

P	110
C	14
T	

pos

ALBERT-LÁSZLÓ BARABÁSI

# LINKED

(Conectado)

## A Nova Ciência dos *Networks*

*Como tudo está conectado a tudo e o que isso significa para os negócios, relações sociais e ciências*

Publicação



Editora

QUARTA CONEXÃO

*Mundos Pequenos*

## QUARTA CONEXÃO

### *Mundos Pequenos*

Quando submeteu seu trabalho especial à publicação, Mark Granovetter ainda era estudante de graduação em Harvard, mas acalentava grandes esperanças em relação a seu ensaio. No final da década de 1960, Harvard era o lugar certo no momento certo. As redes quase infestaram a sociologia, e Harvard e o MIT constituíam sementeiras das novas ideias. Uma série de preleções de Harrison White, pioneiro da perspectiva de rede nas ciências sociais, expôs Granovetter às redes sociais no começo de sua graduação. Muitas das novas ideias demonstraram haver caído em terreno fértil por ocasião de sua tese de doutorado, que pôs sob microscópio sociológico uma questão que mais cedo ou mais tarde permearia todas as graduações: como as pessoas arrumam emprego. Em vez de burilar o próprio currículo e frequentar feiras de emprego, Granovetter atravessou o rio Charles em direção a Newton, Massachusetts. Embora hoje seja um pujante subúrbio de Boston, no final de 1960 Newton era um bairro operário. Pretendendo descobrir como as pessoas “entram em rede” – utilizam suas conexões sociais para arranjar um emprego –, Granovetter entrevistou dezenas de gerentes e funcionários perguntando-lhes quem os ajudara a encontrar o emprego atual. Foi um amigo? Obtinha sempre a mesma resposta: “Não, não foi um amigo. Foi apenas um conhecido”. Isso fez Granovetter lembrar-se da clássica aula de química que demonstrava como o hidrogênio fraco mantém coesas as grandes moléculas da água, e essa imagem, inculcada desde o primeiro ano de faculdade, inspirou seu primeiro trabalho de pesquisa, um longo e esclarecedor ensaio sobre a importância dos vínculos sociais fracos em nossas vidas. Ele o enviou pelo correio, em agosto de 1969, à *American Sociological Review*. Em dezembro, foi informado de que dois julgadores anônimos haviam recusado o trabalho. Segundo um deles, o texto não deveria ser publicado por “uma série infundável de razões que vêm de imediato à mente”. Terrivelmente

desencorajado, Granovetter não tocou no trabalho durante os três anos seguintes. Em 1972, submeteu uma versão concisa do texto a outro jornal, o *American Journal of Sociology*. Teve mais sorte dessa vez, e o trabalho foi finalmente publicado em maio de 1973, quatro anos após sua primeira submissão. Hoje, o ensaio de Granovetter, *The Strength of Weak Ties*, é reconhecido como um dos mais influentes trabalhos de sociologia já escritos. É também um dos mais citados, distinguido com uma *citation classic* por *Current Contents* em 1986.

Em *The Strength of Weak Ties*, Granovetter propôs algo que se afigura paradoxal à primeira vista: quando se trata de arranjar emprego, saber das novidades, abrir um restaurante ou espalhar a última fofoca, nossos vínculos sociais fracos são mais importantes que as sólidas amizades que cultivamos. Segundo ele, a estrutura da rede social em torno de uma pessoa comum, que ele chama de Ego, é bastante genérica: "Ego terá um grupo de amigos íntimos, muitos dos quais se acharão em interação recíproca – um aglomerado de estrutura social densamente articulado. Além disso, Ego terá um grupo de pessoas de suas relações, e algumas dessas pessoas conhecerão umas as outras. É provável, porém, que cada uma dessas pessoas tenha seus próprios amigos íntimos, a ser enredados, portanto, em uma intrincada trama de estrutura social, diferente, contudo, da de Ego".

Embutida no argumento de Granovetter, encontra-se uma imagem de sociedade bem diferente do universo randômico descrito por Erdős e Rényi. Na visada por Granovetter, a sociedade é estruturada em aglomerados altamente conectados, ou círculos de amigos profundamente entrosados, em que todo mundo conhece todo mundo. Alguns vínculos externos que conectam esses grupos não permitem que eles se isolem do restante do mundo. Se a esquematização proposta por Granovetter estiver correta, então a rede que descreve nossa sociedade terá uma estrutura bastante peculiar. Trata-se de uma coleção de *grafos completos*, minúsculas clusterizações nas quais cada nó está conectado a todos os demais dentro do *cluster* (Figura 4.1). Esses grafos completos estão ligados uns aos outros por algumas fracas ligações entre conhecidos que pertencem a diferentes círculos de amigos.

Os vínculos fracos desempenham papel crucial em nossa capacidade de nos comunicar com o mundo exterior. Frequentemente, nossos amigos íntimos podem nos oferecer pouca ajuda quando se trata de arranjar emprego. Eles transitam pelas mesmas rodas que nós e inevitavelmente estão expostos às mesmas informações. Para obter novas informações, temos de ativar nossos vínculos fracos. De fato, é mais provável que funcionários de nível gerencial fiquem sabendo da existência de uma vaga por meio de contatos sociais fracos (27,8% dos casos) do que por relações sólidas (16,7%). Esses vínculos fracos, ou de conhecidos (que não seriam amigos íntimos), constituem nossa ponte com o mundo exterior, pois, por frequentar lugares diferentes, eles obtêm informações de fontes diferentes daquelas dos seus amigos mais próximos.

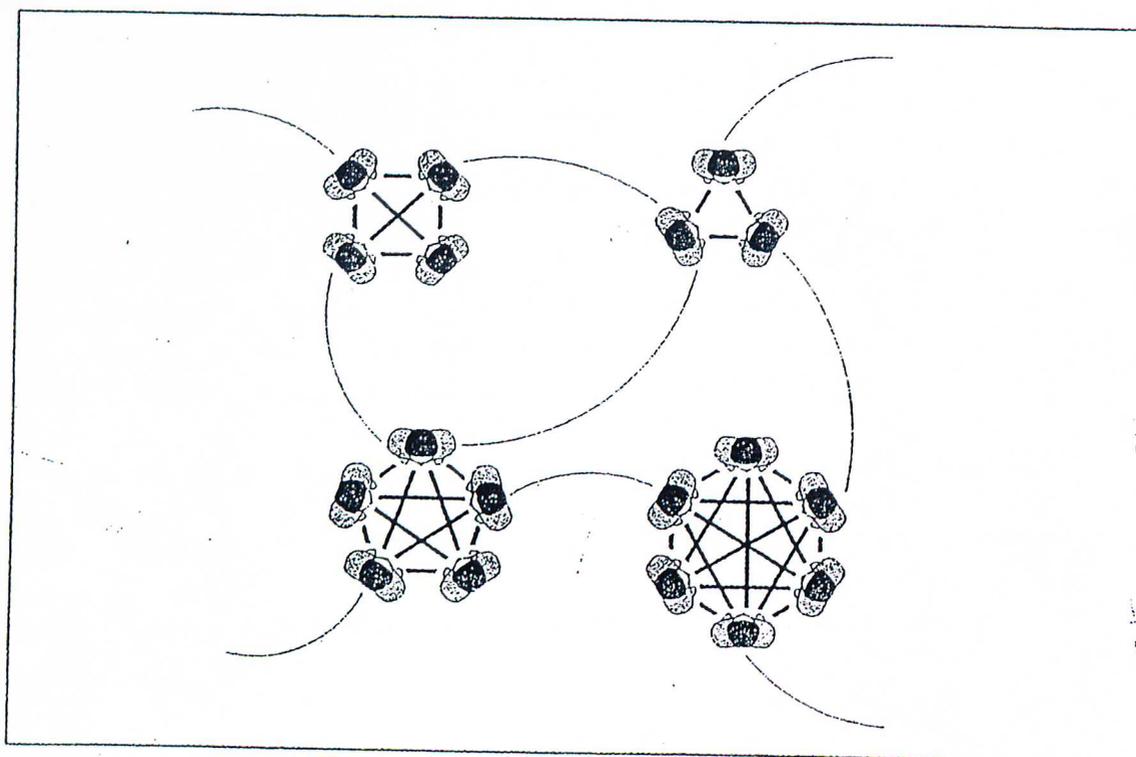


Figura 4.1. Vínculos fortes e fracos: no mundo social de Mark Granovetter, nossos amigos mais próximos frequentemente também são amigos uns dos outros. A rede que se encontra por trás dessa sociedade clusterizada é formada por pequenos círculos de amigos totalmente conectados, que se congregam por sólidos vínculos, como mostram as linhas em negrito. Os vínculos fracos, ilustrados por linhas tênues, conectam os componentes desses círculos de amizade a seus conhecidos, que possuem fortes laços com seus próprios amigos. Os vínculos fracos desempenham papel importante em uma série de atividades sociais que vão da disseminação de boatos à obtenção de um emprego.

Em uma rede randômica, não haveria nenhum círculo de amigos na medida em que nossas conexões com outros nós são completamente aleatórias. No universo social de Erdős-Rényi, a probabilidade de que meus dois amigos mais chegados se conheçam é a mesma de que o melhor amigo de um sapateiro australiano seja um chefe tribal africano. Mas não é essa a configuração que nossa sociedade apresenta. Na maioria dos casos, dois bons amigos conhecem os amigos de cada um deles. Geralmente, vão às mesmas festas, frequentam os mesmos *pubs* e assistem aos mesmos filmes. Quanto mais forte o vínculo entre duas pessoas, maior a sobreposição entre seus círculos de amigos. Muito embora o argumento de Granovetter acerca da importância das relações fracas possa parecer contraintuitivo à primeira vista e até mesmo paradoxal, formula uma verdade simples sobre nossa organização social. A sociedade granovetteri-

ana, uma teia fragmentada de aglomerados totalmente interligados que se comunicam através de elos fracos, é mais verdadeira para nossa experiência cotidiana do que a descrição absolutamente randômica proposta por Erdős e Rényi. Para entender plenamente a estrutura da sociedade, a teoria das redes randômicas tem de ser conciliada, de certa forma, com a realidade das clusterizações descrita por Granovetter. Transcorreram quase três décadas para se chegar a tal conclusão. Curiosamente, a chave para uma possível solução não adveio da sociologia ou da teoria dos grafos.

## 1.

Atravessando o Café Central, a poucos passos da janela favorita de Karinthy, o visitante desce por uma pequena porta e uma estreita escada do subsolo e entra em um dos estúdios teatrais da elite de Budapeste. Apropriadamente chamado de *Kamra*, ou *Closet*, pois comporta apenas cerca de dez atores no palco e uma centena de pessoas na plateia, os assentos para suas apresentações são muito disputados por aqueles que têm familiaridade com a borbulhante vida teatral de Budapeste. A última apresentação a que assisti no *Kamra* aboliu a cortina para aproveitar o espaço, obrigando o público a imaginar exatamente quando a peça acabaria. Mas foi difícil escapar quando repentinamente todo mundo em volta de mim prorrompeu em calorosos aplausos, que ecoavam e eram amplificados pelas paredes pretas da pequena caverna subterrânea. Em algum momento, a caótica trovoadadeu lugar a aplausos uníssonos. Nossas palmas ocorriam exatamente no mesmo instante, unidas por uma misteriosa força que nos compelia a aplaudir sincronizadamente, como se guiadas pela batuta de um invisível regente. Quando os atores se inclinavam em agradecimento, deixavam o palco e reapareciam, os aplausos cadenciados se tornavam cada vez mais estrondosos. Sua sincronicidade se dissolvia momentaneamente quando os aplausos adquiriam velocidade e força, apenas para recobrar força total alguns segundos depois.

Aplausos sincronizados dificilmente são algo excepcional para o pequeno teatro *Kamra* de Budapeste. São uma ocorrência regular ao final de apresentações cênicas, concertos ou eventos esportivos na Europa Oriental e, às vezes, são ouvidos em qualquer parte do mundo. Surgiram espontaneamente, por exemplo, no Madison Square Garden, quando o público inconscientemente sincronizava seus aplausos em homenagem a Wayne Gretzky, o lendário jogador de hóquei, antes de aposentar-se do New York Rangers em 1999. Espontâneos e misteriosos, os aplausos sincronizados oferecem um exemplo magnífico de auto-organização, obedecendo a leis rigorosas que são amplamente investigadas por físicos e matemáticos. Algumas espécies de vaga-lume também se sujeitam a

essas leis. No Sudoeste da Ásia, agrupam-se aos milhões em volta de grandes manguezais, piscando intermitentemente. De repente, todos os vaga-lumes começam a ligar e desligar as caudas fluorescentes, acendendo-as e apagando-as exatamente no mesmo instante, transformando a árvore em forma de farol em um imenso bulbo luminoso pulsante, avistável a quilômetros de distância. Uma sutil premência de sincronizar é algo que permeia a natureza. Com efeito, aciona milhares de células marca-passo no coração e sincroniza os ciclos menstruais de mulheres que vivem juntas por longos períodos.

Duncan Watts, trabalhando em sua tese de doutorado em matemática aplicada na Universidade de Cornell, em meados de 1990, foi incumbido de investigar um curioso problema: como os grilos sincronizam seus cri-cris. Os grilos fêmeos atraem os machos cricrilando forte. Diferentemente de muitos humanos, os grilos evitam a ostentação ouvindo cuidadosamente os outros grilos à sua volta, ajustando o próprio cri-cri para sincronizá-lo com o de seus companheiros. Se juntarmos muitos deles, da cacofonia surgirá uma sinfonia que, amiúde, apreciamos ouvir no quintal, nas noites úmidas de verão.

Watts não se encaixa na imagem estereotipada do matemático livresco. Dono de uma mente ágil, tem a rara capacidade de parar, recuar e refletir sobre seu trabalho, mudando de direção se preciso for. De fato, a pesquisa acerca dos grilos fez dele um estudioso das redes sociais e finalmente um sociólogo, transformação oficializada em 2000, quando recebeu um convite para lecionar no Departamento de Sociologia da Universidade de Columbia.

Enquanto se esforçava por compreender como os grilos sincronizam seus cri-cris, Watts se deparou com o conceito dos seis graus de separação, que lhe fora inculcado pelo pai durante uma conversa casual. As pessoas se perguntam o tempo todo sobre assuntos como os seis graus, mas essa filosofia de café raramente conduz à pesquisa séria. Watts achava que para bem compreender como os grilos se sincronizam, era preciso entender como prestavam atenção uns aos outros. Será que todos os grilos prestam atenção a cada um dos outros que estão cricrilando? Ou será que alguns escolhem um outro favorito para tentar sincronizar-se apenas com esse? Qual a estrutura da rede que codifica como os grilos, ou as pessoas, se influenciam mutuamente? Refletindo cada vez mais sobre redes e cada vez menos sobre grilos, Watts procurou seu orientador de doutorado, Steven Strogatz, para consultar-se. Professor de matemática aplicada em Cornell, notabilizado pelos estudos acerca do caos e da sincronização, Strogatz não é conhecido por deixar escapar uma ideia heterodoxa. Logo se viram em territórios desconhecidos, deslocando as redes para além das fronteiras estabelecidas por Erdős e Rényi.

Watts principiou sua incursão pelas redes com uma pergunta simples: qual a probabilidade de dois amigos meus se conhecerem? Como vimos há pouco, essa questão recebe uma clara resposta na teoria de rede randômica. Como os nós se articulam de maneira aleatória, meus dois melhores amigos têm a mesma

probabilidade de se conhecerem, tanto quanto um gondoleiro veneziano e um pescador esquimó. Evidentemente, como argumentou Granovetter 25 anos atrás, não é assim que a sociedade funciona. Somos membros de grupos nos quais todo mundo conhece todo mundo. Logo, meus dois melhores amigos inevitavelmente se conhecerão. Para aduzir evidências acerca da natureza gregária da sociedade, em termos aceitáveis para um matemático ou físico, precisamos ser capazes de *mensurar* as clusterizações. Para tanto, Watts e Strogatz introduziram uma grandeza chamada *coeficiente de clusterização* (*clustering coefficient*). Admitamos que alguém tenha quatro bons amigos. Se todos eles também forem amigos uns dos outros, é possível vincular cada um deles a um *link*, obtendo ao todo seis *links* de amizades. Há probabilidade, contudo, de que alguns de seus amigos não sejam amigos uns dos outros. Então, a conta chegará a menos de seis *links* – digamos, quatro. Nesse caso, o coeficiente de clusterização do círculo de amigos dessa pessoa é 0,66, que se obtém dividindo-se o número efetivo de *links* entre seus amigos (quatro) pelo número de *links* que poderiam ter se todos fossem amigos uns dos outros (seis).

O coeficiente de clusterização nos informa o grau de coesão de nosso círculo de amigos. Um número próximo de 1 significa que todos os nossos amigos são bons amigos uns dos outros. Por outro lado, se o coeficiente de clusterização for zero, significará que somos os únicos que agregamos nossos amigos, quando não parecerem apreciar a companhia uns dos outros. A visão granovetteriana de sociedade comporta muitas clusterizações altamente conectadas, interligadas entre si por vínculos fracos. Uma rede tão altamente clusterizada deveria possuir um grande coeficiente de clusterização. Para obter evidência quantitativa de que a sociedade é, de fato, permeada por essas clusterizações, precisaríamos medir o coeficiente de clusterização de cada habitante da Terra. Como não há nenhum mapa que nos indique quem está conectado a quem e quem é amigo de quem, trata-se de tarefa impossível. Felizmente, contudo, um subconjunto peculiar da sociedade regularmente publica seus vínculos sociais. Podemos, portanto, verificar a clusterização entre esse grupo incomum.

## 2.

Hoje Paul Erdős é famoso não apenas por seus inúmeros teoremas e demonstrações, mas também por um conceito por ele inspirado: o número de Erdős. Tal autor publicou mais de 1.500 trabalhos com 507 coautores. É uma honra ímpar incluir-se entre suas centenas de coautores. Em suma, é uma grande distinção estar a apenas dois *links* dele. Para avaliar a própria distância em relação a Erdős, os matemáticos introduziram o *número de Erdős*. Este tem número de Erdős zero. Aqueles que foram coautores dele possuem número de

Erdős 1. Os que escreveram um trabalho com um coautor de Erdős possuem número de Erdős 2, e assim por diante. Um baixo número de Erdős é motivo de orgulho – tanto que há quem suspeite de que falsas colaborações possam ter sido engendradas após a morte de Erdős, em 1996, para rebaixar o número de alguém. Consequentemente, matemáticos de todo o mundo se esforçaram (e ainda se esforçam) para demonstrar suas respectivas distâncias em relação a esse excêntrico centro do universo matemático. Para facilitar essa pesquisa de distância, Jerry Grossmann, professor de matemática da Universidade de Oakland, em Rochester, Michigan, mantém uma detalhada página da *Web* com uma coletânea de números de Erdős de milhares de matemáticos, possibilitando que qualquer matemático com trabalho publicado possa calcular seu próprio número.

Muitos matemáticos apresentam números de Erdős bastante reduzidos, geralmente de dois a cinco passos de Erdős. Mas a influência de Erdős extrapola seu campo imediato. Economistas, físicos e cientistas da computação também podem facilmente conectar-se a ele. Einstein tem número de Erdős 2. Paul Samuelson, prêmio Nobel de Economia, tem 5. James D. Watson, codescobridor da dupla hélice, tem 8. Noam Chomsky, o célebre linguista, tem 4. Até William H. (Bill) Gates, fundador da Microsoft, que pouca ciência publicou, tem número Erdős 4. Meu número de Erdős também é 4. Erdős escreveu um trabalho com Joseph E. Gillis, que teve George H. Weiss entre seus 17 coautores, o qual, por sua vez, trabalhou com H. Eugene Stanley, meu orientador no doutorado, de quem fui coautor em um livro e em mais de uma dúzia de artigos científicos.

A própria existência do número de Erdős demonstra que a comunidade científica forma uma rede altamente interconectada na qual todos os cientistas estão linkados reciprocamente pelos trabalhos acadêmicos que produzem. A pequenez de muitos números de Erdős indica que essa rede científica constitui realmente um mundo pequeno. Como só raramente acontece de os autores de uma publicação não se conhecerem pessoalmente, a coautoria representa vínculos sociais fortes. Consequentemente, a rede científica é um protótipo em pequena escala de nossa rede social, com a única característica de que suas conexões são regularmente divulgadas. Com efeito, da mesma forma como os pesquisadores podem localizar trabalhos sobre determinado tópico, assim também todas as publicações científicas são registradas em bancos de dados computadorizados; isso automaticamente cria um registro digital pormenorizado das conexões sociais e profissionais entre os cientistas. Podemos, portanto, utilizá-los para estudar a estrutura da rede de colaboração.

Foi exatamente isso que se fez na primavera de 2000. Tamás Vicsek, um distinto pesquisador e chefe do Departamento de Física Biológica da Universidade Eötvös, em Budapeste, durante o ano acadêmico de 1999 a 2000, organizou um programa anual voltado para a física biológica no Instituto de Estudos Avançados, situado em um charmoso castelo medieval de Buda, com vista para

o Danúbio. Zoltán Néda, físico da Romênia, foi um dos participantes que trouxe consigo Erzsébet Ravasz, à época estudante de mestrado do grupo de Néda. Também fazia parte da equipe András Schubert, especialista em sociometria que trabalhava na Academia Húngara, o qual teve acesso, para fim de pesquisa, a grandes bancos de dados de coautoria. Com Vicsek, Ravasz, Néda, Schubert e Hawoong Jeong, conectamos todos os matemáticos por meio de trabalhos publicados entre 1991 e 1998, compondo a rede altamente interligada de 70.975 matemáticos, conectados por mais de 200 mil *links* de coautoria. Se os matemáticos houvessem escolhido seus coautores aleatoriamente, a rede randômica resultante teria, segundo a teoria de Erdős e Rényi, um pequeno coeficiente de clusterização de, aproximadamente,  $10^{-5}$ . Contudo, nossas mensurações indicaram que o coeficiente de clusterização da rede real de colaboração é cerca de 10 mil vezes maior, o que prova que os matemáticos não escolhem seus colaboradores de maneira aleatória. Eles formam antes uma rede altamente clusterizada, semelhante à identificada por Granovetter na sociedade em sentido lato.

Desconhecido pelo grupo, Mark Newman, físico do Instituto Santa Fé, também esteve investigando o grafo de colaboração de cientistas – particularmente dos físicos, médicos e cientistas da computação –, formulando questões similares às que fizemos em Budapeste. Newman, cuja habilidade vai dos sistemas randômicos às extinções de espécies em ecossistemas, reconheceu a oportunidade única que nosso mundo computadorizado nos oferece para finalmente conhecer as redes. Antes de se voltar para as redes de colaboração, ele havia escrito diversos trabalhos sobre mundos pequenos que agora são considerados clássicos. Quando nosso computador estava rodando os primeiros resultados, ele postou na Internet seu primeiro trabalho sobre colaborações entre cientistas. O trabalho de Newman provou que a atividade cotidiana da ciência se processa por meio de grupos densamente conectados de cientistas, ligados por ocasionais *links* fracos. Seu trabalho, combinado com o nosso, proporcionou evidência quantitativa de algo que sentíamos ser verdade desde o início, mas que era notoriamente difícil de mensurar antes dos computadores: a clusterização, de fato, está presente nos sistemas sociais.

### 3.

Clusterização em sociedade é algo que entendemos intuitivamente. Os seres humanos possuem o desejo inato de constituir rodas e grupos que lhes proporcionem familiaridade, segurança e intimidade. Todavia, uma propriedade da rede social só é de interesse para os cientistas se revelar algo genérico acerca da maior parte das redes na natureza. Por conseguinte, a descoberta mais

importante de Watts e Strogatz é que a clusterização não se detém na fronteira das redes sociais.

Conquanto seja comum associar a inteligência humana à complexidade e à dimensão da rede neural no interior de nosso cérebro, o impronunciável *Caenorhabditis elegans*, citado pelo apelido *C. elegans*, é prova viva de quão longe se pode alcançar com meros 302 neurônios. Apesar de seu intervalo de vida de duas a três semanas, esse verme de um milímetro teve uma brilhante trajetória desde que Sydney Brenner, eminente biólogo molecular do Molecular Sciences Institute, em Berkeley, na Califórnia, elegeu-o, em 1962, “cobaia” da biologia molecular. Desde então, ele figura em milhares de artigos e tem sido procriado em centenas de laboratórios no mundo todo, e diversas páginas da *Web* lhe são dedicadas.

Embora seu genoma não seja tão diferente do dos humanos, *C. elegans* é um dos organismos multicelulares mais simples. De fato, os cientistas conseguiram decifrar a precisa trama de seu sistema nervoso, criando um mapa que detalha quais neurônios estão conectados a outros neurônios. Estudando esse diagrama da rede neural, Watts e Strogatz descobriram que essa minúscula rede não difere muito da social em geral. Ela revela alto grau de clusterização – tão elevado, de fato, que os vizinhos de um neurônio têm cinco vezes mais probabilidade de estarem interligados do que teriam em uma rede randômica. Os pesquisadores detectaram o mesmo padrão quando estudaram a rede elétrica do Oeste americano, cujos nós são geradores e transformadores interligados por linhas de força. Essa rede de força também revela um alto grau de clusterização incomum. Da mesma forma opera a rede de colaboração de atores de Hollywood, rede que discutiremos com mais detalhes no capítulo 5.

Graças ao alto interesse por clusterização suscitado pela descoberta inesperada de Watts e Strogatz, subsequentemente a comunidade científica tem estudado muitos outros tipos de redes. Sabemos agora que a clusterização está presente na *Web*; identificamo-la nas redes físicas que conectam os computadores na Internet; os economistas detectaram-na na rede que descreve como as empresas se vinculam por relações de propriedade; os ecologistas veem-na em cadeias alimentares que quantificam como as espécies alimentam umas as outras nos ecossistemas; e os biólogos celulares descobriram que a clusterização caracteriza a tênue rede de moléculas envolvidas em uma célula. A descoberta de que a clusterização é onipresente alçou-a rapidamente da condição de característica específica da sociedade à posição de propriedade genérica das redes complexas, desafiando seriamente a visão de que as redes reais são fundamentalmente randômicas.

## 4.

Para explicar a onipresença da clusterização na maioria das redes reais, Watts e Strogatz propuseram uma alternativa ao modelo de rede randômica postulado por Erdős e Rényi no estudo que publicaram na revista *Nature*, em 1998. Eles apresentaram um modelo que pela primeira vez reconciliou a clusterização com o caráter inteiramente ao acaso dos grafos randômicos. Perceberam que as pessoas vivem em um círculo (Figura 4.2), em cujo âmbito todo mundo conhece seus vizinhos imediatos. Nesse modelo simples, cada nó possui exatamente quatro vizinhos, que estão conectados *uns aos outros* por três *links*. Portanto, a rede resultante tem elevado coeficiente de clusterização. De fato, se todos os quatro vizinhos estivessem conectados uns aos outros, haveria seis *links* entre eles. Como há apenas três, o coeficiente de clusterização é de  $3/6$ , ou 0,5, próximo do 0,56 que encontramos para os matemáticos. Para perceber que isso realmente representa uma clusterização significativa, considere uma rede randômica na qual um nó típico ainda tem quatro vizinhos, mas é conectado aleatoriamente a qualquer outro nó no sistema. O número de *links* entre meus quatro vizinhos depende agora do tamanho da rede. Se eu tiver 12 nós, como tenho na figura, o coeficiente de clusterização será de 0,33. Para 1 bilhão de nós, contudo, ele cai para 4 em 1 bilhão. Evidentemente, o coeficiente de clusterização de 0,5 que o novo modelo prevê é gigantesco, se comparado a esses valores.

Porém, temos de pagar um preço pela elevada clusterização que o modelo nos proporciona. Foi-se nosso mundo pequeno. Na sociedade-modelo mostrada na figura, apenas meus vizinhos imediatos e mais próximos estão ligados a mim. Para contatar alguém que se encontra do outro lado do círculo, teria, literalmente, de rodear o círculo, apertando inúmeras mãos pelo caminho. Efetivamente, é fácil perceber que o caminho mais curto que liga o nó do topo ao nó da base tem uma extensão de pelo menos três *links*. Pode não parecer muito, mas se tivesse tido a paciência (e espaço) de desenhar 6 bilhões de nós ao longo do mesmo anel, cada qual conectado a seus vizinhos imediatos e próximos, o atalho mais curto para o lado oposto do círculo demandaria mais de 1 bilhão de apertos de mão! Logo, uma sociedade em círculo não só é altamente clusterizada, como também representa um “mundo demasiado grande” (grandes distâncias de separação entre os nós).

Na realidade, todos temos *links* com pessoas distantes em volta do mundo. Temos amigos que não vivem localmente próximos uns dos outros. Se quiser encontrar um caminho para uma pessoa na Austrália, não irei de porta em porta, porque mais cedo ou mais tarde chegarei ao oceano Pacífico. Em vez disso, eu me lembrarei de que meu melhor amigo da escola secundária se mudou para Sidney há poucos anos. Logo, tudo o que preciso fazer é encontrar

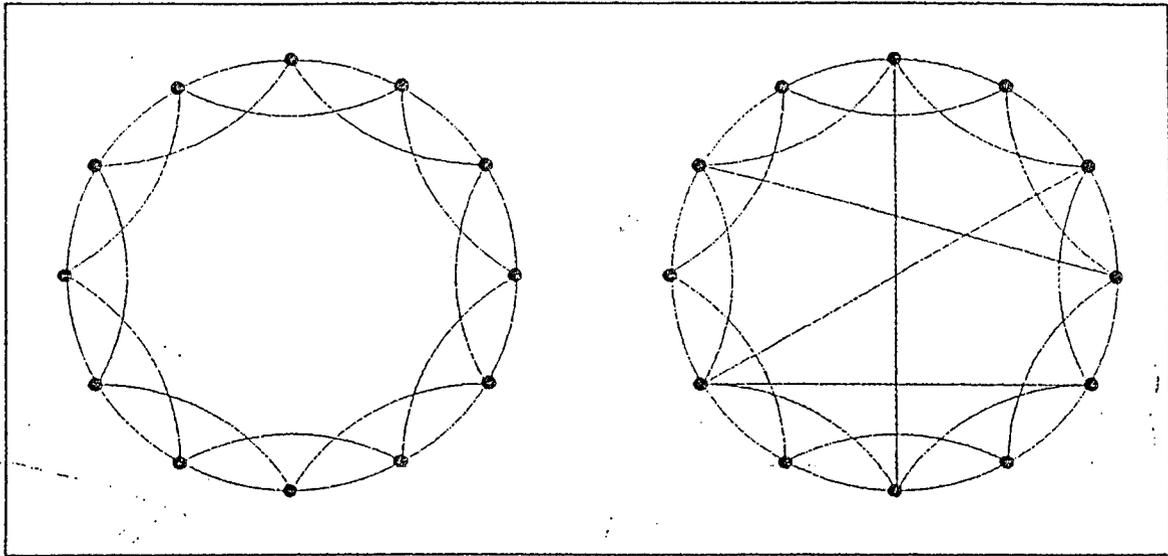


Figura 4.2. Um pequeno e clusterizado mundo: para modelar redes com alto grau de clusterização, Duncan Watts e Steven Strogatz partiram de um círculo de nós onde cada nó se conecta ao seguinte e a seus vizinhos mais próximos (esquerda). Para tornar esse mundo um mundo pequeno, adicionam-se alguns *links* extras, conectando nós aleatoriamente escolhidos (direita). Esses *links* de amplo espectro oferecem o atalho crucial entre nós distantes, encurtando drasticamente a separação média entre todos os nós.

um *link* para meu alvo australiano por meio dos *links* de amizade cada vez mais densos que meu amigo está criando em torno de si exatamente agora. Um modelo realista de sociedade hoje deve possibilitar *links* distantes. Podemos facilmente perceber isso no modelo descrito na figura 4.2, adicionando poucos *links* a alguns nós selecionados aleatoriamente em torno do círculo. Em outras palavras, tomemos dois nós quaisquer ao longo do círculo e os conectemos a um novo *link*. Isso reduzirá para 1 a distância entre os nós escolhidos, e seus vizinhos imediatos ficarão muito mais próximos também uns dos outros. Se eu adicionar esses *links* aleatórios, poderei manter todos os nós bem próximos entre si.

A surpreendente descoberta de Watts e Strogatz é que poucos *links* extras já são suficientes para reduzir drasticamente a separação média entre os nós. Esses poucos *links* não alterarão significativamente o coeficiente de clusterização. Todavia, graças às extensas pontes que formam, frequentemente conectando nós no lado oposto do círculo, o grau de separação entre todos os nós decai de forma significativa. A capacidade que tem o modelo de reduzir drasticamente a separação, mantendo o coeficiente de clusterização praticamente inalterado, indica que podemos ser bastante provincianos na escolha de nossos amigos, desde que uma pequena parcela da população possua alguns *links* de grande alcance. Segundo o *insight* proporcionado por esse modelo simples, os

seis graus de separação baseiam-se no fato de que algumas pessoas possuem amigos e parentes que já não vivem próximos a elas. Esses *links* distantes nos oferecem atalhos para pessoas que se encontram em regiões muito remotas do mundo. Grandes redes não precisam ser repletas de *links* aleatórios para revelar traços de mundo pequeno. Poucos *links* desses darão conta do recado.

## 5.

A publicação do trabalho de Watts-Strogatz acerca da clusterização, dois anos após a morte de Erdős, suscitou enorme interesse igualmente entre físicos e matemáticos. Em primeiro lugar, formalizou a visão de Granovetter ao propor um modelo que efetivamente revelava clusterização significativa. Em segundo lugar, desempenhou papel único ao chamar a atenção da comunidade dos físicos e matemáticos para o problema do mundo pequeno, temática muito investigada na sociologia. Por um breve momento, teve-se a impressão de que o modelo mais geral, do grupo de amigos, proposto por Watts e Strogatz substituiria o universo randômico de Erdős e Rényi. Todos poderíamos nos relacionar com a simples representação da ordem familiar local salpicada de poucos *links* distantes, oferecendo uma lúcida explanação dos mundos pequenos que existem em torno de nós. O modelo propunha um sofisticado compromisso entre o mundo inteiramente randômico de Erdős e Rényi, que é um mundo pequeno, mas hostil aos círculos de amigos, e de uma treliça regular, que revela alta clusterização, mas na qual existem nós que estão bem distantes uns dos outros.

Hoje entendemos que o modelo Watts-Strogatz não é incompatível com a cosmovisão de Erdős-Rényi. Decerto, ao pressupor que começamos com uma treliça regular, ele, de fato, admite *clusters*. Mas, de diversas formas, sua filosofia fundamental continua a seguir de perto a visão de Erdős e Rényi. Independentemente do arranjo inicial dos nós ao longo do círculo, conectamos os nós de maneira inteiramente *randômica* uns aos outros. Por conseguinte, ambos os modelos descrevem uma sociedade profundamente igualitária, cujos *links* são regulados pelo lance de um dado.

Quando o trabalho pioneiro de Watts e Strogatz foi publicado em 1988, meu grupo de pesquisa estava tentando entender a estrutura das redes complexas, enfocando principalmente a *Web*. Levou algum tempo para que se percebesse inteiramente a importante mensagem do trabalho e se apreciasse a capacidade do novo modelo de congregar a visão de mundo de Erdős-Rényi com a sociedade clusterizada de Granovetter. Com o tempo, isso aconteceu, e tínhamos uma situação emergente em mãos. Nosso pequeno robô retornou da *Web* com uma rede que era drasticamente diferente das previsões dos modelos tanto de Erdős-Rényi como de Watts-Strogatz. Como veremos no capítulo 5, ele nos

trouxe um aglomerado de *hubs* – nós dotados de um número extraordinariamente grande de *links*. O problema era que, no modelo igualitário de Erdős e Rényi, esses *hubs* são extremamente raros; era claro, portanto, que o modelo não podia explicar a descoberta de nosso robô. O modelo Watts-Strogatz não se saía muito melhor, pois também impede a existência de nós significativamente com mais *links* do que os que o nó médio possui. Claramente faltava algo importante de *ambos* os modelos, o que limitava nossa compreensão do universo em forma de teia. Os dados nos levaram a buscar uma melhor compreensão das redes reais, obrigando-nos, por fim, a abandonar de vez a cosmovisão randômica. Seguindo esse caminho, os eventos deram uma guinada bastante inesperada. Tivemos de descartar simplesmente tudo o que havíamos aprendido acerca das redes até então.