

## ANÁLISE DE VULNERABILIDADE DA REDE DE TRANSPORTE AÉREO: APLICAÇÃO NA MALHA AÉREA BRASILEIRA

**Rafael Rodrigues D. Pereira**

**Pastor Willy G. Taco**

Universidade de Brasília

Programa de Pós-graduação em Transportes

**Glauco E. Gonçalves**

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Departamento de Estatística e Informática

### RESUMO

Esta pesquisa buscará o desenvolvimento de um método para avaliar a vulnerabilidade da rede de transporte aéreo em cenários de interrupção operacional de aeroportos. A ciência das redes complexas proporciona um ferramental teórico e técnico que tem se mostrado adequado pela capacidade de integração de diferentes abordagens metodológicas. A aplicação do método na rede de transporte aéreo brasileira deverá permitir a análise das suas características topológicas, a identificação de aeroportos críticos e a avaliação do grau de vulnerabilidade da própria rede. Destaca-se a potencial contribuição para o aprimoramento do processo de gerenciamento de risco das organizações do setor.

### 1. INTRODUÇÃO

O transporte aéreo tem assumido um papel de relevância na sustentação do desenvolvimento econômico e social da sociedade globalizada. Assim como em outros sistemas de transporte (Erath, 2011) ou sistemas essenciais que operam em rede (Murray *et al.*, 2008), há uma preocupação quanto ao entendimento do grau de vulnerabilidade presente na rede formada pelas operações do transporte aéreo (Conti *et al.*, 2013; Lordan *et al.*, 2014b).

Existe uma variedade de eventos que podem interromper a operação normal de um aeroporto e impactar a malha aérea. Em 13/10/2012, por exemplo, o pouso malogrado de uma aeronave cargueira provocou o cancelamento das operações de pouso e decolagens no Aeroporto Internacional de Viracopos (Campinas/SP) por quase dois dias. Murray *et al.* (2008) apontam que a questão da interrupção de uma instalação ou serviço que compõe um sistema de operação em rede é um ponto de partida para a análise da vulnerabilidade do sistema.

A análise da vulnerabilidade em sistemas de transporte pode ser entendida como uma avaliação do comportamento da rede de transporte quando esta sofre interferências de eventos inesperados ou não desejáveis nos elementos que a compõem (Murray e Grubesic, 2007). Considerando o conjunto de preocupações decorrentes dessa perspectiva, a pesquisa investigará de que maneira é possível avaliar a vulnerabilidade da rede de transporte aéreo (RTAer), de forma a entender o seu comportamento frente a cenários de interrupção ou redução da capacidade operacional de um aeroporto.

#### 1.3. Objetivos

Pretende-se desenvolver um método para avaliar a vulnerabilidade da RTAer em cenários de interrupção operacional de aeroportos. De forma específica, objetiva-se identificar os aeroportos críticos da RTAer brasileira, simular a interrupção desses aeroportos para determinação de impactos à funcionalidade da rede e estimação do seu grau de vulnerabilidade.

#### 1.4. Justificativa

A pesquisa traz uma contribuição de ordem acadêmica, tendo em vista que agrega um esforço

adicional para continuidade de pesquisas sobre o tema. Ademais, a importância da avaliação das potenciais vulnerabilidades de infraestruturas em rede reside no levantamento de informações prévias para formulação de um planejamento estratégico adequado, particularmente num contexto do gerenciamento e da mitigação de interrupções de serviços ou operações (Murray *et al.*, 2008).

A aplicação do estudo na malha aérea brasileira deve permitir identificar os aeroportos críticos do sistema, a partir do dimensionamento de impactos ocasionados por interrupções operacionais. A identificação desses aeroportos está associada a um melhor conhecimento da severidade das consequências de eventos de interrupção, podendo contribuir para o aprimoramento do processo de gerenciamento do risco das organizações do setor.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO SINTÉTICO

### 2.1. Vulnerabilidade em Sistemas de Transportes e Infraestruturas Críticas.

O conceito de vulnerabilidade é aplicado em diferentes campos do conhecimento, mas não há um conceito geral amplamente aceito. Este estudo considera que a vulnerabilidade de um sistema pode ser descrita como a susceptibilidade ou sensibilidade a perigos ou ameaças que reduzirão substancialmente a habilidade do sistema em manter a sua funcionalidade pretendida (Holmgren, 2007).

Os riscos associados aos desastres naturais e as ameaças do terrorismo internacional têm conduzido muitos países a formularem programas de proteção de suas infraestruturas críticas (Yusta, 2011), promovendo segurança àquelas instalações e serviços que, se forem interrompidos ou destruídos, provocarão sérios impactos ao Estado e à sociedade.

### 2.2 Redes de Transporte Aéreo e Teoria de Redes Complexas

Os processos regulatórios de liberalização do setor, os elevados custos operacionais e o aumento da competitividade trouxeram modificações relevantes na configuração da malha aérea das empresas (Lordan *et al.*, 2014a). A preocupação em entender a evolução topológica dessa rede é demonstrada em pesquisas recentes (Rocha, 2009; Kai-Quan *et al.*, 2012) que empregaram a modelagem do transporte aéreo por meio de redes complexas. As potencialidades desse tipo de modelagem foram exploradas no trabalho de Zanin e Lillo (2013).

As redes complexas são um tipo de grafo que apresentam propriedades topográficas bastante particulares, não encontradas em grafos mais simples (Metz *et al.*, 2007). A estrutura e funcionalidade de uma RTAer pode ser modelada como uma rede complexa composta por nós e enlaces. Os nós indicam os aeroportos da rede e os enlaces (links) representam a existência de voos diretos entre um par de aeroportos. Destaca-se, também, um esforço atual da comunidade científica em caracterizar e analisar a vulnerabilidade das RTAer com base na teoria das redes complexas (Houssain *et al.*, 2011; Moraes e Gonçalves, 2013; Lordan *et al.*, 2014b).

## 3. METODOLOGIA DA DISSERTAÇÃO

A pesquisa está sendo desenvolvida pelo método hipotético-dedutivo, delineado nas seguintes fases: (i) revisão da literatura; (ii) formulação do método; (iii) aplicação do método e (iv) análise dos resultados. A fase de revisão da literatura concentra-se no aprofundamento dos temas mencionados no referencial teórico.

A vulnerabilidade de sistemas em rede pode ser analisada sob diferentes abordagens metodológicas cuja integração é recomendada, dado a riqueza de informações que poderiam produzir (Murray *et al.*, 2008). O ferramental teórico e técnico da ciência das redes complexas tem se mostrado útil para essa integração. Assim, a fase (ii), que constitui a formulação do método, passa pelo desenvolvimento e análise de três etapas.

A primeira etapa refere-se à caracterização da rede e identificação da relevância dos aeroportos, a partir da modelagem da malha aérea e medição de diversos parâmetros originais da rede ( $P_0$ ) e de seus nós. A segunda etapa abrange o processo de simulação da interrupção operacional de aeroportos, através da retirada individual de nós da rede, com reposição, para medição de parâmetros situacionais ( $P_1, P_2, P_3$ , etc) e suas respectivas variações em relação aos parâmetros originais da rede ( $(P_1 - P_0)/P_0$ ). Um dos resultados desse processo de simulação será a ordenação dos nós em função do nível de variação negativa provocado nos parâmetros originais da rede e uma análise comparativa com os parâmetros de relevância dos nós, inicialmente considerados.

Por fim, a última etapa para construção do método constitui a avaliação do grau de vulnerabilidade da RTAer. A partir de parâmetros base da rede original, pretende-se gerar redes aleatórias (*random networks*) e redes livres de escala (*scale-free network*) correspondentes (Rodrigues, 2007). A rede aleatória se mostra menos vulnerável à interrupção operacional de nós críticos, enquanto que a rede livre de escala se apresenta mais vulnerável (Lewis, 2009). Assim, considerando a característica antagônica dessas duas redes, pode-se estimar o grau de vulnerabilidade da rede original, que deverá se situar numa posição intermediária entre as redes fictícias geradas.

A linguagem e ambiente R está sendo utilizada para o tratamento dos dados, modelagem da rede de transporte e simulação de cenários. Essa ferramenta possibilita a medição dos parâmetros de interesse, suas variações em decorrência da interrupção de um aeroporto e a estimativa do grau de vulnerabilidade de determinada configuração de rede. A partir dos dados estatísticos do transporte aéreo, pretende-se aplicar o método na malha aérea formada por voos regulares brasileiros, tanto em âmbito nacional como exclusivo das empresas.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A sistemática de simulação adotada neste estudo se diferencia da estratégia utilizada na pesquisa de Lordan *et al.*, (2014b), mas apresenta similaridades com o método empregado por Hossain *et al.*, (2011), podendo trazer resultados comparáveis e novas conclusões.

No processo de caracterização e modelagem da RTAer, identificou-se que os links da rede podem ser valorados de acordo com um atributo mais adequado para medir o parâmetro de interesse. O atributo da oferta de transporte aéreo tem se mostrado apropriado para medição de parâmetros que precisam reconhecer a intensidade ou força da ligação entre dois aeroportos. Já o atributo da “distância efetiva” (Dall’Asta *et al.*, 2006), que pode ser medido pela relação da distância euclidiana entre aeroportos (em quilômetros) e o número de assentos ofertados em determinado período, tem se mostrado aplicável para a determinação de parâmetros que precisam reconhecer o menor caminho entre um par de nós.

Alguns resultados preliminares obtidos sinalizam que os aeroportos vistos como mais relevantes para a RTAer variam de acordo com o parâmetro de nó considerado. A ordenação desses aeroportos relevantes apresenta diferenças com a listagem dos aeroportos críticos.

Assim, a rede pode possuir um aeroporto mais importante, sob determinado parâmetro, mas que não é tido como o aeroporto mais crítico para a manutenção da funcionalidade da rede. Isso pode indicar que a simples análise das características dos nós não é suficiente para identificar aqueles aeroportos dos quais a rede é mais dependente.

Espera-se que os resultados finais demonstrem a relevância e criticidade dos aeroportos, segundo diferentes parâmetros, pelos quais seja possível refletir sobre as características topológicas e funcionais que lhes dão determinado atributo. A estimativa do grau de vulnerabilidade da rede deverá trazer um conhecimento mais apropriado das características da malha aérea, podendo contribuir para o aprimoramento dos processos de gerenciamento de risco das organizações do setor.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Conti E.; S.Cao e A. J. Thomas (2013) Disruptions in the U.S. Airport Network. *Cornell University Library. arXiv.org, Physics and Society.*
- Dall'Asta, L.; A. Barrat; M. Barthélemy, e A. Vespignani (2006) Vulnerability of weighted networks. *Journal of Statistics Mechanics: Theory and Experiment.*
- Erath, A. L. (2011) *Vulnerability Assessment of Road Transport Infrastructure.* Dissertação de Mestrado, ETH ZURICH.
- Holmgren, A. J. (2007) *A framework for vulnerability assessment of electric power system.* Advances in Spatial Science, Critical Infrastructure, Reliability and Vulnerability.
- Hossain, M.; S. Alan.; T. Rees. e H. Abbass (2011) Australian Airport Network Robustness Analysis: A Complex Network Approach. *Australian Transport Research Forum 2013 Proceedings.*
- Lewis, T. G. (2009) *Network Science: Theory and Applications.* Ed. Wiley. Hoboken, New Jersey.
- Lordan, O.; J. M. Sallan; e P. Simo (2014a) Study of the topology and robustness of airline route networks from the complex network approach: a survey and research agenda. *Journal of Transport Geography.* v. 37, p. 112-120.
- Lordan, O.; J. M. Sallan; P. Simo e D. Gonzalez-Prieto (2014b) Robustness of the air transport network. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,* v.68, p. 155-163.
- Metz, J.; R. Calvo; E. R. M. Seno; R. A. F. Romero e Z. Liang (2007) *Redes Complexas: conceitos e aplicações.* Instituto de Ciências Matemáticas de Computação.
- Moraes, T. M. e G. E. Gonçalves (2013) *Estudo da Vulnerabilidade do Sistema de Transporte Aéreo Nacional com Base no Arcabouço da Ciência da Rede.* XIII Jornada de Ensino Pesquisa e Extensão – JEPEX, UFRPE.
- Murray, A. T. e T. H. Grubescic (2007) *Overview of Reliability and Vulnerability in Critical Infrastructure.* Advances in Spatial Science, Critical Infrastructure, Reliability and Vulnerability.
- Murray, A. T.; T. C. Matisziw. e T. H. Grubescic (2008) A Methodological Overview of Network Vulnerability Analysis. *Growth and Change.*
- Rocha, L. E. C. da. (2009) Structural evolution of the Brazilian airport network, *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment.*
- Rodrigues, F. A. (2007) *Caracterização, classificação e análise de redes complexas.* Tese de Doutorado. Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Kai-Quan, C.; Z. Jun; D.Wen-Bo e C. Xian-Bin (2012) Analysis of the Chinese air route network as a complex network. *Chin. Phys. B.,* v. 21, no 2, IOP Science.
- Yusta, J. M.; G. J. Correa e R. Local-Arántegui (2011) Methodologies and applications for critical infrastructure protection: State-of-the-art. *Energy Policy 39.*
- Zanin, M. e F. Lillo (2013) Modelling the Air Transport with Complex Networks: a short review. *The European Physical Journal.*

---

Rafael Rodrigues Dias Pereira (rafaelrodriguesx@gmail.com)

Pastor Willy Gonzales Taco (pwgtaco@gmail.com)

Glauco Estácio Gonçalves (glauco.goncalves@deinfo.ufrpe.br)

Programa de Pós-Graduação em Transportes da Universidade de Brasília

Anexo SG-12, 1º andar; Universidade de Brasília; Asa Norte; CEP: 70910-900; Brasília – DF