

## ESTRUTURA E DINÂMICA DAS REDES AÉREAS

**Aluno: Eduardo Henrique Filizzola Colombo e Antonio Rossano**  
**Orientador: Celia Anteneodo**

### Introdução

Muitos sistemas podem ser modelados como redes onde os elementos do sistema e as suas interações estão representados por vértices e arestas, respectivamente. A maioria das redes biológicas e sociais apresenta uma topologia não trivial em que o padrão de conexões entre seus elementos não é puramente regular, nem aleatório. Isso significa que a grande maioria das situações reais pertence ao intervalo entre os extremos das redes regulares e redes aleatórias, tendo padrões estatísticos únicos, como distribuição de graus com caudas longas, e alto coeficiente de aglomeração [1,2]. Por inúmeros fatores, mas, principalmente por estar imersa num meio complexo, sofrendo influência econômica e social, as redes aéreas são redes complexas.

### Objetivos

Algumas das características estatísticas das redes aéreas não são ainda bem conhecidas, entretanto essas características são importantes como primeiro passo para poder diminuir a sua vulnerabilidade e otimizar a eficiência dos fluxos, o que motiva o presente trabalho. Como em muitos casos reais, não conhecemos e inclusive pode ser impossível determinar por primeiros princípios as leis de evolução e organização dessas redes. Portanto, o estudo empírico é um dos meios principais para o entendimento do comportamento de sistemas complexos e, mais especificamente, das redes complexas. Assim, nosso objetivo é caracterizar as redes aéreas a partir de dados empíricos.

### Metodologia

A estrutura das conexões na forma matricial permite expressar não somente a informação da existência, ou ausência, de conexão entre dois vértices (matriz de adjacência), mas também, características como direcionamento e intensidade (matriz de pesos). De modo a caracterizar a rede são usados parâmetros pré-definidos, como a conectividade, que mede o número de conexões que partem de um dado vértice, e o menor caminho médio entre dois vértices. Para definir e analisar essas e outras características são importantes noções de teoria de grafos, álgebra linear e física estatística.

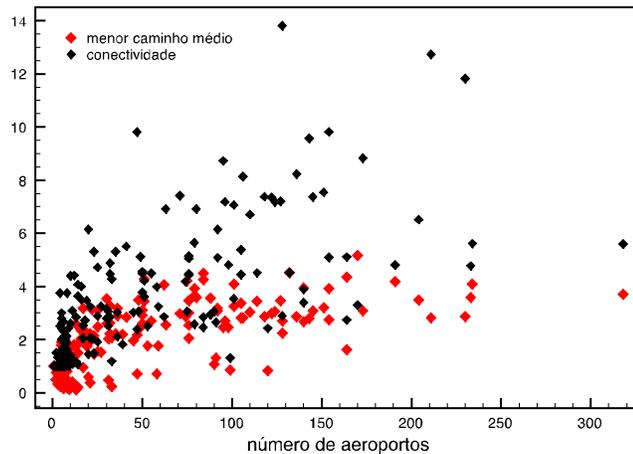
A partir do banco de dados disponível no site (<http://www.rita.dot.gov/>) da *Research and Innovative Technology Administration* do departamento de transporte dos Estados Unidos, foram obtidas e analisadas informações sobre os voos domésticos de todas as companhias aéreas ali cadastradas (um total de 194). Como mencionado, algumas propriedades globais podem ser definidas e sendo assim usadas para uma primeira caracterização. Entretanto, a distribuição de probabilidade dos parâmetros que definem a rede fornece informações mais detalhadas.

Desta forma, dentro do período de cerca de dez anos foi observada a evolução de um conjunto de parâmetros globais para toda a rede de fluxo de voos, e para os dados de 2011 foi feita uma análise mais detalhada em relação à estrutura de cada camada de voos, respectiva a cada companhia, observando a distribuição de probabilidade de graus e dos menores caminhos entres vértices, além de outras medidas adicionais necessárias para complementação

da caracterização da rede. Em termos gerais pode-se ver que todas as companhias aéreas possuem qualitativamente mesma forma de distribuição de menor caminho, que é não trivial, o que acontece também com a distribuição de graus.

Pelo estudo dos dados ao longo de dez anos foi mostrada a estabilidade tanto no tamanho das companhias como nos diversos parâmetros de caracterização (medidas) da rede. Dentro do período 2000-2010 não pode ser visto o crescimento de uma companhia, todas as características já estavam estabilizadas, tendo somente pequenas flutuações e uma oscilação sazonal na ordem de meses, natural consequência das férias anuais e semestrais. Assim, investigamos de que forma medidas tais como a conectividade e o menor caminho médio dependem do tamanho da rede. Para isso consideramos a rede de companhias individuais (voos domésticos norte-americanos), dentro da malha já predefinida pelos aeroportos existentes. A dependência das medidas com o tamanho foi utilizada para extrair informação sobre o crescimento (evolução temporal) de uma rede aérea.

O gráfico abaixo mostra a dependência do menor caminho e da conectividade com o tamanho das companhias. Como era de se esperar, redes maiores (neste caso relacionamos diretamente tamanho ao número de aeroportos servidos por cada companhia) apresentam uma estrutura mínima que fornece a possibilidade da criação quase que espontânea de grandes aglomerados, onde em geral voos até o destino final efetuam uma única escala (duas arestas de distância). Diferentemente das redes de menor porte, neste caso, a distribuição do menor caminho tem máximo bem definido, evidenciando os aglomerados.



## Conclusões

O estudo empírico das redes aéreas norte-americanas trouxe informações de como cada companhia organiza sua rede de vôos dentro da estrutura espacial pré-definida de aeroportos. Pode ser visto que empresas de diferentes tamanhos possuem estruturas distintas. O aumento do tamanho de uma companhia tem como consequência o aumento do menor caminho médio e da conectividade, esta com taxa ainda maior. Em termos gerais, pode ser dito que companhias maiores criam centros de conexão com certo detrimento da coesão da rede.

## Referências

- 1 – WATTS, D. J.; STROGATZ S. H.. Collective dynamics of small world networks. **Nature**. 393. 440–442. 1998.
- 2 – BARABASI, A.-L.; ALBERT R. Emergence of scaling in random networks. **Science**. v.286. 509-512. oct. 1999.
- 3 – NEWMAN, M. E. J; STROGATZ, S. H.; WATTS, D. J. Random graph with arbitrary degree distribution and their applications. **Physical Review** 64. 026118. 2001.