor de Física na University of Notre Dame, onde dirige pesquisas sobre redes complexas. Ele é o autor de *Linked: The New Science of Networks*. Bonabeau é cientista-chefe da Icosystem, uma firma de consultoria sediada em Cambridge, Massachusetts, que aplica as ferramentas da ciência da complexidade para descobrir oportunidades de negócios. Ele é co-autor de *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*.



O MAPA DAS PROTEÍNAS interagindo no fermento evidencia a descoberta de que as proteínas altamente conectadas, ou pólo, tendem a ser cruciais na sobrevivência da célula. O vermelho denota as proteínas essenciais (sua remoção causará a morte da célula). O laranja representa proteínas de alguma importância (sua remoção desacelera o crescimento da célula). O vermelho e o verde, proteínas de significado menor ou desconhecido, respectivamente

mento compacto onde haverá ainda um caminho unindo quaisquer pares de nós. É igualmente difícil romper a rede de interações protéicas de uma célula: nossas mensurações indicam que mesmo após a introdução de um alto nível de mutações aleatórias, as proteínas que não foram afetadas continuarão a trabalhar em conjunto.

Em geral, as redes sem escala exibem uma impressionante resistência a falhas acidentais, propriedade que se deve à sua topologia heterogênea. A remoção aleatória exclui principalmente os nós pequenos, porque são muito mais abundantes que os pólos de convergência e irradiação. E a eliminação de nós pequenos não interrompe significativamente a topologia da rede, porque eles contêm poucos links se comparados aos pólos, que se conectam a praticamente tudo. Mas depender dos pólos traz uma séria desvantagem: vulnerabilidade a ataques.

Em uma série de simulações descobrimos que a remoção de uma pequena quantidade de pólos críticos da Internet fragmenta o sistema em grupos minúsculos de roteadores irremediavelmente isolados. De forma semelhante, experimentos de eliminação de nós empregando fermento demonstraram que a remoção das proteínas mais altamente conectadas tem uma chance significativamente maior de matar o organismo do que a supressão de outros nós.

Uma dependência em relação aos pólos pode ou não ser vantajosa, dependendo do sistema. Certamente, a resistência

ao colapso aleatório é uma boa notícia tanto para a Internet quanto para a célula. Além disso, a dependência da célula em relação aos pólos fornece aos pesquisadores farmacêuticos novas estratégias para selecionar alvos para a ação de medicamentos, o que poderia dar origem a curas que matariam somente as células ou bactérias prejudiciais atingindo seus pólos seletivamente, sem afetar tecidos saudáveis. Mas a capacidade de um pequeno grupo de *hackers* bem informados de derrubar toda a infra-estrutura de comunicações atingindo seus pólos é uma boa razão para preocupações.

O calcanhar-de-aquiles das redes sem escala levanta uma questão importante: que número de pólos é essencial? Pesquisas recentes sugerem que, em geral, a eliminação simultânea de uma quantidade pequena, de 5% a 15% de todos os pólos, pode produzir o colapso de um sistema. No caso da Internet, nossos experimentos implicam que um ataque altamente coordenado – começando pela remoção do maior pólo, seguida da eliminação do segundo maior, e assim por diante – poderia causar rupturas significativas após a eliminação de uma pequena quantidade de pólos. Portanto, proteger os pólos é talvez a maneira mais eficaz de evitar rupturas em grande escala causadas por ataques cibernéticos mal-intencionados.

Epidemias sem Escala

O CONHECIMENTO DAS redes sem escala tem implicações sobre a compreensão do alastramento de vírus de computador, doenças e modas. As teorias de difusão, estudadas intensivamente durante décadas tanto por epidemiologistas quanto por especialistas em marketing, prevêem um limiar crítico para a propagação de uma epidemia em meio a uma população.

Qualquer vírus, doença ou moda que sejam menos infecciosos que o limiar bem definido, inevitavelmente terminam perecendo, enquanto os que se encontram acima do limiar se multiplicarão exponencialmente e acabarão por penetrar todo o sistema. Recentemente, no entanto, Romualdo Pastor-Satorras, da Universidade de Catalunha, em Barcelona, e Alessandro Vespignani do International Center for Theoretical Physics (ICTP), em Trieste, Itália, chegaram a uma conclusão perturbadora. Eles descobriram que o limiar em uma rede sem escala é zero. Isto é: todos os vírus, mesmo os pouco contagiosos, se alastrarão e permanecerão no sistema. Esse resultado explica por que o Love Bug, o mais danoso vírus de computador até o momento (responsável pela paralisação das atividades do Parlamento Britânico em 2000), ainda era um dos vírus mais difundidos um ano após sua suposta erradicação. Como os pólos são conectados a muitos outros nós, pelo menos um pólo tenderá a ser infectado por qualquer nó corrompido. E depois que um pólo tenha sido infectado, transmitirá o vírus a inúmeros outros sites, acabando por comprometer outros pólos que espalharão o vírus por todo o sistema.

Como os vírus biológicos se propagam em redes sociais, que em muitos casos parecem ser sem escala, o resultado sugere que os cientistas deveriam analisar novamente os volumes de pesquisas escritas sobre a interação entre a topologia das redes e as epidemias. Especificamente, em uma rede sem escala, a abordagem tradicional de saúde pública, envolvendo imunização aleatória, poderia facilmente fracassar, porque muito provavelmente não protegeria alguns pólos. Na verdade, praticamente todos teriam de ser tratados para garantir que os pólos não ficassem desprotegidos. Uma vacinação contra sa-

NO FIM DAS CONTAS, O MUNDO É PEQUENO

EM 1967, STANLEY MILGRAM, um psicólogo social na Harvard University, enviou centenas de cartas a pessoas em Nebraska, pedindo a elas que reenviassem a correspondência a conhecidos que pudessem fazê-la chegar mais perto de um destinatário alvo: um corretor de valores em Boston. Para seguir o rastro de cada um dos diferentes caminhos, Milgram pediu aos participantes que lhe enviassem de volta um cartão quando encaminhassem a carta a outra pessoa. Milgram descobriu que as cartas que acabaram chegando ao destino haviam passado por uma média de seis pessoas — a base do conhecido conceito de “seis graus de separação” entre todas as pessoas.

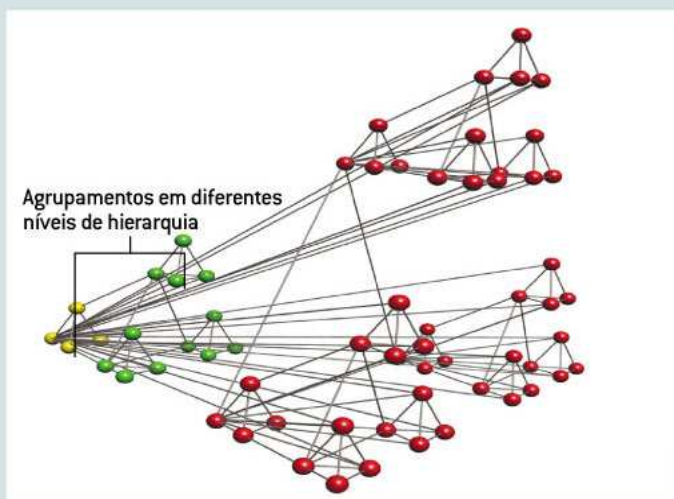
Embora o trabalho de Milgram não tenha sido conclusivo, — pois a maioria das cartas nunca chegou ao corretor de valores —, recentemente os cientistas descobriram que outras redes apresentam essa propriedade de “mundo pequeno”. Descobrimos, por exemplo, que um caminho de apenas três reações conecta pratica-

mente qualquer par de elementos químicos contidos em uma célula. E, na World Wide Web, que contém mais de três bilhões de documentos, as páginas estão geralmente a 19 cliques de distância entre si.

A propriedade de “mundo pequeno” não indica necessariamente a existência de um princípio organizador mágico. Mesmo uma rede de grande porte com conexões puramente aleatórias constitui um mundo pequeno. Suponhamos que você conheça cerca de mil pessoas. Se cada uma também conhecer outras mil, então um milhão de pessoas estarão a apenas dois apertos de mão de distância de você, um bilhão estará a apenas três, e toda a população da Terra estará separada de você por quatro apertos de mão. Levando isso em conta, a idéia de que quaisquer duas pessoas desconhecidas no mundo estão separadas por uma média de seis graus parece quase trivial. No entanto, maiores investigações revelam implicações mais profundas.

Nosso cálculo simples pressupõe que todas as pessoas que você conhece são desconhecidas entre si. Na realidade, muitas delas se conhecem. De fato, a sociedade é dividida em agrupamentos de pessoas com características semelhantes (como renda ou interesses), o que foi amplamente debatido pela literatura sociológica após o trabalho seminal de Mark Granovetter em 1970, à época um aluno do curso de graduação em Harvard. A existência de agrupamentos é também uma propriedade geral de muitos outros tipos de redes. Em 1998, Duncan Watts e Steven Strogatz, ambos na Cornell University, encontraram significativos agrupamentos em uma série de sistemas, da rede de energia elétrica dos Estados Unidos à rede neural do verme *Caenorhabditis elegans*.

À primeira vista, agrupamentos isolados de nós altamente interconectados parecem contradizer a topologia das redes sem escala, onde determinado número de pólos se irradia pelo sistema, interligando tudo. Recentemente, porém, demonstramos que ambas as propriedades são compatíveis: uma rede pode ser ao mesmo tempo altamente agrupada e sem escala quando pequenos agrupamentos de nós hermeticamente interligados estão conectados a grupos maiores, menos coesos (*esquerda*). Esse tipo de hierarquia parece existir em vários sistemas, da World Wide Web (onde os agrupamentos são conjuntos de páginas da Web dedicadas ao mesmo assunto) até uma célula (em que os agrupamentos são conjuntos de moléculas responsáveis por uma função específica). — A.L.B. and E.B



AGRUPAMENTOS HIERÁRQUICOS, mostrados esquematicamente, poderiam incluir, por exemplo, páginas da Web sobre a casa Casa da Cascata de Frank Lloyd Wright (*amarelo*), que poderiam estar ligados a outros agrupamentos (*verde*) referentes a Wright, a casas famosas ou às atrações da Pensilvânia. Esses sites, por sua vez, poderiam estar conectados a agrupamentos (*vermelha*) sobre arquitetura em geral ou sobre arquitetos famosos.

rampo, por exemplo, deve incluir 90% da população para ser eficaz. Mas, e se em vez de promover imunizações aleatórias, os médicos visassem os pólos, ou seja, os indivíduos mais conectados? Pesquisas sobre redes sem escala indicam que essa abordagem alternativa poderia ser eficaz, mesmo se as imunizações incluíssem apenas uma pequena fração da população total, desde que essa fração contivesse os pólos. Entretanto, identificar os pólos em uma rede social é muito mais difícil que detectá-los em outros tipos de sistemas.

Apesar disso, Reuven Cohen e Shlomo Havlin, da Bar-Ilan University em Israel, juntamente com Daniel ben-Avraham da Clarkson University, propuseram uma solução engenhosa: imunizar uma pequena parcela aleatória de pessoas conhecidas por indivíduos arbitrariamente selecionados, um procedimento que seleciona pólos com uma alta probabilidade porque eles estão ligados a muitas pessoas. Essa abordagem, entretanto, engendra uma série de dilemas éticos. Por exemplo: mesmo que os pólos pudessem ser identificados, de-

veriam ser priorizados nas imunizações e curas? Apesar dessas questões, concentrar as ações nos pólos talvez seja a solução mais pragmática para a futura distribuição de vacinas contra Aids ou varíola em países e regiões que não dispõem dos recursos necessários para tratar toda a população.

Em muitos contextos empresariais as pessoas querem iniciar e não interromper epidemias. As campanhas de marketing viral, por exemplo, freqüentemente tentam atingir pólos para acelerar a aceitação de um produto. Os ‘marqueteiros’ sabem que

AS POSSÍVEIS IMPLICAÇÕES DAS REDES SEM ESCALA EM...

Computação

- Redes de computadores com arquiteturas sem escala, como a World Wide Web, são extremamente resistentes a falhas acidentais. Mas muito vulneráveis a ataques deliberados.
- A erradicação de vírus, até mesmo os conhecidos, da Internet, será efetivamente impossível.

Medicina

- Campanhas de vacinação contra vírus perigosos, como o da varíola, poderiam ser mais eficazes caso se concentrassem em tratar os pólos — pessoas que possuem muitas conexões com outras. No entanto, a identificação dessas pessoas pode ser difícil.
- O mapeamento das redes no interior das células humanas poderia ajudar os pesquisadores na descoberta e controle dos efeitos colaterais de medicamentos. Além disso, a identificação das moléculas-pólo associadas a determinadas doenças poderia levar à criação de novos medicamentos que teriam como alvos esses pólos.

Atividade Empresarial

- A compreensão de como as empresas, setores e economias estão interligados poderia ajudar os pesquisadores a monitorar e prevenir colapsos financeiros em cascata.
- O estudo da propagação de um contágio em uma rede sem escala poderia oferecer novos meios para os 'marqueteiros' promoverem propaganda boca a boca de seus produtos.

determinados clientes são mais valiosos que outros, quando se trata de propaganda boca a boca de produtos e modas. Mas estudos recentes sobre redes sem escala fornecem o referencial científico e as ferramentas matemáticas necessárias para examinar mais rigorosamente esse fenômeno.

Da Teoria à Prática

EMBORA REDES SEM ESCALA sejam muito difundidas, existem diversas exceções importantes. Por exemplo: o sistema rodoviário e a rede de energia elétrica dos Estados Unidos são em escala. A maior parte das redes observadas na ciência de materiais também. Na topologia atômica de um cristal, por exemplo, os átomos possuem a mesma quantidade de ligações com seus vizinhos. No caso de outras redes, os dados são inconclusivos. O tamanho relativamente pequeno das cadeias alimentares, que mostram as relações predador-presa, tem impedido os cientistas de chegar a uma conclusão quanto ao tipo dessas redes. E a ausência de mapas de conectividade cerebral em grande escala impediu que os pesquisadores conhecessem também a natureza dessa importante rede.

Para compreender o comportamento

de um sistema é importante determinar se uma rede é sem escala, mas outros parâmetros significativos também merecem atenção. Uma dessas características é o diâmetro, ou comprimento da trajetória, de uma rede — o maior número de saltos necessários para ir de um nó a outro pelo caminho mais curto possível (*ver box na página 71*). Por fim, o conhecimento da topologia geral de uma rede é apenas parte da compreensão das características gerais e do comportamento desses sistemas. Pode haver um custo elevado, por exemplo, associado à inclusão de cada link adicional a um determinado nó para tentar evitar que certas redes (como o sistema rodoviário dos Estados Unidos) se tornem sem escala. Em cadeias alimentares, algumas presas são mais fáceis de capturar que outras e isso exerce um efeito profundo no ecos-

sistema como um todo. No caso de redes sociais, as ligações entre os membros da família são muito mais fortes que as relações com meros conhecidos, portanto as doenças (e as informações) têm probabilidade maior de se espalhar por meio dessas ligações. No caso dos sistemas de transporte, transmissão e comunicação (como a Internet), o congestionamento em determinados links é uma consideração importante: o tráfego excessivo em um determinado link pode levá-lo ao colapso comprometendo outras conexões, obrigadas a dar conta do excesso.

Devido a esses e outros fatores, os cientistas apenas começaram a elucidar o comportamento dos sistemas sem escala. Essencialmente, começamos a estudar redes complexas ignorando os detalhes de seus links e nós individuais. Ao nos distanciarmos desses detalhes, pudemos observar melhor alguns dos princípios organizadores por trás desses sistemas aparentemente incompreensíveis. O conhecimento obtido por meio desse trabalho levou, no mínimo, à reconsideração de muitas premissas básicas. No passado, os pesquisadores modelaram a Internet como uma rede aleatória para testar de que forma um novo protocolo de roteamento poderia afetar o congestionamento do sistema. Agora, porém, sabemos que a Internet é um sistema sem escala com um comportamento dramaticamente diferente daquele exibido por uma rede aleatória. O conhecimento das propriedades das redes sem escala será importante em muitas outras áreas, especialmente à medida que formos além das topologias de redes para investigar as dinâmicas intrincadas e muitas vezes sutis que ocorrem nesses sistemas complexos. SA

PARA CONHECER MAIS

- All the World's a Net.** David Cohen em *New Scientist*, Vol. 174, No. 2338, páginas 24–29; 13 de abril de 2002.
- Statistical Mechanics of Complex Networks.** Réka Albert e Albert-László Barabási, em *Reviews of Modern Physics*. Vol.74. Págs. 47-97. Janeiro 2002.
- Linked: The New Science of Networks.** Albert-László Barabási. Perseus Publishing, 2002.
- Evolution of Networks: From Biological Nets to the Internet and WWW.** J.F.F. Mendes e Sergei N. Dorogovtsev. Oxford University Press, 2003.
- Outros artigos sobre redes sem escala em: www.nd.edu/ffnetworks