

ESTUDO DA VULNERABILIDADE DO SISTEMA DE TRANSPORTE AÉREO NACIONAL COM BASE NO ARCABOUÇO DA CIÊNCIA DAS REDES

Thays Melo de Moraes¹, Glauco Estácio Gonçalves²

Introdução

A ciência das redes estuda os sistemas complexos que nos cercam com foco nas relações entre as partes componentes destes sistemas. Assim, não se estuda cada um dos componentes isoladamente, mas procura-se visualizar toda a complexa teia de interações entre eles. Tal estudo pode ser aplicado às mais diversas áreas como: ciências sociais, com foco na sociedade de sete bilhões de indivíduos que interagem por meio de relações profissionais, de amizade, ideologia etc; engenharias, pelo estudo dos sistemas de distribuição de energia, comunicação etc; na biologia, nas interações moleculares, genéticas etc.

Apesar de tão distintos, estes sistemas complexos reais podem ser estudados por meio do arcabouço oferecido pela ciência das redes. Assim, um sistema complexo é descrito por meio de uma rede complexa (também chamada grafo), que pode ser definida como um conjunto de nós (também denominados vértices) e um conjunto de enlaces (também denominados arestas) que ligam os nós entre si (Lewis, 2009). Os nós e enlaces do modelo correspondem aos atores do sistema e as interações entre eles, respectivamente.

Na Ciência das Redes existe uma subárea que se dedica ao estudo de como um sistema complexo reage diante de falhas e ataques. Na literatura da área (Motter & Lai, 2002), considera-se falha todo sinistro ocorrido sem causa intencional seja por desgaste de um componente, evento externo não controlado, má configuração, etc. Sob o termo ataque estão abarcados todos os sinistros derivados de uma investida intencional e planejada, isto é, no ataque há um processo de escolha a partir de alguns fatores. Assim, na ciência das redes, consideram-se as falhas como eventos aleatórios e os ataques como eventos determinísticos. Contudo, em ambos os casos o efeito é o mesmo: um componente da rede é desativado.

Essa área vem recebendo bastante atenção devido a sua óbvia importância. Os estudos procuram analisar maneiras de tornar os sistemas complexos mais resistentes a estes dois fenômenos. Existem trabalhos aplicados aos mais diversos sistemas complexos. Um exemplo é o trabalho de (Wang et al., 2013) que realiza uma análise da Internet sob ataques e ilustra o impacto de falhas em cascata.

Um exemplo de rede que também está sendo estudado é o sistema aéreo. Tal sistema é formado pelos aeroportos (nós) e as rotas dos aviões entre os aeroportos (enlaces). Os trabalhos desenvolvidos nesta área estão relacionados a estrutura da rede aérea de aeroportos de determinados países, como, por exemplo, o sistema de transporte aéreo chinês (Yaru & Wenjing, 2011). No tocante ao Brasil, destaca-se o trabalho de (Rocha, 2009), que traz a evolução da rede de aeroportos do Brasil e mostra que o investimento aeroportuário tem focado no maior uso de rotas mais rentáveis e não necessariamente no estabelecimento de novas rotas. Tal conclusão tem forte impacto sobre a topologia da rede conforme aponta o autor: “Essa evolução dinâmica das rotas, vem resultando em aeroportos que se tornam centrais (redes com maiores conexões), enquanto outros acabam tendo pouquíssimas conexões” (Rocha, 2009).

O presente artigo faz um estudo preliminar da robustez da rede de transporte aéreo brasileiro. O trabalho realiza uma série de simulações para demonstrar como a rede aérea brasileira se comporta na presença de falhas e ataques. Este estudo serve então como indicativo da importância de se realizar estudos mais específicos sobre estas questões, buscando também formas de tornar essas redes mais resistentes aos sinistros.

Material e métodos

A. Base de Dados e Modelagem

A base de dados para as simulações e estudo é proveniente do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2013). Foram utilizadas duas bases de dados: a primeira é formada pelos registros das ligações origem-destino de rotas aéreas de cargas realizadas em 2010, formada por 50 aeroportos e 165 rotas de voo. A segunda é formada pelos fluxos principais do sistema aéreo brasileiro composto por 142 aeroportos e 387 rotas de voo. Esses dados foram então modelados como redes sendo cada aeroporto correspondente a um nó e cada rota de voo correspondente a um enlace. A

¹Thays Melo de Moraes é aluna do curso de Bacharelado em Sistemas de Informação, Universidade Federal Rural de Pernambuco. Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos - CEP: 52171-900 - Recife/PE. E-mail: thaysmelo.m@gmail.com

²Glauco Estácio Gonçalves é Professor Adjunto do Departamento de Estatística e Informática, Universidade Federal Rural de Pernambuco. Av. Dom Manoel de Medeiros, s/n, Recife, PE, CEP 52.171-900. E-mail: glauco.goncalves@deinfo.ufrpe.br

Fig. 1(a) mostra a rede obtida a partir dos dados de rotas de carga, enquanto que a Fig. 1(b) mostra a rede de rotas de fluxos principais. Note que cada rota liga apenas o aeroporto de origem do voo ao aeroporto de destino, as escalas dos voos não são utilizadas na modelagem.

B. Simulações

A simulação objetiva observar como a retirada de nós impacta em cada uma das redes em estudo, individualmente. Para tanto, desenvolveu-se um simulador na linguagem e ambiente R (ISM, 2013) que, partindo da rede inicial, realiza os seguintes passos: a) escolher um percentual de nós para desativação; b) removê-los da rede; e c) observar como a retirada impacta na rede.

Para a escolha dos nós a serem removidos utilizou-se dois processos diferentes: falha e ataque. No primeiro, um percentual dos nós da rede é escolhido de forma equiprovável, assim garantimos que a probabilidade de remover qualquer nó independe da importância do nó na rede. A simulação de ataque foca na remoção dos nós mais importantes. Como medida de importância utilizou-se o *betweenness* do nó, que mede o número de menores caminhos que passam por um determinado nó (Lewis, 2009). Desta maneira, um *betweenness* alto indica que um aeroporto é ponto de escala ou conexão para outros aeroportos. No processo de ataque, escolhe-se um determinado percentual de nós cujo *betweenness* sejam os mais elevados da rede.

Uma vez escolhidos os nós, a remoção consiste na retirada do nó da rede juntamente com seus respectivos enlaces, indicando que os voos com destino àquele aeroporto são cancelados. A remoção do nó equivale a um aeroporto deixar de operar em razão da falha. Note que não são criados novos enlaces, mas apenas os caminhos na rede são reconfigurados de acordo com a nova topologia.

O último passo consiste na coleta das métricas. Nesta análise utilizou-se apenas o tamanho médio dos caminhos, que é a média de todos os menores caminhos na rede medido em número de saltos. Esta medida indica em média, quantas conexões/escalas são feitas em um voo no Brasil. Observando esta métrica pode-se avaliar qual o impacto que um sinistro terá no tempo dos voos, considerando que a remoção de um aeroporto levará a um aumento do número de saltos e, conseqüentemente, a uma reconfiguração das escalas e conexões.

Os parâmetros usados nas simulações são: a rede de transporte aéreo (Carga ou Fluxos Principais); o tipo do sinistro (Falha ou Ataque); e a quantidades de nós removidos. Este último parâmetro foi variado de 1% a 99%, com passos de 1%.

Resultados e Discussão

Um primeiro importante resultado pode ser visto na Fig. 2(a). Neste gráfico, o tamanho médio dos caminhos é medido na rede de cargas sob falha e ataque. Na presença de falhas, o tamanho médio dos caminhos permanece sem grandes alterações até a remoção de cerca de 20% dos nós da rede. A partir desse percentual, a métrica sofre oscilações, porém, no geral, varia pouco. Quando 80% ou mais dos nós da rede são removidos, o tamanho médio dos caminhos decresce significativamente atingindo o valor de 1 salto. Isto se deve ao fato da rede estar desconexa, isto é, restam apenas um ou alguns pequenos grupos de nós (3 ou 4) isolados porém conectados entre si. Sob ataque, a rede de cargas se mostra mais vulnerável, pois a remoção de aproximadamente 25% dos nós leva a métrica para 1, atingindo o estado de desconexão visto anteriormente. Este estado se agrava quando 70% ou mais nós são removidos. Neste caso, não temos mais medidas para o tamanho médio dos caminhos, já que a rede ficou completamente desconectada.

Os resultados para a rede de fluxos principais podem ser vistos na Fig. 2(b). No caso de falhas, a rede de Fluxos principais apresenta comportamento semelhante: estável quando até 20% dos nós são removidos; oscilação a partir deste valor; e decréscimo com a remoção de a mais de 80% dos nós, devido à desconexão da rede. Contudo a oscilação é muito mais perceptível neste gráfico. As oscilações se devem à aleatoriedade da retirada dos nós, um nó importante pode ser escolhido para falhar em algumas simulações, mas não em outras. A despeito desta oscilação, pode-se visualizar a tendência geral de aumento do tamanho médio dos caminhos. Sob ataque, a remoção de menos de 10% dos nós na rede de fluxos principais leva a um aumento considerável no valor da métrica estudada (cerca de 60% no tamanho dos caminhos). Com a remoção de mais nós, o comportamento da métrica é semelhante ao da rede de cargas, porém a rede não chega a atingir um nível de desconexão completa.

Percebe-se que as redes estudadas são bastante suscetíveis a ataques. A remoção de uma pequena quantidade de nós por meio de ataques ocasiona um aumento súbito nas distâncias, mas o mesmo não ocorre no caso de falhas. Essa resistência das redes às falhas e a pouca resistência aos ataques são características de sistemas complexos já observadas em outros trabalhos ((Motter & Lai, 2002) e (Wang et al., 2013)). Isso se deve ao fato de que o grau de importância dos nós na rede é diferente. Sinistros envolvendo nós menos importantes, tal qual ocorre quando se simula falhas, permite que o sistema se reorganize sem que seja muito afetado. Mas, se os nós desativados são exatamente os mais importantes tem-se o rompimento de arestas imprescindíveis para a conexão da rede como um todo.

As observações feitas neste estudo apontam a vulnerabilidade do sistema de transporte aéreo nacional na presença de ataques. Esta vulnerabilidade deve ser levada em consideração pelas autoridades responsáveis no momento do

planejamento de ações estratégicas para a melhoria da aviação no Brasil, principalmente nos grandes eventos que serão sediados no Brasil onde a probabilidade de falhas e ataques tendem a aumentar. Contudo, como já dito, o estudo apresentado é apenas preliminar e foi restrito a uma base de dados com certa defasagem, já que é de 2010. Como trabalhos futuros indica-se aquisição de dados mais recentes para análise, bem como o aprofundamento deste estudo por meio da análise de falhas em cascata e a avaliação de como o sistema de transporte aéreo nacional deve ser protegido.

Referências

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE); Ligações aéreas 2010. http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geografia/redes_fluxos/ligacoes_aereas_2010/default.shtm. 12 Out. 2013.

Institute for Statistics and Mathematics (ISM), The R Project for Statistical Computing. <http://www.r-project.org>. 12 Out. 2013.

Lewis, T.G. Network science : theory and applications. John Wiley & Sons, Inc, 2009. p. 1-22.

Motter, A.E. e Lai, Y. Model for cascading failures in complex networks, Physical Review E, n. 66, 2002.

Rocha, L.C.E da . Structural evolution of the Brazilian airport network, Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, issue 4, 2009. <http://iopscience.iop.org/1742-5468/2009/04/P04020/> 14 Out. 2013. doi:10.1088/1742-5468/2009/04/P04020

Wang, W-J.; Jiang, C.; Quian, J. Robustness of internet under targeted attack: A cascading failure perspective. Journal of Network and Computer Applications, 2013.

Yaru, D.; Wenjing, L. Comparative Analyses on Weighted Network Structure os Air Passenger Flow of China and US. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011.

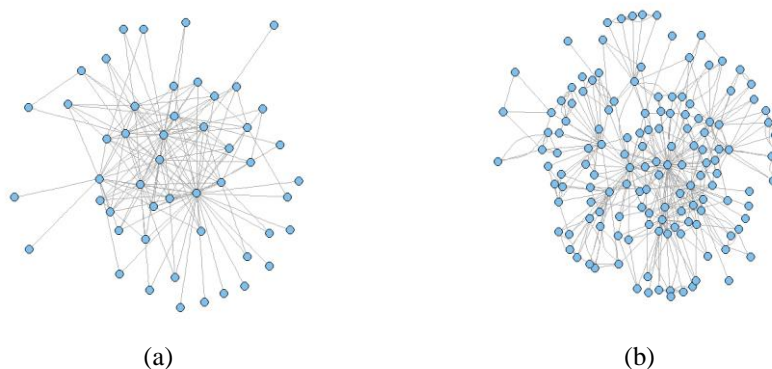


Figura 1. Representação do sistema aéreo nacional: (a) rede de Cargas e (b) rede de Fluxos Principais.

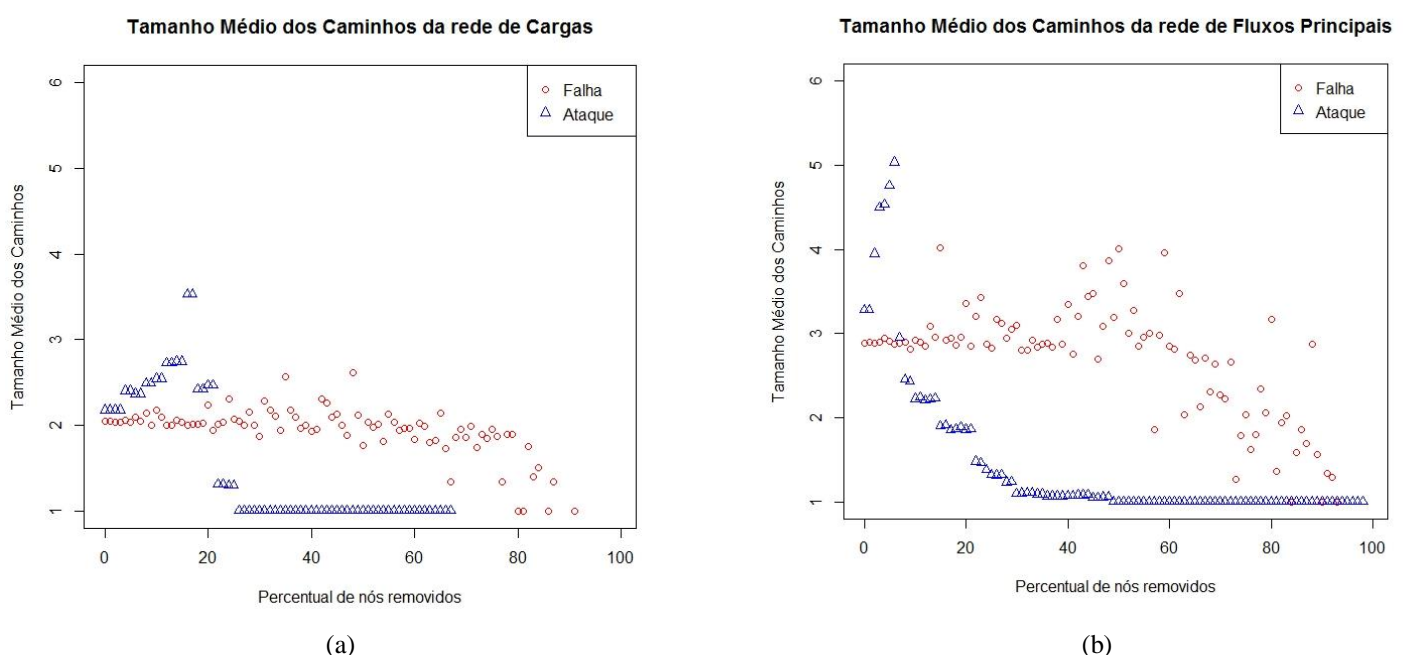


Figura 2. Tamanho Médio dos Caminhos obtido por simulação de falhas e ataques (a) na rede de Cargas e (b) na rede de Fluxos Principais.