XXI SITRAER
2024 | Air Transportation Symposium

ANALYSIS OF THE RESILIENCE OF THE BRAZILIAN AIR TRANSPORT NETWORK IN THE CASE OF INTERRUPTION OF THE OPERATIONS OF BRASÍLIA INTERNATIONAL AIRPORT

Victor Hugo Machado de Almeida[1], Fabiana Serra de Arruda[2]
Graduate Program in Transportation of the University of Brasília (PPGT-UnB)[1,2]

*** Corresponding author e-mail address**: victor.hugomachado08@gmail.com[1]

PAPER ID: SIT903789

ABSTRACT

This paper presents an assessment of the resilience of the Brazilian air transport network based on the assumption of a complete interruption of the operations of the Brasília International Airport, a geographically central airport and one with high criticality in the system. The analysis is done from a method originally created to assess the vulnerability of air transport networks, and uses concepts of transportation resilience as its theoretical base and the software R as its main tool. The method comprehends a topological analysis of the network, the measurement of the potential impacts caused to the network by the interruption and the analysis and understandings of the result. With the application of the method, it was verified that the topological organization of the Brazilian air network is mostly hub-spoke, which causes low resilience levels. Additionally, it is stated an average reduction of 8,29% in the parameters of the disturbed network, that expose the criticality of the airport and justify the measures taken to keep its continuous operations. There is a necessity of keeping critical systems operating continuously, to minimize its interruptions and keep its good functioning. Thus, the study of resilience can be used as a tool to identify the most critical points of a system, making it possible to foresee and prevent the impacts that an interruption of one of those points can bring to the system as a whole.

Keywords: Resilience, Air Transport Network, Critical Airport, Complex Networks.

1. INTRODUÇÃO

Segundo o Painel de Indicadores do Transporte Aéreo da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), o transporte aéreo é a principal opção dos passageiros ao realizar uma viagem interestadual no Brasil (ANAC, 2024). O país apresentou, entre 2003 e 2008, um aumento na quantidade de voos domésticos e internacionais superior até mesmo ao crescimento do PIB, tendo um crescimento de mais de 37% no volume de passageiros transportados no período (Rodrigues, 2021). O aumento da demanda gerou alterações na disposição da rede de transporte aéreo (ATN) e em sua densidade, tornando-a mais concentrada nas regiões de maior população e desenvolvimento econômico do país.

Esse aumento da densidade da rede e da quantidade de voos também resultou em aeroportos operando mais próximos do limite de sua capacidade, tornando-os menos flexíveis para um repentino aumento de demanda (Tosic e Mirkovic, 2020). Nesse contexto, torna-se de interesse geral dos atores envolvidos com o transporte aéreo a identificação dos pontos críticos da rede. Ou seja, os aeroportos dos quais o fechamento causaria longos atrasos e/ou cancelamentos de voos em uma situação de ruptura (Janic, 2015).

Com as alterações na rede, o Aeroporto de Brasília ganhou importância por se tornar um ponto de convergência do fluxo de passageiros no centro do país, sendo conexão entre um grande conjunto de pares de cidades e se consolidando como *hub* de elevado movimento no cenário nacional (Silva *et al*. 2015). Em adição, Rodrigues (2020) explica que Brasília se tornou um destino atrativo não só para os passageiros, mas também cobiçado pelas companhias aéreas para utilizar o aeroporto como *hub*, em especial pela posição geográfica vantajosa.

Assim, percebe-se como o estudo da resiliência da rede do transporte aéreo pode contribuir para que se encontre os pontos mais críticos do sistema e planejar ações de contingência para eventos de ruptura, de forma a operar em níveis mais aceitáveis de performance do sistema (Leobons *et al*. 2019). Em especial considerando a importância do Aeroporto de Brasília, que é avaliado como um dos mais críticos do Brasil por seu grande número de conexões (Pereira, 2016), e que movimenta mais de 10 milhões de passageiros ao ano e realiza mais de 100 mil pousos e decolagens anuais (Inframérica, 2024). Ademais, o estudo da resiliência é bem explorado internacionalmente, mas, como constatado por Falcão *et al.* (2021), o assunto praticamente não é abordado nos estudos brasileiros sobre linhas aéreas. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a resiliência da rede de transporte aéreo do Brasil em uma condição de interrupção total das operações do Aeroporto de Brasília.

2. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

Os sistemas de transporte são descritos como uma organização de redes que possuem nós (ou vértices), que se conectam e interagem entre si através de *links* (ou arestas), gerando viagens (Mattsson e Jenelius, 2015). Pereira (2016) complementa associando as redes de transportes a sistemas de redes complexas, nas quais os nós e arestas são representações da estrutura de conexão da rede.

Em uma ATN, os aeroportos se comportam como os nós, enquanto as rotas aéreas atuam como as arestas de conexão entre os nós, dando completude ao sistema (Rocha, 2017). Nesse contexto, o Controle de Tráfego Aéreo e o Gerenciamento do Tráfego Aéreo organizam e dão fluidez às rotas, permitindo que as conexões sejam feitas de maneira eficiente e segura (Janic, 2015). Quanto à organização das ATNs, estas apresentam duas topologias básicas: uma concentrando as operações em aeroportos centrais (*hubs*) e redistribuindo os passageiros a partir desse ponto, e outra com as rotas conectando diretamente a origem ao seu destino (Pereira, 2016). Zhang e Lin (2017) acrescentam que o modelo de rede em que há a centralização das movimentações em *hubs* pode ser chamada de *hub-spoke*, e tem como resultado a diminuição do número de voos utilizados para ligação entre nós, aumentando a quantidade de destinos possíveis para os passageiros, mas se tornando mais

suscetível a atrasos. Já o modelo com ligações diretas, segundo Zgodavová *et al.* (2018), se chama ponto a ponto e nele não há a grande dependência de aeroportos *hub* para o funcionamento do sistema, o que torna a rede menos suscetível a sofrer um "efeito dominó" causado por um eventual atraso ou cancelamento, sendo mais resiliente.

Sobre a resiliência, esta pode ser definida de maneiras distintas e pode ter contextos diferentes dependendo da área de estudo analisada, mas os conceitos apresentam pontos em comum, principalmente o de que a resiliência é a capacidade de se recuperar perante a uma adversidade (Medeiros, 2018). Leobons *et al*. (2020) adicionam que, em sistemas de transportes, a resiliência é a capacidade de manter níveis de mobilidade aceitáveis e reestabelecer a normalidade após um evento de colapso ou ruptura.

Para o transporte aéreo, uma análise da resiliência pode expor quais aeroportos são os mais críticos do sistema, isto é, os aeroportos cujo fechamento poderiam causar maiores danos à rede e reduzir seus níveis de serviço (Janic, 2015). Por isso, Leobons *et al.* (2020) esclarecem a importância de um sistema de transportes resiliente para reduzir os impactos causados por alguma ameaça que possa criar uma ruptura.

No que se refere à resiliência, o Aeroporto de Brasília possui elementos que lhe conferem um bom aumento dessa característica, como as duas pistas de pouso e decolagem que funcionam simultaneamente, seu ILS CAT I e sua equipe de *security* que segue os procedimentos designados pelas normas vigentes da ANAC e que baseiam no Anexo 17 da OACI (Inframérica, 2024). Apesar da infraestrutura e facilidades disponíveis, como explicado por Lordan *et al*. (2014), a dimensão dos possíveis efeitos na rede causados pela interrupção do aeroporto, em especial considerando seu movimento e importância na rede, justificam que se estude e que se entenda o tema da resiliência.

3. MÉTODO

Considerando os conceitos de resiliência apresentados, foi escolhido um método com base na análise de redes complexas para a avaliação da resiliência da ATN brasileira, assim como para o estudo de possíveis impactos no caso da interrupção das operações do Aeroporto de Brasília. A resiliência foi medida através da verificação do decréscimo de parâmetros de mobilidade e servidão da rede, representando quantitativamente os danos causados à rede perturbada e os prejuízos à sua mobilidade, como descrito por Janic (2015) e Leobons *et al*. (2020).

Foi usado o método desenvolvido por Pereira (2016) devido ao fácil acesso aos dados utilizados para a modelagem, pois as variáveis utilizadas estão integralmente dispostas em bancos de dados públicos da ANAC e atualizados regularmente. O método foi empregado originalmente para análise da vulnerabilidade da ATN brasileira, através da verificação da organização da rede e da atribuição de níveis e índices de criticidade aos aeroportos. Para o presente trabalho, não foram atribuídos tais níveis e índices, mas foi feita uma análise dos impactos específicos do Aeroporto de Brasília.

O método é composto por 6 etapas. Essas são: I - Caracterização do sistema de transporte aéreo (ATS); II - Processo de modelagem ATN; III - Análise topológica da ATN; IV - Simulação de ataque sequencial à ATN; V - Simulação de interrupção individual de aeroportos; VI - Análise dos resultados e conclusões finais. Para o presente trabalho, optou-se por não executar a etapa IV - Simulação de ataque sequencial à ATN, pois essa está relacionada com a verificação específica da vulnerabilidade da rede através da interrupção de vários aeroportos em sequência a partir de determinada característica pré-definida.

Na Etapa I, é preciso caracterizar a rede e o sistema nos quais se dará a pesquisa, através da descrição e obtenção de dados referentes a fatores, institucionais, operacionais e organizacionais. Nessa primeira parte, pode-se observar alguns dados qualitativos do sistema, como os indicados por Lordan *et al.* (2014), Medeiros (2018) e Santos (2020). Esta etapa também compreende a descrição da base de dados a ser utilizada, como a especificação de aeroportos e voos envolvidos na rede. Para a Etapa II, abstrai-se a ATN, formando um conjunto de nós (vértices) e *links* (arestas), sendo representadas por um grafo. Como explicado anteriormente, os aeroportos são os vértices da rede, enquanto as arestas são os voos conectando dois aeroportos. A visualização da rede em forma de

grafo permite simplificar a análise, pois as diversas variáveis utilizadas podem ser aplicadas nos vértices ou arestas para uma melhor representação da malha.

A fim de dar maior fidelidade ao modelo, atribui-se pesos a cada vértice e aresta da rede, utilizando parâmetros como a quantidade de pousos e decolagens ocorridas em determinado período de tempo, a distância geográfica entre os nós e a quantidade de Passageiro Quilômetro Pago Transportado (RPK). Salienta-se que podem ser atribuídos outros parâmetros para valorar os pesos, como assentos disponíveis e/ou o volume de carga transportada no mesmo período de tempo, caso esses dados estejam disponíveis (Janic, 2015; Pereira, 2016). A escolha dos parâmetros usados para a valoração é feita de acordo com a característica que se deseja analisar.

A análise topológica, Etapa III do método, visa a trazer uma caracterização estrutural e funcional da rede, avaliando e medindo propriedades da rede original sem perturbações, como o grau médio, o diâmetro, a distância efetiva entre os nós, o menor caminho médio, a maior componente conectada e o coeficiente de aglomeração. As principais medidas adotadas para a análise dos vértices se referem à centralidade, e se aplicam à análise topológica estrutural e funcional da rede. O grau (*degree*) se refere à quantidade de arestas conectados ao nó analisado. A proximidade (*closeness*) é determinada pelo inverso do tamanho dos menores caminhos entre um vértice e os outros vértices da rede. A intermediação (*betweenness*) é avaliada pela razão entre o número de menores caminhos que passam por um determinado vértice e o total de menores caminhos da rede.

Para a Etapa V, pesquisas feitas por Rodrigues (2020), Pereira (2016) e Silva *et al.* (2015) apontam o Aeroporto de Brasília como um dos mais importantes do país por aspectos econômicos, turísticos, geográficos, entre outros. Nesse sentido, se explica a escolha desse aeródromo como objeto de estudo, que ainda possui um elevado nível de intermediação entre nós da rede (*betweenness*). Essa é a característica mais crítica que os nós podem possuir no sistema, pois sua retirada da rede causa grandes prejuízos de conexão (Lordan *et al*. 2014).

Na Etapa V é assumido o total fechamento das operações do aeroporto. O tipo de ocorrência adversa que levou à interrupção do aeroporto, seja por falhas aleatórias ou por ataques, não foi considerada relevante para a análise. A consideração da interrupção foi suficiente para avaliar os impactos potenciais. Nessa situação, o vértice é completamente removido da rede, assim como todas as arestas que o conectavam.

Com essa ação, mede-se os parâmetros pré-estabelecidos na análise topológica na situação da rede perturbada (P_1), e compara-se os valores com os parâmetros originais da rede (P_0). O tamanho da variação entre os parâmetros indica a intensidade do impacto causado pela remoção do nó. Quanto maior o decréscimo dos valores dos parâmetros causados pela retirada de um único nó, menor é a resiliência da rede.

Por fim, a Etapa VI objetiva realizar as análises finais dos resultados obtidos com os *outputs* das etapas anteriores, e é realizada ao fim de cada etapa, de modo a ser estabelecido um entendimento mais claro dos parâmetros calculados. Com os resultados, é viável também usar os dados para melhorias de tomadas de decisões de órgãos reguladores e operacionais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No método foram considerados apenas os aeroportos nos quais eram realizados voos comerciais com passageiros para a simulação da malha, assumindo que esses configuram a ATN brasileira. Conforme explicado anteriormente, a base de dados definida para a análise foi obtida através dos dados estatísticos atualizados periodicamente e disponíveis publicamente no portal eletrônico da ANAC. A planilha escolhida possui 38 tipos de dados diferentes relativos às mais diversas informações das etapas de voo, sendo fornecidos à ANAC pelas empresas aéreas brasileiras e estrangeiras que operam voos regulares e não regulares com origem e/ou destino no Brasil.

Dentre essas variáveis, 11 foram adotadas e definidas como mais relevantes para serem utilizadas na realização da simulação, conforme o método de Pereira (2016). São elas: Empresa (Sigla), Aeroporto de origem (Sigla), Aeroporto de destino (Sigla), Grupo de Voo, Decolagens. Ano, Mês, RPK, Assentos, Natureza do Voo e Distância Voada.

A planilha possui registros a partir do ano 2000 e conta com atualizações até meados de 2024. Foi escolhido o ano de 2023 para a análise, uma vez que os dados de 2024 ainda se encontram recentes, podendo ainda sofrer possíveis revisões e alterações pela Agência e empresas responsáveis até as publicações finais dos anuários estatísticos.

Após breve checagem dos dados, verificou-se que o mês de janeiro foi o mês com maior quantidade de operações registradas. Esse foi, então, o mês escolhido para a aplicação do método, pois foi o período no qual o sistema possuiu maior demanda e operou mais próximo de sua capacidade. Por essas razões, a avaliação da resiliência se torna mais crítica e importante para garantir que a rede mantenha seus níveis de serviço adequados mesmo com o maior número de operações.

Por fim, feitas as análises prévias, foram delimitadas 3 redes para a avaliação, para que se pudesse analisar a rede a partir de configurações distintas. A Rede Doméstica (R-Dom), usando os dados referentes a etapas de voo com origem e destino no Brasil, a Rede Internacional (R-Int), com os registros de voos que tiveram origem ou destino fora do Brasil, e a Rede Total (R-Tot), abrangendo todos os voos comerciais de passageiros no país registrados no espaço de tempo definido.

Na Etapa II, de modelagem da rede, foi utilizada a versão 4.4.1 do *software* R para filtragem, tratamento e verificação dos dados. O R é um ambiente e linguagem de programação com foco em computação estatística e análise gráfica (R CORE TEAM, 2024). Para a aplicação do método, a base de dados foi importada para o ambiente R, onde foi trabalhada usando funções base do aplicativo e da biblioteca *igraph*, uma biblioteca focada em análise gráfica de redes.

Uma vez importados os dados, prosseguiu-se para a filtragem, de modo a gerar as redes delimitadas na Etapa I. Primeiramente, foi aplicado o filtro temporal, para selecionar o período especificado de janeiro de 2023. O primeiro processamento resultou em uma base com 3730 linhas de etapas de voos, das 1011845 linhas originais. Cada linha apresenta o somatório dos valores de cada variável registrados por cada companhia em uma etapa ao longo de um mês.

Em seguida, foi filtrada a variável “RPK”, que representa os passageiros pagos quilômetros transportados, excluindo os dados nos quais essa variável era zero ou nula. Desta forma, apenas os voos que processaram passageiros foram mantidos. Na sequência, foram eliminados os dados cujas variáveis “Decolagens” e “Distância Voada” fossem nulas ou iguais a zero, para assegurar que fossem coletados apenas os valores referentes a voos válidos. Após a seleção, restaram 2574 linhas de dados. Para a criação da Rede Total não houve novo filtro, para as demais redes foi utilizado um filtro na variável “Natureza”, de forma a designar apenas os voos de natureza doméstica ou internacional a depender da rede selecionada.

Com o refinamento dos dados, o próximo passo foi a geração dos grafos representativos das redes definidas. Com o objetivo de trazer maior fidelidade na simulação, foi decidido que os grafos gerados seriam direcionados, ou seja, existe a diferenciação caso um voo ocorra apenas em um sentido.

Por fim, com o auxílio do *software*, foram gerados os grafos que representam as redes R-Tot, R-Dom e R-Int, como exibido na Figura 1, nesta sequência. Para efeitos de visualização, os vértices foram dimensionados de acordo com seu grau (*degree*), isto é, quanto maior o número de arestas conectado ao nó, maior seu tamanho. As arestas foram valoradas com pesos baseados no parâmetro de distância efetiva, que é a distância geográfica dividida pela oferta de voos (assentos disponíveis, decolagens e RPK). Com essa atribuição de peso às arestas, rotas que possuem grande oferta de assentos ficam mais aproximadas, mesmo que exista maior distância geográfica entre elas.

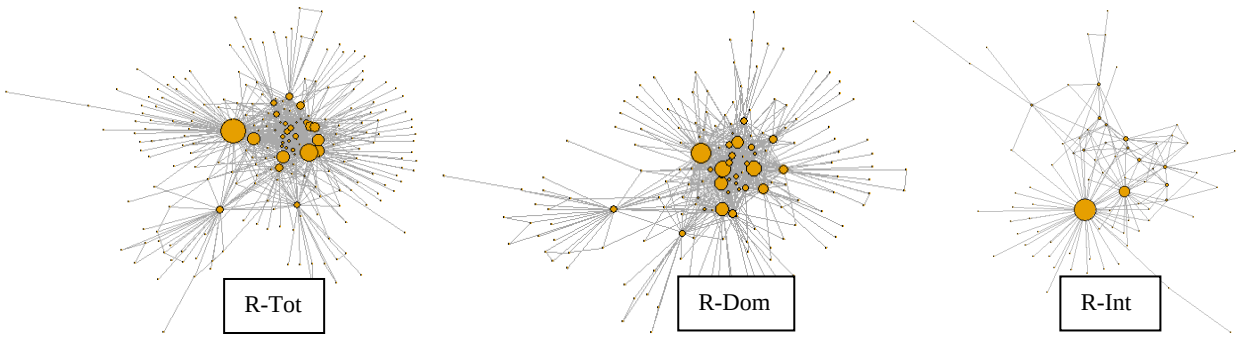


Figura 1 Grafos representativos das redes R-Tot, R-Dom e R-Int

Destaca-se que a representação formada pelos grafos não expressa a posição geográfica dos aeroportos, mas demostra a centralização de determinados nós para a rede e o afastamento de outros. É possível perceber que os nós menos conectados são exibidos de forma mais afastada do centro do grafo, enquanto aqueles com maior grau se encontram mais ao centro.

Nota-se, nas redes, considerável quantidade de aeroportos que possuem uma única conexão, possuindo apenas um destino disponível. Essa característica expõe a fragilidade da topologia da ATN brasileira. Observa-se na rede doméstica que os aeródromos com poucas conexões têm grande dependência dos *hubs*, que são a única opção de conexão com o resto da rede em inúmeros casos. A filtragem dos dados restrita a apenas um período específico pode ter influência nessa ocorrência, uma vez que é possível que no mês especificado para a análise não ocorreram outros voos com passageiros para aquele aeródromo.

Na Etapa III, a partir dos grafos gerados, foram analisados parâmetros e características topológicas da rede original, para que se entendesse melhor seu funcionamento, suas peculiaridades e sua organização. Para isso, as variáveis que descrevessem as características requeridas foram designadas e divididas entre variáveis estruturais e funcionais, e em seguida calculadas. Novamente, o *software* R foi usado para as verificações dos parâmetros.

Primeiramente, buscou-se entender a estrutura da rede, considerando características de conectividade da rede, centralidade dos nós e distribuição das conexões. Os parâmetros estruturais da rede escolhidos para a verificação foram o número de arestas existentes, a densidade da rede, a conectividade global, o grau médio, a distância média entre nós, o diâmetro da rede e o coeficiente de aglomeração,

O número de arestas é o somatório de todas as arestas presentes na rede. A densidade corresponde à razão entre número de arestas existentes e a quantidade total de arestas possíveis, conectando todos os nós, e varia entre 0 e 1. A conectividade global representa a soma do grau dos aeroportos presentes na rede. O grau médio refere-se ao valor médio de número de conexões dos nós. O diâmetro da rede é quantidade de escalas necessárias para conectar os aeroportos mais distantes (topologicamente) da rede. A distância média é quantidade média de escalas necessárias para se conectar dois destinos. O coeficiente de aglomeração descreve a incidência de ocorrências de 3 aeroportos estarem conectados entre si, criando um grupo (*cluster*), e também varia entre 0 e 1. Os valores obtidos para cada parâmetro estrutural das redes designadas estão indicados na Tabela 1.

Tabela 1 Parâmetros estruturais das redes

Rede	Número de Arestas	Densidade	Conectividade Global	Grau Médio	Distância Média	Diâmetro	Coeficiente de Aglomeração
R-Tot	1379	0,0279	2758	12,36	2,64	6	0,257
R-Dom	1107	0,0419	2214	13,58	2,67	6	0,345
R-Int	278	0,0463	556	7,13	2,57	6	0,593

O número de arestas das redes evidencia que a rede R-Int possui aproximadamente um quarto das arestas da rede R-Dom e um quinto quando comparada à rede R-Tot. Todavia, a Rede Internacional possui uma maior densidade que as demais redes, o que significa que, apesar de possuir menos voos, estes se organizam de forma mais distribuída na rede. Outra explicação é a de que um número reduzido de aeroportos brasileiros opera voos internacionais, então estes possuem maior conectividade na rede e elevam a densidade por se conectarem a mais destinos.

O grau médio revela que os nós nas redes R-tot e R-Dom possuem, em média, pouco mais de 12 conexões. Esse valor, entretanto, não se apresenta com frequência, uma vez que o grau é um parâmetro desigualmente distribuído. Na rede R-Int, o valor dessa variável (7,13) é ainda menor, pois o código utilizado também considera os aeroportos internacionais na rede para o cálculo, e estes possuem, no estudo, conexões com poucos aeródromos brasileiros.

A distância média mostra que para se conectar 2 destinos leva-se aproximadamente 2,63 voos em todas as redes. O diâmetro das redes representa o maior número de conexões possível para se conectar dois aeroportos, ou seja, o maior de todos menores caminhos entre dois nós existentes.

Os baixos valores encontrados para os parâmetros de densidade (< 0,05) e coeficiente de aglomeração (< 0,5) ratificam os estudos de Rodrigues (2020) e Pereira (2016) que indicam a disposição da ATN brasileira no modelo *hub-and-spoke*, pois apontam um grafo esparso, no qual não há um grande número de conexões mútuas entre nós, mas sim poucos nós com muitas conexões.

Executada a verificação das características da rede, foi efetuado o cálculo de parâmetros específicos do nó representativo do Aeroporto de Brasília, para avaliar a importância e as principais características do nó para a rede. Foram determinados os parâmetros de grau (*degree*), proximidade (*closeness*), e intermediação (*betweenness)* do nó, previamente explicados. Os valores obtidos estão expostos na Tabela 2.

Tabela 2 Parâmetros do vértice do Aeroporto de Brasília

Rede	Grau	Proximidade	Intermediação
R-Tot	50	0,5641	0,06324
R-Dom	44	0,5797	0,07723
R-Int	7	0,3909	0,03783

Como o grafo foi produzido de forma direcionada, as arestas são geradas saindo e chegando ao vértice. Portanto, para que o grau não fosse calculado duplamente, optou-se por contar apenas as arestas que saíam do nó. A disparidade no valor da intermediação e do grau do Aeroporto de Brasília entre as redes doméstica e internacional confirma o explicado por Rodrigues (2020) quanto ao destaque no cenário nacional, já que mostra a elevada relevância do aeroporto para a rede doméstica. A intermediação significa que o nó faz parte do menor caminho entre outros dois nós em mais de 7,5% dos casos na rede doméstica.

Posteriormente, foram analisados aspectos funcionais da rede, que influenciam em seus níveis de serviço, como sua eficiência de funcionamento e assentos disponíveis. Esses parâmetros podem servir de referência para uma avaliação da qualidade dos serviços e da quantidade de atendimento de determinadas rotas. Para a avaliação funcional, decidiu-se que seriam verificados os parâmetros de acessibilidade global, quantidade de voos realizada, assentos disponíveis e demanda atendida.

A acessibilidade global indica o somatório das distâncias geográficas médias das rotas, através da divisão da distância voada em uma etapa pelo número de decolagens da respectiva etapa. A quantidade de voos, assentos disponíveis e demanda atendida são a somatória, respectivamente, das variáveis “Decolagens”, “Assentos” e “RPK”, da base de dados utilizada. Os valores encontrados dos parâmetros descritos estão na Tabela 3.

Tabela 3 Parâmetros funcionais das redes

Rede	Acessibilidade Global	Quantidade de Voos	Assentos Disponíveis	Demanda Atendida
R-Tot	5.001.202	159.302	25.800.750	41.214.186.646
R-Dom	2.285.814	139.156	21.146.576	18.673.468.686
R-Int	2.724.434	20.146	4.654.174	22.540.717.960

Uma vez que foram avaliados os parâmetros originais da rede, prosseguiu-se para a Etapa V, na qual foram escolhidos os aspectos considerados mais relevantes para a verificação da resiliência. Assim como na análise topológica, dividiu-se os impactos a serem analisados em duas categorias: estrutural e funcional. Os impactos de cunho estrutural referem-se àqueles que podem reduzir a força de ligações, conectividade e a densidade. Os impactos funcionais estão relacionados a redução de níveis e fatores de serviço, como quantidade de assentos disponíveis e tráfego de aeronaves.

Para a avaliação dos impactos estruturais, os parâmetros adotados foram a quantidade de arestas existentes, a densidade e a conectividade global da rede. Para os impactos funcionais foram utilizados os mesmos parâmetros da análise topológica, com a adição do parâmetro de eficiência da rede.

A eficiência da rede foi calculada a partir de uma função pré-existente sobre análise de redes dentro do pacote *igraph* do *software* R. A medida do programa baseia-se nos estudos de Latora e Marchiori (2001) sobre o tópico e considera que a eficiência de uma rede representa a capacidade de

transporte ou de comunicação desta. A eficiência pode ser calculada como o inverso da média das menores distâncias topológicas entre todos os pares de nós possíveis da rede. Quanto maior a eficiência da rede, menores são os caminhos necessários para ligar dois nós.

Uma vez definidas as variáveis iniciais (P_0) do estudo, prosseguiu-se com a remoção do nó representativo do Aeroporto de Brasília da rede, assim como todas as arestas conectadas a ele. O Aeroporto de Brasília, possui um total de 101 arestas conectadas a seu nó representativo, indicando que existem 101 rotas partindo ou chegando ao aeródromo.

Com a remoção, o grafo foi novamente avaliado e as variáveis foram mais uma vez aferidas (P_1). Realizando uma simples proporção, foi calculada a variação percentual dos parâmetros entre a situação original e a situação perturbada sem o nó. A diferença percentual entre um parâmetro original e o parâmetro situacional (nó removido) revela o impacto gerado no desempenho da rede para aquela variável. O impacto na rede causado pela remoção do aeroporto pode variar dependendo do parâmetro e de qual rede está sendo analisada.

Quanto aos parâmetros estruturais, as principais características do nó que influenciam na variação dos parâmetros são o grau e a proximidade, pois essas variáveis são as principais medidas de conectividade do nó no que se refere a quantidade de destinos atendidos e a distância topológica desses destinos ao vértice em questão. Como cada um dos parâmetros avaliados depende diretamente das variáveis mencionadas, observa-se na Tabela 4 que as variações são colineares para cada rede, ou seja, o valor percentual de decréscimo é igual.

Tabela 4 Variação dos parâmteros estruturais das redes

Rede	Variação da quantidade de arestas	Variação da Densidade	Variação da Conectividade global
R-Tot	-7,32%	-7,32%	-7,32%
R-Dom	-7,95%	-7,95%	-7,95%
R-Int	-5,40%	-5,40%	-5,40%

Considerando que as redes Total, Doméstica e Internacional possuem respectivamente 223, 163 e 78 nós, a redução média de 6,89% dos valores dos parâmetros estruturais causada pela remoção de um único nó indica que o vértice removido possuía alta conectividade e criticidade na rede. A variação da quantidade de arestas, por exemplo, representa a percentagem de rotas existentes prejudicadas pela remoção. Percebe-se, mais uma vez, uma notória diferença nos valores encontrados entre a rede doméstica e a internacional, demonstrando, novamente, a maior influência do Aeroporto de Brasília na Rede Doméstica em relação às demais redes.

Nos aspectos funcionais, o grau e a intermediação são as principais variáveis com potencial de causar maiores reduções, já que a perda de conectividade afeta diretamente o serviço da rede, e a perda de um nó com alta intermediação faz com que os menores caminhos entre nós aumentem, ou até mesmo deixem de existir, caso o aeroporto retirado fosse a única opção de conexão entre dois pontos. A Tabela 5 mostra a variação funcional da rede perturbada.

Tabela 5 Variação dos parâmetros funcionais das redes

Rede	Variação da Acessibilidade Global	Variação da Quantidade de Voos	Variação dos Assentos Disponíveis	Variação da Demanda Atendida	Variação da Eficiência Global
R-Tot	-6,89%	-11,71%	-12,59%	-8,56%	-3,12%
R-Dom	-9,11%	-12,97%	-16,14%	-16,06%	-3,18%
R-Int	-5,24%	-3,03%	-2,40%	-2,35%	-4,67%

Quando se analisa a variação dos parâmetros funcionais da rede R-Int, encontram-se as menores variações calculadas no estudo, isso pode ser explicado pelos baixos valores de intermediação que o Aeroporto de Brasília possui nessa rede, já que o principal *hub* de conexões internacionais do país é o Aeroporto de Guarulhos.

Entretanto, o decréscimo superior a 10% em alguns dos parâmetros funcionais das redes Doméstica e Total corrobora com o descrito por Lordan *et al*. (2014), Pereira (2016) e Zgodavová *et*

al. (2018), pois demonstra a grande dependência da rede por poucos pontos críticos, expondo uma baixa resiliência. A redução dos valores funcionais maior que o encontrado para os parâmetros estruturais significa que, além da grande conectividade, o Aeroporto de Brasília atende um elevado número de passageiros e operações.

5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar a resiliência da rede de transporte aéreo brasileira e estimar de forma quantitativa a importância do Aeroporto de Brasília, através da simulação de sua retirada da malha e do cálculo do decréscimo dos valores de parâmetros estruturais e funcionais da rede. Com o estudo de resiliência verificando o impacto causado à rede pelo fechamento de um aeroporto, é possível que sejam elaborados com maior eficácia planos de contingência em casos de interrupções de operação, de forma a garantir que o sistema se adapte rapidamente. Em adição, espera-se que o estudo possa contribuir para a consolidação da literatura sobre a resiliência no transporte aéreo brasileiro.

Foram verificados e confirmados dados da literatura a respeito das características topológicas da ATN brasileira, como sua disposição predominante no modelo *hub-spoke*, na qual uma quantidade reduzida de nós (*hubs*) possui elevada importância, tornando-a pouco resiliente. Em adição, com a delimitação de três redes distintas, foi possível perceber a diferença de importância que o Aeroporto de Brasília possui para cada uma, sendo constatado que a rede doméstica foi a mais impactada com a retirada do aeródromo.

Verificou-se que o Aeroporto de Brasília tem diversas medidas que aumentam sua resiliência como estrutura única, sendo capaz de operar mesmo sob inúmeras condições adversas. Todavia, para a rede, algum evento que extrapole seus limites e cause sua interrupção acarretaria impactos de magnitude estrutural e funcional, tornando a rede vulnerável. Por isso, a implementação e manutenção das medidas que visam a manter o aeroporto funcionando são embasadas e demonstram que sua estrutura está em conformidade com seu nível de criticidade. Já no que se refere às limitações do trabalho, dispõe-se que o método não abrange impactos de cunho operacional, como o relacionado a controle de tráfego aéreo e de operações nos terminais. Do mesmo modo, não há avaliação econômica dos efeitos da interrupção. Também, o método não incluiu os voos de carga e voos de aviação geral para avaliação dos parâmetros, se restringindo apenas aos voos comerciais.

6. REFERÊNCIAS

ANAC (2024). *Agência Nacional De Aviação Civil. Anuário do Transporte Aéreo 2023*, Acesso em: 25 de Junho, 2024, disponível em https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-do-transporte-aereo/painel-de-indicadores-do-transporte-aereo/painel-de-indicadores-do-transporte-aereo-2023

Falcão, V. A; Silva, F.G.F; Oliveira, F.H.L; Negri, A.R; Andrade, M.O; Brasileiro, A; Eller, R.A.G; Macário, R. (2021). Scientific investigations in air transport about Brazil: A bibliometric review. *Case Studies on Transport Policy 9*, 9 1912–1921. doi: https://doi.org/10.1016/j.cstp.2021.10.012

Inframérica (2024). *Dados e Informações*. Acesso em: 25 de Junho, 2024, disponível em https://www.bsb.aero/institucional/sobre-o-aeroporto/dados-e-informacoes

Inframérica. (2024) *Declaração da Capacidade de Infraestrutura Aeroportuária.* Acesso em: 25 de Junho 2024, disponível em https://www.bsb.aero/arquivo/SeasonItem/2024/02/20/Declaracao_de_Capacidade_e_Condicoes_Operacionais_S24_6388.pdf

Janić, M. (2015). Modelling the resilience, friability and costs of an air transport network affected by a large-scale disruptive event. *Transportation Research Part A: Policy and Practice,* v. 71, p. 1-16, jan. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2015.07.012

Latora, V. & Marchiori, M. (2001). Efficient behavior of small-world networks. *Physical Review Letters*, v. 87, n. 19. doi: https://doi.org/10.1103/physrevlett.87.198701

Leobons, C. M; Campos, V. B. G & Bandeira, R. A. M. (2019). Assessing Urban Transportation Systems Resilience: A Proposal of Indicators. *Transportation Research Procedia* 37. P. 322-329. 21st EURO Working Group on Transportation Meeting

Leobons, C. M; Campos, V. B. G. & Bandeira, R. A. M. (2020). Procedimento para avaliação da resiliência de sistemas de transportes. *Revista Transportes*, ago. v. 28 n 3 doi:10.14295/transportes.v28i3.2038

Lordan, O.; Sallan, J. M. & Simo, P. (2014). 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. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.04.015

Lordan, O.; Sallan, J. M.; Simo, P. & Gonzalez-prieto, D. (2014). Robustness of the air transport network. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 68, p. 155–163. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2014.05.011

Mattsson, L. G & Jenelius, E. (2015). Vulnerability and resilience of transport systems – A discussion of recent research. *Transportation Research Part A*. p. 16-34. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2015.06.002

Medeiros, W. J. N. (2018). *Modelo para determinação de resiliência em sistemas de transporte: uma aplicação no sistema de tráfego aéreo*. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Logísticos, São Paulo.

Pereira, R. R. D. (2016). Método de Análise de Vulnerabilidade Utilizando Redes Complexas: Aplicação na Rede de Transporte Aéreo Brasileira. Dissertação de Mestrado em Transportes, Publicação PPGT/ENC. T.DM-008/2016, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 146p.

R CORE TEAM. (2024) *The R Project for Statistical Computing*. Acesso em: 25 de Junho, 2024, disponível em https://www.r-project.org/foundation/

Rocha, L. E. C. (2017). Dynamics of Air Transport Networks: A Review From a Complex Systems Perspective. *Chinese Journal of Aeronautics*. P. 469-478. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.cja.2016.12.029

Rodrigues, L. A. (2021). Organização Territorial do Transporte Aéreo de Passageiros no Brasil. *Revista Contexto Geográfico.* V. 6. N.12 P. 84 – 104. doi:https://doi.org/10.28998/contegeo.6i12.13101

Rodrigues, L. A. (2020). *Transporte aéreo de passageiros no estado de Santa Catarina: estratégias logísticas e organização territorial*. 331 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geografia.

Santos, T. F. (2020). *Procedimento para avaliação da resiliência do sistema de transporte público frente a mudanças econômicas*. 147 p. Tese (Doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Transportes.

Silva, E. A. M.; Sobrinho, F. L. A. & Fortes, J. A. A. S. (2015). A importância geoestratégica do Aeroporto Internacional de Brasília no desenvolvimento do turismo regional. *Caderno Virtual de Turismo*. Rio de Janeiro, v. 15 n. 3., p.303-316, dez.

Tosic, V; Mirkovic, B. (2020). Investigating Untapped Capacity at Single-Runway Airports using Short Final Curved Approach, Dual Glide Slope, and Double Threshold. *Transportation Research Record*. doi: https://doi.org/10.1177/0361198120934481

Zgodavová, Z; Rozenberg, R; Szabo, S. (2018). Analysis of Point-to-Point versus Hub-and-Spoke Airline Networks. 2018 XIII International Scientific Conference - New Trends in Aviation Development (NTAD). doi: https://doi.org/10.1109/NTAD.2018.8551733

Zhang, Y. & Lin, M. H. (2017). Hub-Airport Congestion Pricing and Capacity Investment. *Transportation Research Part B*. p. 89-106. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2017.03.009