

**Ministério da Educação**  
**Universidade Federal de Ouro Preto**  
**Escola de Minas**  
**Departamento de Engenharia de Produção, Administração e Economia**

CAROLINA DE OLIVEIRA CUNHA

**Modelagem Computacional para Otimização em  
Viagens Aéreas: Redução de Custos na Escolha de  
Itinerários com Dados Reais**

Ouro Preto  
2024

Carolina de Oliveira Cunha

**Modelagem Computacional para Otimização em Viagens  
Aéreas: Redução de Custos na Escolha de Itinerários com  
Dados Reais**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Produção.

Universidade Federal de Ouro Preto

Orientador: Prof. Dr. Helton Cristiano Gomes  
Coorientador: Prof. Me. Cristiano Luís Turbino de França e Silva

Ouro Preto  
2024



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Carolina de Oliveira Cunha**

**Modelagem computacional para otimização em viagens aéreas: redução de custos na escolha de itinerários com dados reais**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro(a) de Produção.

Aprovada em 27 de fevereiro de 2024.

### Membros da banca

Doutor - Helton Cristiano Gomes - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto  
Doutora - Irce Fernandes Gomes Guimarães - Universidade Federal de Ouro Preto  
Mestranda PPGEP - Larissa Aparecida Lopes de Souza - Universidade Federal de Ouro Preto

Helton Cristiano Gomes, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 27/02/2024.



Documento assinado eletronicamente por **Helton Cristiano Gomes, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/02/2024, às 15:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0674598** e o código CRC **DE3F4FAE**.

## Agradecimentos

Dedico este trabalho aos meus pais, Mônica e João, cujo amor incondicional e apoio me trouxeram até aqui. À minha família, especialmente meus irmãos Camila e Gabriel, e primas Júlia e Raquel, pela certeza de que onde quer que eu esteja, sempre tenho um porto seguro pra onde voltar.

Agradeço aos meus amigos, especialmente Renato, Carol, Isabella, Higor, Marlon, Jéssica e Bianca, pela companhia e apoio inestimável ao longo da minha jornada acadêmica. À Javi, por estar sempre presente, mesmo à distância.

Aos professores do ciclo básico e do Departamento de Engenharia de Produção, expresse minha profunda gratidão pelo conhecimento transmitido. Um agradecimento especial ao meu orientador, Helton, pelo apoio e ensinamentos fundamentais na realização desse trabalho, e ao meu coorientador, Cristiano, pela disponibilidade e interesse.

À UFOP pelo ensino público de qualidade.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho e para o meu crescimento pessoal e profissional durante os últimos anos.

*“Paciência é a companheira da sabedoria.”*  
*“O mundo é um livro, e quem não viaja lê só uma página.”*  
*Santo Agostinho*

## Resumo

O presente trabalho explora a interseção entre turismo, tecnologia e otimização, com foco em uma solução para o "Flying Tourist Problem"(FTP), onde um turista almeja visitar diversas cidades por avião dentro de uma janela de tempo pré definida, e cujo propósito é minimizar os custos com as passagens. A solução encontrada consiste em um conjunto de voos que o turista deveria adquirir, e foi encontrada através da modelagem do problema em Programação Linear Inteira (PLI), seguida de uma otimização computacional utilizando dados reais coletados de um metabuscador por meio de *web scraping*. Foram abordados conceitos relevantes relacionados ao turismo e à otimização, e realizou-se uma análise dos preços coletados. Os resultados destacam a complexidade e variabilidade dos preços das passagens, bem como a relevância prática da abordagem de otimização proposta para viajantes interessados em economia financeira e eficiência na escolha de rotas de viagem.

**Palavras-chave:** FTP, PLI, Otimização Computacional, Rotas de viagem.

## Abstract

The present work explores the intersection between tourism, technology, and optimization, focusing on a solution for the "Flying Tourist Problem"(FTP), where a tourist aims to visit several cities by plane within a predefined time window, with the purpose of minimizing travel costs. The solution consists of a set of flights that the tourist should acquire, found through modeling the problem based on Integer Linear Programming (ILP), followed by computational optimization using real data collected from a metasearch engine through web scraping. Relevant concepts related to tourism and optimization were addressed, and an analysis of the collected prices was conducted. The results highlight the complexity and variability of flight prices, as well as the practical relevance of the proposed optimization approach for travelers interested in financial savings and efficiency in choosing travel routes.

**Keywords:** FTP, ILP, Computational optimization, Travel Routes.

## Lista de abreviaturas e siglas

ACO	<i>Ant Colony Optimization</i>
TSP	<i>Travelling Salesman Problem</i>
PCV	Problema do Caixeiro Viajante
RPKs	<i>Revenue Passenger-Kilometers</i>
UNWTO	<i>World Tourism Organization</i>
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
TICs	Tecnologias de Informação e Comunicação
PRV	Problema do roteamento de veículos
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
PLI	Programação Linear Inteira
TDTSP	<i>Time-Dependent Traveling Salesman Problem</i>

## Lista de ilustrações

Figura 1 – Identificação de <i>outliers</i> . . . . .	30
Figura 2 – Identificação de outliers nos voos internos . . . . .	31
Figura 3 – Variação de preço por dia da semana nos voos de ida e volta para BH .	32
Figura 4 – Variação de preço por dia da semana nos voos internos . . . . .	32
Figura 5 – Visualizando a relação entre distâncias e preços em um gráfico de dispersão . . . . .	33
Figura 6 – Relação entre distâncias e preços para voos na Europa . . . . .	34
Figura 7 – Análise das tendências de preço ao longo do mês por destino Final . . .	35
Figura 8 – Análise da sazonalidade para destinos intermediários . . . . .	36
Figura 9 – Análise das variações de preço por destino para a cidade de origem . .	38
Figura 10 – Análise das variações de preço por destino para os destinos intermediários	39
Figura 11 – Rede da rota otimizada . . . . .	40

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Métodos da Pesquisa Operacional . . . . .	18
Tabela 2 – Códigos para busca . . . . .	27
Tabela 3 – Amostra dos dados obtidos . . . . .	28
Tabela 4 – Matriz de distâncias entre as cidades . . . . .	29
Tabela 5 – Resultado da otimização para $Tp=2$ . . . . .	41
Tabela 6 – Primeiro itinerário aleatório com $Tp=2$ . . . . .	42
Tabela 7 – Segundo itinerário aleatório com $Tp=2$ . . . . .	42

# Sumário

	Lista de ilustrações . . . . .	8
	Lista de tabelas . . . . .	9
1	INTRODUÇÃO . . . . .	11
1.1	Objetivo: . . . . .	12
1.2	Objetivos específicos: . . . . .	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO . . . . .	13
2.1	Turismo . . . . .	13
2.1.1	História do Turismo . . . . .	14
2.1.2	Turismo mochileiro . . . . .	15
2.2	Turismo e tecnologia . . . . .	15
2.2.1	Metabuscaadores e agencias online . . . . .	16
2.3	Conceitos de otimização . . . . .	17
2.4	Programação Linear Inteira . . . . .	19
2.5	O Problema do Caixeiro Viajante . . . . .	21
3	METODOLOGIA . . . . .	23
3.1	Classificação da pesquisa . . . . .	23
3.2	Formulação do problema . . . . .	23
3.3	Coleta de dados . . . . .	25
3.3.1	Escolha dos destinos, período de tempo e buscador . . . . .	26
3.3.2	Ajustes e execução . . . . .	27
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS . . . . .	28
4.1	Dados coletados . . . . .	28
4.2	Análise dos dados . . . . .	29
4.3	Resultado do modelo de otimização . . . . .	40
4.4	Comparação entre rotas alternativas . . . . .	41
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .	44
	REFERÊNCIAS . . . . .	46
	ANEXOS . . . . .	49
	ANEXO A – CÓDIGOS E DADOS UTILIZADOS . . . . .	50

# 1 Introdução

Nos últimos anos, o mercado de viagens tem passado por transformações significativas. As viagens aéreas tornaram-se um meio comum e acessível de transporte global. A pandemia de COVID-19 impactou fortemente o setor, mas à medida que as restrições foram sendo aliviadas em 2022, o mundo testemunhou uma rápida reconexão através das viagens aéreas.

Segundo a IATA (Associação Internacional de Transporte Aéreo), no primeiro semestre de 2023, houve um impressionante crescimento global de 47,2% nos RPKs (*Revenue Passenger-Kilometers*), métrica usada na indústria de aviação para medir a demanda de passageiros em companhias aéreas, em comparação com o mesmo período do ano anterior (International Air Transport Association (IATA), 2023).

Embora as regiões tenham experimentado padrões de recuperação variados, os RPKs internacionais totais cresceram 33,7% em relação a junho de 2022, destacando uma recuperação sólida. A declaração da IATA indica que, em junho de 2023, a Europa foi responsável por 30,8% da participação mundial no mercado de aviação total. Isso implica que quase um terço da atividade global de aviação, medida pelo mercado total, foi atribuído à Europa durante esse mês específico (International Air Transport Association (IATA) - Sustainability & Economics, 2023)

Após um período desafiador com uma perda acumulada de mais de US\$180 bilhões de 2020 a 2022, espera-se que a demanda de passageiros retorne aos níveis pré-pandemia em 2024. O setor enfrentou e superou desafios-chave, indicando uma trajetória positiva para o futuro do mercado de viagens.

Existe uma crescente disponibilidade de buscadores de voos, que em sua maioria, embora permitam encontrar preços e destinos mais baratos durante um período de tempo, não fornecem ferramentas para otimizar efetivamente as rotas de viagem, o que cria a necessidade de um estudo que aborde a otimização de rotas, beneficiando diretamente os viajantes ao economizar recursos financeiros. Essa pesquisa também está alinhada com as tendências tecnológicas e a constante mudança de preços de voos, abordando uma necessidade prática e relevante para os viajantes.

Alguns estudos recentes abordam esse problema como o "Problema do turista voador" (do inglês *the Flying Tourist Problem* - FTP) (SANTOS, 2019), ou o problema do mochileiro viajante *the Traveling Backpacker Problem* (TBP) (NAKAMURA, 2015), um problema multi-cidades, sendo definido como um caso especial do conhecido Problema do Caixeiro Viajante (TSP, na sigla em inglês). Mais especificamente, ele está relacionado à variação do Problema do Caixeiro Viajante dependente do tempo.

Com este trabalho, procura-se resolver o problema de forma ótima, ou seja, encontrar a melhor solução para uma solicitação específica do usuário, com destinos pré definidos e

dados reais coletados de um buscador através de um programa computacional. Para isso, será definida uma formulação de Programação Linear Inteira (PLI) para o problema.

### 1.1 Objetivo:

Criar uma ferramenta computacional para otimizar os custos de uma rota predefinida, segundo dados coletados de buscadores reais.

### 1.2 Objetivos específicos:

- Criar e implementar um código que possibilite extrair preços do buscador Kayak.
- Minimizar os custos de uma viagem com mesma origem e destino final, passando por  $n$  cidades por um determinado intervalo de dias.
- Realizar uma análise dos dados obtidos para tentar identificar padrões.

## 2 Referencial teórico

Este capítulo oferece uma visão geral de alguns conceitos de otimização necessários para a compreensão do trabalho. Também apresenta uma revisão breve dos problemas de planejamento de viagens encontrados na literatura, e o crescimento e importância do turismo na atualidade.

### 2.1 Turismo

A palavra "turismo", originada do latim "tornare" ou grego "tornos", tem a raiz na ideia de círculo, refletindo a noção de partir e eventualmente retornar ao ponto de origem. A Organização Mundial do Turismo (UNWTO) estabeleceu definições padronizadas para fins estatísticos, categorizando turistas como visitantes que permanecem 24 horas ou mais no país visitado, motivados por lazer, férias, saúde, estudos, religião, esportes, família, reuniões, missões, entre outros.

O mercado de turismo tem experimentado um crescimento significativo nas últimas décadas, marcado por uma queda nos preços de passagens aéreas e um aumento no número de aeroportos e conexões disponíveis. Relatórios do World Travel & Tourism Council (WTTC) sugerem que essa tendência de crescimento deve continuar. De acordo com a pesquisa anual mais recente do WTTC, em 2022, o setor de Viagens e Turismo registrou uma contribuição de 7,6% para o PIB global, representando um aumento de 22% em relação a 2021 e uma redução de apenas 23% em comparação com os níveis pré-pandêmicos de 2019. Além disso, houve a criação de 22 milhões de novos empregos, indicando um aumento de 7,9% em relação a 2021.

O Anuário do Transporte Aéreo 2022, divulgado pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), revela um aumento significativo nos indicadores do setor aéreo brasileiro, com aproximadamente 831 mil voos realizados, representando um crescimento de 39% em relação a 2021. Além disso, cerca de 98 milhões de passageiros foram transportados, indicando uma revitalização expressiva do setor. De acordo com um levantamento de dados realizado pelo Kayak, principal metabuscador de viagens do mundo, houve um aumento de buscas de voos em 2023 pelos brasileiros (KAYAK, 2023).

As opções de acomodação diversificaram-se com o surgimento de empresas bilionárias como a Airbnb e a popularização do *couchsurfing*, uma forma de hospedagem colaborativa em que os viajantes ficam temporariamente na casa de pessoas locais, oferecendo uma variedade de escolhas em diferentes faixas de preço. Além disso, o aumento do acesso à informação contribuiu para um aumento significativo no número de viajantes.

Essa expansão do mercado é evidente na proliferação de empresas relacionadas a viagens, incluindo redes de hotéis e companhias aéreas (BERNE; GARCIA-GONZALEZ;

MUGICA, 2012). Uma parte substancial desse crescimento pode ser atribuída à prevalência do turismo online. A internet não apenas forneceu uma nova plataforma para práticas de viagem existentes, ela transformou fundamentalmente a maneira como as pessoas abordam as viagens.

Uma análise do turismo online revela uma mudança no comportamento do consumidor, com indivíduos buscando uma maior personalização para suas viagens. Em vez de optar por pacotes prontos, os viajantes agora preferem personalizar suas viagens para atender às suas necessidades específicas. Como resultado, o planejamento independente de viagens superou as compras tradicionais por meio de agências de viagens (BERNE; GARCIA-GONZALEZ; MUGICA, 2012).

A prática de escolher e misturar diferentes destinos e suas atrações está se tornando cada vez mais comum, rompendo com a concepção anterior de ter que optar entre categorias fixas, como férias na praia, viagens culturais, passeios urbanos para escapadas curtas, ou outros arranjos uniformes (HOLLOWAY; HUMPHREYS, 2022).

### 2.1.1 História do Turismo

A história do turismo revela sua presença ao longo das sociedades desde a pré-história até os dias atuais, com motivações diversas, como comerciais, educacionais, religiosas e de lazer. Seu início remonta a eventos como a viagem da rainha de Sabá no século X a.C. e os primeiros jogos olímpicos na Grécia em 776 a.C. (BOSISIO, 2005; OLIVEIRA, 2002).

Deslocamentos comerciais no Oriente Médio e Egito, junto com práticas turísticas entre nobres na França nos séculos XVII, XVIII, XIX e XX, contribuíram para a evolução do setor (DIAS; SOIFER; FERREIRA, 2009). As Revoluções Francesa e Industrial nos finais do séculos XVIII e XIX, respectivamente, tiveram impacto significativo, com o caminho-de-ferro desempenhando papel crucial.

Após uma pausa durante a Segunda Guerra Mundial, o turismo ressurgiu com o desenvolvimento dos meios de transporte, especialmente o avião, na segunda metade do século XX. A história do turismo é dividida em três fases: o *Grand Tour*, a era Industrial e pós-industrial, marcada pela globalização. Atualmente, o turista moderno é caracterizado pela autonomia e fácil acesso a tecnologias e informações (MOLINA, 2003).

Ao longo dos séculos, o interesse pelas viagens persistiu, superando desafios financeiros, e o turismo transformou-se em um produto de consumo no século XX, impulsionado pelo crescimento econômico, mudanças geopolíticas e tecnológicas, e pelo aumento do tempo livre (HOLLOWAY; HUMPHREYS, 2022). A história do turismo reflete a busca humana por novas experiências, exploração de terras distantes e a transmissão de diversidade cultural ao longo dos séculos.

### 2.1.2 Turismo mochileiro

Os viajantes conhecidos como *backpackers* ou mochileiros são caracterizados por sua preferência por viagens econômicas e acessíveis, utilizando a infraestrutura local de serviços, como restaurantes, comunicação, transporte e facilidades. Esse estilo de viagem proporciona um contato mais próximo com a população local e permite uma imersão no estilo de vida da cidade visitada. Este grupo representa um subsetor do turismo econômico internacional, composto por indivíduos que planejam suas viagens de forma independente, sem depender de agências de viagens, utilizando ferramentas de tecnologia de comunicação para realizar pesquisas.

Os mochileiros geralmente viajam sozinhos ou em pequenos grupos, superando a média de frequência de viagens da população em geral. São abertos a novas experiências, mantendo, ao mesmo tempo, o interesse em explorar aspectos e locais considerados tradicionais de uma cultura. Este estilo de viagem reflete uma abordagem aventureira e autêntica, onde a liberdade e a espontaneidade desempenham um papel fundamental na experiência do viajante.

O termo "mochileiro" foi introduzido por Pears na década de 90 para designar um segmento específico no turismo (PARIS, 2008). Este setor atrai um público-alvo abrangente, que varia de 16 a 80 anos, mas encontra sua maior representação na faixa etária de 20 a 35 anos. Geralmente, são indivíduos que querem explorar o mundo e buscam minimizar os custos da viagem.

O turismo, essencialmente uma atividade econômica, é influenciado pelas condições financeiras do turista durante o processo de escolha. As condições econômicas impactam a disponibilidade de tempo para a viagem, o tipo de hospedagem, os passeios, a alimentação, o transporte e outros fatores que determinam as escolhas do viajantes.

Apesar das limitações financeiras, que podem ser uma escolha ou uma necessidade, os mochileiros fazem sacrifícios em transporte, lazer e alimentação para prolongar a viagem ou obter benefícios adicionais de lazer (OLIVEIRA, 2008). Essa abordagem reflete a dedicação desse grupo em priorizar a experiência, aventura e economia em detrimento ao luxo convencional.

## 2.2 Turismo e tecnologia

O desenvolvimento acelerado das Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs) nos últimos 20 anos causou um impacto significativo na indústria do turismo, redefinindo a competitividade de organizações e destinos. O setor de viagens e turismo foi pioneiro nas transformações trazidas pela Internet, com companhias aéreas oferecendo passagens diretamente online, e novos intermediários emergindo como forças dominantes (STANDING; BOYER, 2014).

As TICs se tornaram essenciais para o turismo, desempenhando papéis cruciais em

marketing, distribuição, promoção e coordenação da atividade turística. O impacto da Internet no turismo se reflete na expansão de pesquisas e áreas de estudo nesse campo (LAW; LEUNG; CHAN, 2020). A produção científica brasileira sobre as interações entre Turismo e Tecnologias de Informação e Comunicação tem experimentado um aumento significativo, especialmente a partir de 2014. Isso reflete a crescente importância acadêmica da temática, alinhada ao desenvolvimento e à adoção de novas tecnologias pela sociedade (SOARES et al., 2023).

O rápido avanço das TICs é fundamental para a competitividade do turismo, oferecendo ferramentas e soluções tecnológicas que se tornaram parte integrante da vida cotidiana. O crescimento das mídias sociais, em particular, tem transformado a forma como os turistas obtêm informações, permitindo uma prévia familiarização com destinos por meio de conteúdos online, blogs e sites (Cacho et al., 2014).

Atualmente, a Internet é um canal de distribuição ideal para o turismo, permitindo que consumidores e fornecedores se comuniquem diretamente e tirem proveito do acesso direto à informação a qualquer momento por meio de vários canais (LAW; LEUNG; CHAN, 2020).

Historicamente, as reservas de viagens eram realizadas por telefone ou por meio de um agente de viagens, mas a inovação em TICs e a proliferação da Internet na última década aumentaram a complexidade e alteraram a estrutura da distribuição de viagens, além de criar um novo ambiente competitivo. Essa evolução e transformação dos canais de distribuição de turismo aumentaram a concorrência, oferecendo mais opções aos consumidores e permitindo que eles pesquisem, comparem e reservem produtos de viagem adequados por conta própria (KIM; KIM; HAN, 2007)

Devido à conveniência e facilidade de compra online, as reservas eletrônicas logo se tornaram a norma, em vez da exceção (CHRISTODOULIDOU; CONNOLLY; BREWER, 2009).

### **2.2.1 Metabuscaadores e agencias online**

Nesse novo ambiente competitivo e em constante mudança, as Agencias Online de Viagem (OTA) rapidamente adquiriram uma grande parcela do mercado e hoje desempenham um papel fundamental na distribuição de viagens, representando 38% do total global (DUDÁS; BOROS; VIDA, 2017).

À medida que as tarifas aéreas se tornaram amplamente acessíveis na Internet, os viajantes passaram a ter a capacidade de comparar os preços mais baixos e efetuar compras a qualquer momento ao longo do ano, o que os tornou mais sofisticados e flexíveis em relação às datas e horários de partida (LAW; LEUNG; CHAN, 2020). No entanto, dado o interesse dos viajantes em avaliar rapidamente as opções de viagem e recorrer a inúmeros sites para comparar preços antes de finalizarem suas reservas, a abundância de sites de viagens impõe uma sobrecarga de informações aos consumidores. Conseqüentemente, o

processo de busca tornou-se demorado e desafiador para aqueles que desejam viajar de forma econômica. Essa dinâmica conduziu ao surgimento de metabuscadores de viagens, como Kayak, Skyscanner ou Momondo, que consolidam todas as informações essenciais para uma decisão de reserva, coletando dados de diversos sites e apresentando-os de forma centralizada (DUDÁS; BOROS; VIDA, 2017).

### 2.3 Conceitos de otimização

A otimização é uma disciplina essencial nas áreas de ciência da computação, matemática aplicada e engenharia.

Um problema de otimização pode ser visto como um problema de busca no qual o objetivo é encontrar as melhores soluções dentre todas as possíveis (solução ótima), considerando um conjunto de critérios para avaliar a qualidade dessas soluções. Essa avaliação baseada em critérios é representada como uma função matemática (conhecida como função objetivo) que recebe como entrada uma solução e retorna seu valor de qualidade (VIEIRA, 2018).

O espaço de busca representa todas as combinações possíveis das variáveis de decisão dentro das restrições estabelecidas. A exploração desse espaço é conduzida por algoritmos de otimização, que são métodos computacionais desenvolvidos para encontrar a solução ótima de maneira eficiente. Não existe um único método disponível para resolver eficientemente todos os problemas de otimização. Portanto, diversos métodos foram desenvolvidos para resolver diferentes tipos de problemas. Os métodos de busca ótima também são conhecidos como técnicas de programação matemática e são geralmente estudados como parte da Pesquisa Operacional (PO). A PO é um ramo que trata da aplicação de métodos e técnicas científicas à resolução de problemas de tomada de decisão e à busca das melhores ou ótimas soluções. O marco inicial da PO é frequentemente atribuído às ações militares no início da Segunda Guerra Mundial. Diante da urgência em alocar eficientemente recursos escassos para operações militares, os comandos britânico e norte-americano convocaram um grande número de cientistas para lidar com esses desafios. Essas equipes de cientistas foram pioneiras na área de PO, contribuindo significativamente para vitórias estratégicas, como na Batalha Aérea na Grã-Bretanha e na Batalha do Atlântico Norte (HILLIER; LIEBERMAN, 2013). Esses métodos posteriormente ficaram conhecidos como métodos da pesquisa operacional.

A Tabela 1 lista várias técnicas de programação matemática juntamente com outras áreas bem definidas da pesquisa operacional, incluindo as meta-heurísticas. A classificação apresentada não é única; é fornecida principalmente por conveniência por Rao (2019).

As técnicas de programação matemática são úteis para encontrar o mínimo de uma função de várias variáveis sob um conjunto prescrito de restrições. Técnicas de processos estocásticos podem ser usadas para analisar problemas descritos por um conjunto de variáveis aleatórias com distribuições de probabilidade conhecidas. Métodos estatís-

ticos permitem analisar dados experimentais e construir modelos empíricos para obter a representação mais precisa da situação física.

Tabela 1 – Métodos da Pesquisa Operacional

Mathematical programming or optimization techniques	Stochastic process techniques	Statistical methods
Calculus methods	Statistical decision theory	Regression analysis
Calculus of variations	Markov processes	Cluster analysis, pattern recognition
Nonlinear programming	Queueing theory	Design of experiments
Geometric programming	Renewal theory	Discriminate analysis (factor analysis)
Quadratic programming	Simulation methods	
Linear programming	Reliability theory	
Dynamic programming		
Integer programming		
Stochastic programming		
Separable programming		
Multiobjective programming		
Network methods: Critical Path Method (CPM) and Program (Project) Management and Review Technique (PERT)		
Game theory		
<i>Modern or nontraditional optimization techniques (including Metaheuristic optimization methods)</i>		
Genetic algorithms	Bat algorithm	Salp swarm algorithm
Simulated annealing	Honey Bee algorithm	Cuckoo algorithm
Ant colony optimization	Crow search algorithm	Water evaporation algorithm
Particle swarm optimization	Firefly algorithm	Passing vehicle search algorithm
Tabu search method	Harmony search algorithm	Runner-root algorithm
	Teaching-learning algorithm	Artificial immune system algorithm
	Fruitfly algorithm	Neural network-based optimization
		Fuzzy optimization

Fonte: (RAO, 2019)

Problemas de otimização podem ser classificados como contínuos ou discretos, dependendo se as variáveis de decisão podem assumir valores em um intervalo contínuo ou são restritas a valores discretos. Além disso, existem problemas multiobjetivo, nos quais a otimização ocorre simultaneamente em várias funções objetivas, muitas vezes conflitantes.

Segundo Rao (2019), a formulação matemática de um problema de otimização pode

ser definida como:

$$\begin{aligned} \text{Encontre } \mathbf{X} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix} & \text{ que minimize } f(\mathbf{X}), \\ \text{suj. às condições } & g_j(\mathbf{X}) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \\ & l_j(\mathbf{X}) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \end{aligned} \quad (2.1)$$

Onde  $\mathbf{X}$  é um vetor de  $n$  dimensões chamado vetor solução,  $f(\mathbf{X})$  é denominada função objetivo, e  $g_j(\mathbf{X})$  e  $l_j(\mathbf{X})$  são conhecidas como restrições de desigualdade e igualdade, respectivamente. O número de variáveis  $n$  e o número de restrições  $m$  e/ou  $p$  não precisam estar relacionados de nenhuma maneira. O problema declarado na Eq. (2.1) é chamado de problema de otimização com restrições.

A otimização desempenha um papel crucial em várias áreas, como logística, finanças, engenharia, aprendizado de máquina e design, contribuindo para a tomada de decisões eficientes e eficazes em uma ampla gama de contextos.

## 2.4 Programação Linear Inteira

O tema da programação linear pode ser definido de maneira bastante concisa. Ele está relacionado ao problema de maximizar ou minimizar uma função linear, cujas variáveis devem obedecer a um sistema de restrições lineares, sendo uma restrição uma equação ou desigualdade linear. Problemas desse tipo surgem de maneira natural e bastante elementar em muitos contextos, especialmente em problemas de planejamento econômico.

O tipo de problema de otimização de programação linear foi reconhecido pela primeira vez na década de 1930 por economistas que desenvolviam métodos para a alocação ótima de recursos. Durante a Segunda Guerra Mundial, George B. Dantzig, membro do grupo da Força Aérea, formulou o problema geral de programação linear e criou o método simplex de solução em 1947. Posteriormente, houve avanços significativos no desenvolvimento teórico e nas aplicações práticas da programação linear. Dentre todas as contribuições, os trabalhos teóricos de Kuhn e Tucker tiveram um impacto importante no desenvolvimento da teoria da dualidade na programação linear. Os trabalhos de Charnes e Cooper foram responsáveis pelas aplicações industriais da programação linear (RAO, 2019).

Embora vários outros métodos tenham sido desenvolvidos ao longo dos anos para resolver problemas de programação linear, o método simplex continua sendo o mais eficiente e popular para resolver problemas gerais de programação linear (RAO, 2019).

O desenvolvimento da programação linear é considerado um dos avanços científicos mais importantes do meio do século XX, e seu impacto desde 1950 tem sido extraordinário. Tornou-se uma ferramenta padrão que resultou em economias substanciais para

muitas empresas, incluindo até mesmo negócios de médio porte em vários países industrializados ao redor do mundo. Além disso, a aplicação da programação linear se expandiu rapidamente para diversos setores da sociedade.

Segundo Rao (2019), o problema geral de programação linear pode ser estabelecido nas seguintes formas padrão:

Forma escalar:

$$\text{Minimizar } f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

Suj. às restrições

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &= b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &= b_2 \\ &\vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &= b_m \\ x_1 &\geq 0 \\ x_2 &\geq 0 \\ &\vdots \\ x_n &\geq 0 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Forma matricial:

$$\begin{aligned} \text{Minimize } & c^T X \\ \text{Suj à } & aX = b \\ & X \geq 0 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Onde

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix}, \quad c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix}, \quad a = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}.$$

As características de um problema de programação linear, apresentadas na forma padrão, são as seguintes:

1. A função objetivo é do tipo minimização.
2. Todas as restrições são do tipo igualdade.
3. Todas as variáveis de decisão são não negativas.

Qualquer problema de programação linear pode ser expresso na forma padrão por meio de transformações.

## 2.5 O Problema do Caixeiro Viajante

O Problema do Caixeiro Viajante (PCV) é um problema clássico de otimização combinatoria que consiste em encontrar a rota mais curta através de um conjunto de  $N$  vértices, de modo que cada vértice seja visitado exatamente uma vez. Muitos algoritmos exatos e heurísticos foram desenvolvidos no campo da Pesquisa Operacional (PO) para resolver esse problema (DAHIYA; SANGWAN, 2018).

Dada uma coleção de cidades e a distância de viagem entre cada par delas, o PCV consiste em encontrar a maneira mais curta de visitar todas as cidades e retornar ao ponto de partida. Embora o enunciado pareça simples, sua resolução não é (REINELT, 2003). O PCV é um problema de otimização e possui um vasto espaço de busca, sendo considerado NP-difícil, ou seja, não existe um método eficiente conhecido para resolver o problema rapidamente conforme o número de cidades aumenta, o que significa que não pode ser resolvido em tempo polinomial (FOGEL, 1988).

O PCV é uma formulação clássica em vários domínios, incluindo teorias de roteamento e grafos (APPLEGATE; BIXBY; CHVÁTAL, ; GROSS; YELLEN, 2003). Ele também é frequentemente aplicado em outros cenários específicos de otimização, incluindo o Problema de Roteamento de Veículos (PRV) ou o sequenciamento em uma única máquina. Embora as versões simétricas em um grafo não direcionado sejam frequentemente contempladas, é comum encontrar outras variações que se fundamentam na contraparte assimétrica em um grafo direcionado, conforme destacado por Osaba et al. (2018).

É um dos problemas mais fundamentais no campo da ciência da computação na atualidade, sendo aplicado em muitos campos (DAHIYA; SANGWAN, 2018). Algumas outras aplicações incluem a fabricação de microchips, roteamento de pacotes de dados em GSM (*Global System for Mobile Communications* - Sistema Global para Comunicações Móveis), perfuração em placas de circuito impresso, etc. Em termos mais simples, se tivermos um conjunto de  $n$  cidades, podemos obter  $(n - 1)!$  rotas alternativas para cobrir todas as  $n$  cidades.

Os vários algoritmos de otimização propostos para o PCV são geralmente agrupados em abordagens exatas, heurísticas e metaheurísticas.

A maioria dos algoritmos exatos (LAPORTE, 1992a; LAPORTE, 1992b) baseia-se em uma formulação de Programação Linear Inteira (PLI), enquanto outros são baseados em técnicas de *Branch-and-Bound* (MORRISON et al., 2016) e *Minimal Spanning Tree* (DEVI; GEETHANJALI, 2020).

Existem também muitos métodos heurísticos para resolver tanto o PCV (ROKBANI et al., 2021; REGO et al., 2011) quanto o PRV (GAO et al., 2020).

Entre as abordagens mais comuns estão heurísticas de melhoria, como k-opt exchange (KHAN; MAITI; MAITI, 2017), heurísticas de construção, incluindo o vizinho mais próximo (LAPORTE, 1992a) e busca tabu (GLOVER; LAGUNA, 1998).

Nos últimos 30 anos, um grande interesse também foi dedicado ao uso de algoritmos meta-heurísticos para resolver o TSP. As meta-heurísticas podem ser vistas como heurísticas de ordem superior: elas usam uma heurística subjacente e guiam o algoritmo para produzir uma exploração eficiente do espaço de busca. A classe de meta-heurísticas é vasta e inclui algoritmos como o Simulated Annealing (KIRKPATRICK; GELATT; VECCHI, 1983), Algoritmo Genético (GOLDBERG, 2013), Colônia de Formigas (ACO) (DORIGO; GAMBARDELLA, 1997), entre outros (BRYANT, 2000). Além disso, atualmente tem-se explorado a utilização de aprendizado de máquina (*Machine Learning*) para a resolução do PCV (WU et al., 2021; ADAMO et al., 2023).

No contexto da otimização aplicada ao planejamento de viagens, a PLI emerge como uma abordagem particularmente adequada e eficaz devido à sua capacidade de lidar eficientemente com situações onde as decisões a serem tomadas estão sujeitas a restrições claras e lineares.

## 3 Metodologia

O problema de planejamento de viagem apresentado no Capítulo 1 consiste em auxiliar um viajante a encontrar as melhores datas para ir a cada destino em uma viagem de forma a minimizar o custo total de transporte. Este capítulo apresenta em detalhes os métodos utilizados para resolver esse problema, abrangendo a coleta de dados e modelagem matemática.

### 3.1 Classificação da pesquisa

De acordo com VENANZI e SILVA (2016), a metodologia de pesquisa exige uma classificação quanto à natureza, abordagem, objetivos e procedimentos técnicos. No contexto do presente trabalho, essa classificação segue o modelo proposto da seguinte maneira: em relação à natureza, a pesquisa é classificada como aplicada, uma vez que aborda um problema específico de maneira prática ao propor um modelo de otimização de custos de transporte para uma viagem. Quanto à abordagem, adota-se uma perspectiva quantitativa, buscando gerar dados numéricos para análise e resolução do problema. No que tange aos objetivos, a pesquisa segue uma abordagem exploratória, pois existe um problema explícito definido e, partir dele, é proposta uma solução com auxílio de um *software* de otimização. Em relação aos procedimentos técnicos, o trabalho coleta informações sobre o preço de diferentes passagens aéreas para realizar a otimização de custos de uma rota. Portanto, no âmbito dos procedimentos técnicos, este trabalho é categorizado como pesquisação.

### 3.2 Formulação do problema

O FTP modela a situação de um turista que almeja visitar diversas cidades por avião dentro de uma janela de tempo predefinida. O principal propósito é minimizar os custos com as passagens e a solução consiste em um conjunto de voos que o turista deve adquirir, resultando em um Ciclo Hamiltoniano. Adicionalmente, este problema possui grande semelhança com o TDTSP (do inglês *Time-Dependent Traveling Salesman Problem*), pois o turista precisa especificar o tempo de parada em cada cidade e os preços variam conforme a data escolhida.

Ao considerar um turista que deseja explorar um conjunto  $V$  de  $n$  cidades interligadas pelo conjunto de arcos  $A$ , o FTP busca minimizar uma função de custo, onde  $c_{ijt}$  representa o peso do arco conectando os nós  $i$  e  $j$  no instante  $t$  de um itinerário. Este itinerário tem início na cidade de origem  $0$ , visita exatamente uma vez todas as  $n$  cidades e conclui novamente na cidade de origem. A função de custo, nesse caso, representaria o preço da viagem. O usuário interessado forneceria a data de parada  $T_p$  em cada cidade

intermediária, juntamente com a faixa de tempo  $T_0 = [T_0m, T_0M]$  no qual a viagem poderia começar. Neste trabalho, o tempo de parada é tratado como um número inteiro. O modelo de programação linear inteira (PLI) desenvolvido é composto por uma função objetivo e algumas equações/inequações de restrição.

**Parâmetros:**

- $n$  : Número de cidades a serem visitadas,  $0 \rightarrow$  origem
- $m$  : Número de possíveis datas de viagem
- $C_{ijk}$  : Custo do voo da cidade  $i$  para a cidade  $j$  na data  $t$ ,
- $tp_i$  : Tempo de permanência na cidade  $i$

Como todos os trajetos duram menos de 24 horas, não foi considerado o tempo de viagem.

**Variáveis:**

$$X_{ijt} = \begin{cases} 1, & \text{se for feita uma viagem da cidade } i \text{ para a cidade } j \text{ na data } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$X_{ijt} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}, \quad \forall j \in \{1, \dots, n\}, \quad \forall t \in \{1, \dots, m\}$$

$u_i$  = Posição da cidade  $i$  na sequência da viagem (rota)

$$u_i \geq 0 \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}$$

$d_j$  = Data da viagem para a cidade  $j$

$$d_j \geq 0 \quad \forall j \in \{1, \dots, n\}$$

O custo total da viagem e, portanto, a função a ser minimizada, é:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m C_{ijt} \cdot X_{ijt}$$

**Restrições:**

$$(1) \quad \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^m X_{kjt} = 1 \quad \forall k \in \{1, \dots, n\}$$

Garantem que a partir da cidade  $k$  só seja feita uma viagem em uma data  $t$ .

$$(2) \quad \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^m X_{ikt} = 1 \quad \forall k \in \{1, \dots, n\}$$

Garantem que só seja feita uma viagem para a cidade  $k$  em uma data  $t$ .

$$(3) \quad u_i - u_j + nX_{ijt} \leq n - 1, \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall j \in \{1, \dots, n\}, \forall t \in \{1, \dots, m\}$$

Garantem que a posição da cidade  $j$  na rota da viagem seja maior que a da cidade  $i$  caso  $X_{ijt} = 1$  em algum  $t$ , ou seja, se existe alguma viagem de  $i$  para  $j$ .

$$(4) \quad d_j \geq d_i + t_{pi} - (1 - X_{ijt})M, \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall j \in \{1, \dots, n\}, \forall t \in \{1, \dots, m\}$$

Garantem que, caso seja feita uma viagem da cidade  $i$  para a  $j$  em alguma data  $t$ , a data da viagem para a cidade  $j$  deve ser após a data da viagem para a cidade  $i$  mais o tempo de permanência na cidade  $i$ .

$$(5) \quad X_{ijt} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall j \in \{1, \dots, n\}, \forall t \in \{1, \dots, m\}$$

$$(6) \quad u_i \geq 0 \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}$$

$$(7) \quad d_j \geq 0 \quad \forall j \in \{1, \dots, n\}$$

### 3.3 Coleta de dados

Em qualquer problema de otimização, a qualidade das soluções alcançadas é fortemente influenciada pela disponibilidade de informações. Os dados do problema delineiam o espaço de busca, estabelecendo, por consequência, os limites de todas as soluções potenciais. Assim, a utilização de dados incorretos ou incompletos pode prejudicar significativamente a qualidade das soluções finais. A eficácia da solução está intrinsecamente ligada à qualidade das informações disponíveis. Portanto, a etapa de coleta de dados desempenha um papel fundamental na resolução de problemas de otimização.

No contexto do problema de otimização dos custos de transporte de viagem, o conjunto de dados deve conter informações acerca dos preços dos voos para cada dia e destino dentro do período definido.

Atualmente, como mencionado no Capítulo 2, existem meta buscadores capazes de juntar todas as informações de diferentes companhias aéreas. Apesar disso, ter acesso a esses dados sob demanda não é tão simples. Embora muitas fontes possuam as informações necessárias, o acesso geralmente é restrito a parceiros comerciais e clientes pagantes. Alguns sites oferecem algum tipo de acesso de teste para desenvolvedores, como API's (*Application Programming Interface* - Interface de Programação de Aplicações), uma interface que permite que desenvolvedores acessem e integrem funcionalidades específicas ou dados relacionados a passagens aéreas, como preços, em seus próprios aplicativos, *websites* ou sistemas. Isso possibilita o acesso a dados relevantes de passagens aéreas sem precisar visitar diretamente o *site* do buscador. Apesar disso, o processo de avaliação é lento e o acesso gratuito geralmente é limitado, o que torna difícil utilizá-lo para o presente trabalho.

Pensando nisso, uma alternativa para obter essas informações seria o *web scraping*, técnica de extração de dados na qual um programa automatizado navega por páginas da *web* e extrai informações relevantes diretamente do código-fonte HTML, ou seja, uma maneira de coletar dados de *sites* da *web* de forma automatizada, simulando a interação humana.

Ao incorporar o *web scraping*, simplifica-se significativamente a coleta de dados comparado ao método manual. Essa técnica não só permite extrair informações detalhadas e pertinentes sobre os destinos e os preços dos voos selecionados, mas também elimina a dependência de plataformas externas, garantindo maior controle sobre o processo.

Com a metodologia definida e a escolha do *web scraping* como método para coleta de dados, o próximo passo foi a implementação prática desse procedimento. A execução precisa e personalizada desse processo envolveu uma série de etapas, detalhadas a seguir.

### 3.3.1 Escolha dos destinos, período de tempo e buscador

Optou-se por realizar a coleta de dados de forma personalizada, selecionando o mês, destinos e detalhes da viagem de acordo com preferências pessoais. Este método busca oferecer uma abordagem flexível, permitindo que futuros usuários possam adaptar a pesquisa conforme suas próprias preferências e necessidades. Para isso foram determinados cinco destinos específicos para análise: Roma, Madri, Amsterdã, Paris e Londres. A cidade de partida e chegada foi definida como Belo Horizonte. Essa seleção foi baseada em critérios pessoais e visando abranger diferentes contextos culturais e geográficos.

A pesquisa por voos, diante da vasta gama de opções *online*, demandou uma escolha criteriosa entre os principais buscadores do mercado. Nesse cenário, plataformas renomadas como *Google Flights*, *Skyscanner* e *Expedia* figuram entre as opções mais conhecidas e utilizadas globalmente. Contudo, após uma análise ponderada, o *Kayak* emergiu como a escolha deliberada para a coleta de dados desta pesquisa. O *Kayak*, parte da *Booking Holdings* (NASDAQ: BKNG), é o principal mecanismo de busca de viagens do mundo (KAYAK, 2023) e oferece uma extensa cobertura internacional, proporcionando uma gama abrangente de opções de destinos e datas.

Além disso, um aspecto que influenciou diretamente na decisão foi a política de não encriptação da URL pelo *Kayak*. Essa característica específica facilitou consideravelmente o desenvolvimento do código de *web scraping*, permitindo alterações diretas e estratégicas nas URLs. Em comparação com plataformas que adotam criptografia, essa liberdade na manipulação da URL tornou o processo mais flexível e adaptável às necessidades específicas da pesquisa.

Cada destino escolhido possui um "código" específico no buscador que identifica a respectiva cidade. Os mesmos foram obtidos por meio de buscas aleatórias, observando-os na URL. A partir disso, eles foram incorporados no *script* em Python utilizado para realizar as buscas.

Os destinos e respectivos códigos encontram-se na Tabela 2:

Cidade	Código
Roma	rom
Madrid	mad
Paris	par
Londres	lon
Amsterdã	ams

Tabela 2 – Códigos para busca

### 3.3.2 Ajustes e execução

Com o intuito de proporcionar uma análise abrangente, incorporou-se ajustes dinâmicos no código, permitindo a alteração das datas de partida e chegada. Isso possibilitou a simulação de diferentes cenários, e a possibilidade de fazer ajustes caso houvessem problemas para encontrar os dados necessários.

A metodologia desenvolvida oferece uma estrutura clara para futuros usuários. Estes poderiam seguir as etapas definidas para personalizar a pesquisa de acordo com suas próprias preferências, selecionando destinos, ajustando códigos e modificando as datas de viagem.

Durante a busca, o objetivo principal consistiu em identificar a passagem mais econômica de uma cidade  $i$  para outra cidade  $j$  na data  $t$ , durante o mês de maio de 2024, e consolidar esses dados em um arquivo CSV. Após a execução do programa, esse arquivo foi armazenado localmente, proporcionando uma compilação conveniente das informações obtidas durante a pesquisa. Contudo, em determinados momentos, a informação desejada não pôde ser encontrada, possivelmente devido a questões como carregamento dinâmico de conteúdo ou outras variáveis relacionadas ao *web scraping*. Dessa forma o código teve que ser readaptado algumas vezes para coletar os dados restantes, resultando em vários arquivos.

Portanto, foi essencial desenvolver um segundo código, para consolidar os diversos arquivos CSV resultantes, com o intuito de garantir uma união coerente e completa dos dados coletados durante a busca.

Para conduzir as análises, optou-se pela linguagem de programação Python para a implementação das operações necessárias. Todos os dados foram processados em um ambiente computacional com as seguintes configurações: Processador Apple M1 chip, 8,00 GB de memória RAM e sistema operacional de 64 bits baseado na arquitetura ARM.

Para a otimização da rota, o modelo matemático foi implementado utilizando o *software* GLPK em um computador com sistema operacional Windows 11, processador Intel core i7 de 10<sup>a</sup> geração e 16 GB de RAM.

Os preços foram coletados no dia 7 de Dezembro de 2023.

## 4 Apresentação e discussão dos resultados

Neste capítulo, os resultados obtidos serão apresentados e discutidos em detalhes. As análises aqui apresentadas são fruto da aplicação dos procedimentos metodológicos descritos no Capítulo 3. Este capítulo está estruturado em seções que abordam cada um dos objetivos específicos propostos na pesquisa, destacando os principais achados e sua relevância.

### 4.1 Dados coletados

Após a execução do código Python e a extração dos dados por meio de *web scraping*, obteve-se um arquivo CSV contendo informações detalhadas sobre os preços das passagens aéreas. Na Tabela 3, apresenta-se uma amostra dos dados coletados, que compreende os menores preços de voos entre as cidades durante todo o mês de maio de 2024.

Destino Inicial	Destino Final	Data	Preço
Rom	Mad	1	R\$ 203
Rom	Mad	2	R\$ 203
Rom	Mad	3	R\$ 361
Rom	Lon	8	R\$ 152
Rom	Lon	9	R\$ 152
Rom	Lon	10	R\$ 232

Tabela 3 – Amostra dos dados obtidos

Todos os dados coletados e utilizados para esse trabalho estão disponíveis em um repositório público no GitHub, cujo link pode ser encontrado no Anexo A.

Para complementar a análise, buscou-se informações sobre as distâncias entre as cidades, considerando esse aspecto relevante para o estudo. Utilizou-se o site *Distance.to* (DISTANCE...), como fonte, pela facilidade de acesso aos dados. No entanto, é importante ressaltar que a confiabilidade de fontes online pode variar.

Diante desse contexto, apresenta-se na Tabela 4 a matriz de distâncias em km entre as cidades selecionadas. Esta matriz, além de fornecer uma visão abrangente das distâncias aéreas entre os diversos destinos estudados, serviu como base para as análises subsequentes, contribuindo para uma compreensão mais completa e detalhada dos padrões de preços e acessibilidade entre as localidades consideradas.

Cidade	bhz	ams	rom	mad	par	lon
bhz	0	9318	8989	7895	8914	9012
ams	9318	0	1298	1481	430	357
rom	8989	1298	0	1365	1107	1435
mad	7895	1481	1365	0	1052	1263
par	8914	430	1107	1052	0	343
lon	9012	357	1435	1263	343	0

Tabela 4 – Matriz de distâncias entre as cidades

## 4.2 Análise dos dados

Como mencionado no Capítulo 3, foi feita uma análise dos dados utilizando a linguagem de programação Python. Os códigos desenvolvidos também encontram-se disponíveis no repositório do GitHub.

O arquivo CSV continha todos os dados coletados durante a pesquisa de preços de passagens aéreas. No entanto, optou-se por dividir esses dados em algumas das análises realizadas, segmentando os preços entre voos saindo e chegando da cidade de origem, Belo Horizonte, e voos intermediários na Europa. Essa decisão foi tomada considerando diversos motivos que contribuem para uma análise mais precisa e abrangente dos dados.

Ao segmentar os dados podemos obter uma compreensão mais aprofundada dos fatores que influenciam os preços em cada etapa do percurso, incluindo considerações como sazonalidade, demanda por rotas específicas, políticas de precificação das companhias aéreas e custos operacionais associados a voos de longa distância versus voos regionais na Europa.

Além disso, é importante ressaltar que viagens intercontinentais têm características diferentes das viagens dentro da Europa, que muitas vezes são operadas por companhias aéreas de baixo custo, conforme discutido no Capítulo 2. Essas diferenças podem influenciar significativamente os padrões de preços e a disponibilidade de voos, justificando a análise separada dos dados para cada segmento de viagem.

A primeira análise realizada foi a obtenção das médias de preços das passagens aéreas. Essa abordagem proporcionou uma visão geral dos custos envolvidos nos diferentes tipos de viagens.

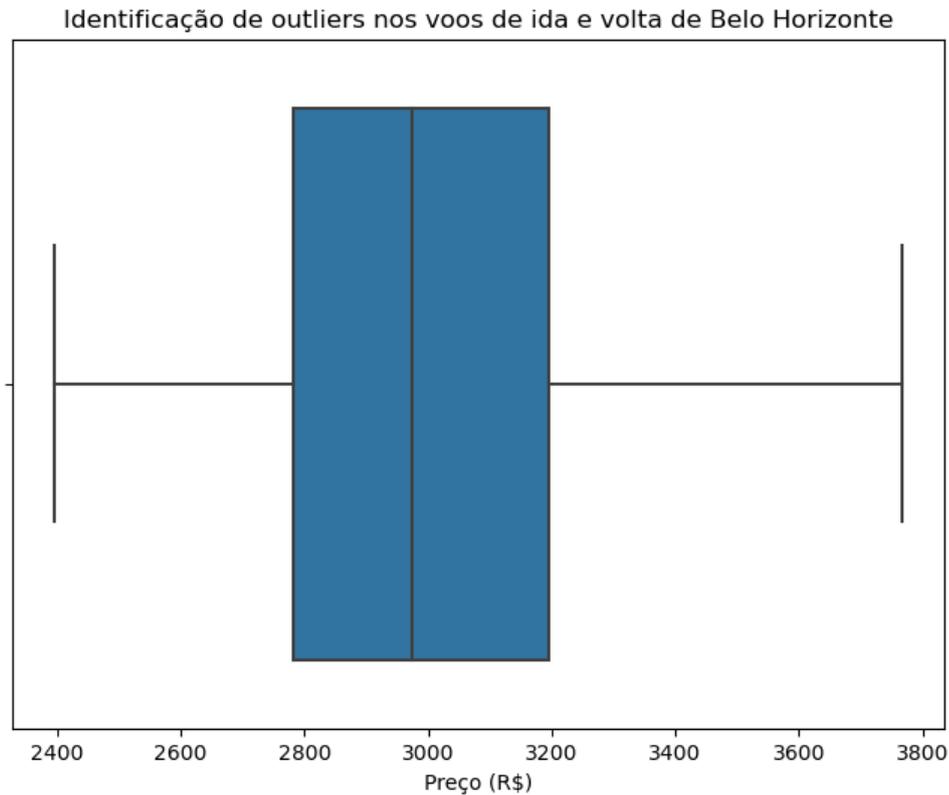
Média de preços para destinos envolvendo BHZ: R\$ 3010,31

Média de preços para destinos intermediários: R\$ 340,68

Para uma análise mais detalhada dos dados de preços das passagens aéreas, é interessante identificar os *outliers*, que são valores atípicos que se destacam em relação aos demais. Esses *outliers* podem fornecer informações valiosas sobre padrões incomuns ou excepcionais nos preços das passagens, ajudando a entender melhor a distribuição dos dados e a detectar possíveis anomalias. As Figuras 1 e 2 ilustram em *boxplots* a distribuição

dos preços para passagens saindo e chegando a BHZ, e para voos internos na Europa, respectivamente.

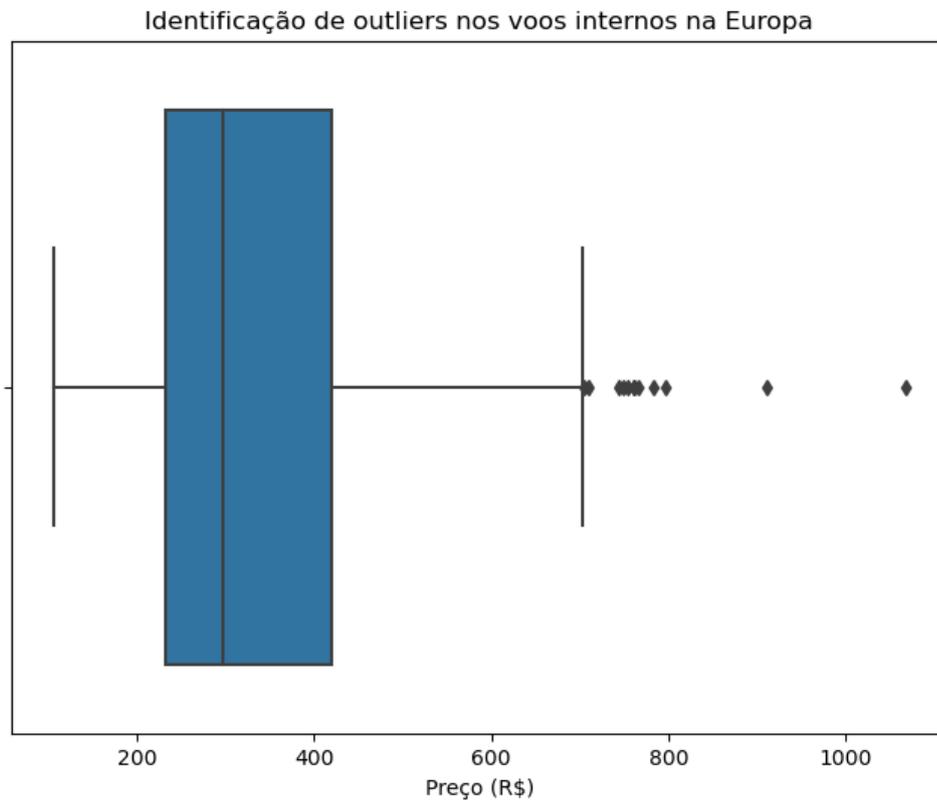
Figura 1 – Identificação de *outliers*



Fonte: Elaborado pela autora

É possível identificar no gráfico acima que as passagens de ida ou volta para Belo Horizonte podem variar entre R\$2400,00 e R\$3800,00, aproximadamente. Essa é uma diferença considerável, o que ressalta ainda mais a importância de selecionar cuidadosamente as passagens escolhidas. Podemos observar também que a mediana é mais baixa que a média informada anteriormente, o que indica que metade dos valores observados são inferiores a R\$3000,00. No entanto, os preços mais elevados se estendem mais para os extremos, indicando uma dispersão maior, o que explicaria o aumento da média. Grande parte dos valores pode ser encontrada entre os valores R\$2800,00 e R\$3200,00 marcados pelo boxplot.

Figura 2 – Identificação de outliers nos voos internos

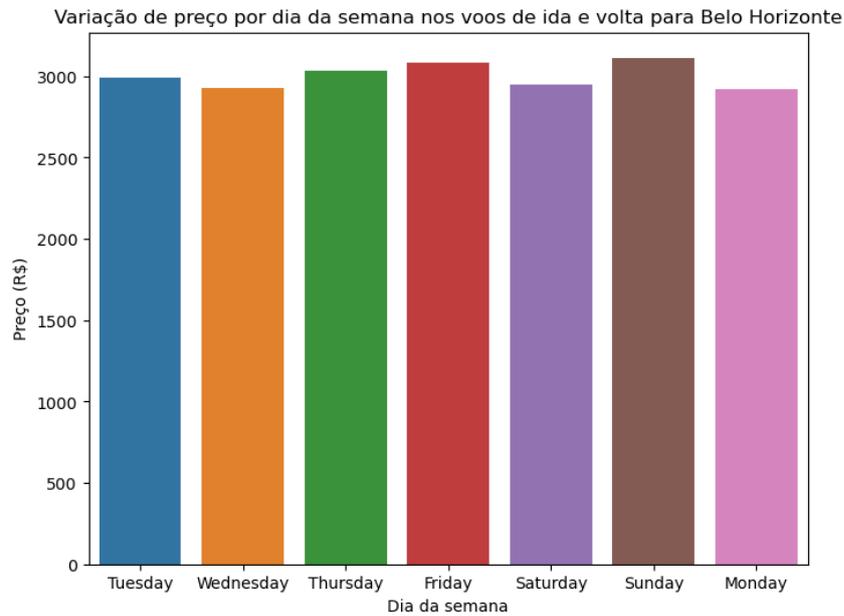


Fonte: Elaborado pela autora

Já nos voos dentro da Europa (Figura 2), destacam-se ainda mais os outliers relacionados ao aumento de preço. Os valores podem ultrapassar R\$1000,00, começando a partir de R\$100,00, o que também indica a necessidade de avaliar a rota cuidadosamente, principalmente no turismo mochileiro, cujo objetivo é economizar conforme visto na seção 2.1.2. Igualmente, a mediana mostra-se inferior a média calculada anteriormente, não chegando a R\$300,00. Novamente, isso indica que os valores mais altos são mais dispersos. Existe uma grande concentração de preços entre R\$220,00 e R\$300,00 aproximadamente.

Também é interessante investigar a variação dos preços conforme os dias da semana, uma vez que essa análise pode ajudar a entender melhor a dinâmica dos custos das passagens aéreas. A compreensão desses padrões pode contribuir para a formulação de estratégias mais eficazes de planejamento de viagens. A Figura 3 ilustra isso para os voos intercontinentais.

Figura 3 – Variação de preço por dia da semana nos voos de ida e volta para BH

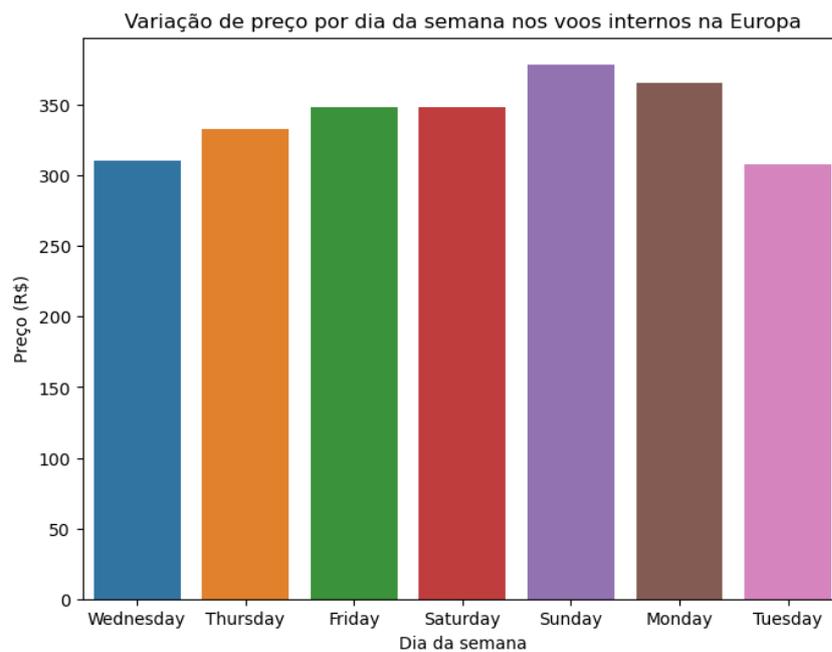


Fonte: Elaborado pela autora

O gráfico revela que os dias com maior média de preço para ir e voltar de Belo Horizonte foram Domingo e Sexta-feira, e os mais baratos Segunda-feira e Quarta-feira.

Já a Figura 4, expõe a mesma análise para voos dentro da Europa.

Figura 4 – Variação de preço por dia da semana nos voos internos

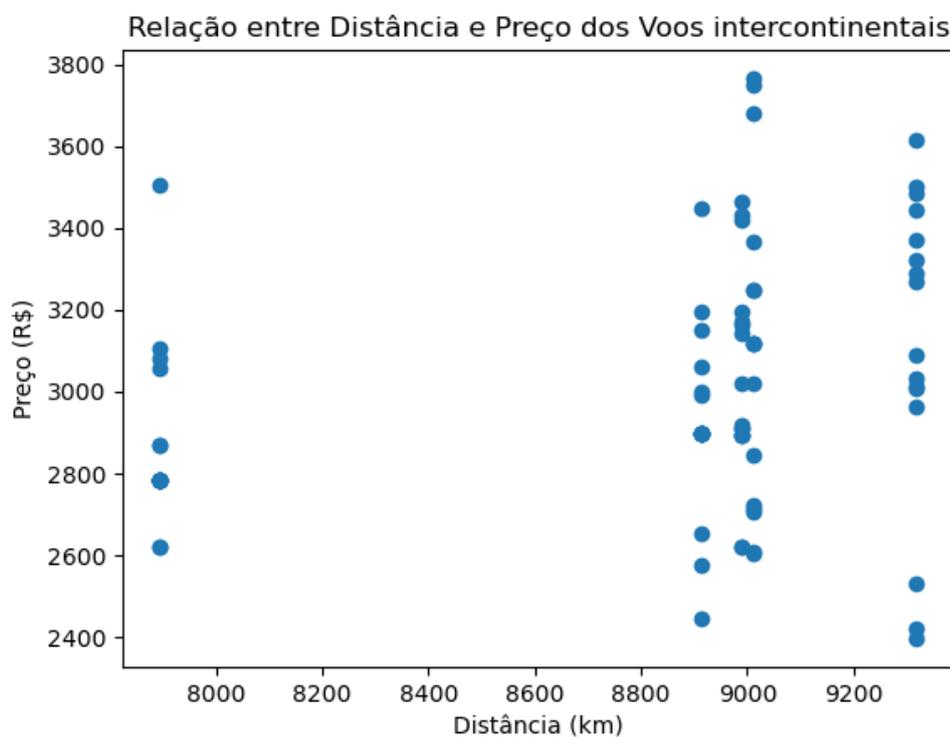


Fonte: Elaborado pela autora

A partir do gráfico da Figura 4, pode-se observar que novamente Domingo se destaca como um dia com preço médio elevado, enquanto Quarta-Feira se mantém como um dia com custo relativamente abaixo. Além disso, vê-se um preço mais elevado na Segunda-feira, Sexta-feira e Sábado.

Outra métrica relevante a se considerar é a relação entre a distância percorrida e o preço das passagens. Para realizar essa análise, optei por separar novamente os dados de preços entre voos intercontinentais e voos dentro da Europa.

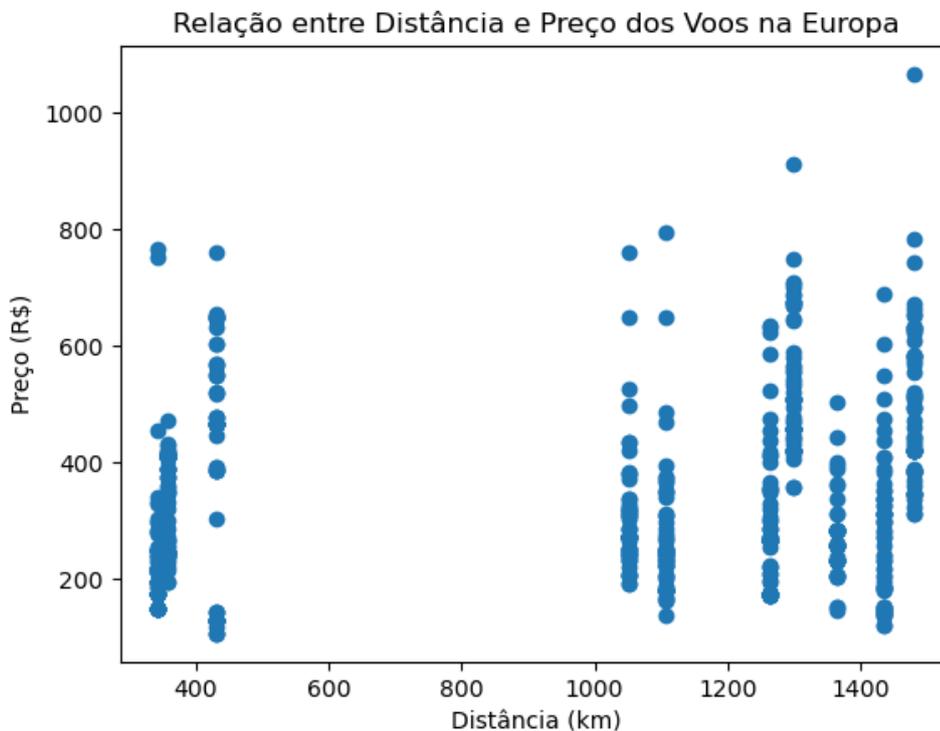
Figura 5 – Visualizando a relação entre distâncias e preços em um gráfico de dispersão



Fonte: Elaborado pela autora

No gráfico apresentado na Figura 5, observa-se uma discrepância nos preços dos voos em relação à distância. Contrariamente à expectativa comum, voos com distâncias mais longas não necessariamente resultaram em preços mais altos. Essa variação pode ser atribuída a uma série de fatores, incluindo estratégias de precificação das companhias aéreas, possíveis escalas ou conexões envolvidas nas rotas mais longas, acordos comerciais ou subsídios, além de nuances na demanda sazonal e estrutura de custos das empresas aéreas.

Figura 6 – Relação entre distâncias e preços para voos na Europa

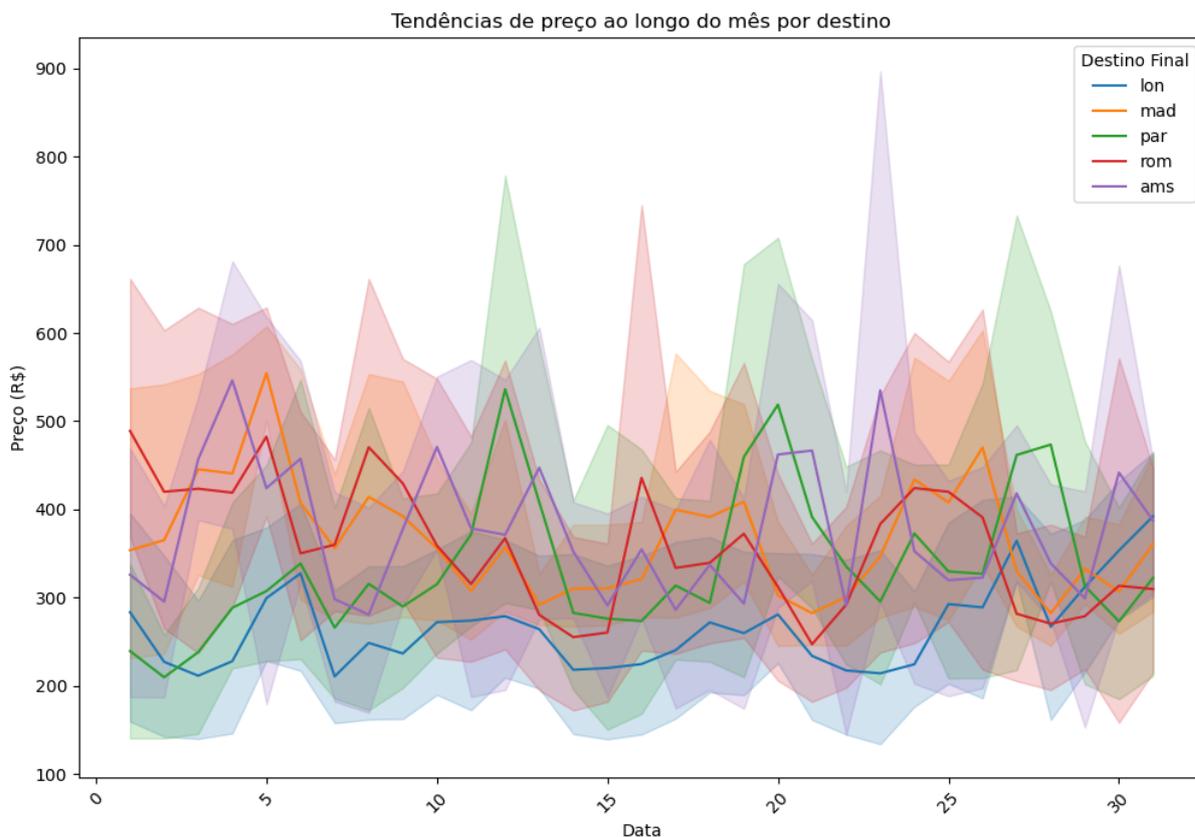


Fonte: Elaborado pela autora

Ao examinar o gráfico na Figura 6, nota-se que dentro da Europa, é possível perceber uma certa relação entre a distância e o preço, onde o maior preço encontrado foi para o voo mais distante, e para voos menos longos, encontramos majoritariamente preços abaixo dos R\$400. Apesar disso, essa relação não é linear, pois mesmo nos voos mais largos conseguimos encontrar preços relativamente baixos, e vice versa. A distância pode influenciar o preço dos voos devido aos custos operacionais mais elevados associados a rotas mais longas, incluindo combustível, manutenção da aeronave e taxas aeroportuárias. Porém, essa análise, juntamente com a Figura 5, destaca a complexidade da determinação dos preços dos voos, que vai além de uma relação linear com a distância, demonstrando a importância de considerar uma gama mais ampla de variáveis ao interpretar os dados de precificação aérea.

Além de analisar as distâncias, foi examinada a tendência de preços por mês para cada destino final, como ilustrado na Figura 7. Ao observar como os preços variam para esses destinos ao longo do período, podemos obter diversas informações.

Figura 7 – Análise das tendências de preço ao longo do mês por destino Final

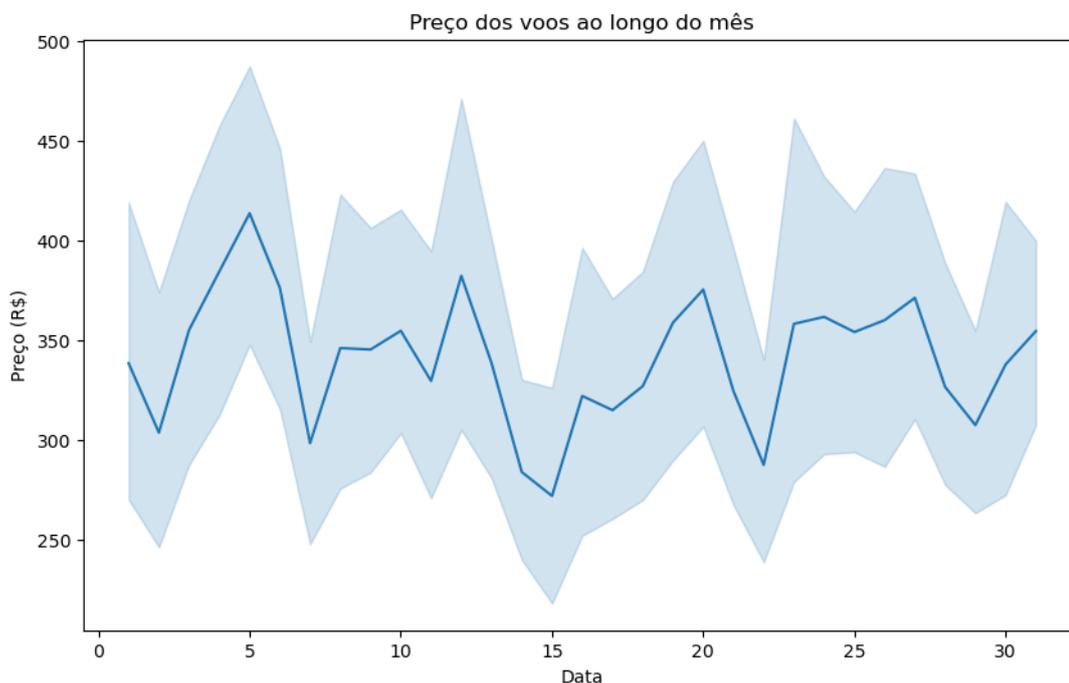


Fonte: Elaborado pela autora

A primeira delas, é que Londres, representada pela cor azul, possui uma média de preços abaixo dos outros destinos durante quase todo o período. Isso pode indicar que a cidade possui mais oferta, e/ou está melhor conectada com as outras. Londres também parece ter um menor preço por dia mais estável, com menos picos e vales. Já os outros destinos possuem mais variações, com destaque para Paris, que possui picos bastante discrepantes, e Amsterdã, que possui o pico mais extremo. Ao longo do mês, com exceção de Londres, podemos ver que a média de preços varia bastante entre os destinos, alternando entre quais seriam mais baratos, o que justifica um estudo da rota.

A análise da sazonalidade é importante para compreender as flutuações nos preços das passagens aéreas ao longo do mês. Este tipo de análise permite identificar padrões sazonais nas tarifas, o que pode ser influenciado por uma variedade de fatores, como feriados, eventos, condições climáticas e sazonalidade do turismo. Os voos de ida e volta para Belo Horizonte não foram incluídos nessa análise. A Figura 8 ilustra essa análise da sazonalidade para os destinos intermediários (dentro da Europa).

Figura 8 – Análise da sazonalidade para destinos intermediários



Fonte: Elaborado pela autora

É possível ver que não existe um padrão bem definido, e as médias diárias variam entre aproximadamente R\$ 275 (mínimo, no dia 15) e R\$415 (máximo, no dia 5). Os países estudados possuem as seguintes datas comemorativas:

**França:**

- 01/05 - Feriado: Dia do Trabalho
- 08/05 - Feriado: Dia da Vitória na Europa
- 09/05 - Celebração: Dia da Ascensão
- 19/05 - Celebração: Pentecostes
- 20/05 - Feriado: Segunda-Feira de Pentecostes
- 26/05 - Celebração: Dia das Mães

**Espanha:**

- 01/05 - Celebração: Dia do Trabalho
- 05/05 - Celebração: Dia das Mães
- 19/05 - Feriado: Pentecostes

**Reino Unido:**

- 06/05 - Feriado: Early May Bank Holiday
- 27/05 - Feriado: Spring Bank Holiday

**Itália:**

- 01/05 - Feriado: Dia do Trabalhador
- 12/05 - Celebração: Dia das Mães

**Holanda:**

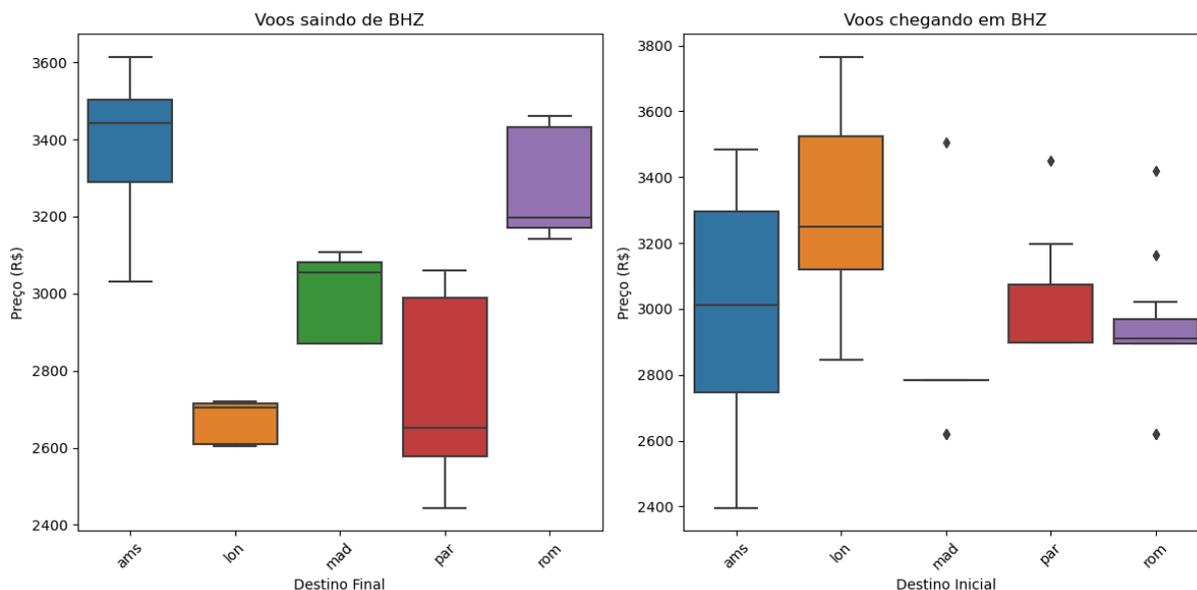
- 04/05 - Celebração: Dia da Lembrança
- 05/05 - Celebração: Dia da Libertação
- 09/05 - Feriado: Dia da Ascensão
- 12/05 - Celebração: Dia das Mães
- 19/05 - Celebração: Pentecostes

Pode-se observar que os países apresentam padrões semelhantes em seus calendários de feriados. O Dia do Trabalho, celebrado em 1<sup>o</sup> de maio, é reconhecido como feriado nacional na França e Itália, e celebrado na Espanha. Além disso, o Dia das Mães, uma homenagem à maternidade, é observado em datas variadas, como 5 ou 12 de maio, dependendo do país. Isso poderia explicar os picos observados no gráfico nesses dois dias. O Pentecostes, uma festa cristã significativa, ocorre em 19 de maio e é marcado como feriado em várias nações, e também é possível identificar um aumento na média de preços nessa data.

Além disso, os vales, dias com menor média de preço, ocorrem durante dias da semana. Como visto anteriormente, os preços podem variar consideravelmente de um dia para outro. Em maio de 2024, os dias 4, 5, 11, 12, 18, 19, 25 e 26 correspondem a fins de semana. Geralmente, os voos durante os finais de semana tendem a ser mais procurados, resultando em uma possível alta nos preços devido à maior demanda.

A análise das variações de preço por destino também oferece *insights* valiosos sobre as tendências de custo em relação à cidade de destino/origem. Nesse contexto, o gráfico da Figura 9 proporciona uma visão detalhada das flutuações de preço em diferentes cidades, permitindo uma comparação entre os valores médios.

Figura 9 – Análise das variações de preço por destino para a cidade de origem



Fonte: Elaborado pela autora

Para os voos partindo de Belo Horizonte (Confins), pode-se observar que o destino com a menor variação de preço é Londres. No entanto, o destino com a menor mediana é Paris, possuindo também o valor mínimo. Amsterdã possui a maior mediana e, também, o valor máximo. Paris exibe a maior variação de preços, evidenciada pelo maior *boxplot*, porém os valores aparentam estar concentrados na extremidade inferior devido ao menor tamanho do *boxplot* no segundo quartil, em relação ao terceiro. Por outro lado, em Londres a maioria dos valores está concentrada acima da mediana, refletido pelo *boxplot* mais estreito nessa região, o que também se aplica a Madrid. Tanto Paris quanto Amsterdã apresentam *outliers* mais distantes da mediana, sugerindo uma maior variabilidade de preços.

Para os voos de chegada, Madrid apresenta a menor mediana, com os valores bastante concentrados em torno de R\$2800 e apenas dois *outliers*. Seu *boxplot* está bastante compacto, sugerindo uma menor dispersão nos preços. Por outro lado, Amsterdã exibe uma grande variabilidade, com preços variando de R\$2400 a R\$3500. Londres, como destino inicial em direção a BHZ, possui a maior mediana e o maior preço observado, chegando a quase R\$3800.

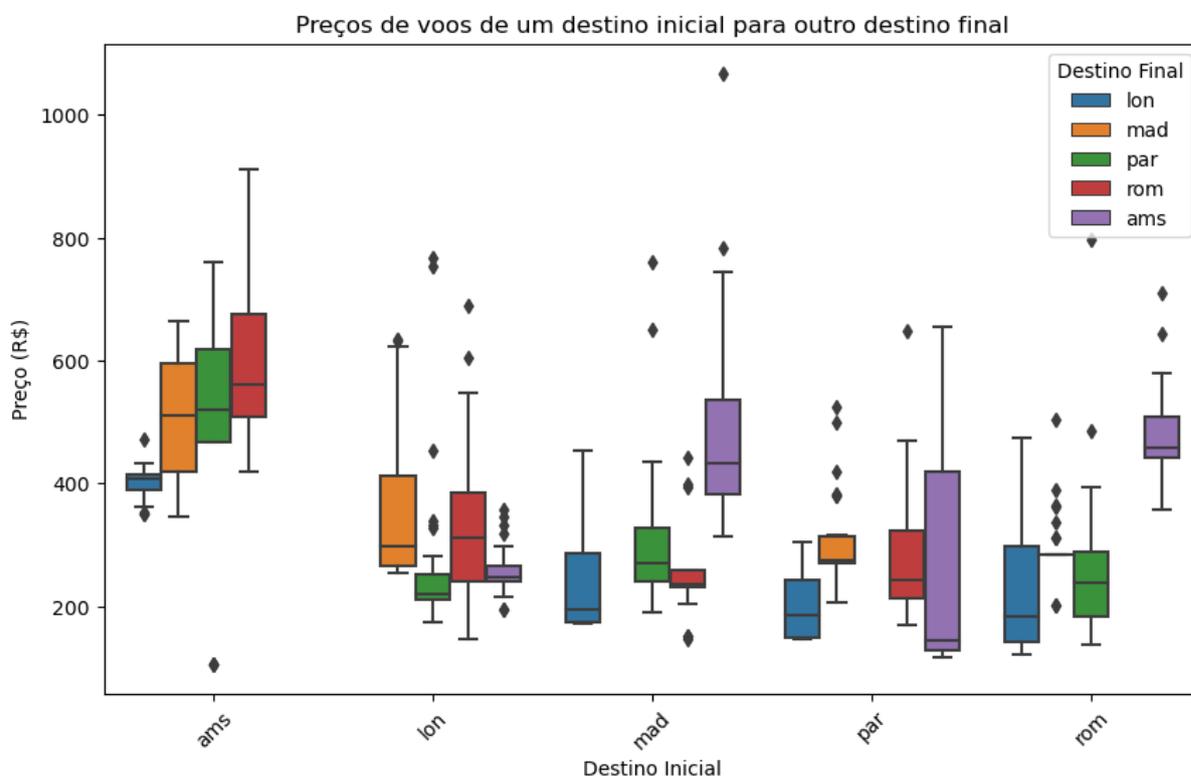
Analisando ambos os gráficos de forma geral, uma opção promissora poderia ser seria viajar de Belo Horizonte para Paris e retornar de Amsterdã ou Madrid.

Após o texto sobre a variabilidade nos preços dos destinos intermediários, pode-se introduzir o gráfico conforme a Figura 10:

Dando continuidade à análise das variações de preço, a Figura 10 a seguir apresenta uma análise mais detalhada dos destinos intermediários. Este gráfico visa fornecer uma

visão abrangente das flutuações de preço para cada destino específico, permitindo uma comparação mais precisa entre as opções disponíveis.

Figura 10 – Análise das variações de preço por destino para os destinos intermediários



Fonte: Elaborado pela autora

Ao considerar as opções de destinos partindo de Amsterdã, observa-se que Londres apresenta os preços mais acessíveis (menor mediana), além de uma menor variabilidade. Por outro lado, Madrid e Roma exibem a maior variabilidade de preços, destacando-se pelos *boxplots* mais amplos. Roma se destaca ainda por ter o maior preço medido e a maior mediana entre todos os destinos analisados.

Ao analisar os preços partindo de Londres, percebe-se uma tendência geral de valores mais baixos em comparação com Amsterdã, possivelmente devido a uma maior oferta e presença de companhias aéreas na cidade. Madrid apresenta a maior variabilidade, enquanto Amsterdã se destaca pela menor variabilidade. Paris, apesar de possuir a menor mediana, também é responsável pelo maior preço encontrado.

Partindo de Paris, Amsterdã é o destino com preços mais baixos (menor valor e menor mediana), mas também com a maior variabilidade e o preço máximo. Poderia ser uma boa opção ir para Londres já que a mediana é a segunda mais baixa e a variabilidade não é tão alta, dependendo da posição deste destino na rota, ou seja, das datas adequadas.

No que diz respeito a Roma como destino inicial, quase não é possível visualizar o

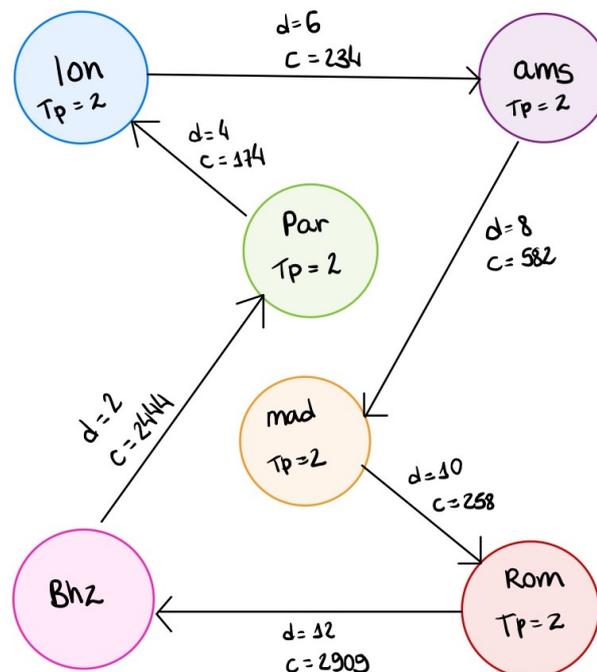
*boxplot* de Madrid, o que indica que os valores estão muito concentrados, com apenas alguns *outliers*, a maioria indicando preços superiores à mediana. O destino com menor mediana é Londres, porém ele também parece possuir alta variabilidade. O destino com a maior mediana é Amsterdã, o que pode indicar que este não seja um bom destino saindo de Roma, no entanto, o maior *outlier* é indo para Paris.

A partir das tendências observadas no gráfico da Figura 10, é possível sugerir que os melhores destinos (com menor custo) seriam: saindo de Amsterdã: Londres e Madrid; saindo de Londres: Paris e Roma; saindo de Madrid: Londres e Roma; saindo de Paris: Amsterdã e Londres e, finalmente, saindo de Roma: Londres e Paris. Porém, a disponibilidade nas datas requeridas, a variabilidade dos preços podem fazer com que o viajante optasse por outros destinos. Precisamente por isso, optou-se por fazer uma otimização computacional.

### 4.3 Resultado do modelo de otimização

Conforme descrito no Capítulo 3, o modelo matemático exposto foi implementado e chegou-se na rota ótima apresentada na Figura 11:

Figura 11 – Rede da rota otimizada



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Onde:

$T_p$  : Tempo de permanência na cidade

$c$  : Custo da Viagem

$d$  : Data da Viagem

De acordo com o itinerário gerado pelo modelo matemático, o viajante iria de Belo Horizonte a Paris, em seguida a Londres e após a Amsterdã. De aí, seguiria em direção a Madrid e posteriormente a Roma, para então retornar a cidade de origem. Para a rota foi considerado um tempo de permanência de dois dias em cada cidade e, conforme pode-se ver na Tabela 5, o custo total foi de R\$6601,00.

Tabela 5 – Resultado da otimização para  $T_p=2$

<b>Origem</b>	<b>Destino</b>	<b>Data</b>	<b>Preço (R\$)</b>
Belo Horizonte	Paris	2	2444
Paris	Londres	4	174
Londres	Amsterdã	6	234
Amsterdã	Madrid	8	582
Madrid	Roma	10	258
Roma	Belo Horizonte	12	2909
<b>Total</b>			<b>6601</b>

Fonte: Elaborado pela autora

#### 4.4 Comparação entre rotas alternativas

Para avaliar a eficácia da rota encontrada pelo modelo matemático, optou-se por compará-la com diferentes abordagens, como a soma dos valores médios encontrados e duas rotas selecionadas aleatoriamente.

Tomando como base os valores médios das passagens, uma viagem custaria em torno de:

$$R\$3010,31 \times 2 + R\$340,68 \times 5 = R\$7724,02$$

Pagar R\$6601,00 em uma viagem, em vez de R\$7724,00 pode representar uma economia significativa para um viajante que busca maximizar a utilização de seus recursos financeiros. A diferença de R\$1123,00 (aproximadamente 15%) entre esses dois valores pode fazer uma grande diferença no orçamento pessoal, especialmente em um contexto onde cada centavo conta. Essa economia pode permitir ao viajante aproveitar mais experiências durante a viagem, como explorar a gastronomia local, visitar pontos turísticos adicionais ou até mesmo estender a duração da viagem. Além disso, economizar dinheiro

em uma viagem pode ter um impacto positivo em outras áreas da vida financeira do viajante, como economias para futuras viagens, investimentos ou despesas cotidianas. Portanto, pagar um valor menor pela viagem não apenas proporciona uma economia imediata, mas também oferece oportunidades adicionais de desfrutar da experiência de viajar e de alcançar objetivos financeiros mais amplos.

O primeiro itinerário aleatório selecionado foi descrito na Tabela 6:

Tabela 6 – Primeiro itinerário aleatório com  $T_p=2$

<b>Origem</b>	<b>Destino</b>	<b>Data</b>	<b>Preço (R\$)</b>
Belo Horizonte	Paris	2	2444
Paris	Madrid	4	314
Madrid	Londres	6	399
Londres	Amsterdã	8	195
Amsterdã	Roma	10	645
Roma	Belo Horizonte	12	2909
<b>Total</b>			<b>6806</b>

Fonte: Elaborado pela autora

A rota proposta parte de Paris, seguindo para Madrid, depois Londres, Amsterdã e Roma, antes de finalmente retornar a Belo Horizonte. Apesar de possuir o mesmo destino inicial e final, pode-se perceber que essa rota possui um custo mais alto. Comparada a rota ótima encontrada, houve um aumento de R\$205,00 (aproximadamente 3%).

Já para a segunda rota selecionada aleatoriamente, a seguinte ordem foi proposta:

B. Horizonte ->Amsterdã ->Paris -> Roma ->Londres ->Madrid ->B. Horizonte

Para esse trajeto, o custo total é apresentado na Tabela 7:

Tabela 7 – Segundo itinerário aleatório com  $T_p=2$

<b>Origem</b>	<b>Destino</b>	<b>Data</b>	<b>Preço (R\$)</b>
Belo Horizonte	Amsterdã	2	3442
Amsterdã	Paris	4	467
Paris	Roma	6	296
Roma	Londres	8	152
Londres	Madrid	10	355
Madrid	Belo Horizonte	12	2783
<b>Total</b>			<b>7495</b>

Fonte: Elaborado pela autora

Caso seja feito o itinerário mostrada na Tabela 7, haveria um um aumento nos custos de de R\$894,00 (aproximadamente 12 %) em relação à rota descrita na Tabela 5.

Por meio da comparação entre as rotas, é possível destacar a eficácia do modelo de otimização em encontrar uma rota que minimize os custos de voos em viagens. Enquanto as rotas baseadas na média dos preços e nas seleções aleatórias resultariam em custos consideravelmente mais altos, a rota determinada pelo modelo matemático oferece uma economia significativa, proporcionando ao viajante a oportunidade de maximizar seus recursos financeiros. Isso demonstra a importância e o valor prático da aplicação de técnicas de otimização em situações do mundo real, como o planejamento de viagens, para garantir decisões eficientes e economicamente viáveis.

## 5 Conclusões e considerações finais

Ao longo deste trabalho, foi explorada uma ampla gama de tópicos relacionados ao turismo e sua interseção com a tecnologia, além de conceitos fundamentais de otimização. De forma a garantir informações precisas e relevantes para a resolução do problema proposto, foi realizada a coleta de dados reais, cujo processo envolveu a escolha dos destinos, do período de tempo e buscador a ser utilizado, e o desenvolvimento de um código. A metodologia desenvolvida proporciona flexibilidade aos futuros usuários, permitindo ajustes dinâmicos no programa em Python, além da possibilidade de personalização da pesquisa de acordo com suas preferências. Durante a busca, o foco foi identificar a passagem mais econômica de uma cidade para outras em cada dia, consolidando os dados em um arquivo CSV.

Foi conduzida uma análise abrangente sobre os padrões de preços de passagens aéreas entre diferentes cidades, considerando voos dentro da Europa e voos intercontinentais. Uma observação significativa foi a complexidade e a variabilidade dos preços das passagens aéreas, que podem ser influenciados por uma ampla gama de fatores, incluindo sazonalidade, distância percorrida, dias da semana, eventos específicos e estratégias de precificação das companhias aéreas. A avaliação revelou padrões interessantes e destacou a importância de considerar múltiplos aspectos ao planejar uma viagem. Durante a análise foram feitas sugestões de rotas baseadas em observações do contexto geral.

Além disso, a implementação de um modelo de otimização computacional permitiu identificar uma rota ótima para viajar entre as cidades estudadas. A comparação entre diferentes estratégias de roteamento destacou a superioridade da abordagem de otimização proposta, evidenciando sua relevância prática para os viajantes em busca de economia. A modelagem computacional se mostra como uma ferramenta valiosa para os viajantes que buscam maximizar sua eficiência financeira.

As recomendações realizadas após a visualização dos dados sugeriam que os destinos mais vantajosos em termos de custo seriam: saindo de Amsterdã- Londres e Madri; Londres - Paris e Roma; Madri - Londres e Roma; Paris - Amsterdã e Londres; e Roma - Londres e Paris. De Belo Horizonte se indica ir para Paris, retornando a partir de Amsterdã ou Madri. A rota otimizada propõe ir de Belo Horizonte a Paris, e de Paris a Londres, o que coincide com a recomendação. Porém a partir de Londres o viajante seguiria a Amsterdã, que não está entre os destinos recomendados. Novamente a sugestão coincidiu com a rota otimizada, propondo ir de Amsterdã a Madrid e, após a Roma. Finalmente, o retorno para a cidade de origem não correspondeu à sugestão, sendo feito de Roma e não de Madri ou Amsterdã.

Com base na análise e na comparação com a rota otimizada, pode-se concluir que as recomendações feitas após a visualização dos dados ofereceram percepções valiosas.

Porém, embora algumas das sugestões tenham se alinhado com a rota otimizada, outras discrepâncias foram identificadas. Isso demonstra a importância de um processo de otimização mais abrangente, considerando não somente um trecho específico, mas o conjunto da viagem como um todo.

É importante destacar que a utilização de *web scraping* para a coleta dos preços pode apresentar algumas limitações, como a dependência da estrutura do *website* e a possibilidade de alterações nas páginas ao longo do tempo, além disso, pode ser um processo demorado, e como os preços são dinâmicos poderia haver alguma alteração antes de que a otimização fosse concluída. Outra limitação do estudo é a utilização de somente um buscador, e a coleta de somente o menor preço do dia, sem levar em consideração outros fatores como a duração e horário do voo.

Para trabalhos futuros sugere-se abordar essas limitações e explorar novas direções de pesquisa, como a melhoria da coleta de dados, utilizando um maior volume de informações e mais de uma fonte, além de técnicas avançadas de processamento de dados para lidar com grandes volumes de informações. Além disso, seria interessante investigar a incorporação de mais variáveis e restrições na modelagem do problema, como preferências do usuário, horários de voos, duração total do deslocamento, quantidade de dias de estadia por destino flexíveis e o custo relacionado a estar em cada lugar por período de tempo. Outra linha de pesquisa interessante seria a aplicação de técnicas de inteligência artificial e aprendizado de máquina para aprimorar a precisão e eficiência da otimização de rotas de viagem.

Considerando o rápido crescimento do mercado de viagens e as mudanças contínuas no comportamento do consumidor, é fundamental continuar explorando e aprimorando abordagens de otimização para atender às necessidades dos viajantes modernos.

## Referências

- ADAMO, T. et al. Learned upper bounds for the time-dependent travelling salesman problem. *IEEE Access*, IEEE, v. 11, p. 2001–2011, 2023.
- APPLEGATE, D. L.; BIXBY, R. E.; CHVÁTAL, W. J. V. Cook. the traveling salesman problem: A computational study. princeton up, princeton. 606 pp. 45.00. *thesymmetrictravelingsalesmanproblem(tsp)isoneofthebest – knownproblemsofcombinatorialoptimisation,veryeasytoexplainandvisualise,yet.Citeseer*.
- BERNE, C.; GARCIA-GONZALEZ, M.; MUGICA, J. How ict shifts the power balance of tourism distribution channels. *Tourism Management*, Elsevier, v. 33, n. 1, p. 205–214, 2012.
- BOSISIO, A. Breve história do turismo e da hotelaria. *Rio de Janeiro: Confederação Nacional do Comércio/Conselho de Turismo*, 2005.
- BRYANT, K. Genetic algorithms and the travelling salesman problem. 2000.
- CHRISTODOULIDOU, N.; CONNOLLY, D. J.; BREWER, P. Travel meta-search: opportunity or threat? *Tourism Analysis*, Cognizant Communication Corporation, v. 14, n. 6, p. 821–832, 2009.
- DAHIYA, C.; SANGWAN, S. Literature review on travelling salesman problem. *International Journal of Research*, v. 5, n. 16, p. 1152–1155, 2018.
- DEVI, M. M.; GEETHANJALI, M. Hybrid of genetic algorithm and minimum spanning tree method for optimal pmu placements. *Measurement*, Elsevier, v. 154, p. 107476, 2020.
- DIAS, F.; SOIFER, J.; FERREIRA, L. O futuro do turismo: Território, património, planeamento. *Porto: Aptur*, 2009.
- DISTANCE.TO. <<https://www.distance.to/>>. Acesso em: 15/02/2024.
- DORIGO, M.; GAMBARDELLA, L. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 1, n. 1, p. 53–66, 1997.
- DUDÁS, G.; BOROS, L.; VIDA, G. Comparing the temporal changes of airfares on online travel agency websites and metasearch engines. *Tourism: An International Interdisciplinary Journal*, Institut za turizam, v. 65, n. 2, p. 187–203, 2017.
- FOGEL, D. B. An evolutionary approach to the traveling salesman problem. *Biological Cybernetics*, Springer, v. 60, n. 2, p. 139–144, 1988.
- GAO, L. et al. Learn to design the heuristics for vehicle routing problem. *arXiv preprint arXiv:2002.08539*, 2020.
- GLOVER, F.; LAGUNA, M. Tabu search. In: \_\_\_\_\_. *Handbook of Combinatorial Optimization: Volume1–3*. Boston, MA: Springer US, 1998. p. 2093–2229. ISBN 978-1-4613-0303-9. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0303-9\\_33](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0303-9_33)>.

- GOLDBERG, D. E. *Genetic algorithms*. [S.l.]: pearson education India, 2013.
- GROSS, J. L.; YELLEN, J. *Handbook of graph theory*. [S.l.]: CRC press, 2003.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. *Introdução à pesquisa operacional*. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2013.
- HOLLOWAY, J. C.; HUMPHREYS, C. *The business of tourism*. [S.l.]: Sage, 2022.
- Annual Review 2023*. 79th Annual General Meeting and World Air Transport Summit, Istanbul, Türkiye.
- International Air Transport Association (IATA) - Sustainability & Economics. *Air Passenger Market Analysis*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/air-passenger-market-analysis---june-2023/>>.
- KAYAK. *Relatório de Tendências de Viagem 2023*. 2023. Acesso em 13/12/2023. Disponível em: <<https://www.kayak.com.br/c/relatorio-viagem-2023/>>.
- KHAN, I.; MAITI, M. K.; MAITI, M. Coordinating particle swarm optimization, ant colony optimization and k-opt algorithm for traveling salesman problem. In: SPRINGER. *Mathematics and Computing: Third International Conference, ICMC 2017, Haldia, India, January 17-21, 2017, Proceedings 3*. [S.l.], 2017. p. 103–119.
- KIM, D. J.; KIM, W. G.; HAN, J. S. A perceptual mapping of online travel agencies and preference attributes. *Tourism management*, Elsevier, v. 28, n. 2, p. 591–603, 2007.
- KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by simulated annealing. *Science*, v. 220, n. 4598, p. 671–680, 1983. Disponível em: <<https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.220.4598.671>>.
- LAPORTE, G. The traveling salesman problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, v. 59, n. 2, p. 231–247, 1992. ISSN 0377-2217. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037722179290138Y>>.
- LAPORTE, G. The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, v. 59, n. 3, p. 345–358, 1992. ISSN 0377-2217. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037722179290192C>>.
- LAW, R.; LEUNG, D.; CHAN, I. Progression and development of information and communication technology research in hospitality and tourism: A state-of-the-art review. *International Journal of Contemporary Hospitality Management*, v. 32, n. 2, p. 511–534, 2020.
- MORRISON, D. R. et al. Branch-and-bound algorithms: A survey of recent advances in searching, branching, and pruning. *Discrete Optimization*, v. 19, p. 79–102, 2016. ISSN 1572-5286. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1572528616000062>>.
- NAKAMURA, K. Y. Problema do caixeiro viajante mochileiro: formulações e métodos de soluções. Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), 2015.

- OLIVEIRA, A. P. *Turismo e desenvolvimento: planejamento e organização*. [S.l.]: Atlas, 2002.
- OLIVEIRA, R. J. de. Turismo backpacker: estudo dos viajantes internacionais no brasil. *CULTUR: Revista de Cultura e Turismo*, UESC-Universidade Estadual de Santa Cruz, v. 2, n. 1, p. 89–104, 2008.
- OSABA, E. et al. A discrete water cycle algorithm for solving the symmetric and asymmetric traveling salesman problem. *Applied Soft Computing*, v. 71, p. 277–290, 2018. ISSN 1568-4946. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494618303818>>.
- PARIS, C. *The backpacker market: Targeting a mobile population through online communities*. [S.l.: s.n.], 2008. ISBN 054952665X.
- RAO, S. S. *Engineering optimization: theory and practice*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2019.
- REGO, C. et al. Traveling salesman problem heuristics: Leading methods, implementations and latest advances. *European Journal of Operational Research*, v. 211, n. 3, p. 427–441, 2011. ISSN 0377-2217. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221710006065>>.
- REINELT, G. *The traveling salesman: computational solutions for TSP applications*. [S.l.]: Springer, 2003. v. 840.
- ROKBANI, N. et al. Bi-heuristic ant colony optimization-based approaches for traveling salesman problem. *Soft Computing*, Springer, v. 25, p. 3775–3794, 2021.
- SANTOS, F. M. F. dos. Flying tourist problem. 2019.
- SOARES, R. A. M. d. C. et al. Revisão sistemática da produção científica brasileira sobre turismo e tecnologia da informação e comunicação (tic). *Revista Brasileira de Pesquisa Em Turismo*, SciELO Brasil, v. 16, p. e–2629, 2023.
- STANDING, J.-P. T.-T. C.; BOYER, M. The impact of the internet in travel and tourism: A research review 2001–2010. *Journal of Travel & Tourism Marketing*, Routledge, v. 31, n. 1, p. 82–113, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10548408.2014.861724>>.
- VENANZI, D.; SILVA, O. R. d. *Introdução à Engenharia de Produção: conceitos e casos práticos*. [S.l.: s.n.], 2016.
- VIEIRA, G. L. *Trip-Planning Optimization: Minimizing Cost and Travel Time in Itineraries with Multiple Destinations*. Tese (Doutorado) — MSc. Thesis., School of Engineering, Federal University of Minas Gerais, 2018.
- WU, G. et al. Solving time-dependent traveling salesman problem with time windows with deep reinforcement learning. In: IEEE. *2021 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. [S.l.], 2021. p. 558–563.

## Anexos

## ANEXO A – Códigos e dados utilizados

Repositório do GitHub: <https://github.com/carol-oliveirac/traveling-optimization>