

Coloração de grafos para a determinação do número de portões em aeroportos: um estudo prático sobre o Aeroporto Internacional de Guarulhos

Vinicius Alves Pereira

Engenharia da Computação

CEFET-MG

Divinópolis, Brasil

vinicius.apereira04@gmail.com.br

Resumo—Este estudo investiga a relação entre o número de voos de um aeroporto e sua infraestrutura, especificamente os portões de embarque e desembarque em cada terminal. A eficiência do processo de recepção e despacho de passageiros, que é crucial para lidar com múltiplos voos simultâneos, está diretamente ligada a esses elementos. O Aeroporto Internacional de Guarulhos, uma destacada referência no transporte aéreo brasileiro, serve como objeto de análise, utilizando seus dados de voos como ponto de partida. A metodologia adotada emprega a teoria dos grafos, com foco no algoritmo clássico de coloração. A aplicação desse algoritmo, que deriva o número cromático, permite estimar o número mínimo de portões necessários para acomodar todos os voos registrados. Também aplica a identificação do grau máximo do grafo para encontrar o voo que gerou o maior número de conflitos de horários. Os resultados dessa abordagem permitiram verificar as congruências entre os dados obtidos e a infraestrutura física existente no aeroporto. Além disso, o estudo possibilitou a identificação do horário de maior movimentação de voos, evidenciando os horários de pico. Em suma, a análise proposta não apenas aborda a capacidade de acomodação, mas também oferece análises importantes sobre o planejamento estratégico e operacional do Aeroporto Internacional de Guarulhos.

Palavras-Chave—Teoria dos Grafos, Coloração, Aeroporto

I. INTRODUÇÃO

O transporte aéreo desempenha um papel fundamental no contexto global, como evidenciado pelos dados da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), que registrou um aumento significativo no número de passageiros transportados por via aérea no Brasil em 2022, atingindo a marca de 106,4 milhões, representando um crescimento de 10,5% em relação a 2021 [1]. Esses números destacam a relevância do setor não apenas em escala mundial, mas também no âmbito nacional.

O Aeroporto Internacional de Guarulhos, ao divulgar seus dados do primeiro semestre de 2023, revelou uma média impressionante de 744 operações por dia [1]. Diante desse elevado volume diário de voos, surge a necessidade de enfrentar o desafio dos conflitos de horários. Para isso, a distribuição eficiente de portões de embarque/desembarque torna-se crucial para a gestão de múltiplos voos simultâneos.

Este trabalho propõe-se a determinar o número ideal de portões de um aeroporto, utilizando como base os dados de

seus voos. Essa análise busca identificar o menor número necessário para acomodar todos os voos, gerando uma análise da eficiência operacional de um dos principais aeroportos do país. Em especial, o estudo observará a utilização da capacidade em horários de pico, oferecendo uma visão aprofundada da dinâmica do aeroporto.

A abordagem adotada para resolver esse desafio envolve a modelagem do problema utilizando a teoria dos grafos. Cada voo é representado como um vértice, e para cada conflito de horário entre dois voos, uma aresta é estabelecida entre eles. A aplicação de algoritmos de coloração nesse grafo permite identificar o número cromático, que representa o mínimo de cores necessário para garantir que voos com horários sobrepostos utilizem portões distintos, evitando conflitos.

Além disso, a análise do grau máximo do grafo possibilita a identificação de horários de pico, indicando quando ocorrem mais conflitos de horários. Essa informação é crucial para a otimização da gestão aeroportuária.

Em resumo, este estudo não apenas aborda a questão prática do número de portões, mas também oferece uma compreensão mais profunda da operação do Aeroporto Internacional de Guarulhos, contribuindo para uma tomada de decisão mais informada e eficiente.

II. CONTEXTUALIZAÇÃO

Para a compreensão do problema, é preciso definir alguns termos e conceitos relacionados ao contexto do nosso trabalho.

Um portão de embarque/desembarque é uma estrutura que possibilita o fluxo de passageiros entre o aeroporto e a aeronave. Um terminal é uma seção do aeroporto que agrupa vários portões. Assim, um aeroporto tem diversos terminais e, em cada um deles, diferentes portões. Cada portão pode ser relacionado unicamente a um voo.

Além disso, os aeroportos são identificados pela sua sigla ICAO. Essa sigla tem como objetivo identificar, de maneira única, todos os aeroportos. Ela é definida pela Organização da Aviação Civil Internacional, órgão com a função de promover o desenvolvimento do transporte aéreo em todo o mundo.

Foi decidido utilizar o Aeroporto Internacional de Guarulhos como objeto de estudo para este trabalho. Essa escolha

se baseia em seu grande volume de voos e sua importância a nível nacional e internacional. Além disso, este aeroporto disponibiliza de maneira pública informações sobre sua infraestrutura. Sua sigla ICAO é SBGR.

É necessário também definir um período que utilizaremos para estudar o caso. Iremos analisar o período de janeiro de 2023, aplicando o algoritmo aos dados de cada dia. E, por fim, comparar os resultados diários para obter uma análise mais profunda do período completo. Foi decidido esse período visto que seria suficiente para testar, de maneira inicial, nossa hipótese e analisar os resultados obtidos.

Iremos considerar um conflito de horários em voos cuja a data planejada de partida ou chegada dista, no máximo, do mesmo limite de tempo. Ou seja, dois voos que decolam, dois voos que pousam ou ainda um pouso e uma decolagem; todos esses casos, se estiverem dentro dessa margem de tempo, serão considerados um conflito. Esse valor foi definido a partir da média do tempo de solo permitido para diferentes aeronaves, como mostrado nas equações 1, 2 e 3. O tempo de solo representa o intervalo em que uma aeronave pode permanecer na pista, seja para embarque, decolagem ou manobra. Para este trabalho, iremos considerar apenas os tempos de chegada e partida. Essas informações estão disponíveis no documento de capacidade do aeroporto [2], os dados podem ser vistos na Tabela 1.

Tipo de Voo	Código B	Código C	Código D	Código E	Código F
Chegada	30 min	45 min	50 min	60 min	60 min
Partida	30 min	60 min	90 min	90 min	120 min

Tabela I: Tabela de tempos máximos de solo por códigos de aeronaves.

$$\text{Média de Chegada} \frac{30 + 45 + 50 + 60 + 60}{5} = 49\text{min} \quad (1)$$

$$\text{Média de Partida} \frac{30 + 60 + 90 + 90 + 120}{5} = 78\text{min} \quad (2)$$

$$\text{Média total} \frac{49 + 78}{2} = 63,5\text{min} \quad (3)$$

Um grafo $G = (V, E)$ consiste em V , um conjunto não vazio de vértices (ou nós), e E , um conjunto de arestas. Cada aresta tem um ou dois vértices associados a ela, chamados de suas extremidades. Dizemos que uma aresta liga ou conecta suas extremidades [3]. Essa estrutura será de grande importância em nosso trabalho, sendo nossa principal ferramenta de pesquisa.

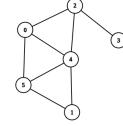


Figura 1: Exemplo de grafo com 6 vértices e 8 arestas.

A coloração de um grafo simples é a associação de uma cor a cada vértice do grafo de modo que dois vértices adjacentes não estejam associados à mesma cor [3]. Esse conceito, amplamente utilizado em diversos problemas de grafos, também será de essencial importância para nossa modelagem. O número cromático de um grafo é o menor número de cores necessárias para a coloração deste grafo. O número cromático de um grafo G é indicado por $\chi(G)$ [3].

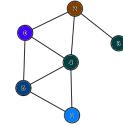


Figura 2: Exemplo de grafo após aplicação do algoritmo de coloração, com $\chi(G) = 6$

Encontrar o número cromático de um grafo é um problema não trivial e muitas vezes pode se deparar com complexidades exponenciais. Dessa forma, em nosso trabalho, iremos utilizar algoritmos que fazem uso de estratégias gulosas. Um algoritmo gúloso sempre faz a escolha que parece ser a melhor no momento em questão. Ou seja, faz uma escolha localmente ótima, na esperança de que essa escolha leve a uma solução globalmente ótima [4].

Outro conceito importante para nossa pesquisa é o grau máximo de um grafo. O grau de um vértice de um grafo não orientado é o número de arestas incidentes a ele [4]. Complementando essa definição, o grau máximo diz respeito ao grau do vértice de maior grau presente no grafo. De maneira simplificada, estamos buscando o vértice com o maior número de ligações no grafo e retornando seu grau.

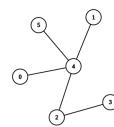


Figura 3: Exemplo de grafo com grau máximo igual 4. O vértice com esse grau é o vértice 4.

III. TRABALHOS CORRELATOS

Durante uma etapa de revisão bibliográfica, foram encontradas três principais referências correlatas a este trabalho.

A dissertação de mestrado apresentada por A. G. Da Silva, em 2018, constitui um exame minucioso da teoria de coloração de grafos [5], abordando tanto a coloração de arestas quanto a coloração de vértices. Em sua essência, o estudo realiza uma revisão abrangente dos principais resultados relacionados à coloração de arestas e coloração total, além de apresentar novas contribuições voltadas para grafos multipartidos. Em particular, são oferecidas análises detalhadas da determinação do número cromático total equilibrado para essas distintas classes de grafos, enriquecendo assim o entendimento da coloração em contextos específicos.

Um desafio de significativa relevância, amplamente abordado em diversos estudos, é a alocação de portões para diferentes voos em aeroportos. O presente artigo, proposto por Y. She, Q. Zhao, R.-Y. Guo, and X. Yu, se dedica a explorar a problemática relacionada à designação de voos (chegadas, estacionamentos e partidas) a portões de maneira econômica e robusta [6]. Recentemente, uma pesquisa específica concentrou-se na complexidade da designação de portões de aeroporto (APGP), com o intuito de desenvolver uma estratégia eficiente e resistente para a alocação de atividades de voo ao longo de um período determinado. A proposta central deste estudo envolve a criação de um modelo de programação matemática multiobjetivo, cujo objetivo é maximizar as preferências dos operadores aeroportuários, ao mesmo tempo em que minimiza os custos associados à robustez. Este enfoque considera variáveis cruciais, tais como o número de passageiros e a localização estratégica dos portões, proporcionando uma abordagem abrangente e inovadora para enfrentar os desafios da alocação de recursos aeroportuários.

O artigo apresentado por H. Li, X. Ding, L. Jiang, and J. Zhou, apresenta uma proposta inovadora ao desenvolver um modelo e algoritmo destinados à alocação eficiente de voos a portões de embarque em aeroportos [7]. Os autores meticulosamente consideram uma série de variáveis, incluindo o modelo da aeronave, tipo de portão, tempo mínimo de processamento de passageiros em trânsito, número de viagens de metrô entre terminais, tempo de caminhada dos passageiros e planos de transferência de voos específicos. Estabelecendo um sólido alicerce, eles formulam um modelo matemático de programação inteira multiobjetivo, visando a minimização da tensão total dos passageiros em trânsito, do número mínimo de portões utilizados, dos voos não alocados a portões e dos passageiros não transferidos com sucesso. Para resolver essa complexidade, o modelo é transformado em um único objetivo e solucionado por meio de um algoritmo de coloração de grafos baseado em ajuste de parâmetros. Este algoritmo leva em consideração conflitos de horários entre voos para determinar a sequência de alocação. Os resultados revelam que a abordagem proposta é altamente eficaz na otimização da alocação de voos a portões em aeroportos, demonstrando uma notável redução na tensão dos passageiros em trânsito.

IV. METODOLOGIA

Nosso trabalho será desenvolvido utilizando a linguagem de programação Python [8], na versão 3.0.0. Essa escolha baseia-se nas bibliotecas disponibilizadas pela linguagem, visando facilitar o desenvolvimento e agrupar diferentes tipos de manipulação em um único projeto. Para lidar com as bases de dados no formato CSV, faremos uso da biblioteca Pandas [9]. Para a modelagem do grafo e aplicação do algoritmo de coloração, utilizaremos a biblioteca NetworkX [10].

Para visualização do grafo, empregaremos o software Gephi [11]. Essa ferramenta oferece diversas opções de exibição de um grafo, organizando os vértices e arestas em layouts baseados em diversos algoritmos. Em nosso trabalho, é importante observar cliques e agrupamentos no grafo, além de colorações, e o Gephi proporciona modelos que possibilitam essas visualizações.

Duas bases de dados fornecidas pela ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) [12] foram utilizadas no trabalho. A primeira consiste em uma relação de todos os voos realizados em janeiro de 2023 nos aeroportos brasileiros. Este registro inclui todas as operações, sejam voos nacionais ou internacionais, contendo informações como nome e sigla do aeroporto de origem e destino, datas de chegada e partida, horário previsto e real. A segunda base de dados é uma lista dos aeroportos brasileiros [12], que inclui os nomes e siglas de todos os aeroportos em território nacional.

Inicialmente, foi necessário separar apenas os voos relacionados ao Aeroporto Internacional de Guarulhos. Ou seja, aqueles que tinham o Aeroporto de Guarulhos como partida ou destino. Nessa etapa, é importante observar que nem todas as informações da tabela são relevantes para nosso contexto. Portanto, foram selecionadas apenas as informações pertinentes ao nosso trabalho, que são a sigla ICAO do aeroporto de origem e do destino, e as datas previstas de decolagem e pouso.

A segunda manipulação consistiu em selecionar apenas os voos realizados entre aeroportos brasileiros. Isso foi feito verificando se os aeroportos de partida e destino estavam ambos presentes na lista de aeroportos brasileiros, obtida a partir da segunda base de dados. Essa separação é crucial, pois os aeroportos geralmente têm terminais distintos para voos internacionais e nacionais. Assim, filtrar dessa maneira facilita a análise do número de portões.

Para a modelagem do grafo, inicialmente, iremos criar os vértices. Cada voo será considerado um vértice do grafo.

Para a construção das arestas, é necessário analisar todas as combinações possíveis de voos, verificando se há conflito de horário entre eles, como mostrado no Algoritmo 1.

No exemplo de algoritmo fornecido, recebemos como entrada um grafo já contendo os vértices, a base de dados com a lista de voos e a sigla do aeroporto que estamos analisando.

Para cada par de voos, existem quatro possibilidades de conflito: ambos pousando no mesmo destino, ambos decolando da mesma origem, um pousando e outro decolando, ou um decolando e outro pousando, em um mesmo aeroporto.

Algorithm 1 Modelando o grafo

```

Entrada: G, database, aero
for voo1 in database do

    for voo2 in database do

        if voo1 == voo2 then
            continue
        end if

        diferencaTempo  $\leftarrow$  getDiferencaTempo(voo1, voo2)

        if ehIgual(voo1.origem, voo2.origem, aero) then
            if diferencaTempo  $\leq$  TEMPO_LIMITE then
                criarVertice(voo1, voo2, G)
            end if
        end if

        if ehIgual(voo1.destino, voo2.destino, aero) then
            if diferencaTempo  $\leq$  TEMPO then
                criarVertice(voo1, voo2, G)
            end if
        end if

        if ehIgual(voo1.origem, voo2.destino, aero) then
            if diferencaTempo  $\leq$  TEMPO_LIMITE then
                criarVertice(voo1, voo2, G)
            end if
        end if

        if ehIgual(voo1.destino, voo2.origem, aero) then
            if diferencaTempo  $\leq$  TEMPO_LIMITE then
                criarVertice(voo1, voo2, G)
            end if
        end if

    end for
end for

```

Quando é identificado um conflito, ou seja, os voos distam menos de uma hora em suas datas previstas, é criada uma ligação entre eles no grafo.

É importante destacar que a complexidade dessa etapa é $O(K^2)$, sendo K o número de voos, já que é necessário comparar todas as combinações possíveis.

Como mostrado na Figura 4, é possível ver a modelagem do grafo. Utilizando o software Gephi [11], escolhemos um layout que favorece a formação de agrupamentos. Esses grandes grupos, visualizáveis, representam focos de conflito de horário. Ou seja, períodos do dia com um maior número de portões sendo simultaneamente utilizados.

Após a montagem do grafo iremos aplicar o algoritmo de coloração. A implementação disponível na biblioteca Networkx [13] utiliza de uma estratégia gulosa e foi aplicada em nosso trabalho. O Algoritmo 2 apresenta um pseudocódigo exibindo o funcionamento desse algoritmo.

Essa estratégia se baseia na escolha a partir do vértice com

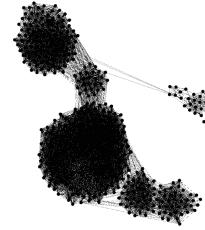


Figura 4: Visualização do grafo referente a data 01/01/2023. É possível observar os grupos que se formam onde há maior colisões de horários entre os voos.

Algorithm 2 Coloração de Grafos (Largest-First)

```

Entrada: vertices

color  $\leftarrow$  {} ▷ Mapa de vértices para cores

while vertices.tamanho  $> 0$  do
    v  $\leftarrow$  getVerticeDeMaiorGrau(vertices)
    removeVerticeDaLista(vertices, v)

    if algumVizinhoJaFoiColorido(v) then
        cores_usadas  $\leftarrow$  coresDosVizinhos(v)
        cor  $\leftarrow$  max(cores_usadas) + 1
    else
        cor  $\leftarrow$  0
    end if

    color[v]  $\leftarrow$  cor ▷ Atribuir a cor ao vértice
end while

```

o maior número de vizinhos. Após ordenar todos os vértices, é iterado de maneira decrescente. Em cada passo, é definida para o vértice uma cor diferente daquelas de seus vizinhos. Uma cor é representada por um número inteiro. Essa abordagem, por se tratar de um algoritmo guloso simples, não garante o resultado ideal sempre, porém mostrou-se suficiente para a aplicação buscada neste trabalho.

Esse algoritmo apresenta alguns fatores que devem ser considerados ao estudar sua complexidade. Como inicialmente temos que ordenar todos os vértices, temos um custo $O(n \log n)$, sendo n o número de vértices. É necessário iterar por todos os vértices, implicando uma complexidade $O(n)$. Em cada iteração, é preciso incrementar a cor até encontrar uma cor disponível. No pior caso, essa etapa terá complexidade $O(d)$, sendo d o grau máximo do grafo. Assim, a complexidade do algoritmo guloso de coloração pode ser descrita como:

$$O(n \log n + n + d) \quad (4)$$

Após a execução do algoritmo, iremos criar novamente uma visualização do grafo, como exibido na Figura 5. É possível ter uma ideia de quantos portões são necessários,

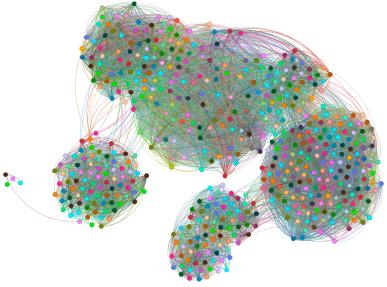


Figura 5: Visualização do grafo após aplicação do algoritmo de coloração, referente a data 15/01/2023. Nesse caso obtemos $\chi(G) = 52$.

mas visualmente não é possível determinar valores exatos. Uma observação importante é que, mesmo em agrupamentos grandes de vértices, vemos cores repetidas. Isso ocorre porque o algoritmo sempre busca o mínimo de cores necessárias. No contexto de um aeroporto, essa relação é benéfica, pois um mesmo portão está sendo utilizado por diferentes voos.

Para extrair o número cromático do grafo, buscamos o maior valor inteiro entre as cores que esteve presente entre os vértices. Para isso, é necessário, a partir da lista de nós, obter o maior valor referente à cor. Como a contagem é iniciada em zero, para obter a quantidade de cores, é necessário somar 1 ao maior valor da lista, a fim de obter o número cromático. Essa operação tem custo $O(n)$, sendo n o número de vértices, uma vez que é necessário observar todos os vértices.

V. RESULTADOS

O código utilizado para execução dos algoritmos citados e criação dos gráficos se encontra disponível em: <https://github.com/tinicius/Trabalho-Final-AEDS>.

A. Algoritmo de coloração para alocação de portões

No Aeroporto Internacional de Guarulhos, a infraestrutura é composta por quatro terminais, sendo que o Terminal 4 é destinado exclusivamente para cargas, enquanto o Terminal 3 é designado para voos internacionais. Nos terminais voltados para voos domésticos, o Terminal 1 dispõe de 8 portões de embarque, enquanto o Terminal 2 possui uma capacidade mais extensa, com 45 portões. Em conjunto, esses dois terminais totalizam 53 portões disponíveis para acomodar voos nacionais.

Para contextualizar e avaliar a eficácia do aeroporto em relação à sua capacidade real, foi desenvolvido o gráfico, exibido na Figura 6, que apresenta o número cromático encontrado em cada dia analisado. O número cromático, ao representar o mínimo de portões necessários, permite analisar a utilização efetiva da capacidade do aeroporto em diferentes momentos. Essa representação gráfica permite uma comparação direta entre a demanda observada e a capacidade

disponível, oferecendo uma visão abrangente sobre a eficiência operacional ao longo do período analisado.

Os resultados obtidos são coerentes com as capacidades reais do aeroporto, uma vez que o número cromático encontrado em nenhum dia ultrapassa a quantidade de portões existentes. É interessante observar que, em todos os dias analisados, o aeroporto operou, em algum momento, próximo de sua capacidade máxima. Especificamente, destaca-se o dia 22, no qual foi alcançado o uso total de todos os portões disponíveis durante um período específico.

A análise do número cromático proporciona uma visão clara sobre a utilização efetiva dos recursos do aeroporto, indicando a proximidade do sistema com sua capacidade máxima. Essa proximidade, especialmente evidente no dia 22, ressalta a importância de estratégias de gestão eficientes para lidar com momentos de demanda intensa.

A visualização do grafo oferece a possibilidade de identificar os dias com maior incidência de conflitos de horários. Como ilustrado na comparação abaixo, observamos grupos no grafo que são maiores e mais densos, refletindo os períodos nos quais o aeroporto enfrentou desafios mais significativos na distribuição de horários de voos. Essa relação pode ser percebida observando a Figura 7, que faz uma comparação entre os dias 3, 8 e 10.

Além disso, é notável que durante o primeiro dia analisado, o aeroporto apresentou uma quantidade relativamente baixa de operações em seu horário de pico, quando comparado ao restante do mês, como pode ser observado na figura 8. Essa observação destaca uma variação nos padrões de demanda ao longo do período, indicando que a dinâmica operacional do aeroporto pode ser influenciada por fatores sazonais ou eventos específicos.

Visualmente, a distinção entre os elementos que caracterizam o dia 1 e o dia 22 não é clara. Para facilitar a comparação, na Figura 9, foi aplicado um gradiente de cores com base na coloração dos vértices. Em outras palavras, quanto mais intensa a cor, maior é o número cromático.

No dia 1, os picos de coloração variaram entre 29 e 39. Em contrapartida, no dia 22, essa variação foi mais ampla, situando-se entre 39 e 53. Portanto, mesmo que visualmente pareça que o dia 1 teve mais picos, é crucial observar que esses picos foram de menor magnitude. Já os picos de conflito observados no dia 22 estiveram consistentemente próximos ou atingiram a capacidade máxima do aeroporto.

B. Determinação do horário de pico baseando-se no grau máximo

A análise dos resultados a partir do modelo de grafo revela claramente a existência de horários de pico no aeroporto, caracterizados por um aumento significativo no número de conflitos de horários, demandando a utilização de um maior número de terminais.

O grafo resultante, apresentado abaixo, evidencia de forma visual esses momentos de pico, destacando os agrupamentos que surgem em resposta aos conflitos de horários. Observa-se que ao longo de um mesmo dia, o aeroporto está operando

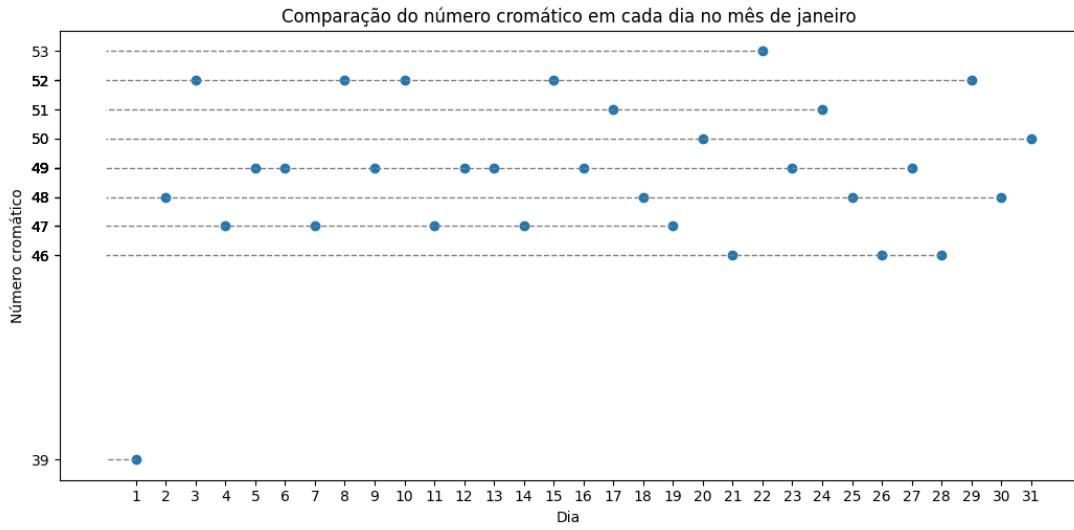


Figura 6: Gráfico exibindo o número cromático para cada dia do período de 01/01/2023 à 31/01/2023.

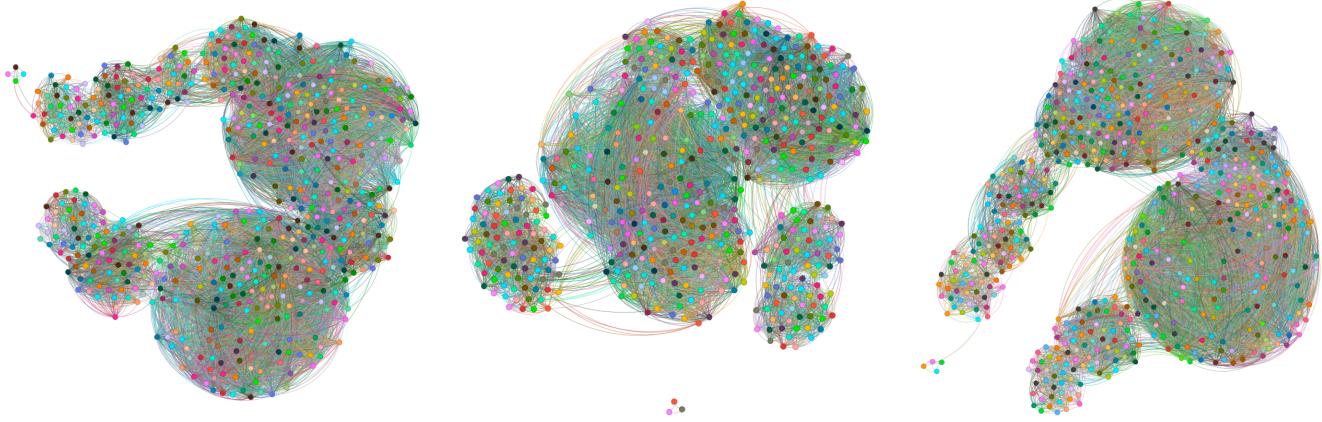


Figura 7: Comparação em entre os gráficos gerados nos dias 3, 8 e 10. Ambos com $\chi(G) = 52$.

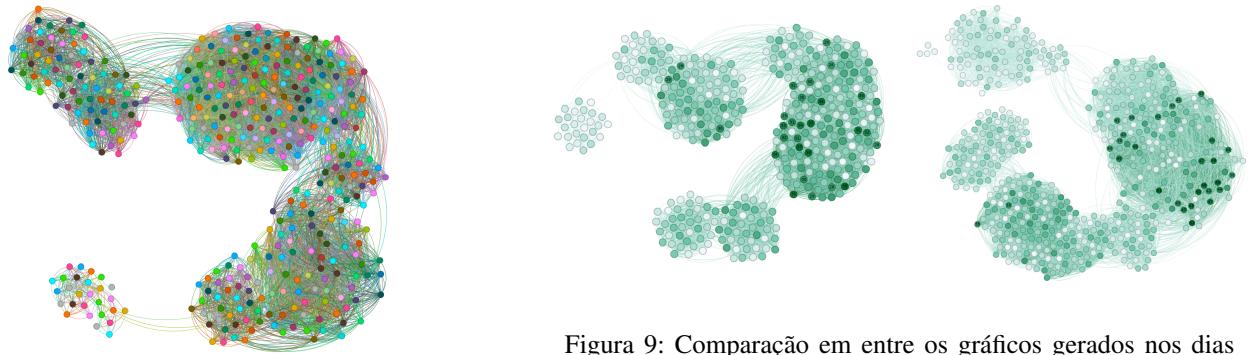


Figura 9: Comparação em entre os gráficos gerados nos dias 1 e 22. Com $\chi(G) = 39$ e $\chi(G) = 53$, respectivamente.

Figura 8: Visualização do grafo referente ao dia primeiro.
Nesse caso obtemos $\chi(G) = 39$.

diversos voos simultaneamente em diferentes horários. Essa constatação alinha-se com a realidade, considerando a posição proeminente dessa infraestrutura no cenário do transporte

aéreo nacional.

Ao analisar o grafo, outra observação significativa é a ausência de grupos isolados. Essa constatação sugere que praticamente todos os voos enfrentam algum nível de conflito de horário. Esse resultado pode ser observado na Figura 10. Essa informação assume importância crucial ao demonstrar que o aeroporto mantém um fluxo constante de voos ao longo do dia, destacando a complexidade operacional do aeroporto.

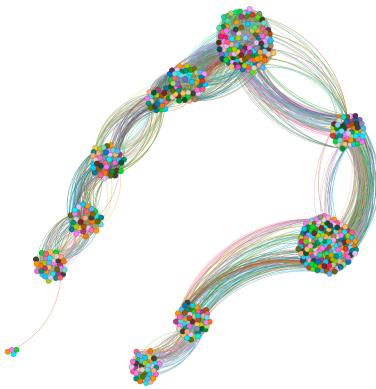


Figura 10: Visualização do grafo após aplicação do algoritmo de coloração, referente a data 10/01/2023. Nesse caso obtemos $\chi(G) = 52$.

Para explorar os horários de maior conflito, elaboramos o gráfico da Figura 11 que exibe os valores obtidos para cada dia durante o período de 01/01/2023 a 31/01/2023.

Esses horários estão diretamente relacionados aos vértices de grau máximo no grafo. Ao identificar o horário do voo associado a esse vértice, observamos que esse horário foi o mais propenso a conflitos com as datas de outros voos. Portanto, esse parâmetro serve como uma métrica robusta para identificar o horário de pico do aeroporto.

No que diz respeito aos horários, notamos que o aeroporto apresenta sua maior atividade entre as 8h e as 10h da manhã. No entanto, é interessante observar que o dia 1 se destacou, apresentando seu horário de pico às 22 horas, revelando uma dinâmica diferenciada em relação aos demais dias do mês. Essa análise temporal proporciona uma compreensão mais refinada dos padrões de atividade do aeroporto ao longo do período considerado.

VI. CONCLUSÃO

A pesquisa conduzida apresenta uma abordagem inovadora e robusta para analisar a eficiência operacional de aeroportos, com destaque para a distribuição de horários de voos e a utilização de portões de embarque/desembarque no Aeroporto Internacional de Guarulhos. A aplicação da teoria dos grafos, especialmente a coloração, revela uma compreensão abrangente da dinâmica aeroportuária, identificando períodos de pico e proporcionando uma avaliação precisa da capacidade das instalações.

A análise do número cromático, que representa o mínimo necessário de portões, demonstrou ser frutífera ao refletir com

precisão os padrões observados no aeroporto real, gerando resultados consistentes. Essa abordagem se revela, assim, uma escolha plausível para análises dessa natureza.

As representações visuais dos grafos diários oferecem uma visão gráfica clara dos momentos de pico, evidenciando a adaptação eficaz da teoria dos grafos ao problema em questão. Os grafos gerados durante o processo apresentam uma representação fiel do fluxo operacional do aeroporto.

A correta identificação dos horários de pico, associados ao maior uso simultâneo de portões, reforça a eficácia da abordagem proposta. Além da aplicação prática na avaliação da capacidade de acomodação, a análise contribui para uma compreensão mais aprofundada da operação do Aeroporto Internacional de Guarulhos, destacando padrões de demanda e eficiência operacional.

Olhando para o futuro, a expansão da pesquisa para diferentes períodos pode revelar novos comportamentos e padrões não abordados neste artigo. Recomenda-se também a inclusão de outros aeroportos, permitindo comparações e análises entre diversas infraestruturas aeroportuárias. A integração de técnicas de aprendizado de máquina para prever padrões de demanda futura e otimizar a distribuição de horários de voos representa uma via promissora para avanços significativos na gestão aeroportuária.

Em resumo, a abordagem delineada neste estudo oferece uma contribuição valiosa para a compreensão e otimização da operação aeroportuária, proporcionando análises cruciais para uma gestão mais eficiente e adaptável no contexto do transporte aéreo.

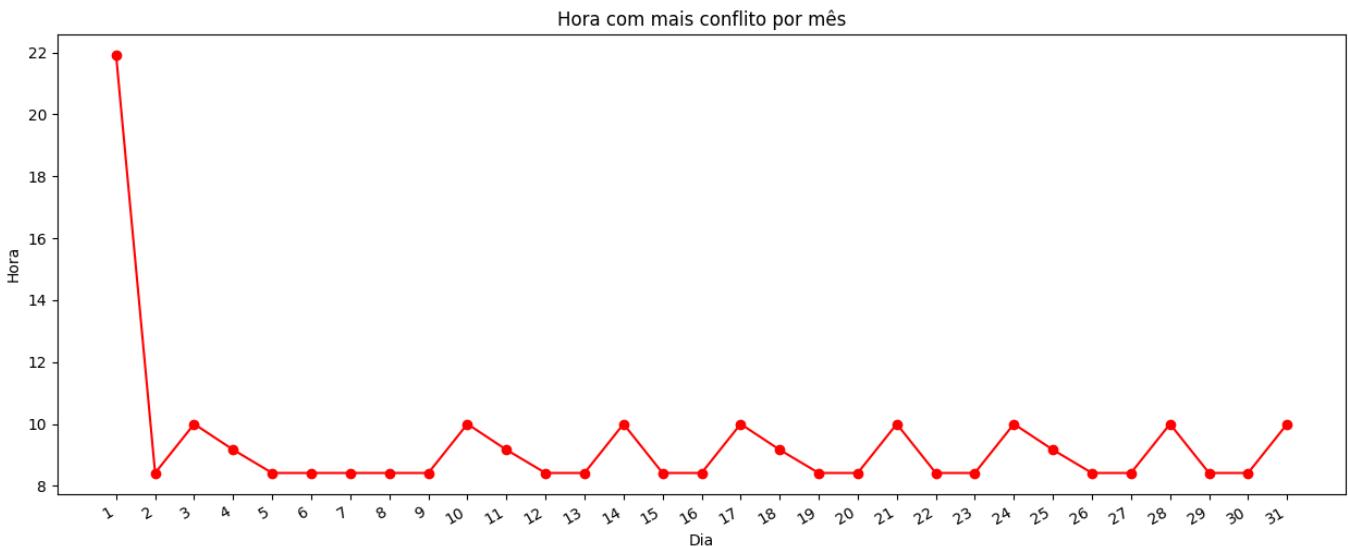


Figura 11: Gráfico exibindo o horário de maior conflito para cada dia do período de 01/01/2023 à 31/01/2023.

REFERÊNCIAS

- [1] Número de viajantes atinge em junho maior índice para o mês em 8 anos. Agência CMA. Disponível em: <https://www.agenciacma.com.br/numero-de-viajantes-atinge-em-junho-maior-indice-para-o-mes-em-8-anos>. Acesso em: 15 nov. 2023.
- [2] GRU Airport. "DECLARAÇÃO DE CAPACIDADE DE INFRAESTRUTURA AEROPORTUÁRIA", GRU Airport, Guarulhos, SP, Brasil. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/regulados/empresas-aereas/slot/aeroportos/GRU/declaracao-de-capacidade/DeclaraoCapacidadeGRU_W23_1.pdf
- [3] T. H. Cormen, Matemática Discreta e Suas Aplicações, 6th. Porto Alegre: AMGH, 2010.
- [4] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, C. Stein, Algoritmos: Teoria e Prática, 3th ed. Rio de Janeiro : Elsevier, 2012.
- [5] A. G. Da Silva, "Um estudo sobre coloração de arestas e coloração total de grafos", Tese de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, 2018. [Online]. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/36080/36080.PDF>
- [6] Y. She, Q. Zhao, R.-Y. Guo, and X. Yu, "A robust strategy to address the airport gate assignment problem considering operators' preferences," Computers & Industrial Engineering, vol. 168, p. 108100, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.cie.2022.108100.
- [7] H. Li, X. Ding, L. Jiang, and J. Zhou, "Study on coloring method of airport flight-gate allocation problem," Journal of Mathematics in Industry, vol. 9, no. 1, Sep. 2019, doi: 10.1186/s13362-019-0068-5.
- [8] G. Van Rossum and F. L. Drake, Python 3 Reference Manual. Scotts Valley, CA: CreateSpace, 2009.
- [9] W. McKinney and Others, 'Data structures for statistical computing in python', in Proceedings of the 9th Python in Science Conference, 2010, vol. 445, pp. 51–56.
- [10] A. A. Hagberg, D. A. Schult, and P. J. Swart, 'Exploring Network Structure, Dynamics, and Function using NetworkX', in Proceedings of the 7th Python in Science Conference, 2008, pp. 11–15.
- [11] M. Bastian, S. Heymann, and M. Jacomy, 'Gephi: an open source software for exploring and manipulating networks', in Third international AAAI conference on weblogs and social media, 2009.
- [12] Banco de dados ANAC <https://www.anac.gov.br/acesso-a-informacao/dados-abertos/conteudo-de-apoio/banco-de-dados>
- [13] M. Kocik, A. Hagberg, and D. Schult, "greedy_color,"NetworkX Documentation, Version 3.2.1, 2021. [Online]. Disponível em: https://networkx.org/documentation/stable/reference/algorithms/generated/networkx.algorithms.coloring.greedy_color.html#greedy-color