

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

Faculdade de Engenharia- campus de São João da Boa Vista

IGOR MASSANOBU HASHIMOTO ARAUJO

Simulação de embarque em aeronave :

Com proposta de novo procedimento utilizando código em Python

São João da Boa Vista

2025

Igor Massanobu Hashimoto Araujo

Simulação de embarque em aeronave :

Com proposta de novo procedimento utilizando código em Python

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Aeronáutica.

Orientador: Prof^o Dr. Murilo Sartorato

São João da Boa Vista

2025

A663s

Araujo, Igor Massanobu Hashimoto

Simulação de embarque em aeronave : Com proposta de novo procedimento utilizando código em Python / Igor Massanobu Hashimoto Araujo. -- São João da Boa Vista, 2025

43 p. : il., tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Aeronáutica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista

Orientador: Murilo Sartorato

1. Simulação por computador. 2. Transporte Trânsito de passageiros. 3. Python (Linguagem de programação de computador). I. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AERONÁUTICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

SIMULAÇÃO DE EMBARQUE EM AERONAVE

Aluno: Igor Massanobu Hashimoto Araujo
Orientador: Prof. Dr. Murilo Sartorato

Banca Examinadora:

- Murilo Sartorato (Orientador)
- Gabriel Pereira Gouveia da Silva (Examinador)
- Lucas Daniel Del Rosso Calache (Examinador)

Os formulários de avaliação e a ata da defesa, na qual consta a aprovação do trabalho, devidamente assinados pela banca encontram-se no prontuário eletrônico do aluno.

São João da Boa Vista, 24 de novembro de 2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais e familiares, que me auxiliaram em cada momento difícil.

*“You can ’t just throw open the gates like funneling cattle into a chute. That ’s not for us, we are
primates after all’
(CGP Grey)*

RESUMO

Entre os procedimentos realizados entre um pouso e a próxima decolagem, o embarque é aquele que leva mais tempo e o que possui maior potencial de melhoria. Considerando que uma diminuição neste tempo é interessante para a companhia aérea e para o passageiro, propostas que melhorem o processo de embarque podem economizar dinheiro da empresa e melhorar a experiência das pessoas. Assim, diversos trabalhos foram realizados para estudar este problema, realizando experimentos práticos e computacionais, além de propor melhorias que levam diferentes aspectos em consideração. Neste trabalho, diferentes métodos de embarque foram simulados e comparados utilizando um código em Python, adotando hipóteses da literatura para comparar alguns métodos de embarque, tomando o tempo total, o tempo de entrada e "em pé" de cada passageiro. Foi possível perceber que entre os métodos estudados, os de trás para frente foram piores que os outros, com um tempo total mais alto, com uma velocidade de entrada mais lenta e com passageiros que ficam mais tempo em pé. Além disso, propõe-se um procedimento para organizar os passageiros na fila, similar ao algoritmo de *bubble sort*, de forma embarque primeiro os passageiros ao fundo da aeronave. Utilizando o mesmo código para verificar o procedimento, variando a quantidade de pessoas que aplicam o procedimento, percebeu-se que para os métodos aleatório, de fora para dentro e de pirâmide reversa, houve uma diminuição no tempo de embarque para uma grande faixa de passageiros que aplicam o procedimento, com uma diminuição de até 5 minutos. Mas, para mais de 95% de aplicação, todos os métodos de embarque mostraram aumento no tempo total.

Palavras-Chave: Simulação por computador; Transporte Trânsito de passageiros; Python (Linguagem de programação de computador).

ABSTRACT

Among the processes done between the arrival and the next departure, boarding is the one that takes the most time and has the greatest potential for improvement. Considering that reducing this time is relevant for the airline and the passenger, strategies that improve this process can reduce costs from the company and improve customer experience. So, several studies have been on this problem, conducting practical experiments and computational analysis, as well as proposing improvements taking different aspects into account. This study simulated and compared different boarding methods using a Python code based on literature assumptions, and taking the total time, the entering time and the “standing up” time from each passenger. Results showed that, among the boarding strategies considered, the back-to-front ones were worse than others, taking more time, with a slower entering speed and passengers standing up for a longer period. In addition, a procedure is proposed for organizing the passengers in line, similar to the bubble sort algorithm, so that the back passengers enter first. Using the same code to verify the method, varying the amount of people applying the procedure, it is noticed that for random, outside-in and reverse pyramid methods, there was a reduction in total boarding time for a big range of passengers that apply the procedure, up to 5 minutes saved. But, for more than 95% of utilization, all boarding methods showed an increase in boarding time.

Keywords: Computer simulation; Transportation Passenger traffic; Python (Computer program language).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Diagramas dos métodos de embarque.	16
Figura 2	Malha da simulação utilizando ASEP	17
Figura 3	Modelo de Aeronave para simulação de evento discreto	18
Figura 4	Imagem da animação feita durante a simulação.	21
Figura 5	Fluxograma do objeto aeronave.	23
Figura 6	Fluxograma do objeto passageiro.	25
Figura 7	Gráfica de convergência da simulação.	28
Figura 8	Comparação do tempo total de embarque com a literatura.	29
Figura 9	Gráfico do tempo total de embarque para cada método utilizando BoxPlot.	29
Figura 10	Gráfico do tempo de entrada na aeronave em função da ocupação.	30
Figura 11	Gráficos do tempo entre a entrada na aeronave e se sentar em função da ocupação.	32
Figura 12	Histogramas do tempo entre entrada e se sentar sobrepostos.	32
Figura 13	Histogramas do tempo entre a entrada e se sentar para cada método de embarque.	33
Figura 14	Gráficos do tempo total de embarque em função da aplicação da nova estratégia.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros considerados nas simulações	27
Tabela 2 – Tabela dos dados estatísticos para o tempo total de embarque, em minutos. .	30
Tabela 3 – Taxa de entrada de passageiros para cada método.	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

B2F	<i>Back-to-Front</i>
WMA	<i>Window-Middle-Isle</i>
ASEP	<i>Asymetric simple exclusion process</i>
P. Rev.	Pirâmide Reversa

LISTA DE SÍMBOLOS

d_t	Passo de tempo
v	Velocidade do passageiro
s	Tamanho do passageiro
d	Dado de distância do passageiro
d_f	Dado de distância até assento do passageiro
t_s	Tempo de acomodação do passageiro
n_{ok}	Quantidade de passageiros que adotam a nova estratégia
α	Fator de escala da distribuição de Weibull
β	Fator de forma da distribuição de Weibull
σ	Desvio padrão
US\$	Dólar dos Estados Unidos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	PROCESSO DE EMBARQUE	14
2.2	MÉTODOS DE EMBARQUE	14
2.3	MÉTODOS DE SIMULAÇÃO APLICADOS NA LITERATURA	17
2.3.1	Processo de Exclusão Simples Assimétrico	17
2.3.2	Simulação de evento discreto	18
2.3.3	Simulação baseada em agente	19
2.3.4	Programação inteira mista	19
2.3.5	Estudos experimentais	20
3	METODOLOGIA	21
3.1	AERONAVE	21
3.2	PASSAGEIRO	23
3.2.1	Modelagem do tempo de acomodação	26
3.2.2	Embaralhamento	26
3.2.3	Parâmetros de simulação	26
3.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1	SIMULAÇÃO DOS MÉTODOS DE EMBARQUE	28
4.2	PROPOSTA PARA DIMINUIÇÃO DO TEMPO DE EMBARQUE	34
4.2.1	Procedimento proposto	34
4.2.2	Simulação da proposta	34
5	CONCLUSÃO	36
	REFERÊNCIAS	38
	APÊNDICE A – PSEUDOCÓDIGO DO OBJETO AERONAVE	40
	APÊNDICE B – PSEUDOCÓDIGO DO OBJETO PASSAGEIRO	41

1 INTRODUÇÃO

O tempo entre um pouso e o preparo para a próxima decolagem, processo chamado de "*Turnaround time*" ou "*Airplane turn-time*", é necessário realizar o desembarque, a carga e descarga de bagagem, limpeza da cabine, abastecimento da *galley* e o embarque, sendo este o processo que leva mais tempo, mas que também possui maior oportunidade de melhoria. Assim, considerando que cada minuto da aeronave em solo custa para a companhia aérea aproximadamente US\$30 (Nyquist; McFadden, 2008), e que a empresa realiza 500 voos diários, reduzir em apenas 1 minuto o tempo de embarque resulta em uma economia de US\$5475000. Portanto um estudo adequado deste problema é de interesse da empresa aérea, mas também dos passageiros, pois uma redução no tempo melhora sua experiência percebida (Jaehn; Neumann, 2015) e diminui o risco de problemas com conexões. Para isso existem diferentes métodos de embarque, criados para tentar melhorar o processo. Entre eles estão: de fora para dentro, de trás pra frente, de pirâmide reversa e aleatório, onde são explicados mais adiante neste trabalho.

Assim, diversos trabalhos foram feitos para estudar este processo. Entre os métodos utilizados estão: modelos práticos, utilizando voluntários e seções de aeronave com câmeras para análise de vídeo (Ren; Xu, 2018); coleta de dados em casos reais, também utilizando câmeras no interior do avião (Schultz, 2017; Coppens *et al.*, 2018); e simulações computacionais, aplicando, entre outros métodos, o Processo de Exclusão Simples Assimétrico (Schultz; Kunze; Fricke, 2013; Schultz, 2017), simulação de evento discreto (Landeghem; Beuselinck, 2002; Zeineddine, 2017; Moreira *et al.*, 2023) e simulação baseada em agente (Delcea *et al.*, 2018; Delcea *et al.*, 2019; Kobbaey; Bilquise; Naqi, 2023). E, além de tomar o tempo total para diferentes métodos de embarque, alguns estudos também consideram os efeitos da: quantidade de bagagem por passageiro, da taxa de ocupação e conformidade entre outros aspectos.

Também, estratégias para minimizar o tempo de embarque foram propostas, entre elas: utilizando um tapete com indicações dos assentos (Wallace, 2009) e a ordenação ótima dos passageiros que minimiza o tempo de embarque, encontrado por Steffen (2008).

Porém, em aplicações reais alterações são feitas no método de embarque, pois, alguns passageiros possuem prioridade, com necessidades especiais ou para maior tarifa da passagem, e também dependendo da bagagem de mão (LATAM, 2025; Brasileiras, 2019). Além disso, um método complexo ou com muitos grupos pode dificultar o gerenciamento das pessoas no portão de embarque, em que passageiros viajando juntos e famílias ficam em grupos separados. Considerando estas dificuldades, propõe-se um meio para reduzir o tempo de embarque de maneira que não dependa do método adotado pela companhia aérea, sendo um processo aplicado pelos passageiros.

Dado tudo que foi exposto, o presente trabalho simulou o embarque em uma aeronave inspirada no Airbus A320 utilizando um código escrito em Python considerando diferentes métodos de embarque, então os resultados obtidos foram analisados e comparados com a

literatura, e, uma proposta para diminuição no tempo de embarque foi simulada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Entre os diversos trabalhos realizados para estudar o problema, algumas hipóteses e estratégias de embarque são comumente adotados, e estas considerações são explicadas a seguir.

2.1 PROCESSO DE EMBARQUE

Os passageiros entram em fila, onde não é possível ultrapassar uns aos outros por conta do estreito corredor, então andam até seu assento, e quando chegam na fileira especificada guardam sua bagagem e então se sentam. Porém, durante este processo de acomodação podem ocorrer dois problemas que devem ser considerados, as interferências de corredor e de assento.

A interferência de assento é causada quando passageiros já sentados devem se levantar para que outro consiga passar. Neste caso, é possível considerar diferentes tipos de embaralhamento de passageiros, que dependem de quais lugares estão ocupados. Esses tipos são, em ordem crescente de complexidade: sem interferência, quando não é necessário que outros se levante, com somente o assento do corredor ocupado, com somente o assento do meio ocupado e com ambos corredor e meio ocupados. Este tempo pode ser calculado de diferentes maneiras, em Kobbaey, Bilquise & Naqi (2023) a distância e o número de lugares ocupados foi utilizado, enquanto Schultz, Kunze & Fricke (2013), Schultz (2017) considerou o número de movimentos necessários para cada caso.

A interferência de corredor é causada pois os passageiros não podem se ultrapassar, assim, quando um passageiro chega em sua fileira ele trava o corredor, fazendo todas as pessoas atrás dele esperarem até que se acomode. Nota-se que, um passageiro a frente daquele que trava o corredor pode continuar seu caminho, assim, se uma pessoa imediatamente atrás de outra em processo de acomodação tivesse embarcado à frente, ela poderia seguir até sua fileira sem aguardar, diminuindo o tempo de embarque.

Também considera-se que um passageiro nunca irá contra o sentido da fila, por exemplo caso tenha se sentado no local errado e deva retornar ao assento correto. Esta suposição é feita por conta da dificuldade na modelagem do algoritmo, mas, conversando com profissionais da área, o autor descobriu que apesar de ocorrer em voos reais o acontecimento não é comum, portanto a consideração de simplificação do modelo é razoável.

2.2 MÉTODOS DE EMBARQUE

Diferentes estratégias de embarque foram desenvolvidas, pois é necessário considerar não só o tempo, mas também problemas como a organização dos passageiros no portão, membros da mesma família em grupos diferentes e necessidade da companhia aérea para priorizar passageiros.

Assim, os métodos de embarque mais comumente estudados são:

- **Aleatório:** Não existe um grupo, passageiros entram por ordem de chegada. É fácil de implementar, mas pode não ser ótimo (Figura 1a).
- **De trás para frente:** Ou *Back to Front (B2F)*, em que passageiros são separados em grupos, e o embarque começa do fundo até a frente, reduzindo a interferência de corredor. Para um número reduzido de grupos, geralmente são utilizados três (Figuras 1b e 1c), é viável organizar os passageiros no portão e manter pessoas viajando juntas em um mesmo grupo.
- **De fora para dentro:** Ou *Window Middle Aisle (WMA)*, onde passageiros sentados na janela embarcam primeiro, seguidos do assento do meio e então do corredor. Este método visa eliminar a interferência de assento, mas tende a separar passageiros viajando juntos em grupos diferentes (Figura 1d).
- **Pirâmide Reversa:** Este método separa os grupos de forma que o embarque é realizado de trás para frente e ao mesmo tempo de fora para dentro, formando uma pirâmide, com objetivo de reduzir as interferências de corredor e assento (Figura 1e).
- **Steffen:** Neste método uma fila ideal é necessária, em que passageiros embarcam em ordem, em apenas um lado, de trás pra frente em fileiras alternadas, minimizando a interferência de corredor, e começando pela janela, eliminando interferência de assento. A fila segue fazendo o mesmo para o outro lado do avião, seguindo este padrão para os assentos restantes, para o meio e para o corredor. Apesar de ser praticamente impossível de aplicar este método, é incluído por ser o ideal teórico (Figura 1f).

Também a Figura 1 mostra estes métodos, onde os passageiros são chamados para embarque seguindo em ordem crescente o número indicado.

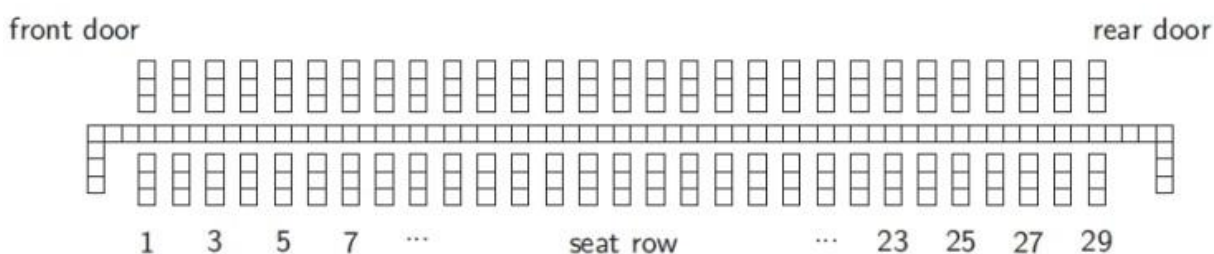
2.3 MÉTODOS DE SIMULAÇÃO APLICADOS NA LITERATURA

Para estudar o problema do embarque, é possível fazer experimentos práticos, obtendo dados de voos reais ou utilizando voluntários para variar parâmetros mais facilmente. Porém, utilizar métodos computacionais é uma maneira mais prática para simular o problema, onde simplificações e hipóteses são adotadas, um algoritmo é utilizado e valores como o de tempo total de embarque são obtidos. Assim, diferentes métodos de simulação foram utilizados para avaliar o embarque, e alguns deles são mostrados a seguir.

2.3.1 Processo de Exclusão Simples Assimétrico

Utilizando o Processo de Exclusão Simples Assimétrico (*asymmetric simple exclusion process* - ASEP), Schultz, Kunze & Fricke (2013), Schultz (2017) simularam o embarque em uma malha baseada na distribuição de assentos de um Airbus A320, com células iguais de tamanho 0,4 x 0,4 m, como mostra a Figura 2. O passageiro entra na aeronave, a cada passo de tempo se desloca para a próxima célula vazia a frente, a não ser que ela esteja ocupada, até chegar ao seu assento, guarda sua bagagem bloqueando a fila e senta. Assumindo velocidade de 0,8 m/s e passo de tempo de 0,5 s, a posição dos passageiros é atualizada utilizando uma estratégia de atualização sequencial embaralhada.

Figura 2 – Malha da simulação utilizando ASEP



Fonte: Elaborado por Schultz, Kunze & Fricke (2013)

Apesar do movimento no corredor depender apenas do próximo passageiro, o tempo para se sentar leva em consideração o número de bagagens e também a ocupação dos outros assentos, pois pode ser necessário realizar um embaralhamento onde passageiros já sentados devem sair para o próximo passar. Para modelar este procedimento Schultz (2017) utilizou dados obtidos em voos reais. Com isso, outros estudos e o presente trabalho utilizaram seus modelos. Assim, uma explicação detalhada deste cálculo é mostrada em seções seguintes.

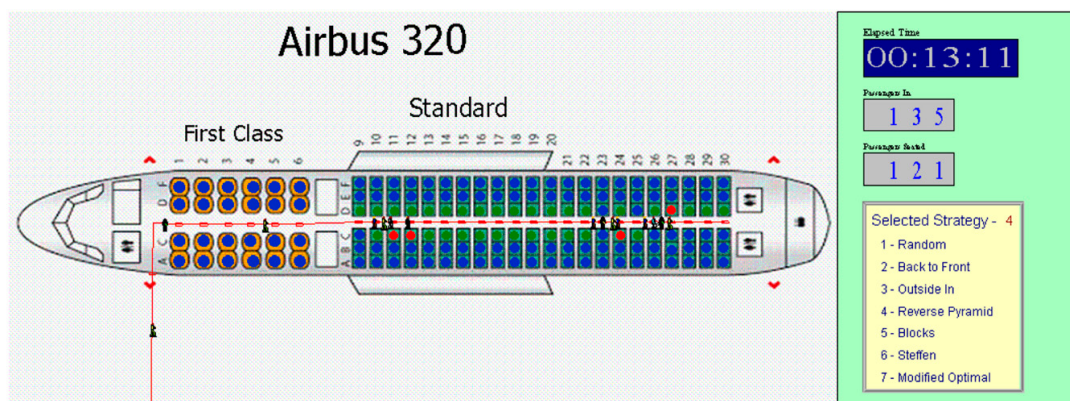
Outros problemas como ocupação do compartimento de bagagens e passageiros que andam contra o sentido de embarque não foram considerados.

2.3.2 Simulação de evento discreto

O *software* Arena foi utilizado por Landeghem & Beuselinck (2002), usando um modelo de simulação de evento discreto, para simular diversos métodos de embarque, variando a ordem de entrada baseada: grupos, fileiras, posições e assentos. A aeronave utilizada possui um total de 132 assentos, composto por 23 fileiras, onde a primeira e última possuem 3 assentos, e as outras possuem 6 assentos. Os autores também consideram a ocupação dos compartimentos de bagagem, e passageiros que se sentam no lugar errado e devem sair quando o passageiro correto chega. Em ambos casos, pode acontecer de uma pessoa ter que andar contra o sentido da fila, para procurar um compartimento para sua bagagem ou chegar a seu assento correto, mas a forma como esse efeito foi modelado não foi explicada.

Utilizando o mesmo *software*, uma simulação também foi desenvolvida por Moreira *et al.* (2023), considerando fatores de velocidade e tempo de acomodação similares a Schultz (2017), considerando além da entrada imediata de passageiros, uma entrada seguindo uma exponencial de 3,7 segundos. Porém, o Airbus A320 modelado considera a separação entre primeira classe e econômica, sendo as 6 primeiras fileiras com 4 assentos, duas fileiras vazias e as últimas 22 com 6 assentos, como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Modelo de Aeronave para simulação de evento discreto



Fonte: Elaborado por Moreira *et al.* (2023)

Simulações de evento discreto também foram usadas por Zeineddine (2017) para estudar diferentes métodos de embarque e comparar seus resultados com a estratégia proposta, que gera a ordem de entrada baseada nas interferências causadas por *cliques* (grupo de passageiros viajando juntos). Neste caso, a aeronave utilizada possui 20 fileiras de 6 assentos, totalizando 120 assentos e variou-se a quantidade de passageiros com bagagem de 40% a 80%, a porcentagem de passageiros em *cliques* de 25% a 75% e o seu tamanho de 2 a 6 passageiros. O estudo também considera a ocupação de bagagem dos *bins* e entrada de passageiros a cada 9 segundos.

2.3.3 Simulação baseada em agente

O *software* Netlogo foi utilizado por Delcea *et al.* (2018), Delcea *et al.* (2019), Kobbaey, Bilquise & Naqi (2023) para realizar uma simulação baseada em agente, considerando um *layout* inspirado no Airbus A320, com um único corredor, 30 fileiras de 6 assentos cada, sem considerar separação entre econômica e executiva, similar ao modelo da Figura 2.

Em Delcea *et al.* (2019) a simulação considera apenas embarque por duas portas, frontal e traseira, por ser utilizado quando os passageiros chegam à aeronave de ônibus, propondo estratégias de melhoria para este caso específico. E Delcea *et al.* (2018) compara métodos de embarque focando na entrada aleatória sem assentos marcados, portanto os passageiros escolhem seus lugares. Em ambos trabalhos a velocidade do passageiro depende de sua bagagem, e especialmente em Delcea *et al.* (2019) existe a distinção entre bagagem grande e pequena.

O estudo feito por Kobbaey, Bilquise & Naqi (2023) compara diferentes métodos de embarque e propõe uma estratégia, considerando o impacto: da quantidade de bagagem no compartimento, da taxa de ocupação e de conformidade (taxa de passageiros que não respeitam os grupos). Sua simulação calcula o tempo de acomodação calculando o tempo para guardar a bagagem $t_{bagagem}$ considerando a ocupação do compartimento, e o atraso causado pela interferência de assento t_{atraso} . Este tempo é obtido fazendo:

$$t_{bagagem} = 2 + (0,5 \times (n_{comp} + n_{bag})) \times n_{bag} \quad (1)$$

E:

$$t_{atraso} = 2 \times (dist \times n_{ocup}) \quad (2)$$

Onde n_{comp} e n_{bag} são o número de bagagens já no compartimento e a serem guardadas, e, $dist$ e n_{ocup} são a distância entre do corredor até o assento e o número de lugares ocupados neste caminho. Por conta do método utilizado, o tempo da simulação foi medido em *ticks*.

2.3.4 Programação inteira mista

A linguagem de programação *Python* foi utilizada por Willamowski & Tillmann (2022) para resolver o problema do embarque. Para as hipóteses adotadas, provaram a complexidade NP-Difícil de alguns métodos de embarque e então, com parâmetros similares a Schultz (2017) e um modelo de programação inteira mista, utilizaram o otimizador Gurobi 9.1.0 para minimizar o tempo de embarque para aeronaves de: 10 fileiras com 2 assentos por fileira, 20 fileiras e 2 assentos, 20 fileiras e 4 assentos e 30 fileiras e 6 assentos. O trabalho também estudou os distúrbios causados por eventos prováveis, sendo eles: passageiros atrasados, passageiros que não seguem o grupo de embarque correto e variações nos parâmetros do passageiro (pois os valores utilizados na simulação podem ser diferentes dos reais).

2.3.5 Estudos experimentais

Estudos experimentais também foram realizados para análise do problema. Ren & Xu (2018) usou um modelo de um Boeing 737-800 para simular diferentes métodos de embarque. A estrutura consiste de uma seção de aeronave com 12 fileiras de 6 assentos, um corredor central e os respectivos compartimentos de bagagens. Câmeras também foram instaladas para coletar dados de interferências de assento e corredor, tempo para guardar bagagem, entre outros comportamentos menores. Em Coppens *et al.* (2018) câmeras foram instaladas para avaliar 3 voos diferentes, onde as gravações foram utilizadas para estudar as interferências e o comportamento de passageiros, que não tinham conhecimento das câmeras. Também, usando 5 fileiras de 6 assentos em um Boeing 737 e 30 voluntários, quatro simulações de embarque foram realizadas para estudar uma proposta que considera a disposição das bagagens. Além disso, observações em campo foram utilizadas por Schultz (2017) para calibrar os modelos estocásticos e comparar com resultados de simulações, e também por Hutter, Jaehn & Neumann (2019) para verificar o impacto no tempo de embarque dos fatores de: número de passageiros, capacidade do avião e quantidade de bagagem, além de comparar seus resultados com outros trabalhos.

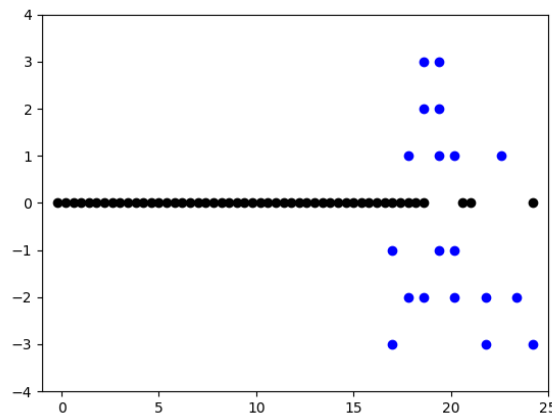
3 METODOLOGIA

Um código em Python foi desenvolvido para simular o embarque considerando uma aeronave de corredor único, com entrada de passageiros apenas pela porta frontal, e hipóteses semelhantes às consideradas na literatura. As bibliotecas utilizadas para a criação deste código foram:

- Numpy, para tratamento de dados;
- Pandas, para tratamento e armazenamento de dados;
- Matplotlib, para geração de gráficos.

Assim, um objeto para a aeronave foi criado para trabalhar os dados referentes aos assentos, e um objeto para cada passageiro, que lida com o "andar" e o tempo para se acomodar no assento. Fluxogramas explicando o funcionamento de cada objeto são mostrados na Figura 5 e Figura 6, e pseudocódigos também são colocados em Apêndice. Também, animações foram criadas utilizando Matplotlib para visualizar e verificar o funcionamento da simulação. A Figura 4 mostra uma foto de uma animação, onde os pontos pretos representam os passageiros no corredor, e os azuis aqueles já sentados.¹

Figura 4 – Imagem da animação feita durante a simulação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

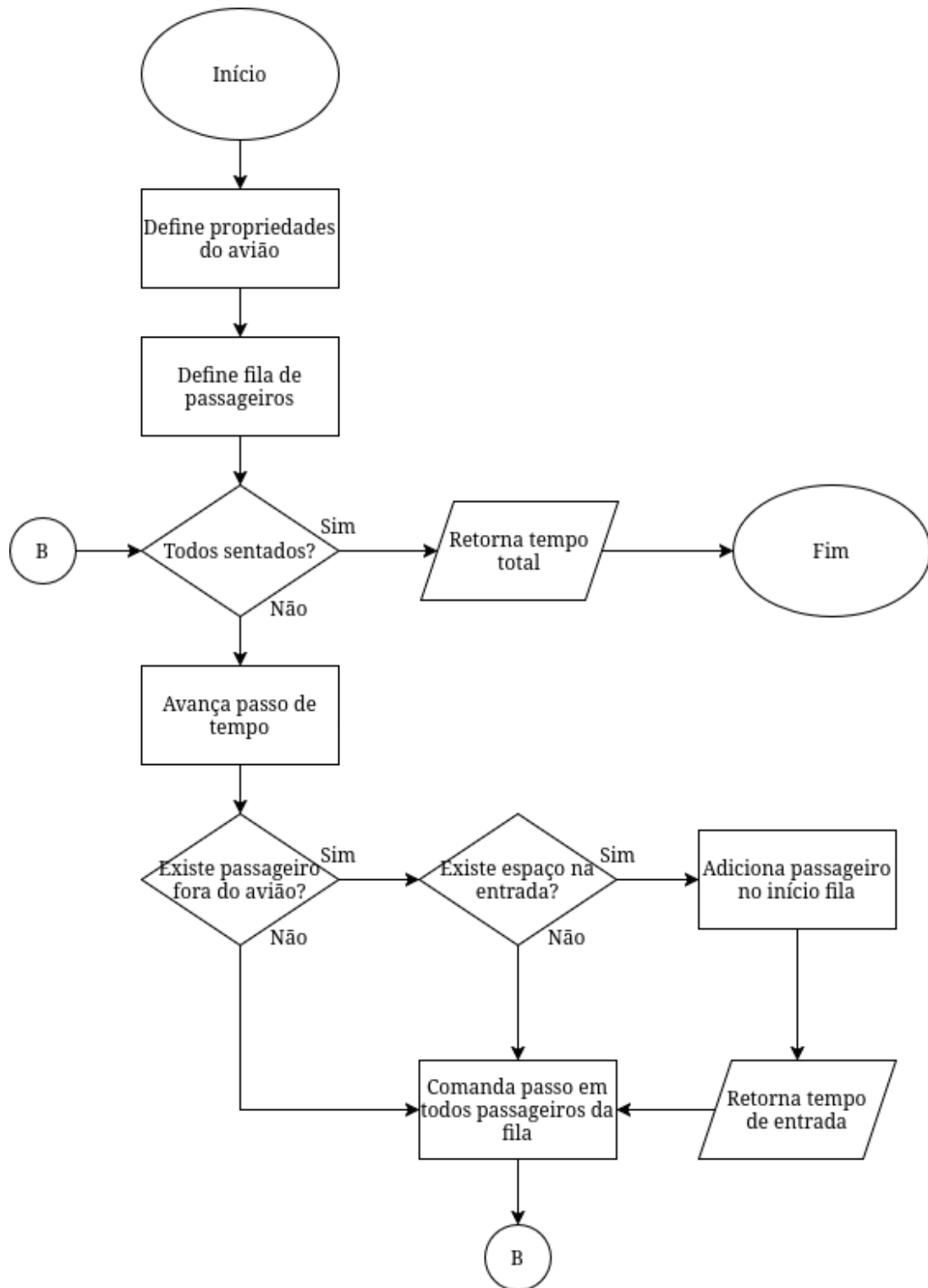
3.1 AERONAVE

O objeto aeronave é responsável por: Calcular a distância de caminhada até cada assento, anotar a disponibilidade dos assentos, identificar qual será o tipo de embaralhamento necessário e simular o passo de tempo. No início da execução são definidos a distância da entrada até o primeiro assento, o espaço entre fileiras, a disposição dos assentos, e também o passo de tempo

¹ Animações em GIF e o código utilizado está disponível em: <https://github.com/ImhAraujo/boardingSim>

adotado dt . Então, o objeto cria uma lista com todos os assentos e a distância da entrada até cada fileira, que será usada para gerar a fila de embarque, e também define todos como estando livres. A cada passo de tempo, os passageiros são comandados em ordem a avançar, começando pelo mais a frente, e, caso haja espaço na entrada, um novo é colocado. Quando um passageiro chega à fileira especificada, o objeto define aquele assento como ocupado, e retorna o embaralhamento necessário, usado para calcular o tempo de acomodação.

Figura 5 – Fluxograma do objeto aeronave.



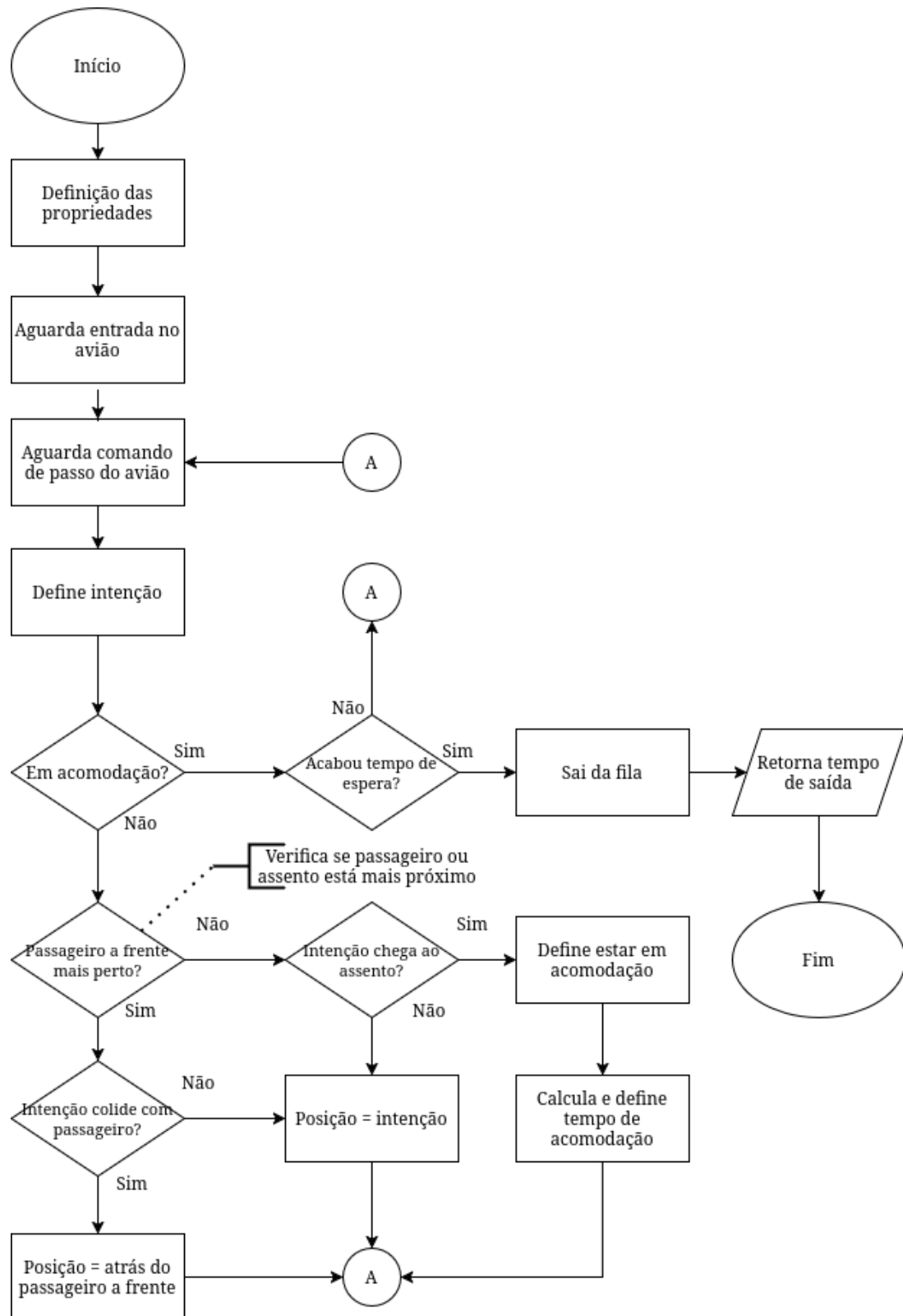
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 PASSAGEIRO

O objeto passageiro possui os dados de velocidade v , tamanho s , número de bagagens, assento e distância até o mesmo d_f . Também, é responsável pelo seu deslocamento sem causar

uma colisão com o passageiro a frente, e calcular o tempo para acomodação. No início da execução, a fila de embarque é gerada a partir dos assentos fornecidos pela aeronave formando uma lista de passageiros, definindo também o número de bagagens de cada um. Para fazer o deslocamento, o objeto guarda sua posição atual d e também uma intenção d_i , sendo a o ponto que ele pretende estar no próximo passo de tempo, calculado por $d_i = d + vdt$. Quando um passo de tempo é comandado pela aeronave, o passageiro verifica se sua intenção irá causar uma colisão com o próximo passageiro ou chegar em seu assento, o que acontecer primeiro, atualizando sua posição e intenção. Caso tenha chegado ao seu destino d_f , o passageiro permanece parado no local por um tempo de acomodação t_s e então é removido da fila. Para o calculo deste tempo, a aeronave irá fornecer o embaralhamento necessário, e, com base também no número de bagagens, calcular o tempo de acomodação t_s . Para se assemelhar a outros trabalhos, os modelos propostos por Schultz (2017) foram utilizados, e são descritos a seguir.

Figura 6 – Fluxograma do objeto passageiro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1 Modelagem do tempo de acomodação

A modelagem do tempo de acomodação e a distribuição de bagagens por passageiro foi feita baseada no trabalho de Schultz (2017).

A quantidade de bagagens por passageiro considerada foi, 60% dos passageiros possuem 1 peça de bagagem, 30% possuem 2 peças e 10% possuem 3 peças.

O tempo para se sentar foi modelado dependendo de diferentes fatores estocásticos, utilizando distribuições triangulares que precisam de três valores: mínimo, moda e máximo. Os fatores e as distribuição consideradas {mínimo, moda, máximo} foram:

- {6 s, 9 s, 20 s} para o tempo de resposta de todos os passageiros;
- {1,8 s, 2,4 s, 3 s} para o movimento entre assentos.

Para se aproximar das medidas obtidas em casos reais, o tempo para guardar uma peça de bagagem utilizada foi uma distribuição de Weibull com fator de escala $\alpha = 1,7$ e fator de forma $\beta = 16,0$ s ao invés de uma distribuição triangular.

3.2.2 Embaralhamento

Durante o processo de acomodação, passageiros já sentados podem ter que se levantar para que o próximo chegue ao seu assento. O tempo que esse processo leva foi modelado em função do número de movimentos realizados. Por exemplo, se não há interferência o passageiro apenas se senta, então 1 movimento, mas se o assento no corredor já está ocupado é necessário que: a pessoa saia do assento, o próximo entre na fileira, e os dois andem um assento, então 4 movimentos. Assim, os casos de interferência e o número de movimentos são:

- Acesso sem interferência: 1 movimento;
- Assento do corredor bloqueado: 4 movimentos;
- Assento do meio bloqueado: 5 movimentos;
- Assentos do meio e corredor bloqueados: 9 movimentos.

Então, o tempo de acomodação foi calculado somando: uma tomada para o tempo de reação, uma tomada para cada peça de bagagem, uma tomada para cada movimento necessário.

3.2.3 Parâmetros de simulação

Foi utilizada uma aeronave inspirada em um Airbus A320, com entrada apenas pela porta da frente onde os passageiros entram imediatamente um após o outro. Outros parâmetros considerados são mostrados na Tabela 1, escolhidos para se aproximar dos trabalhos de Schultz, Kunze & Fricke (2013), Schultz (2017), Landeghem & Beuselinck (2002), Moreira *et al.* (2023), Delcea *et al.* (2018), Delcea *et al.* (2019), Kobbay, Bilquise & Naqi (2023).

Tabela 1 – Parâmetros considerados nas simulações

Parâmetro	Valor
Velocidade do passageiro v	0,8 m/s
Distância entre assentos	0,8 m
Distância até o primeiro assento	2,4 m
Número de fileiras	30
Número de assentos por fileira	6
dt	0,1 s

Fonte: Elaborado pelo autor

3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Como valores aleatórios são tomados para geração da fila, distribuição de bagagem e tempo de acomodação, o método de Monte Carlo foi utilizado.

Com os parâmetros da aeronave e dos passageiros escolhidos, inicialmente uma fila aleatória é criada, e então ordenada de acordo com o método de embarque selecionado (se o método for aleatório nada é feito). Depois, as bagagens são colocadas aleatoriamente seguindo a distribuição escolhida, e esta será a fila de entrada. E durante a execução, o tempo de acomodação é calculado aleatoriamente seguindo as distribuições descritas anteriormente.

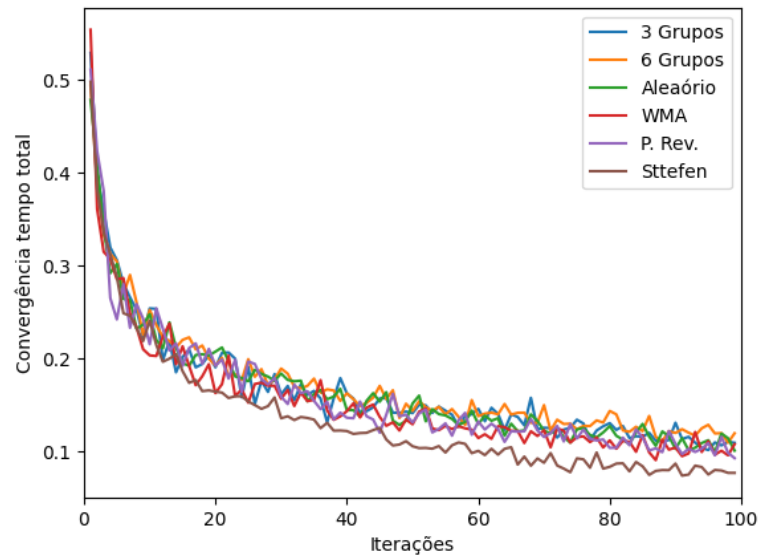
Então, para os métodos de embarque escolhidos foram realizadas diversas rodadas, em que foram tomados os dados de: tempo total de embarque, tempo que entra um novo passageiro na aeronave e o tempo que cada passageiro leva entre entrar na aeronave e se sentar (tempo "em pé"). Com isso, os valores de média, mínimo, máximo, quartis e desvio foram obtidos, gráficos relacionando o tempo médio de entrada em função do progresso do embarque, do tempo médio "em pé" em função do progresso e histogramas foram criados.

Também, para estudar o procedimento proposto, variou-se o número de passageiros que seguem a estratégia, realizando 100 rodadas em cada caso, e a média do tempo total de embarque foi calculada em função da quantidade de passageiros que aplicam o procedimento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os métodos de embarque considerados foram escolhidos para se aproximar da literatura, sendo eles: Aleatório, B2F com 3 grupos, B2F com 6 grupos, WMA, Pirâmide Reversa e de Steffen. Então, utilizando o algoritmo descrito anteriormente, 100 rodadas foram realizadas para cada método, e um gráfico de convergência comparando o tempo total de embarque e a média, mostrado na Figura 7, em que os valores tendem a convergir com o aumento das iterações.

Figura 7 – Gráfica de convergência da simulação.

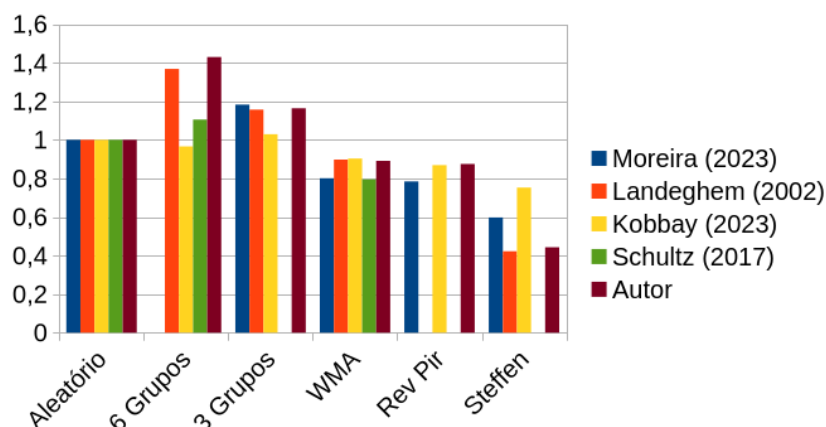


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1 SIMULAÇÃO DOS MÉTODOS DE EMBARQUE

Um gráfico comparando o tempo médio de embarque de cada método com a literatura é mostrado na Figura 8. Como diferentes tomadas de tempo foram utilizadas, os resultados foram normalizados com relação ao seu respectivo método aleatório. Os tempos obtidos por diferentes autores oscilam em semelhança dependendo do método de embarque, em que, os resultados para 6 Grupos e Steffen mostraram grande divergência, enquanto os outros aparecem relativamente próximos. Apesar disso, o presente estudo se aproximou dos resultados obtidos por Landeghem & Beuselinck (2002), aplicando o método de evento discreto para simulação.

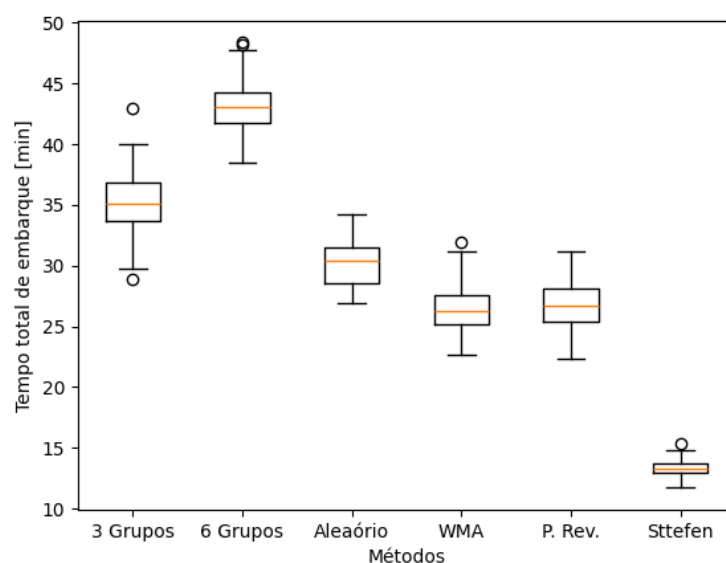
Figura 8 – Comparação do tempo total de embarque com a literatura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para comparar os diferentes métodos de embarque, os dados relativos ao tempo total são apresentados em um BoxPlot na Figura 9, e os valores quantitativos mostrados na Tabela 2. Excluindo o caso ideal de Steffen, os gráficos mostram que as estratégias WMA e de Pirâmide reversa resultam em um menor tempo de embarque, com WMA sendo ligeiramente melhor, seguido do aleatório e então 3 grupos e 6 grupos. Também é possível perceber que, com exceção do ideal, que existe uma variação de aproximadamente 10 minutos entre o menor e o maior tempo para todos os casos. Este grande intervalo é causado pela dependência do método em efeitos aleatórios, sendo a formação da fila e o tempo de acomodação. Este efeito é percebido por conta do caso ideal, onde a fila de embarque é constante e a variação dos resultados é menor.

Figura 9 – Gráfico do tempo total de embarque para cada método utilizando BoxPlot.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para verificar o progresso do embarque, um gráfico relacionando o tempo em que um

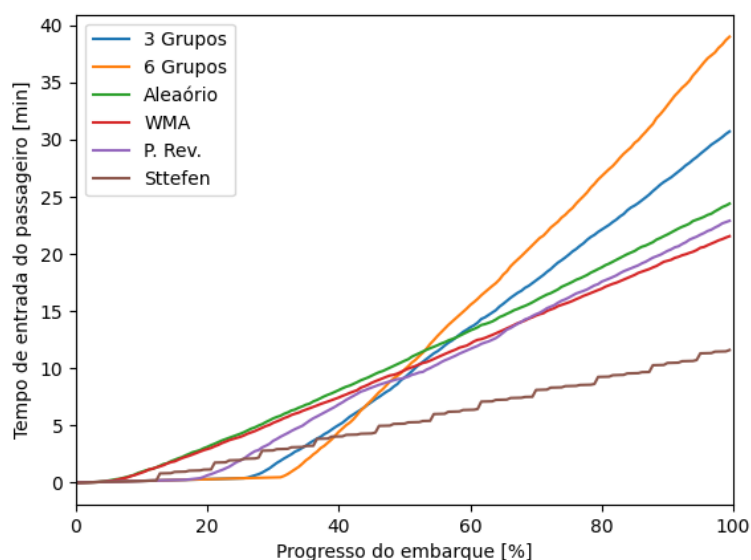
Tabela 2 – Tabela dos dados estatísticos para o tempo total de embarque, em minutos.

Método de Embarque	Média	σ	Mínimo	Q25	Q50	Q75	Máximo
3 Grupos	35,1	2,3	28,9	33,7	35,1	36,8	42,9
6 Grupos	43,2	2,1	38,5	41,8	43,1	44,3	48,4
Aleatório	30,2	1,8	26,9	28,5	30,4	31,5	34,3
WMA	26,4	1,8	22,6	25,5	26,2	27,6	32,0
Pirâmide Reversa	26,9	2,0	22,4	25,4	26,8	28,2	31,2
Sttefen	13,4	0,7	11,7	12,9	13,4	13,8	15,7

Fonte: Elaborado pelo autor

passageiro entra na aeronave em função da porcentagem de ocupação dos assentos é mostrado na Figura 10. Nele, é possível perceber que: com os métodos 3 Grupos, 6 Grupos e de Pirâmide Reversa, muitos passageiros entram rapidamente no início, pois nestes casos o primeiro grupo possui assentos mais para o final do corredor. Também, a inclinação da curva indica a taxa de entrada na aeronave, assim, no método de 6 Grupos os passageiros entram mais devagar na aeronave, seguido de 3 Grupos, então os métodos Aleatório, WMA e Pirâmide Reversa a uma taxa similar, e o caso ideal de Sttefen sendo o mais rápido. Os valores em min/passageiro calculando a inclinação de cada curva utilizando uma regressão linear são mostrados na Tabela 3.

Figura 10 – Gráfico do tempo de entrada na aeronave em função da ocupação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 – Taxa de entrada de passageiros para cada método.

Método de Embarque	Taxa de entrada em min/passageiro
3 Grupos	0,236
6 Grupos	0,318
Aleatório	0,148
WMA	0,148
Pirâmide Reversa	0,152
Sttefen	0,071

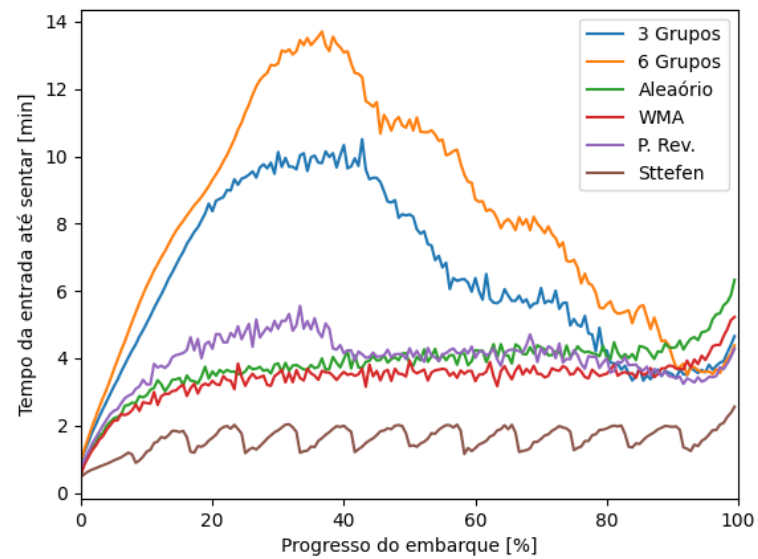
Fonte: Elaborado pelo autor

A percepção do passageiro sobre a qualidade do embarque também é relevante, então foram tomados o tempo que cada passageiro leva entre a entrada e se sentar.

Com isso, um gráfico deste tempo médio em função da ocupação foi criado, Figura 11, também, histogramas considerando as cem rodadas, e portanto um total de 18000 medidas, foram criados, mostrados sobrepostos na Figura 12 e separados na Figura 13.

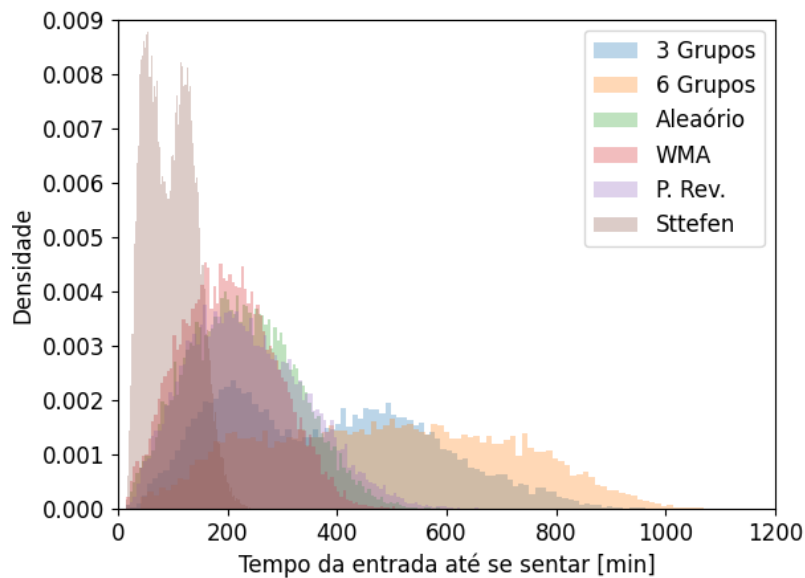
A Figura 11 mostra que nos métodos de 3 Grupos e 6 Grupos, na maior parte do processo, em média, os passageiros demoram mais que 5 minutos até se sentar, com picos em 10 e 13 minutos respectivamente. Enquanto isso, os métodos Aleatório e WMA permanecem aproximadamente constantes, entre 3 e 5 minutos, pela maior parte do processo. O método da Pirâmide Reversa também apresenta um comportamento similar, salvo por um pequeno pico próximo de 30% do embarque. O método de Sttefen apresentou uma forma de dente de serra, causada pelas sequências de embarque que dependem somente do passageiro que está se sentando mais próximo da entrada. Verificando o histograma da Figura 12, o método de Steffen mostra um tempo muito menor que os outros, e os métodos 3 Grupos, Aleatório, WMA e Pirâmide Reversa mostram um pico próximo de 200 segundos. Então, comparando com os histogramas separados, a Figura 13a mostra ser bimodal com picos em 200 segundos e 500 segundos, assim, o segundo pico possui valor aproximado do máximo na Figura 11, e a Figura 13e mostra distorcida à direita, com pico em 200 segundos. Esta assimetria deve estar relacionada com o primeiro grupo de embarque, que possui assentos deslocados para o fim da fila, assim, no início os passageiros andam mais antes de encontrar interferência. Para o método de 6 Grupos, Figura 13b, o mesmo deveria ocorrer, mas o histograma mostra ser mais uniforme, principalmente entre 200 e 800 segundos. Os métodos Aleatório e WMA, Figuras 13c e 13d, aparentam ser simétricos com picos em 250 e 200 segundos respectivamente.

Figura 11 – Gráficos do tempo entre a entrada na aeronave e se sentar em função da ocupação.



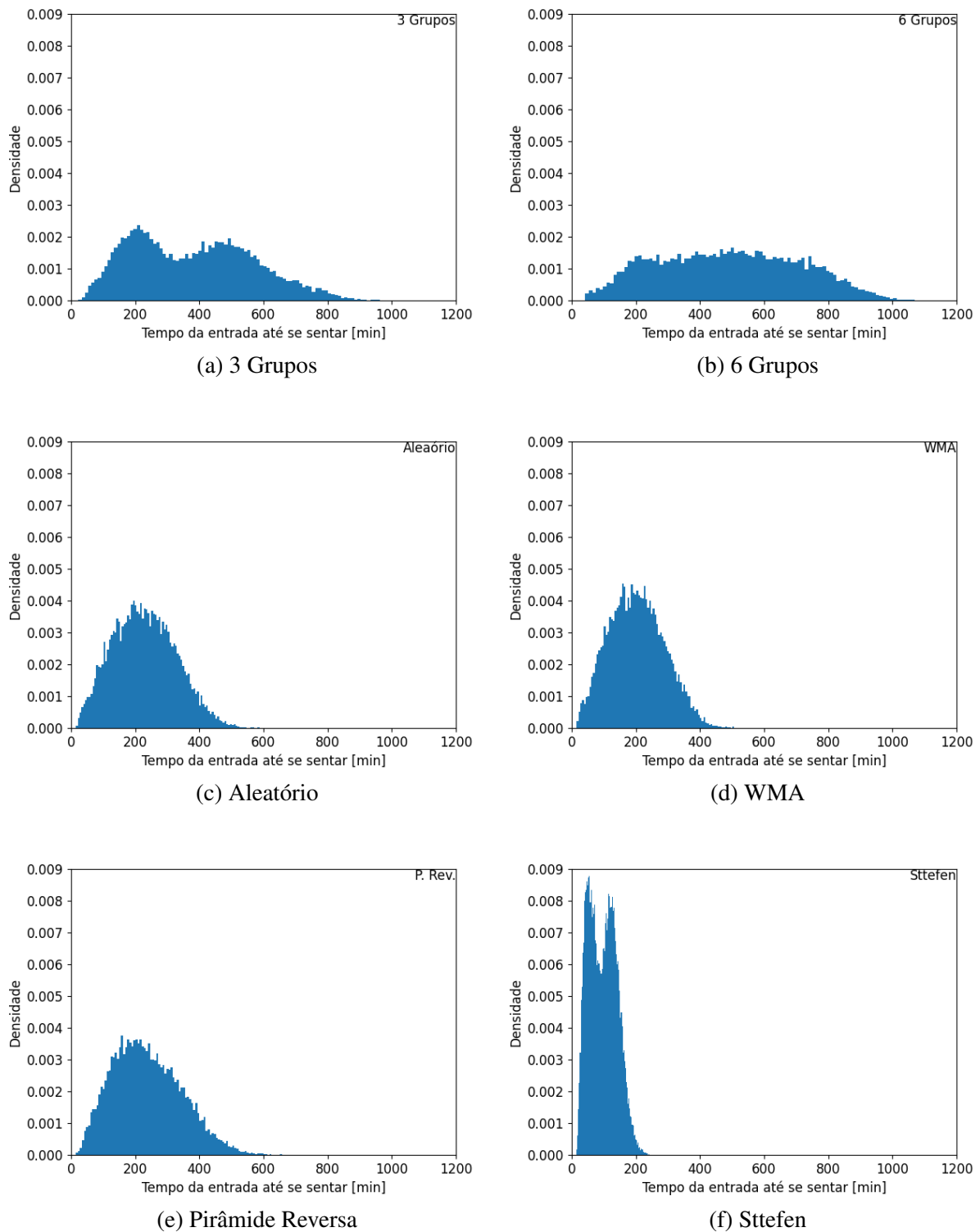
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 12 – Histogramas do tempo entre entrada e se sentar sobrepostos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 – Histogramas do tempo entre a entrada e se sentar para cada método de embarque.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 PROPOSTA PARA DIMINUIÇÃO DO TEMPO DE EMBARQUE

Lembrando que uma inversão de posição na fila pode impedir uma interferência de assento, propõe-se que os passageiros apliquem um procedimento similar ao algoritmo de ordenação *bubble sort*, de forma que os passageiros nas últimas fileiras embarquem primeiro.

4.2.1 Procedimento proposto

Dado que uma simples troca de posição na fila pode reduzir o tempo de embarque, quando o passageiro com assento mais longe entra primeiro, a proposta é de que os passageiros realizem o seguinte procedimento:

Na fila para o embarque, um passageiro que aplica o método pergunta a pessoa atrás dele o número do assento, e caso este seja maior que o próprio eles trocam de lugar, aplicando novamente caso o mesmo se aplique com o próximo passageiro.

Assim, aquele que aplica o método terá um aumento mínimo em seu tempo de embarque, por conta do pequeno aumento na distância percorrida, mas, com ambos os passageiros progredindo paralelamente para o embarque, o tempo total deve diminuir.

Porém, percebe-se também que no caso em que todos aplicam este método o tempo de embarque aumenta, pois os passageiros estarão agrupados para chegar a mesma fileira, onde apenas se acomoda uma pessoa por vez. A vantagem deste procedimento é de não depender do método de embarque utilizado pela companhia aérea, sendo realizado apenas pelos passageiros enquanto aguardam na fila. Além disso, o passageiro irá realizar o procedimento com objetivo de ganhar tempo, e sempre é interessante para pessoa de trás ganhar uma posição na fila.

4.2.2 Simulação da proposta

Para verificar a proposta, simulações foram feitas variando o número de passageiros que aplicam o procedimento n_{ok} , de 0 (igual ao caso anterior) até 180 (capacidade máxima), onde n_{ok} é o número de passageiros que aplicam o procedimento.

O algoritmo funciona de maneira similar ao realizado anteriormente, mas, após a geração da fila de embarque são selecionados n_{ok} passageiros que aplicam o procedimento até não ser mais possível, e o algoritmo segue normalmente.

Assim, foram feitas 100 rodadas para cada simulação, considerando os métodos de embarque usados anteriormente excluindo o de Sttefen, por já ser uma organização feita por assento.

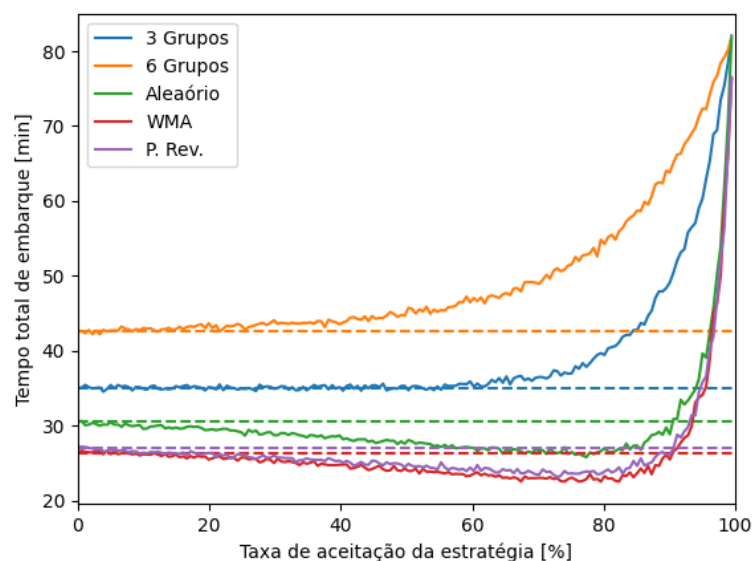
Então, um gráfico da média do tempo total de embarque em função da porcentagem de passageiros que aplicam a estratégia é mostrado na Figura 14, onde a linha tracejada é o tempo sem adotar a estratégia, adicionada para melhorar a comparação.

Assim, percebe-se que os métodos Aleatório, WMA e de Pirâmide Reversa apresentam diminuição no tempo até 90% de aplicação da estratégia, chegando a um ganho de 5 minutos em 80% de aplicação.

Mas, para 3 Grupos e 6 Grupos o tempo de embarque apenas aumentou, causado provavelmente por já agruparem passageiros em fileiras próximas, impossibilitando melhora significativa.

Também, para valores elevados de aceitação todos os métodos aumentaram o tempo de embarque, como era esperado.

Figura 14 – Gráficos do tempo total de embarque em função da aplicação da nova estratégia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÃO

Diferentes métodos de simulação já foram usados para estudar o processo de embarque, e comparando seus resultados para tempo total após normalizar pela estratégia aleatória, as estratégias de 6 Grupos e de Steffen mostraram grande discrepância, enquanto os outros foram mais semelhantes.

Nota-se que a velocidade do passageiro e seu tamanho foram mantidas constantes neste trabalho, mas o código utilizado permite variação nesses parâmetros. Portanto é possível realizar um estudo que varie esses valores, por exemplo em função da quantidade de bagagem. Também, é possível considerar outros métodos de embarque, apenas variando a fila de entrada.

Com relação às estratégias de embarque, com exceção do caso ideal, todos possuem uma variação de aproximadamente 10 minutos entre o pior e o melhor caso. Também, o WMA e de Pirâmide Reversa mostraram semelhança nos resultados, com o primeiro ligeiramente mais rápido. Então, os métodos de embarque com menor tempo total calculado foram em ordem: Steffen, WMA, Pirâmide Reversa, Aleatório, 6 Grupos e 3 Grupos. Portanto, o método aleatório "sem organização" mostrou um desempenho melhor que os dois últimos métodos.

Além disso, verificando o tempo de entrada na aeronave percebe-se que para 3 Grupos, 6 Grupos e de Pirâmide Reversa muitos passageiros entram rapidamente no início do embarque, em que os dois primeiros resultam depois em uma taxa mais lenta de entrada.

E, por estar relacionado com a percepção das pessoas com relação ao embarque, o tempo entre a entrada e se sentar de cada passageiro foi analisado. Percebe-se que os métodos Aleatório, WMA e de Pirâmide Reversa mostraram que a maior parte dos passageiros ficam aproximadamente 4 minutos em pé. Enquanto isso, os métodos de 3 Grupos e 6 Grupos mostram um aumento elevado neste tempo durante o embarque.

Apesar deste e também de outros trabalhos mostrarem estratégias que diminuam o tempo de embarque, e portanto diminuindo custo da empresa aérea, é comum quebrar o método para dar prioridade para passageiros que pagam tarifas mais altas. Portanto, utilizar um método que valorize os passageiros mais "caros" pode ser mais vantajosos que um método que economize tempo.

Por fim, a proposta para redução no tempo de embarque mostrou em média uma melhora de até 5 minutos para os três melhores métodos de embarque, com uma piora apenas após uma porcentagem elevada de aceitação do procedimento. Enquanto isso, os dois piores métodos tiveram apenas aumento do tempo com a aceitação do procedimento.

Portanto, considerando que os métodos Aleatório, WMA e Pirâmide Reversa são aplicados, que uma aceitação extrema do procedimento não aconteceria e que é um processo que independe das preferências da companhia aérea, a proposta aparenta ser uma maneira viável para redução no tempo de embarque.

Porém, o procedimento é limitado pela vontade das pessoas, então seria necessário conscien-

tizar os passageiros de que, por um pequeno aumento no tempo individual, pode ser possível diminuir o tempo total de embarque para todos. Portanto, a proposta deve ser mais eficaz em locais onde as pessoas estão mais dispostas a interagir com as outras para realizar a ordenação, e de sacrificar um pouco de ganho pessoal para um bem maior.

REFERÊNCIAS

- AZUL LINHAS AÉREAS BRASILEIRAS. **O embarque da Azul está melhor**. 2019. 1 vídeo (2m:29s). Disponível em: <https://youtu.be/zdfcEyctlh8?si=VF1bVmeXuKfyzvFu>. Acesso em: nov. 2025.
- COPPENS, J. *et al.* Improving airplane boarding time: a review, a field study and an experiment with a new way of hand luggage stowing. **International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace**, Daytona Beach, v. 5, n. 2, 2018. ISSN 2374-6793.
- DELCEA, C. *et al.* Investigating the random seat boarding method without seat assignments with common boarding practices using an agent-based modeling. **Sustainability**, Basel, v. 10, n. 12, p. 4623, dez. 2018. ISSN 2071-1050.
- DELCEA, C. *et al.* Methods for accelerating the airplane boarding process in the presence of apron buses. **IEEE Access**, New York, v. 7, p. 134372–134387, 2019. ISSN 2169-3536.
- HUTTER, L.; JAEHN, F.; NEUMANN, S. Influencing factors on airplane boarding times. **Omega**, Amsterdam, v. 87, p. 177–190, set. 2019. ISSN 0305-0483.
- JAEHN, F.; NEUMANN, S. Airplane boarding. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 244, n. 2, p. 339–359, jul. 2015. ISSN 0377-2217.
- KOBBAEY, T.; BILQUISE, G.; NAQI, A. A. A Comparative Evaluation of Airplane Boarding Strategies with a Novel Method for Sustainable Air Travel. *In*: 2023 9th International Conference on Information Technology Trends (ITT), 9., 2023, Dubai. **Proceedings [...]**. Dubai: IEEE, 2023. p. 169–174.
- LANDEGHEM, H. V.; BEUSELINCK, A. Reducing passenger boarding time in airplanes: A simulation based approach. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 142, n. 2, p. 294–308, out. 2002. ISSN 0377-2217.
- LATAM. **Embarque por grupos**. , 2025. Disponível em: <https://www.latamairlines.com/br/pt/experiencia/aeroporto/embarque>. Acesso em: nov. 2025.
- MOREIRA, H. *et al.* Analysis of boarding strategies on an airbus a320 using discrete event simulation. **Sustainability**, Basel, v. 15, n. 23, p. 16476, dez. 2023. ISSN 2071-1050.
- NYQUIST, D. C.; MCFADDEN, K. L. A study of the airline boarding problem. **Journal of Air Transport Management**, Amsterdam, v. 14, n. 4, p. 197–204, jul. 2008. ISSN 0969-6997.
- REN, X.; XU, X. Experimental analyses of airplane boarding based on interference classification. **Journal of Air Transport Management**, Amsterdam, v. 71, p. 55–63, ago. 2018. ISSN 0969-6997.
- SCHULTZ, M. Aircraft boarding - data, validation, analysis. *In*: TWELFTH USA/EUROPE AIR TRAFFIC MANAGEMENT RESEARCH AND DEVELOPMENT SEMINAR, 12., 2017, Seattle. **Proceedings [...]**. Seattle: [s.n.], 2017.

SCHULTZ, M.; KUNZE, T.; FRICKE, H. Boarding on the critical path of the turnaround. *In: TENTH USA/EUROPE AIR TRAFFIC MANAGEMENT RESEARCH AND DEVELOPMENT SEMINAR*, 10., 2013, Chicago. **Proceedings** [...]. Chicago: [s.n.], 2013. v. 10, p. 11.

STEFFEN, J. H. Optimal boarding method for airline passengers. **Journal of Air Transport Management**, Amsterdam, v. 14, n. 3, p. 146–150, maio 2008. ISSN 0969-6997.

WALLACE, R. **The Flying Carpet System**. , 2009. Disponível em: <https://www.roundpegin.com/the-flying-carpet-system>. Acesso em: ago. 2025.

WILLAMOWSKI, F. J. L.; TILLMANN, A. M. Minimizing airplane boarding time. **Transportation Science**, Catonsville, v. 56, n. 5, p. 1196–1218, set. 2022. ISSN 1526-5447.

ZEINEDDINE, H. A dynamically optimized aircraft boarding strategy. **Journal of Air Transport Management**, Amsterdam, v. 58, p. 144–151, jan. 2017. ISSN 0969-6997.

APÊNDICE A – PSEUDOCÓDIGO DO OBJETO AERONAVE

Algoritmo Objeto_aviao

```

  Var n_fileiras , n_assentos_p_fileira: inteiro
  Var distancia_entre_assentos , distancia_inicial: real
  Var dt: real

```

Inicio

```

  assentos = gera_assentos(n_fileiras , n_assentos_p_fileira ,
                           distancia_entre_assentos , distancia_inicial)
  passageiros_fora = define_fila_passageiros(assentos)
  passageiros_dentro = []
  t = 0

```

```

  Enquanto passageiros_fora != [] E passageiros_dentro != []

```

```

    t = t + dt

```

```

    Se existe_espaco_no_inicio E passageiro_fora != [] Entao

```

```

        novo_passageiro = remove_de(passageiros_fora)

```

```

        inicia(novo_passageiro)

```

```

        Adiciona novo_passageiro Em passageiros_dentro

```

```

        Retorna t # Tempo que passageiro entra

```

```

    Fim Se

```

```

  Para passageiro Em passageiros_dentro

```

```

      comanda_passo(passageiro)

```

```

      Se sentado(passageiro) Entao

```

```

          Remove passageiro De passageiros_dentro

```

```

          Retorna t # Tempo que passageiro se senta

```

```

      Fim Se

```

```

  Fim Para

```

```

  Fim Enquanto

```

```

  Retorna t # Tempo Total

```

Fim

APÊNDICE B – PSEUDOCÓDIGO DO OBJETO PASSAGEIRO

Algoritmo Objeto_passageiro

Var n_bagagem: inteiro

Var tamanho, velocidade, dt: real

Var assento

Inicio

distancia_assento = calcula_distancia(assento)

aguarda_inicio() # Espera o comando do Objeto_aviao

d = 0

sentado = falso

em_acomodacao = falso

Enquanto sentado = falso

intencao = d + velocidade*dt

aguarda_passo() # Espera o comando de passo do Objeto_aviao

Se em_acomodacao E t_espera >= t Entao

sentado = verdadeiro

Senao Se distancia_passageiro_frente() < distancia_assento Entao

Passageiro a frente esta mais proximo

Se intencao > distancia_passageiro_frente() Entao

Colisao com passageiro

d = distancia_passageiro_frente

Senao

d = intencao

Fim Se

Senao

Assento mais proximo

Se intencao > distancia_assento Entao

t_espera = t + calcula_tempo(n_bagagem)

em_acomodacao = verdadeiro

Senao

d = intencao

Fim Se

Fim Se

Fim Enquanto

Fim