

BARABÁSI E AS REDES: UMA INFRAESTRUTURA DINÂMICA PARA A COMPLEXIDADE

Fabiola Amaral¹

Rosa Ladeira²

1. Introdução

O interesse pelas redes complexas permeia várias áreas do conhecimento. Iniciado no campo das ciências exatas, com relevantes contribuições de matemáticos e físicos, o estudo das redes foi depois absorvido por diversas áreas, como a sociologia, na perspectiva da análise estrutural das redes sociais, e a medicina, na pesquisa das redes de reações bioquímicas intracelulares. No entanto, a noção de que algo diferente surge quando alguns elementos estabelecem entre si algum tipo específico de ligação, remonta a tempos tão distantes quanto o da metafísica de Aristóteles (2002, p. 363-365), que reconhece no todo algo além da união de suas partes. Segundo Capra (1996), todos os organismos vivos – das partes que os compõem às comunidades por eles formadas – seguem um padrão comum de organização: as redes, o padrão da vida, das quais novas estruturas e comportamentos podem emergir espontaneamente.

Nos últimos anos, os estudos sobre as redes têm se expandido consideravelmente. A principal razão são os inúmeros sistemas que podem ser modelados como redes complexas. Em *Linked – A Nova Ciência da Redes*, Albert-László Barabási apresenta modelo que se aproxima das complexas redes reais, as redes *scale-free* ou redes livres de escala. Partindo de dois pressupostos básicos – o crescimento da rede e a conexão preferencial entre os nós – o modelo reproduz um comportamento característico de muitos sistemas reais: a distribuição das conexões segundo uma lei de potência.

Albert-László Barabási, físico húngaro radicado nos Estados Unidos, através de uma narrativa que aplica à estrutura de um artigo científico o colorido característico das crônicas, traz em *Linked* capítulos numerados como “conexões” e descreve as complexas redes reais embaladas pelo ritmo das histórias dos feitos científicos que pavimentaram o caminho de Barabási e seus colaboradores permeadas com detalhes sobre seus autores e acompanhadas de curiosidades sobre a cronologia das redes.

¹ Mestranda em Engenharia de Produção – UFRJ/Brasil. <https://orcid.org/0000-0003-0654-2292>

² Mestranda em Engenharia de Produção – UFRJ/Brasil. <https://orcid.org/0000-0002-3985-4148>. E-mail: rosa.ladeira@gmail.com

2. A evolução do conhecimento sobre as redes

Segundo Castro (2007), para matemáticos e físicos, uma rede é um conjunto de vértices ligados por arestas. Para Castells (2010), as redes são formas flexíveis e adaptáveis, formas evolutivas de desenvolvimento orgânico de ação social humana.

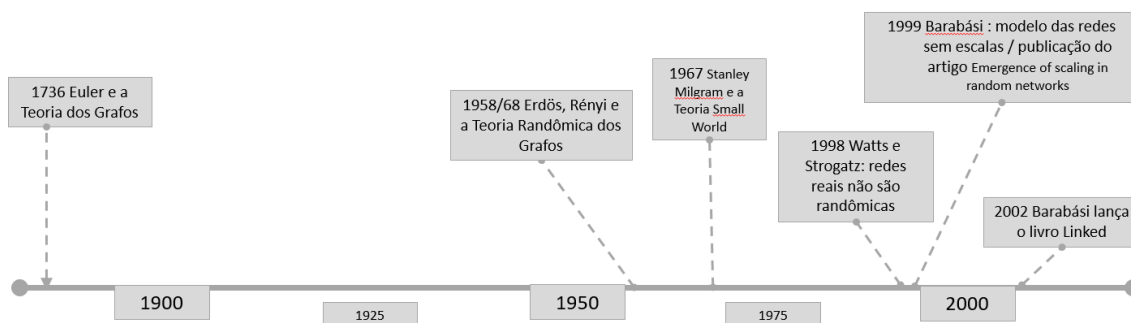


Figura 1 – Marcos da evolução do conhecimento sobre as redes

Fonte: elaborado pelas autoras.

O estudo das redes tem início no ano de 1736 (Figura 1). Assume-se que sua estrutura essencial foi representada pela primeira vez quando Euler criou o primeiro grafo, composto de vértices e arestas, para resolver o problema das sete pontes de Königsberg (Figura 2), desafio que entretinha a população da próspera cidade da Prússia Oriental. Com a intenção de demonstrar a impossibilidade de solução do problema, Euler deu origem à Teoria dos Grafos, um ramo da matemática dedicado ao estudo das relações entre os elementos de um determinado conjunto. Ao longo de mais de 200 anos, os estudos dos grafos avançaram com uma perspectiva estática, sem considerar a ação do tempo e de outros fatores sobre esses elementos e suas relações.

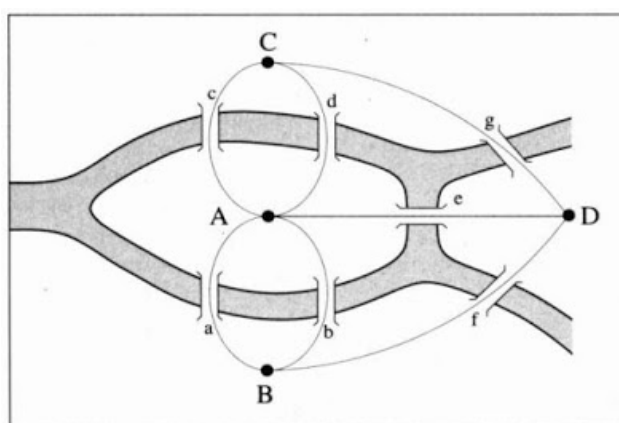


Figura 2 – Grafo das Pontes de Königsberg

Fonte: BARABÁSI (2009, p. 10).

Somente em meados do século XX, as conexões que dão forma às redes começaram a ser analisadas sob uma ótica dinâmica, culminando na Teoria Randômica dos Grafos, um passo de aproximação entre os grafos de Euler e as redes reais. No modelo proposto por Paul Erdős

e Alfréd Rényi (1959), as ligações entre os nós vão se formando ao longo do tempo e de maneira aleatória, até que todos os nós passam a contar com pelo menos uma conexão. A partir daí, está estabelecida a rede, na qual, a distâncias maiores ou menores, cada nó possui pelo menos um caminho de ligação com todo e qualquer outro nó. Aplicado às redes sociais, o modelo Erdős-Rényi constata o que John Donne, poeta inglês do século XVI, concluiu como consequência de uma necessidade humana: “Nenhum homem é uma ilha, inteiramente isolado; todo homem é um pedaço de um continente, uma parte de um todo” (DONNE, 2007, p. 103-105).

Nas redes randômicas de Erdős e Rényi, os caminhos entre os nós vão se encurtando à medida em que eles vão estabelecendo entre si mais e mais conexões. Em 1967, Stanley Milgram, pesquisador do campo da psicologia interessado na estrutura das redes sociais, realizou um experimento para medir quantas conexões é necessário percorrer para que qualquer pessoa nos Estados Unidos chegue a qualquer outra pessoa naquele mesmo país. O experimento consistiu em um sistema de envio de cartas e cartões-postais, iniciado com diversas pessoas nas cidades de Wichita (Kansas) e Omaha (Nebraska), que não conheciam os dois destinatários finais das cartas, moradores das cidades de Sharon e Boston, ambas em Massachusetts.

Com os cartões-postais retornados à universidade e as cartas que chegaram a seus destinos, Milgram não só mapeou os caminhos percorridos – o que lhe permitiu vislumbrar parte da rede social ativada pelo experimento – como verificou que, para as cartas que chegaram a seus destinos, esses caminhos foram traçados, em média, por 5,5 pessoas que as passaram adiante. Em um arredondamento, o experimento de Milgram chega às mesmas seis conexões que, em 1929, foram propostas como um desafio na ficção *Chains*, de Frigyes Karinthy, escritor e jornalista húngaro, sem qualquer passado científico. Porém, nem o estudo de Milgram, nem o livro de Karinthy foram capazes de popularizar tanto a ideia de medir a distância entre as pessoas com base em suas relações, quanto o filme *Six Degrees of Separation*, de 1993, adaptado da peça de teatro de John Guare, autor da famosa expressão que deu nome à sua obra. A ideia de que qualquer pessoa no mundo está, em média, a apenas seis apertos de mão de todas as outras levou a outra expressão popular na caracterização das nossas redes de relacionamentos pessoais: o mundo pequeno ou *small world*.

As redes sociais também despertaram o interesse de Mark Granovetter, sociólogo americano que, em 1973, foi a campo investigar o papel dessas redes na forma como as pessoas conseguem empregos. Granovetter verificou que, diferentemente das redes randômicas de Erdős-Rényi, em que cada nó tem mais ou menos o mesmo número de conexões, as redes sociais contam com grupos distintos de nós altamente conectados entre si (*clusters*), correspondentes aos círculos sociais mais íntimos, nos quais todos estão ligados a todos. Descobriu também que, para arrumar um emprego, as conexões mais efetivas não são com as pessoas do próprio *cluster*, mais próximas ao candidato, mas, sim, com as pessoas mais distantes, que correspondem às poucas ligações que unem um *cluster* a outro. Granovetter chamou de laços fracos (*weak ties*) essas ligações que assumem grande importância quando

precisamos ampliar nossas fronteiras de relacionamento ou acessar informações diferentes das que temos.

Em 1998, os *clusters* descobertos por Granovetter ganharam uma medida para o seu grau de coesão. Duncan Watts, físico e sociólogo, e Steven Strogatz, físico, criaram o coeficiente de clusterização, calculado pela divisão da quantidade de conexões existentes em um *cluster* pela quantidade de conexões que nele haveria se todos os nós fossem ligados a todos os demais nós. Eles sugerem ainda que os *clusters* não se limitam às redes sociais, sendo provavelmente encontrados em várias redes existentes na natureza.

3. Além da aleatoriedade

Com o avanço dos estudos sobre as redes, foi observado que as redes do mundo real possuem propriedades organizacionais robustas e bem distintas das redes randômicas. Diante de redes em que a dinâmica das conexões era complexa a ponto de não poder ser descrita de forma simples, Erdős e Rényi optaram por retratá-las como aleatórias. Uma das consequências é a característica profundamente igualitária dessas redes: com as conexões ocorrendo de forma aleatória, ao final de determinado tempo, todos os nós terão mais ou menos a mesma quantidade de conexões. No entanto, é fácil perceber que não é isso o que ocorre com as redes reais.

A partir da análise de diversas dessas redes – como as páginas da Web, a rede elétrica do Oeste dos Estados Unidos, os atores e atrizes que participaram de filmes de Hollywood e até mesmo a topologia do *C. Elegans*, verme amplamente estudado pela biologia do desenvolvimento – Barabási e dois de seus alunos, Réka Albert e Hawoon Jeong, descobriram que elas apresentam propriedades muito específicas. Verificaram que, em todas essas redes, a distribuição de grau ou a forma como a quantidade de conexões por nó se distribui entre os nós segue uma lei de potência, descrevendo a existência de poucos nós com muitas conexões e de muitos nós com poucas conexões. Ao passo em que nas redes randômicas – cuja distribuição de grau é descrita por uma curva normal – é possível identificar um nó típico com um número médio de conexões, nas redes reais não há uma configuração ou tamanho dominante de nó, não sendo possível estabelecer uma escala.

Até o modelo de Watts-Strogatz, a formação das conexões era a única dinâmica considerada no estudo das redes. Barabási explica a desigualdade na distribuição das conexões quando insere uma nova dimensão nessa dinâmica: o aumento da quantidade de nós. A desigualdade se estabelece à medida em que novos nós se incorporam à rede com uma probabilidade maior de se conectarem a nós que já possuem muitas outras conexões, em lugar de o fazerem de maneira aleatória.

4. O modelo de redes sem escala

Os dois pressupostos básicos das redes sem escala são o crescimento da rede e as conexões preferenciais. Sua coexistência nessas redes explica a presença dos *hubs*. A essa

altura das descobertas, acreditava-se que esses nós altamente conectados correspondiam sempre aos nós mais antigos na rede, que tiveram mais tempo para estabelecer conexões. No entanto, observando a forma como alguns novos produtos lançados no mercado se conectam rapidamente a novos clientes e fornecedores, transformando-se em casos de sucesso, Barabási percebeu que algo além do tempo determinava a quantidade de conexões de um nó. Alguns deles pareciam ser mais aptos às conexões do que os outros, independentemente de sua “idade” na rede. Em 2001, Ginestra Bianconi, sua aluna de doutorado, chega a um modelo matemático que descreve a aptidão dos nós para capturar novas conexões.

O modelo de aptidão de Bianconi e Barabási (2001) considera que, em redes complexas, cada nó é dotado de características intrínsecas que se somam ao tempo para determinar e individualizar a velocidade com que atraem novas conexões. Em um ambiente competitivo, onde os nós lutam pelas conexões, se a competição seguir o modelo “apto fica mais rico”, os *hubs* serão determinados pelas qualidades inerentes aos nós, porém, ainda com alguma influência do tempo, preservando o modelo sem escala. Por outro lado, se a competição seguir o modelo “vencedor leva tudo”, um nó mais apto que todos os demais passam a captar todas as conexões, sem qualquer relação com o tempo, até destruir a topologia sem escala da rede, que assume uma configuração em estrela.

A topologia dessas redes também está sujeita a outros tipos de ameaças. Os *hubs*, por concentrarem um grande número de conexões, são seu ponto vulnerável a ataques, ao mesmo tempo em que lhes conferem resiliência para suportar as falhas. Os ataques – intencionais, direcionados – se feitos de forma simultânea a uns poucos *hubs* da rede, já são suficientes para desintegrá-la. Já as falhas, por sua aleatoriedade, atingem todos os nós da rede com a mesma probabilidade, de forma que, ainda que muitos nós sejam atingidos ao mesmo tempo, a grande maioria será de pequenos nós. Ainda que algum *hub* também seja atingido, os demais grandes nós garantirão a integridade da rede.

Esses eventos, contudo, se tornam mais ameaçadores quando deflagram um efeito cascata: a falência de grandes nós leva à sobrecarga de nós sucessivamente menores, podendo resultar até mesmo no colapso da rede. Sistemas de distribuição de energia elétrica, malhas aeroviárias, sistemas de serviços de saúde, cadeias alimentares e roteadores de redes de computadores são exemplos de algumas redes reais sujeitas às falhas em cascata.

5. Limitações do modelo sem escala

No modelo sem escala, descrito por Barabási e Albert (1999), as redes têm seus nós e conexões em constante mudança. Sua topologia nada mais é que um reflexo de seu processo de evolução contínua. Para estudar essas redes, torna-se mais relevante compreender as leis e os mecanismos que regulam esse processo do que simplesmente descrever sua estrutura.

Sendo assim, Barabási elenca, como limitações do modelo, não contemplar: o envelhecimento da rede, que reduz sua capacidade de atrair novos nós e estabelecer novas conexões; a perda de conexões e nós; a reconfiguração de conexões entre nós já existentes na rede.

Scharnhorst (2003) discute a existência de uma relação entre os modelos de redes sem escala e de mundos pequenos. De acordo com ela, às vezes as duas características são atribuídas às redes. Com apenas alguns nós altamente conectados e a maioria com poucos links, o modelo de Barabási e Albert tem uma distribuição de grau muito baixa. No entanto, uma rede sem escalas não é, necessariamente, um mundo pequeno. Já o modelo de Watts-Strogatz tem um grau de distribuição parecida com a de um grafo aleatório, mas tem um alto grau de conexão entre os nós.

Scharnhorst (2003) chama a atenção para o fato de que os modelos foram criados sob a forma teórica, em testes realizados em computadores. No mundo real, as redes costumam exibir graus de distribuição variados e não necessariamente funcionam num modelo ou outro. "Dependendo de qual definição teórica é escolhida, as propriedades de ambos os tipos de redes podem ser encontradas em redes do mundo real", explica.

6. Algumas redes reais sem escala

6.1. A Internet

No livro *Linked – A Nova Ciência das Redes*, Barabási apresenta exemplos de diversas redes reais que se configuram como redes sem escala, revelando novas e extensas fronteiras de pesquisa em seus respectivos campos de conhecimento. O estudo da Internet, como rede de roteadores conectados por cabos, evidencia suas características de rede sem escala, em que a aptidão dos roteadores para receber novas conexões advém da largura de banda, com o crescimento da quantidade de roteadores na rede relacionado à densidade populacional.

É preciso compreender a topologia da Internet para protegê-la, seja de *hackers*, que concentram suas ações no desencadeamento de falhas – mas que dificilmente vão empreender ataques que desintegrem a rede, uma vez que precisam dela para alcançar seus objetivos – seja de grupos terroristas capazes de empreender ataques físicos a seus *hubs*.

6.2. A Web

Sobre a rede estrutural da Internet se organiza uma outra rede, a Web. A primeira rede real analisada por Barabási e seu grupo de pesquisadores tem suas páginas conectadas por *links* direcionados, o que faz com que só seja possível navega-las em um único sentido, assim como nas redes de citações e nas cadeias alimentares, exemplos de redes reais direcionadas. Analisando mapas da Web, em 2011 o grupo liderado por Andrei Broder identificou como principal consequência da direcionalidade a divisão da Web em quatro regiões ou continentes, que se diferenciam entre si por suas regras de navegação. Em qualquer rede, randômica ou sem escala, se as conexões forem direcionadas, estes continentes com suas regras estarão presentes.

O continente interior é formado por páginas a partir das quais se pode navegar até o núcleo central. Mas, uma vez que lá se chegue, não é possível navegar de volta. No núcleo

central, se encontram as páginas altamente conectadas, como os grandes *websites*, e facilmente navegáveis entre si. Partindo do núcleo central, à medida em que se alcança o continente exterior, torna-se impossível o retorno. O quarto continente é formado pelos filamentos e ilhas, grupos de páginas conectadas entre si, que são isoladas do núcleo central e, em alguns casos, dos demais continentes também. Há ainda os tubos, que permitem a navegação do continente interior ao continente exterior, sem passar pelo núcleo central.

No caso do continente interno e das ilhas, as páginas somente são acessíveis conhecendo-se seu URL (*Uniform Resource Locator*). Essas páginas são invisíveis aos robôs rastreadores (*web crawlers*) usados pelas ferramentas de pesquisa, como Google e Yahoo, para mapear e indexar as páginas da Web. Essas ferramentas vêm alcançando uma fração cada vez menor da rede.

É preciso navegar por suas páginas, informando seus URLs às ferramentas de busca, para evitar que elas desapareçam no passado. Na topologia sem escala da Web, pouca diferença fazem as alterações de código impostas por governos e empresas. Quem determina a persistência ou o esquecimento de determinado conteúdo é o conjunto das decisões individuais de navegação de bilhões de pessoas.

6.3. As redes sociais

Essa mesma topologia é o que faz com que a disseminação de vírus nas redes de computadores pouco dependa de sua capacidade de contágio. A Internet, rede livre de escala subjacente às redes de computadores, garante isso. O estudo de Romualdo Pastor-Satorras e Alessandro Vespignani, em 2001, Trieste, Itália, demonstrou que seus hubs assumem papel fundamental nesse processo: por serem mais conectados, são rapidamente infectados; pelo mesmo motivo, também rapidamente infectam outros nós. O mesmo vale para as redes sociais, quando se trata da disseminação de doenças contagiosas, inovações, religiões, ideias e notícias, sejam elas reais ou fake news.

Em 2002, Zoltán Dezső, aluno de Barabási, chegou à mesma conclusão do estudo de Trieste: no caso das doenças contagiosas, em um cenário de restrição de recursos, como a baixa oferta de medicações para tratamento ou prevenção, os hubs deveriam ser priorizados. Na epidemia de AIDS dos anos 80, isso significaria privilegiar as prostitutas pobres e os viciados em drogas injetáveis na distribuição de tratamento. A efetividade dessa lógica inquietante foi confirmada por Dezső ao comparar diferentes políticas de enfrentamento à disseminação do HIV. Ele constatou que aquelas que tentaram identificar os hubs, ainda que com erro considerável, tiveram êxito na contenção do surto, ao passo em que as políticas que seguiram distribuindo o tratamento de forma aleatória, não conseguiram coibi-la.

Reflexão semelhante pode ser feita com relação à eficácia de alguns critérios de vacinação adotados no combate à pandemia de COVID-19, que se aplicam sobre dados demográficos, estáticos diante da dinâmica rede de contaminação, em que pessoas se conectam por momentos de proximidade física. O distanciamento social e o uso de máscaras não têm outro papel a não ser evitar que essas conexões aconteçam ou que o vírus trafegue

por elas. Critérios que consideram o impacto da doença sobre o nó, individualmente, ignorando as características intrínsecas que o tornam mais ou menos apto a rapidamente estabelecer novas conexões, contribuem para a persistência do vírus na rede. É preciso considerar ainda que não se trata de uma rede apenas, mas de várias delas, conectadas por nós coincidentes.

Muitos dos hubs que são pontos de vulnerabilidade da rede de combate à pandemia também conferem resiliência à rede de contaminação, contribuindo para mantê-la íntegra e ativa. Conseguimos reconhecer esse duplo papel nos profissionais de saúde. Mas ele também é desempenhado pelos motoristas de ônibus, balconistas de farmácias, padeiros e coveiros, entre outros. Por outro lado, muitos *hubs* da rede de contaminação sequer integram a rede de combate. Assim como importantes nós da rede de combate, como representantes governamentais e executivos de empresas farmacêuticas, não precisam atuar como *hubs* de contaminação. Da mesma forma que é necessário conhecer a topologia da Internet para protegê-la, se quisermos seguir à frente do que construímos como civilização, precisamos conhecer e tomar partido das leis que regem as redes que nos relacionam de diversas maneiras.

6.4. As redes bioquímicas intracelulares

Isso também será necessário se quisermos entender a vida. Genes, proteínas e outras moléculas de diferentes graus de complexidade, conectados por interações que vão de reações químicas a ligações físicas, compõem as complexas redes bioquímicas no interior das células. Em 2004, Barabási e o biólogo celular Zoltán Oltvai lançaram-se ao desafio de mapear essas redes para esclarecer se são randômicas ou sem escala. Analisando as redes metabólicas de 43 organismos distintos, de diferentes tamanhos, verificaram que todas eram redes sem escala, com apenas três graus de separação. Observaram também que em boa parte dessas redes os maiores *hubs* eram sempre as mesmas moléculas: ATP, ADP e água, moléculas entre as mais antigas na história da evolução celular. Diversos estudos posteriores mapearam redes em células como a levedura de padeiro, a *Helicobacter pylori* e a *E. coli*, e chegaram aos mesmos resultados: as redes da vida intracelular são redes sem escala, com seus *hubs*, que as fazem resilientes a falhas e suscetíveis a ataques.

Doenças são resultados de perturbações em segmentos dessas redes, responsáveis pelas funções dos diversos sistemas que compõem um organismo. O mapeamento desses segmentos dará origem a uma nova representação da célula. No lugar do modelo clássico, estrutural, composto por membrana, citoplasma, núcleo e organelas, teremos um modelo funcional representativo da grande rede metabólica. Médicos se especializarão em segmentos dessas redes.

A precisão que esses mapas conferirão às intervenções médicas permitirão o preparo de medicações individualizadas, extremamente precisas e sem efeitos colaterais. Antibióticos altamente específicos substituirão os de amplo espectro, reduzindo drasticamente o risco de desenvolvimento de bactérias resistentes (ALBERT-LÁSZLÓ, 2012). Novas e empolgantes

descobertas que estão revolucionando a biologia e a medicina nos dizem de forma eloquente: se quisermos entender a vida, devemos pensar em redes.

6.5. As redes econômicas

Assim como a dinâmica da vida, das funções fisiológicas ao agitado trânsito intracelular, também a economia é movida por uma grande variedade de redes interconectadas. Redes políticas, redes de propriedade, redes de colaboração, redes organizacionais, marketing de rede e outras seguem em constante interação para manter o pulsar de uma grande rede multidimensional que chamamos de “mercado”. Todas essas redes exibem um comportamento que remete ao modelo sem escala, crescendo por meio de suas conexões preferenciais, segundo leis de potência. Consumidores, empresas, grupos econômicos, instituições financeiras, governos e todos os demais potenciais agentes econômicos interagem através de relações de diversas naturezas, como compras e vendas, convênios de pesquisa, projetos de marketing etc., estabelecendo conexões direcionadas, cujo “peso” são os valores que trafegam nessas transações.

Para se manterem competitivas e sobreviverem no novo ambiente de negócios, cada vez mais volátil, incerto, complexo e ambíguo (acrônimo da sigla em inglês VUCA: *Volatility, Uncertainty, Complexity e Ambiguity*), as organizações precisarão se adaptar rapidamente às constantes mudanças, ampliando seu escopo de atuação com uma visão global das possibilidades de conexão com outros agentes econômicos. Algumas organizações já percebem também a necessidade de se reconfigurarem internamente, partindo de um paradigma de estruturas hierárquicas e estáticas para arranjos mais horizontais, com muitas relações transversais e dinâmicas. No novo modelo, equipes com mais autonomia, empoderadas e com maiores responsabilidades se articularão de maneira mais fluida, para alcançar resultados que sejam de grande valor para a organização, mas que também impactem positivamente a sua cadeia produtiva.

As redes, ao mesmo tempo em que conferem a flexibilidade indispensável a esse novo contexto, tornam necessário que cada nó seja lucrativo para que os demais também o sejam. Para alcançar a sustentabilidade econômica, é preciso consciência da presença deste padrão de organização na economia e capacidade de assumir um posicionamento ativo diante das leis que governam essas redes.

6.6. As redes terroristas e outras organizações criminosas

Numa perspectiva um tanto sombria, cartéis de drogas, organizações terroristas e outras organizações criminosas parecem estar à frente nesse desafio. Já não se estruturam hierarquicamente, mas como redes auto organizadas. Os estudos sobre os terroristas envolvidos nos ataques de 11 de setembro de 2001 e suas inter-relações mostram que, ainda que Mohamed Atta, nó mais conectado da célula que operacionalizou os ataques, tivesse sido

impedido de agir, isso não teria sido suficiente para dismantelar a rede e os ataques provavelmente teriam ocorrido, mesmo sem a sua participação.

Mais uma vez, assumir a condução dos movimentos, mesmo com o pouco conhecimento que temos sobre as complexas redes reais, pode ser a chave para o enfrentamento de forças que atuam em sentido contrário ao nosso desenvolvimento como sociedade. Esse protagonismo pode ser exercido de diversas formas: manobras para a remoção de *hubs* em quantidade suficiente para desintegrar essas redes, operações para a drenagem de recursos que as levem a um processo de falhas em cascata ou mesmo o investimento em redes virtuosas, construtivas, com nós cada vez mais aptos a atraírem para si os potenciais novos nós.

7. Uma experiência pessoal com as redes

Vivemos envoltos também por essas redes positivas que, ao capturar, resgatam, amparam. Muitas vezes, a rede familiar é uma delas. Dona Yolanda foi se tornando o *hub* de sua família, desde a infância dos seis filhos. Tinha como características intrínsecas o dom do bem acolher e um humor espirituoso, com *timing* perfeito, daqueles de arrancar gargalhadas até das paredes. Somados a outros, esses fatores lhe conferiram uma aptidão que lhe rendeu muitos laços, fortes e fracos. Filhos e filhas, noras e genro, netos, bisnetos e amigos se reuniam em torno dela regularmente, mantendo vivas essas conexões. Como toda família, essa rede também sofreu ataques e falhas, mas sua dinâmica lhe rendeu uma topologia que garantiu sua integridade e crescimento ao longo dos anos. Os filhos – depois dela, os nós mais antigos da rede – com o tempo foram tornando-se também importantes *hubs*.

O mesmo tempo que permitiu o estabelecimento das tantas conexões que adensaram sua rede, encurtando os caminhos, reduzindo os graus de separação, também foi, impiedosamente, apagando suas conexões neuronais. Ainda assim, em algum nível, ela mantinha um forte senso de ligação, de pertencimento. Tinha os dedos entrelaçados com os da neta quando, contemplando sua rede, já sem qualquer noção de quem era quem ou das relações que uniam aquelas pessoas, transbordou: “Eu gosto muito dessa gente. Essa é a minha gente!”

Em novembro de 2017, a rede perdeu seu maior *hub*. Desde então, tem se redesenhado continuamente para lidar com o maior abalo sofrido em sua história. Os filhos, a essa altura também nós altamente conectados, têm desempenhado papel fundamental na busca por uma nova configuração de equilíbrio. Nessa jornada, alguns nós vêm se alternando em papéis centrais: a neta médica, que orienta e apazigua os demais no que diz respeito à pandemia de COVID-19; o neto que foi duramente atacado pelo vírus e teve uma recuperação milagrosa; a filha que se prepara para deixar a casa que, nos últimos anos, foi espaço físico de realização dos eventos que contribuíam para o fortalecimento das conexões. Mais nova que os demais irmãos, sem filhos, mas com muitos sobrinhos, alguns com idade mais próxima, é talvez uma boa candidata se tornar o novo *hub*. O próximo passo é encontrar um novo local,

onde identificar e desenvolver características que possam torná-la ainda mais apta a reforçar as conexões que ficaram e criar outras tantas.

É preciso lançar mão do conhecimento adquirido nesta jornada para reforçar as conexões da rede de Dona Yolanda, a rede que faz compreender o fascínio do pescador da canção de Oswaldo Montenegro, “que se encanta mais com a rede que com o mar” (LUA, 1989).

8. A contribuição de Barabási

Barabási talvez tenha inaugurado uma nova Era dos Descobrimentos, ao fornecer instrumentos para navegar os oceanos da complexidade. Com recursos computacionais e acesso a um volume e uma variedade de dados impensáveis à época de Erdős e Rényi, foi capaz de identificar o que se apresenta como as leis da dinâmica que governa a estrutura das complexas redes reais. Essas redes parecem estar em tudo, em todo lugar, formadas por relações permanentes ou voláteis, modificando sua formação ao longo dos anos ou de segundos, dando lugar à emergência de tantos fenômenos, se auto organizando.

Se tudo está conectado então tudo pode ser modelado como rede. E mesmo que haja outras leis ainda não descobertas, o crescimento e as conexões preferenciais, seguindo uma lei de potência, estão lá, regendo a dinâmica e definindo a topologia de redes inerentes aos mais variados campos de conhecimento.

Mapear e analisar essas redes pode trazer contribuições que vão desde aumentar, em profundidade e abrangência, o conhecimento sobre as propriedades e a dinâmica das conexões até explicar eventos que permanecem incompreendidos ou parcialmente explicados.

Mais do que isso, pode mudar completamente a forma como nos relacionamos com esses eventos e, principalmente, a forma como nos organizamos e interagimos para isso, em todos os níveis. Lançando-se a uma grande expedição cartográfica, Barabási segue liderando e incentivando diversas iniciativas para construir o grande atlas das redes reais.

Referências

ARISTÓTELES, **Metafísica: ensaio introdutório, texto grego com tradução e comentários de Giovanni Reale**. Tradução: Marcelo Perine. São Paulo: Edições Loyola, 2002.

BARABÁSI, Albert-László. **Linked (conectado): a nova ciência das networks**. Tradução: Jonas Pereira dos Santos. São Paulo: Leopardo, 2009.

BARABÁSI, Albert-László - Q&A at TEDMED 2012. Stamford, CT: The TEDMED Foundation, 2012. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=SkurtDHFnac>. Acesso em: 4 abr. 2021.

- BARABÁSI, Albert-László; ALBERT, Réka. Emergence Of Scaling In Random Networks. **Science**, v. 286, n. 5439, p. 509-512, 1999.
- BARABASI, Albert-Laszlo; OLTVAI, Zoltan N. Network biology: understanding the cell's functional organization. **Nature reviews genetics**, v. 5, n. 2, p. 101-113, 2004.
- BIANCONI, Ginestra; BARABÁSI, Albert-László. Bose-Einstein condensation in complex networks. **Physical review letters**, v. 86, n. 24, p. 5632, 2001.
- BRODER, Andrei et al. Graph structure in the web. *In: The Structure and Dynamics of Networks*. Princeton University Press, 2011. p. 183-194.
- CAPRA, Fritjof. **The Web Of Life: A New Synthesis Of Mind And Matter**. Harper Collins, 1996.
- CASTELLS, Manuel. **A Era Da Informação: Economia, Sociedade E Cultura**, vol. 3, São Paulo: Paz e terra, 1999, cap. 1, p. 49-85.
- CASTRO, Paulo Alexandre de. **Rede Complexa E Criticalidade Auto-Organizada: Modelos E Aplicações**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- DEZSÖ, Zoltán; BARABÁSI, Albert-László. Halting viruses in scale-free networks. **Physical Review E**, v. 65, n. 5, p. 055103, 2002.
- DONNE, John. **Meditações / de John Donne**. Tradução: Fabio Cyrino. São Paulo: Landmark, 2007.
- GUARE, John. **Six degrees of separation: A play**. Vintage, 1990.
- GRANOVETTER, Mark S. The strength of weak ties. **American journal of sociology**, v. 78, n. 6, p. 1360-1380, 1973.
- KARINTHY, Frigyes. Chains. *In: Everything is different*. Budapest, 1929.
- LUA & FLOR. Intérprete: Oswaldo Montenegro. Compositor: Oswaldo Montenegro. *In: AO VIVO*. Intérprete: Oswaldo Montenegro. Rio de Janeiro: Som Livre, 1989. 1 disco vinil, lado B, faixa 1.
- MILGRAM, Stanley. The small world problem. **Psychology today**, v. 2, n. 1, p. 60-67, 1967.
- PASTOR-SATORRAS, Romualdo; VESPIGNANI, Alessandro. Epidemic spreading in scale-free networks. **Physical review letters**, v. 86, n. 14, p. 3200, 2001.
- PAUL, Erdős; ALFRÉD, Rényi. On random graphs I. **Publicationes Mathematicae (Debrecen)**, v. 6, p. 290-297, 1959.
- SCHARNHORST, Andrea. Complex Networks And The Web: Insights From Nonlinear Physics. **Journal Of Computer-Mediated Communication**, v. 8, n. 4, p. JCMC845, 2003.
- WATTS, Duncan J.; STROGATZ, Steven H. Collective dynamics of 'small-world' networks. **Nature**, v. 393, n. 6684, p. 440-442, 1998.