

## **REALOCAÇÃO DE PASSAGEIROS DE VOOS CANCELADOS DEVIDO AO FECHAMENTO DE UM AEROPORTO DE TRÂNSITO**

**Júlio Teles Ribeiro de Azevedo Nascimento**

Universidade de Fortaleza, Programa de Graduação em Engenharia de Computação  
Av. Washington Soares 1321, CEP: 60811-905, Fortaleza, Ceará, Brasil  
julioteles@edu.unifor.br

**Napoleão Vieira Nepomuceno**

Universidade de Fortaleza, Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada  
Av. Washington Soares 1321, CEP: 60811-905, Fortaleza, Ceará, Brasil  
napoleaovn@unifor.br

### **RESUMO**

Neste trabalho, investiga-se o problema de realocação de passageiros de voos cancelados em virtude do fechamento de um aeroporto de trânsito, uma situação de contingência bastante atual em face à pandemia de Covid-19. Um modelo em Programação Linear Inteira é proposto para que a companhia aérea afetada possa minimizar uma função que considera a insatisfação de seus clientes devido a atrasos e os custos de realocação de passageiros em rotas alternativas. Um estudo de caso que considera voos com origem em Fortaleza e com destino ou trânsito em Guarulhos é apresentado. Diversos cenários são investigados, limitando ou não a realocação a voos de uma mesma companhia e variando a janela de tempo de realocação dos passageiros. Os experimentos mostram que é possível encontrar boas soluções em um tempo computacional de até 30 minutos, com um *gap* de otimalidade de 7,71% e com realocação efetiva de 100% dos passageiros.

**PALAVRAS CHAVE.** Problemas de Alocação, Transporte Aéreo, Programação Linear Inteira.

**Tópicos (L&T – Logística e Transportes, POI – PO na Indústria, PM – Programação Matemática)**

### **ABSTRACT**

We investigate the problem of relocation of passengers on flights canceled due to the closure of a transit airport, a current contingency situation given the Covid-19 pandemic. An Integer Linear Programming model is proposed so that the affected airline can minimize a function that considers the dissatisfaction of its customers due to delays and the costs of relocating passengers on alternative routes. A case study that considers flights with origin in Fortaleza and with destination or transit in Guarulhos is presented. Several scenarios are investigated, limiting or not the relocation to flights of the same company and varying the time window for passenger relocation. The experiments show that it is possible to find good solutions in a computational time of up to 30 minutes, with an optimality gap of 7.71% and with an effective relocation of 100% of passengers.

**KEYWORDS.** Allocation Problems, Air Transport, Integer Linear Programming.

**Paper topics (L&T – Logistics and Transportation, POI – OR in Industry, PM – Mathematical Programming)**

## 1. Introdução

O setor aéreo cresce colaborando para a inserção do País em fluxos comerciais e turísticos. Sua importância é evidente e vital para o progresso. Proporcional ao esforço para a ampliação do setor, existe o empenho para tornar a malha do sistema à prova de falhas. No mais recente anuário de transporte aéreo publicado, os dados correspondentes a voos autorizados pela ANAC mostraram que 2,9% dos voos sofreram atrasos superiores a 60 minutos e 3,8% dos voos previstos tiveram sua partida cancelada em 2018 [ANAC, 2018].

A natureza de um evento que pode gerar um atraso ou cancelamento varia e, embora alguns eventos possam até ser previstos, muitos não podem ser evitados. Entre as causas, citam-se condições meteorológicas, de segurança, de tráfego aéreo e operacionais das empresas aéreas [ANAC, 2018]. Por exemplo, em 2019, o Aeroporto Internacional Governador Jorge Teixeira, em Porto Velho (RO), foi fechado por aproximadamente duas horas devido à fumaça das queimadas, o que dificultou o pouso e/ou decolagem [Boni, 2019]. A Indonésia teve que fechar 5 aeroportos devido a contínuas erupções do vulcão Monte Raung em 2015. Em 2007, o caos aéreo se estabeleceu quando, após negociações fracassadas, mais de 200 controladores de voos no Brasil entraram em greve paralisando as atividades em mais de 49 aeroportos [Globo, 2007]. Mais recentemente, a pandemia de Covid-19 levou ao fechamento de fronteiras e de aeroportos em todo o mundo.

Desde o início, o mercado aéreo foi submetido a políticas públicas para garantir boas condições de funcionamento. Atualmente, a Resolução nº 400 estabelece as condições gerais para o setor e trata do despacho do passageiro e execução do contrato de transporte aéreo [ANAC, 2016]. “O transportador deverá oferecer as alternativas de reacomodação, reembolso e execução do serviço por outra modalidade de transporte, devendo a escolha ser do passageiro, nos seguintes casos: (I) Atraso de voo por mais de quatro horas em relação ao horário originalmente contratado; (II) Cancelamento de voo ou interrupção do serviço; (III) Preterição de passageiro; e (IV) Perda de voo subsequente pelo passageiro, nos voos com conexão, inclusive nos casos de troca de aeroportos, quando a causa da perda for do transportador.”

Acrescentam-se fatores de mercado, já que uma pesquisa feita por Cho et al. [2018] revelou que todas as dimensões de risco percebidas pelos passageiros de aeronaves afetam negativamente as intenções de viajar de avião. A pesquisa também classificou o desempenho das companhias após uma situação de contingência como preditores significativamente negativos nas intenções dos passageiros na hora de viajar. Viajantes que sofrem com falhas perdem a confiança e a lealdade em companhias que não têm responsabilidade social corporativa [Nikbin et al., 2016]. Cabe então à responsável legal ter uma abordagem proativa de planejamento diante das adversidades, apresentando um bom desempenho na recuperação de serviços.

Em situações de contingência, a realocação de passageiros é uma obrigação da responsável legal. O problema de realocação de passageiros consiste, resumidamente, na escolha de uma nova rota para um passageiro chegar ao seu destino, considerando que o passageiro foi prejudicado por um cancelamento de voo. Neste trabalho, considera-se a situação em que um aeroporto de trânsito é interrompido, ocasionando o cancelamento de voos que transitariam por esse aeródromo. Fatores como atraso total e capacidade da aeronave são apenas alguns dos dados que influenciam na tomada de decisões. Um modelo em Programação Linear Inteira (PLI) é proposto para minimizar os custos de realocação e a insatisfação dos clientes por atrasos.

O restante deste artigo está estruturado da seguinte forma. A Seção 2 aborda os principais trabalhos relacionados, exaltando o que já foi feito de importante nessa área. A Seção 3 descreve a metodologia e o modelo em PLI proposto para tratar o problema. Na Seção 4, são apresentados e discutidos os resultados computacionais do estudo realizado. Por fim, na Seção 5, conclui-se o

trabalho com as contribuições, fatores limitantes e propostas de trabalhos futuros.

## 2. Trabalhos Relacionados

A área de Pesquisa de Operações Aéreas é uma área bastante ampla, com diversos estudos que buscam prevenir situações de contingência e mitigar seus impactos. A seguir, os principais trabalhos relacionados a esta proposta são discutidos.

Gagnon [1967] introduziu um Modelo de Alocação de Passageiros para auxiliar o planejamento do fluxo de viajantes, descrito em três processos: (I) Geração de caminhos atraentes; (II) Estimador de distribuição de tráfego; e (III) Processo de alocação de passageiros. O objetivo é alocar um número de pessoas levando em conta os fatores que mais influenciam os consumidores na hora de escolher um voo. Uma série de regras de decisão estima os efeitos de fatores como: frequência dos voos, horários de chegada e partida, tipos de aeronaves, tipos de voos, assentos disponíveis, etc. A Figura 1 apresenta a estrutura do modelo de forma simplificada.

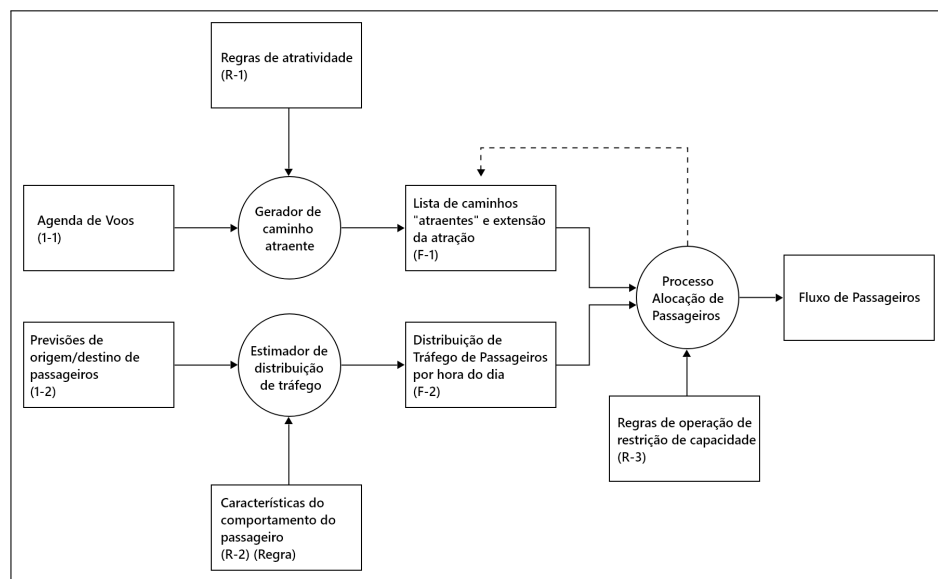


Figura 1: Modelo de alocação de passageiros [Gagnon, 1967]. Tradução nossa.

Soumis et al. [1981] apresentaram uma abordagem baseada na ideia de “sobrecarga de passageiros”. O modelo, denominado de MAPUM, busca atribuir um horário de voo para cada viajante conforme a programação diária de voos e a curva de demanda. Os autores propõem um modelo em Programação Não Linear que busca otimizar uma função objetivo baseada no fator de atratividade e no fator de disponibilidade, que considera a perda de receita devido à sobrecarga de passageiros e o custo de insatisfação dos passageiros.

Aragón e Leal [2003] propuseram um modelo de alocação de fluxo de passageiros em uma rede de transporte público. O modelo, baseado em inequações variacionais, prevê como o fluxo tende a se distribuir. Os autores enfatizam que, diferentemente de uma rede de alocação de veículos em que existe uma correspondência entre a vontade de onde o usuário quer ir com o deslocamento do veículo, em redes de transporte coletivo é feito uma alocação dos passageiros tendo como base linhas pré-existentes. Estes trabalhos, sobretudo, buscavam dar suporte à atividade de planejamento da rede. Outros trabalhos, abordados a seguir, estudaram o impacto de situações de contingência.

Voltes-Dorta et al. [2017] desenvolveram um estudo de caso no Aeroporto de Palma de Maiorca sobre a resiliência da infraestrutura do transporte aéreo. Os autores afirmaram que, até

então, não haveria estudo quantitativo que se concentre na recuperação de serviços de passageiros em aeroportos. Considerando itinerários completos dos passageiros, os status dos aeroportos (fechado / aberto), e os horários do início e do final dos possíveis fechamentos, um algoritmo de caminho mínimo era então aplicado para encontrar um roteamento alternativo ideal para os passageiros em situação de contingência em um processo iterativo. No estudo, 19 cenários foram considerados, apresentando resultados diferentes em termos de taxa de realocação e total de atrasos.

Com o intuito de obter uma solução que minimize o atraso total, em resposta ao fechamento de um aeroporto, Wu et al. [2017] propuseram uma reprogramação de aviões implementada em uma rede distribuída, onde um certo número de segmentos independentes são obtidos pela divisão do espaço de soluções. Desta forma, o número de linhas viáveis parciais, que devem ser calculadas para localizar uma reprogramação de avião otimizada, mostrou-se muito menor em comparação com o número necessário pelo CPLEX CP Optimizer. A abordagem mostrou-se promissora para solucionar o problema de disrupção em linhas aéreas de grande porte.

Lin e Wang [2018] estudaram o mesmo problema de reprogramação de voos após o fechamento de aeroportos. A abordagem foi um algoritmo *Fast Variable Neighborhood Search*. A solução foi dividida em duas etapas: (I) inicialização, em que apenas os voos atrasados são utilizados e o foco é diminuir o custo dos voos atrasados, e (II) busca local, onde a vizinhança analisa todas as soluções possíveis através da troca de duas aeronaves. A abordagem obteve resultados equiparáveis aos alcançados pelo método utilizado por Wu et al. [2017], em termos de qualidade das soluções obtidas, e levou menos tempo computacional.

Os resultados são importantes não só para providenciar soluções viáveis, mas também para a criação de políticas que facilitem a busca por uma solução em tempo hábil. Em particular, os trabalhos que tratam do problema de realocação de passageiros em situação de fechamento de aeroporto focam em encontrar uma solução minimizando o atraso total e o custo da realocação.

### 3. Metodologia

O problema investigado consiste na realocação de passageiros de voos cancelados em virtude do fechamento de um aeroporto de trânsito, com o intuito de minimizar a insatisfação dos passageiros devido a atrasos e os custos de realocação em rotas alternativas. O problema é formulado como um modelo em PLI. Como em um cenário real cada aeroporto tem autonomia e responsabilidade por realocar seus passageiros, o modelo se restringe à realocação dos passageiros de um único aeroporto de origem e de uma única companhia.

Além disso, as companhias áreas projetam seus cronogramas de voos de forma a atender a demanda do consumidor com meses de antecedência. Isto porque diversas variáveis e restrições entram na conta: gastos com combustível, remuneração de funcionários, pagamento de tarifas dos aeroportos, etc. Tudo é planejado em prol de maximizar os lucros. Em função disso, no modelo proposto, nenhum novo voo é criado para comportar os passageiros. Desta forma, será utilizado um cronograma já estabelecido pelas companhias.

Cada passageiro ocupa um assento em cada uma das aeronaves que compõem o seu itinerário desde a origem até seu destino final. Considera-se aqui que, em consequência da interrupção do aeroporto de trânsito, cada passageiro afetado por um cancelamento de voo do aeroporto de origem perde todas as conexões marcadas em seu itinerário e, portanto, uma nova sequência de voos deve ser atribuída. Levando-se em conta que os passageiros poderão ter que realizar conexões até o destino final, o custo da realocação está atrelado às escolhas do itinerário. Para assegurar que cada itinerário seja viável na prática, há um tempo mínimo para conexão (38 minutos), assim como um tempo máximo (24 horas).

Um passageiro possui os seguintes atributos: id, aeroporto de destino, hora de partida e hora de chegada referentes ao itinerário original. Um voo é caracterizado pelos seguintes atributos: id, companhia, aeroporto de origem, aeroporto de destino, hora de partida, hora de chegada, custo de uma passagem e capacidade remanescente. O atributo custo é calculado de acordo com a quantidade em litros de combustível gasto para realizar o voo multiplicado pelo valor em real do combustível e dividido pelo número de assentos ofertados. É importante ressaltar que, quando uma companhia tem seu voo cancelado e precisa recorrer ao plano de contingência, esta prioriza aeronaves da própria frota para a realocação. O modelo regula essa prioridade zerando os custos de realocação em voos da própria empresa.

Há a possibilidade de a quantidade de passageiros em situação de contingência ser excessiva em relação à capacidade dos voos remanescentes. O modelo permite que passageiros sejam negligenciados e, neste caso, uma penalidade no valor de R\$20.000,00 é aplicada, como prevê a resolução em caso dessa infração ANAC [2016]. O custo por minuto de atraso leva em consideração um estudo realizado por Cook et al. [2012], que preconiza diferentes custos de acordo com os intervalos de minutos de atraso, conforme apresentado na Tabela 1. Os autores enfatizam que a insatisfação decorrente da impontualidade pode causar redução na participação de mercado, que não é orientado apenas pelo preço. Entretanto, neste trabalho, adota-se o valor de R\$5.94 (EUR 0.92 convertidos para real) como custo por minuto de atraso. Ressalta-se que considerar cada intervalo de custo, embora mais coerente com a realidade, impactaria de forma significativa a complexidade do modelo proposto.

Tabela 1: Custos de atraso por passageiro em intervalos de tempo [Cook et al., 2012]. Tradução nossa.

Atraso (minutos)	1-15	16-30	31-45	46-60	61-75	76-90	90+
Custo (euros/minuto)	0.05	0.17	0.37	0.58	0.75	0.86	0.92

### 3.1. Modelo em Programação Linear Inteira

Podemos enunciar o problema da seguinte forma: Seja  $G = (N, A)$  um multigrafo orientado não simétrico que representa os aeroportos e os voos previamente escolhidos. Mais precisamente,  $N = \{0, 1, \dots, n\}$  representa o conjunto de aeroportos, em que o nó 0 é o aeroporto de origem dos passageiros afetados pelo cancelamento de voos e o restante dos nós são os aeroportos de destino e/ou de trânsito, e  $A = \{1, 2, \dots, m\}$  representa o conjunto de voos entre dois aeroportos. Ressalta-se que para um mesmo par de nós  $i$  e  $j$  podem existir diversos voos associados. Para cada voo  $v \in A$ , associam-se os seguintes parâmetros de entrada:  $AO_v$ , aeroporto de origem;  $AD_v$ , aeroporto de destino;  $CAP_v$ , capacidade ociosa;  $CST_v$ , custo de uma passagem;  $HP_v$ , hora de partida; e  $HC_v$ , hora de chegada.

Considere ainda  $P = \{1, 2, \dots, z\}$  o conjunto de passageiros que precisam ser realocados. Para cada passageiro  $p \in P$ , associam-se os seguintes parâmetros de entrada:  $DEST_p$ , aeroporto de destino;  $PART_p$ , hora de partida prevista no itinerário original; e  $CHEG_p$ , hora de chegada prevista no itinerário original. Reforça-se que todos os passageiros partem de um mesmo aeroporto de origem.

Utilizam-se ainda os parâmetros:  $PEN$ , a penalidade por cada passageiro não atendido na realocação;  $ATR$ , o custo por minuto de atraso por passageiro;  $MNC$ , o tempo mínimo de conexão; e  $MXC$ , o tempo máximo de conexão. As variáveis binárias de decisão  $y_{pv}$  determinam se o passageiro  $p$  está alocado no voo  $v$  (valor 1) ou não (valor 0). E as variáveis de decisão  $x_p$  indicam se o passageiro  $p$  foi negligenciado na realocação (valor 1) ou atendido (valor 0). O modelo em PLI pode ser descrito como:

$$\min \sum_{p \in P} \sum_{v \in A} CST_v y_{pv} + \sum_{p \in P} PEN x_p + \sum_{p \in P} \sum_{v \in A | AD_v = DEST_p} ATR(HC_v - CHEG_p) y_{pv} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } x_p + \sum_{v \in A | AO_v = 0} y_{pv} = 1 \quad \forall p \in P \quad (2)$$

$$x_p + \sum_{v \in A | AD_v = DEST_p} y_{pv} = 1 \quad \forall p \in P \quad (3)$$

$$\sum_{v \in A | AD_v = a} y_{pv} - \sum_{v \in A | AO_v = a} y_{pv} = 0 \quad \forall p \in P, a \in N | a \neq 0 \ \& \ a \neq DEST_p \quad (4)$$

$$\sum_{p \in P} y_{pv} \leq CAP_v \quad \forall v \in A \quad (5)$$

$$\sum_{v \in A | AO_v = 0} HP_v y_{pv} \geq PART_p (1 - x_p) \quad \forall p \in P \quad (6)$$

$$\sum_{v \in A | AD_v = a} (HC_v + MNC) y_{pv} \leq \sum_{v \in A | AO_v = a} HP_v y_{pv} \quad \forall p \in P, a \in N | a \neq 0 \ \& \ a \neq DEST_p \quad (7)$$

$$\sum_{v \in A | AO_v = a} HP_v y_{pv} - \sum_{v \in A | AD_v = a} HC_v y_{pv} \leq MXC \quad \forall p \in P, a \in N | a \neq 0 \ \& \ a \neq DEST_p \quad (8)$$

$$\sum_{v \in A | AO_v = a} y_{pv} \leq 1 \quad \forall p \in P, a \in N \quad (9)$$

$$\sum_{v \in A | AD_v = a} y_{pv} \leq 1 \quad \forall p \in P, a \in N \quad (10)$$

A função objetivo (1) minimiza o custo total das passagens da realocação, a penalidade por negligenciar passageiros e a insatisfação do cliente em virtude de atrasos. As restrições (2) garantem que cada passageiro saia do aeroporto de origem ou, então, que seja indicada a sua não realocação. As restrições (3) impõem a condição que cada passageiro realocado chegue a seu destino final. As restrições de fluxo (4) asseguram a continuidade de um itinerário durante as conexões entre aeroportos. As restrições (5) certificam que um voo obedeça sua capacidade máxima. As restrições (6) garantem que um passageiro parta do aeroporto de origem somente após a hora de partida do seu itinerário original. As restrições (7) asseguram que o tempo mínimo entre conexões seja respeitado, enquanto que as restrições (8) referem-se ao tempo máximo em que uma conexão pode ocorrer. Em conjunto com restrições precedentes, as restrições (9) e (10) evitam a criação de ciclos em um itinerário, garantindo que um passageiro não retorne a um aeroporto já visitado.

#### 4. Resultados Computacionais

No estudo computacional, considerou-se o Aeroporto Internacional de Fortaleza (FOR, na nomenclatura IATA), localizado em Fortaleza-CE. O aeroporto é o terceiro maior do Nordeste do Brasil e, no ano de 2019, teve uma movimentação de mais de 7 milhões passageiros [Fraport, 2020]. A expectativa é que, até 2047, o aeroporto receba mais de 29,2 milhões de passageiros por ano [PIMENTEL, 2019]. O aeroporto apresenta uma distribuição do número de passageiros ao longo do ano bem regular, somente com intensificações durante o período de alta estação referente



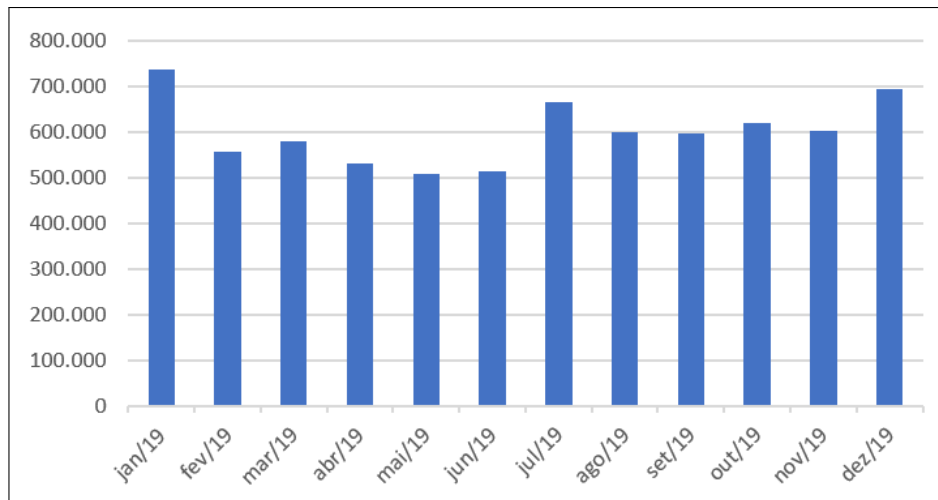


Figura 2: Distribuição de passageiros por mês [Fraport, 2020].

ao período de férias escolares, como mostra a Figura 2. Estes números, entretanto, devem ter sido negativamente afetados devido à pandemia de Covid-19.

Considerou-se ainda um fechamento do Aeroporto Internacional de Guarulhos (GRU), durante o período das 12 às 19 horas do dia 01 de Setembro de 2020. O aeroporto foi escolhido por, além de contar com voos diretos a partir de FOR, ter recebido mais de 43 milhões de passageiros em 2019 [GRUAirport, 2020], tornando-se o aeroporto com maior movimentação aeroportuária do Brasil [ANAC, 2020].

O estudo focou-se nos voos da companhia LATAM Airlines, por, além de ser uma das maiores companhias aéreas operando no mercado brasileiro, ter disponibilizado algumas das suas políticas de contingência para fins acadêmicos. No cenário investigado, há dois voos cancelados em decorrência da interrupção do aeroporto de trânsito, que partiriam de FOR com destino a GRU, conforme consta na Tabela 2.

Tabela 2: Informações dos voos cancelados.

ID Básico	SG Empresa	Nº do Voo	Data	Origem	Destino	Partida	Nº Passageiros
21048678	TAM	3160	01/09/2020	FOR	GRU	12:50	178
21049522	TAM	3815	01/09/2020	FOR	GRU	19:00	199

Fez-se uso da base de dados estatísticos do transporte aéreo da primeira semana de setembro de 2020. Os dados são apresentados pela ANAC com base nos documentos e nas demonstrações contábeis disponibilizados pelas empresas do setor aéreo brasileiro. A veiculação é garantida pela resolução nº 342 de 9 de setembro de 2014 que regulamenta os arquivos disponibilizados para fins de acompanhamento de mercado. São utilizados apenas voos de operações regulares de transporte aéreo de passageiros ou mistas, onde os aeroportos de decolagem e aterrissagem estejam ambos em território brasileiro. São retirados voos particulares, voos que já estejam com a capacidade máxima utilizada e voos com dados ausentes. Voos com destino ao aeroporto de origem são também excluídos.

São utilizadas as informações de lotação de cada aeronave. Entretanto, não há informação disponível sobre o destino individual de cada passageiro. Assim, os destinos finais dos passageiros

afetados pelo cancelamento dos voos são arbitrados conforme a seguir. Além do próprio aeroporto GRU, foram considerados os destinos operados pela LATAM para os quais a empresa não conta com voos diretos partindo do aeroporto FOR. A distribuição dos destinos dos passageiros foi arbitrada conforme a Tabela 3. A hora de partida prevista no itinerário original dos passageiros segue o horário de partida dos voos cancelados. A hora de chegada prevista no itinerário original, entretanto, é estimada a partir de voos que partem de GRU, somente após a chegada dos voos 3160 e 3815, até os destinos finais dos passageiros.

Tabela 3: Distribuição de destinos dos passageiros.

Nº do Voo	Destino Final do Passageiro	Nº de Passageiros
3160	GRU	53
3160	CNF	35
3160	POA	36
3160	BEL	18
3160	BSB	18
3160	FLN	9
3160	GIG	9
3815	CGR	79
3815	GRU	39
3815	GIG	29
3815	BSB	20
3815	REC	22
3815	BEL	10

Os diferentes cenários analisados estão sumarizados na Tabela 4, listados em ordem do mais restritivo ao menos restritivo. Os quatro primeiros cenários limitam a realocação a voos da própria companhia, enquanto que os demais cenários flexibilizam a realocação em voos de empresas concorrentes. Nos oito primeiros cenários, adota-se uma janela de realocação de até três dias, enquanto que nos demais cenários permite-se a realocação em até uma semana. Além disso, diferentes limites de tempo de execução do modelo (1)–(10) são utilizados.

Tabela 4: Diferentes cenários analisados.

Cenário	Voos da companhia	Faixa de tempo de recuperação	Tempo máximo (min)
1	LATAM	3 dias	5
2	LATAM	3 dias	10
3	LATAM	3 dias	30
4	LATAM	3 dias	60
5	Todas as companhias	3 dias	5
6	Todas as companhias	3 dias	10
7	Todas as companhias	3 dias	30
8	Todas as companhias	3 dias	60
9	Todas as companhias	1 semana	5
10	Todas as companhias	1 semana	10
11	Todas as companhias	1 semana	30
12	Todas as companhias	1 semana	60

Utilizou-se o IBM ILOG CPLEX 12.8 [IBM ILOG CPLEX] para solução de modelos em PLI, e os experimentos computacionais foram executados em uma máquina Intel Core I5-7200U de sétima geração 2.7 GHz e 8GB RAM. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5, indicando



a porcentagem de passageiros realocados, o custo total da solução, o custo das passagens, o custo da penalidade, o custo devido ao atraso e o *gap* de otimalidade para cada cenário.

Tabela 5: Resultados obtidos em cada cenário.

Cenário	%Alocados	Custo Total	Custo Passagens	Penalidade	Custo Atraso	Gap
1	69%	5.385.146,88	0,00	2.280.000,00	3.105.146,88	0,25%
2	69%	5.385.117,18	0,00	2.280.000,00	3.105.117,18	0,11%
3	69%	5.385.117,18	0,00	2.280.000,00	3.105.117,18	0,10%
4	69%	5.385.117,18	0,00	2.280.000,00	3.105.117,18	0,00%
5	99%	2.393.289,93	29.258,99	40.000,00	2.324.030,94	24,31%
6	100%	2.130.076,60	31.070,68	0,00	2.099.005,91	13,73%
7	100%	2.074.938,96	30.771,12	0,00	2.044.167,83	7,71%
8	100%	2.074.106,38	30.716,68	0,00	2.043.389,69	5,63%
9	—	—	—	—	—	—
10	64%	4.979.770,83	16.559,57	2.680.000,00	2.283.211,26	190,31%
11	64%	4.979.770,83	16.559,57	2.680.000,00	2.283.211,26	64,50%
12	100%	2.170.638,12	31.483,74	0,00	2.139.154,37	16,25%

A análise experimental mostra que o CPLEX só obteve uma solução provadamente ótima no cenário 4. Veja que a mesma solução foi obtida nos cenários 2 e 3, embora o CPLEX não tenha sido capaz de certificar esta otimalidade em virtude do limite de tempo de execução imposto. Ao restringir a realocação aos voos da própria companhia, percebe-se um alto custo em virtude da negligência a passageiros e atrasos. Esses resultados têm fortes implicações gerenciais, ressaltando a importância das alianças entre empresas em situações de contingências. Os cenários 6 ao 8 e 12 realizam uma realocação de 100% dos passageiros, levando a um custo total bastante reduzido relativamente. Nestas soluções, a parcela do custo relacionado ao atraso é consideravelmente mais significativa, reforçando a importância do gasto que a insatisfação do cliente pode ocasionar. Pode-se também perceber que, em virtude de limites computacionais, o aumento da janela de recuperação não contribui para a melhora da solução encontrada. Ou seja, o cenário mais flexível mostrou-se inviável na prática em virtude da necessidade de um tempo de resposta hábil. Não foi sequer possível obter uma solução viável para o cenário 9, diante da restrição de tempo e do porte da instância. As taxas de realocação também foram bastante afetadas nos cenários 10 e 11.

A Tabela 6 apresenta o menor e o maior tempo de atraso de um passageiro em cada cenário. Percebe-se que há atrasos inferiores ao período de interrupção. Isto porque passageiros que fariam conexão em GRU foram realocados em itinerários alternativos.

## 5. Conclusão

Neste trabalho, foi proposto um modelo em PLI para a realocação de passageiros que tiveram seus voos cancelados devido a uma interrupção em um aeroporto de trânsito. Investigou-se, sobretudo, a importância de diversos componentes de custo das soluções, o que pode direcionar políticas internas das companhias aéreas.

É importante citar algumas limitações do estudo. A falta de um conjunto de dados sobre a demanda dos passageiros é uma lacuna no estudo. A arbitrariedade nos destinos pode gerar ruídos na solução. Ainda, a impessoalidade do modelo não leva em consideração a pluralidade das pessoas, suas necessidades e suas preferências.

Como trabalhos futuros, seria interessante implementar um fator de custo por atraso diferente para cada passageiro, tendo em vista que diferentes clientes têm diferentes níveis de urgência. Ainda, pode-se incorporar as diferentes faixas de tempo de atraso propostas por Cook et al. [2012]. O modelo também pode ser facilmente estendido para tratar concomitantemente a realocação de

Tabela 6: Tempo de atraso em cada cenário.

Cenário	Menor atraso	Maior atraso
1	1 horas e 10 minutos	53 horas e 52 minutos
2	1 horas e 10 minutos	53 horas e 52 minutos
3	1 horas e 10 minutos	53 horas e 52 minutos
4	1 horas e 10 minutos	53 horas e 52 minutos
5	0 horas e 14 minutos	46 horas e 52 minutos
6	0 horas e 14 minutos	29 horas e 24 minutos
7	1 hora e 9 minutos	29 horas e 19 minutos
8	1 hora e 9 minutos	29 horas e 19 minutos
9	0 horas e 14 minutos	138 horas e 1 minutos
10	0 horas e 14 minutos	41 horas e 35 minutos
11	0 horas e 14 minutos	41 horas e 35 minutos
12	0 horas e 14 minutos	49 horas e 42 minutos

várias companhias de um mesmo aeroporto de origem ou ainda de vários aeroportos afetados pela situação de contingência.

## Referências

- ANAC (2016). Resolução nº 400. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*.
- ANAC (2018). Anuário do transporte aéreo. *Agência Nacional de Aviação Civil*.
- ANAC (2020). Dados estatísticos. *Agência Nacional de Aviação Civil*.
- Aragón, F. R. C. e Leal, J. E. (2003). Alocação de fluxos de passageiros em uma rede de transporte público de grande porte formulado como um problema de inequações variacionais. *Pesquisa Operacional*, 23:235 – 264. ISSN 0101-7438. URL [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0101-74382003000200001&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-74382003000200001&nrm=iso).
- Boni, J. (2019). Fumaça de queimadas fecha aeroporto por quase 2 horas em porto velho. *GI*. URL <https://g1.globo.com/ro/rondonia/noticia/2019/08/26/fumaca-de-queimadas-fecha-aeroporto-de-porto-velho.ghtml>.
- Cho, S.-H., Ali, F., e Manhas, P. S. (2018). Examining the impact of risk perceptions on intentions to travel by air: A comparison of full -service carriers and low-cost carriers. *Journal of Air Transport Management*, 71:20 – 27. ISSN 0969-6997. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969699718300140>.
- Cook, A., Tanner, G., e Lawes, A. (2012). The hidden cost of airline unpunctuality. *Journal of Transport Economics and Policy (JTEP)*, 46(2):157–173. ISSN 0022-5258. URL <https://www.ingentaconnect.com/content/lse/jtep/2012/00000046/00000002/art00001>.
- Fraport (2020). Movimentação aeroportuária. URL <https://fortaleza-airport.com.br/pt/informacoes-operacionais/movimentacao-aeroportuaria>.
- Gagnon, G. (1967). A model for flowing passengers over airline networks. *Transportation Science*, 1(3):232–248. URL <https://doi.org/10.1287/trsc.1.3.232>.

- Globo (2007). Greve de controladores leva caos aéreo ao ápice. *GI*. URL <http://g1.globo.com/Noticias/Brasil/0,,MUL16554-5598,00-GREVE+DE+CONTROLADORES+LEVA+CAOS+AEREO+AO+APICE.html>.
- GRUAirport (2020). Movimentação aeroportuária. URL <https://www.gru.com.br/pt/institucional/informacoes-operacionais/movimentacao-aeroportuaria>.
- IBM ILOG CPLEX. 12.8 user's manual.
- Lin, H. e Wang, Z. (2018). Fast variable neighborhood search for flight rescheduling after airport closure. *IEEE Access*, 6:50901–50909.
- Nikbin, D., Hyun, S. S., Iranmanesh, M., Maghsoudi, A., e Jeong, C. (2016). Airline travelers' causal attribution of service failure and its impact on trust and loyalty formation: The moderating role of corporate social responsibility. *Asia Pacific Journal of Tourism Research*, 21(4):355–374. URL <https://doi.org/10.1080/10941665.2015.1048265>.
- PIMENTEL, S. (2019). Aeroportos cearenses têm movimentação recorde em 2018. URL <https://www.opovo.com.br/jornal/economia/2019/01/aeroportos-cearenses-tem-movimentacao-recorde-em-2018.html>.
- Soumis, F., Ferland, J.-A., e Rousseau, J.-M. (1981). Mapum: A model for assigning passengers to a flight schedule. *Transportation Research Part A: General*, 15(2):155 – 162. ISSN 0191-2607. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0191260781900807>.
- Voltes-Dorta, A., Rodríguez-Déniz, H., e Suau-Sanchez, P. (2017). Passenger recovery after an airport closure at tourist destinations: A case study of palma de mallorca airport. *Tourism Management*, 59:449 – 466. ISSN 0261-5177. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261517716301613>.
- Wu, Z., Cao, Q., Li, B., Dang, C., e Hu, F. (2017). A rapid solving method to large airline disruption problems caused by airports closure. *IEEE Access*, 5:26545–26555.