



UM PROCEDIMENTO PARA TOMADA DE DECISÃO QUANTO AO RECEBIMENTO DE ÓRGÃOS BASEADO EM CAMINHOS MÍNIMOS

Gabriella Machado Darze

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes.

Orientadores: Marina Leite de Barros Baltar
Glaydston Mattos Ribeiro

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2024

UM PROCEDIMENTO PARA TOMADA DE DECISÃO QUANTO AO
RECEBIMENTO DE ÓRGÃOS BASEADO EM CAMINHOS MÍNIMOS

Gabriella Machado Darze

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Orientadores: Marina Leite de Barros Baltar
Glaydston Mattos Ribeiro

Aprovada por: Prof. Marina Leite de Barros Baltar
Prof. Glaydston Mattos Ribeiro
Prof. Rodolfo Benedito Zattar da Silva
Prof. Pedro Henrique González Silva

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
FEVEREIRO DE 2024

Machado Darze, Gabriella

Um procedimento para tomada de decisão quanto ao recebimento de órgãos baseado em caminhos mínimos/Gabriella Machado Darze. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2024.

XI, 59 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Marina Leite de Barros Baltar

Glaydston Mattos Ribeiro

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Transportes, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 52 – 59.

1. Transplante de órgãos. 2. Caminhos mínimos.
3. Transporte aéreo. I. Leite de Barros Baltar, Marina *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

Ao meu avô, Francisco.

Agradecimentos

Eterna gratidão aos familiares, amigos e professores que estiveram comigo ao longo dessa jornada. Um especial agradecimento ao meu melhor amigo, Caio Encarnação de Queiroz, pelas inúmeras tardes e noites de ajuda com códigos, por todo suporte ao longo desses anos e pelas conversas leves (ou não) e descontraídas sobre a vida. Ao Prof. Ribamar Rondon de Rezende dos Reis, meu orientador acadêmico da graduação e da vida, que vem acompanhando minha jornada desde 2017, deixando a A-319/9 sempre aberta para me acolher. Ao meu companheiro, Matheus, por todo café na cama, surpresas em dias cinzentos, por todo carinho, pelo colo e pelas séries e filmes no sofá que estica. Aos meus pais, por sempre me darem o suporte necessário para seguir em frente. À minha avó Elisabete, a pessoa mais doce que já conheci, e ao meu avô Francisco, a pessoa que mais me incentivou a seguir esse caminho.

Um agradecimento também ao pessoal da turma de Zouk do Comunidança, por deixar os dias mais leves. Aos amigos que o Instituto de Física me deu, especialmente Estevan, a pessoa mais cheia de vida de já conheci, por escutar os áudios de 10 minutos e por nunca bocejar ou dizer algo corriqueiro, à Isabelle e ao Gabriel, por toparem quase todas as minhas loucuras e pelas conversas madrugada a fora, e aos amigos João e Artur, pelos almoços e conversas pela UFRJ .

Gostaria de agradecer aos meus orientadores, Profa. Marina Leite Barros Baltar e Prof. Glaydston Mattos Ribeiro, por todos ensinamentos e apoio ao longo dessa jornada, aos meus colegas de laboratório, Luís, Filipe e Joyce e à Profa. Cíntia e ao Prof. Rodrigo, pelos momentos divertidos e pelas boas lembranças que irei levar do programa, à Jane, por todo carinho e apoio, à Priscila, uma pessoa que conheci de um modo inusitado e meses depois foi fundamental para o andamento desse trabalho, por todo suporte e carinho dentro da CNT, e à CAPES, pela bolsa de fomento à pesquisa, sem a qual essa dissertação não poderia ser realizada.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

UM PROCEDIMENTO PARA TOMADA DE DECISÃO QUANTO AO RECEBIMENTO DE ÓRGÃOS BASEADO EM CAMINHOS MÍNIMOS

Gabriella Machado Darze

Fevereiro/2024

Orientadores: Marina Leite de Barros Baltar
Glaydston Mattos Ribeiro

Programa: Engenharia de Transportes

O transplante de órgãos é, muitas vezes, a única solução para pacientes com falência de órgãos em estágio terminal e, ao contrário de outras modalidades de tratamento, envolve uma terceira entidade para além do paciente e da equipe médica: o doador. Como doadores e receptores encontrarem-se nas mais diversas regiões de um país, o tempo gasto no transporte do órgão torna-se uma etapa logística crucial para o atendimento dos pacientes em espera, visto que esse é um recurso limitado pelo tempo de isquemia fria do órgão. Dado o tempo disponível e extensas dimensões geográficas de países como o Brasil, o transporte aéreo torna-se a única opção viável para transpor longas distâncias. Apesar do reconhecimento internacional do Brasil pelos avanços em transplantes de órgãos, a Central Nacional de Transplantes (CNT) registrou a perda de 982 órgãos devido à falta de transportes para colaboradores e para o material entre 2011 e 2015, apontando a necessidade de estudos que visem otimizar o processo de transporte. Nesse contexto, esse trabalho propôs um procedimento baseado em um novo método de escolha de voos, permitindo uma maior liberdade, mas não completa de combinações de voos, comparando com outros dois: um que retrata a realidade atualmente empregada e um método que prevê uma liberdade máximo de combinações, para escolhas de combinações de voos comerciais baseados em caminhos mínimos com restrições de recursos para além do modelo atualmente empregado manualmente pela CNT. Para fins de estudo, nove cenários hipotéticos foram criados considerando dados de 30 aeroportos do Brasil e testados para os modelos propostos e o modelo atual. Com os resultados do presente estudo, observou-se reduções de até 6 horas no tempo de chegada ao destino.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

A PROCEDURE FOR DECISION-MAKING REGARDING ORGAN
ACCEPTANCE BASED ON MINIMUM PATHS

Gabriella Machado Darze

February/2024

Advisors: Marina Leite de Barros Baltar

Glaydston Mattos Ribeiro

Department: Transportation Engineering

Organ transplantation is often the only solution for patients with end-stage organ failure, and unlike other treatment modalities, it involves a third entity beyond the patient and the medical team: the donor. As donors and recipients may be located in various regions of a country, the time spent on organ transportation becomes a crucial logistical step in patient care, given that this is a resource limited by the organ's cold ischemia time. Given the available time and extensive geographical dimensions of countries like Brazil, air transportation becomes the only viable option for covering long distances. Despite international recognition of Brazil for its advances in organ transplants, the National Transplantation Center (CNT) reported the loss of 982 organs due to lack of transportation for staff and materials between 2011 and 2015, highlighting the need for studies aimed at optimizing the transportation process. In this context, this study proposed a procedure based on a new method of choosing flights, allowing greater but not complete freedom of combinations of flights, compared to two others: one reflecting the currently employed reality and a method that predicts maximum freedom of combinations for choosing commercial flights based on shortest paths with resource constraints beyond the model currently employed manually by the CNT. For study purposes, nine hypothetical scenarios were created considering data from 30 airports in Brazil and tested for the proposed models and the current model. With the results of the present study, reductions of up to 6 hours in arrival time at the destination were observed.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xi
1 Introdução	1
1.1 Objetivos e contribuições	4
1.2 Organização da dissertação	4
2 Revisão Bibliográfica	6
2.1 Os sistemas de transplantes	6
2.1.1 O sistema espanhol: um exemplo mundial	7
2.1.2 O sistema estadunidense	7
2.1.3 O sistema de transplantes de órgãos no Brasil	8
2.2 Logística dos sistemas de transplantes	12
2.3 Utilização da programação matemática nos estudos sobre a logística dos sistemas de transplantes	13
3 Procedimento proposto	21
3.1 O caminho mínimo	21
3.2 O caminho mínimo com restrição de recursos	23
3.3 O transporte aéreo de órgãos	25
3.4 Procedimento proposto	28
4 Resolução computacional	30
4.1 Algoritmo de Dijkstra	31
4.2 Algoritmo de Dijkstra modificado	33
4.3 Cenários estudados	35
5 Resultados	39
5.1 Resultados computacionais	39
5.2 Análise dos resultados	41
6 Conclusões	49

Lista de Figuras

1.1	Esquema das etapas do processo de doação-transplante [1]	2
1.2	Tempo máximo de isquemia de cada órgão [2]	3
2.1	Taxa de doação de órgãos por milhão da população mundial em 2021. Fonte: ON DONATION e TRANSPLANTATION [3].	10
2.2	Estimativas da necessidade de cada órgão frente ao número de trans- plantes realizados no Brasil em 2022. Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASI- LEIRA DE TRANSPLANTE DE ÓRGÃOS [4]	10
2.3	Dados gerais de doação e transplantes de órgãos por milhão de habi- tantes no Brasil em 2022. Fonte:ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TRANSPLANTE DE ÓRGÃOS [4].	11
2.4	Conexões entre palavras-chave dos estudos obtidos.	14
2.5	Fator de impacto dos periódicos das publicações obtidas na busca.	15
3.1	Exemplo hipotético simplificado de malha aérea de uma companhia em uma rede com cidades A-I [5]	26
3.2	Esquema do procedimento seguido	28
4.1	Aeroportos considerados no estudo	36
5.1	Diferenças nos tempos totais entre os três modelos estudados até cada destino para cenários que apresentaram pelo menos um destino viável.	42
5.2	Malha aérea do Brasil em 2021 para a Azul, Latam e Gol [6]	43
5.3	Representação de algumas rotas partindo de Salvador. Mapa elabo- rado com o My Maps Google 2024 [7].	45
5.4	Representação de algumas rotas partindo de Salvador. Mapa elabo- rado com o My Maps Google 2024 [7].	46

Lista de Tabelas

2.1	Estratégias de busca de estudos.	14
2.2	Foco dos estudos de otimização do transporte de órgãos a serem trans- plantados.	17
2.2	Foco dos estudos de otimização do transporte de órgãos a serem trans- plantados.	18
2.2	Foco dos estudos de otimização do transporte de órgãos a serem trans- plantados.	19
2.2	Foco dos estudos de otimização do transporte de órgãos a serem trans- plantados.	20
3.1	Descrições dos modelos elaborados	25
4.1	Aeroportos considerados no modelo	35
4.2	Órgãos e datas em que ficaram disponíveis para transporte	36
4.3	Aeroportos referentes aos pacientes da lista de espera pelos respectivos órgãos	37
4.4	Cenários considerados	37
4.5	Dados de entrada para resolução computacional	38
5.1	Resultados obtidos para os nove cenários analisados em cada um dos três modelos	40
5.2	Tempo de execução para cada cenário	41
5.3	Horários e operadores aéreos dos voos de Brasília para Manaus refe- rentes aos dias 03/10/2023 e 04/10/2023	44
5.4	Número de voos para os 30 aeroportos considerados no dia 02/10/2023 [8]	47

Capítulo 1

Introdução

O transplante é o ato de retirada de órgãos ou tecidos de uma pessoa viva ou falecida, conhecida como doador, para serem utilizados no tratamento de outras pessoas, os receptores, tendo por objetivo restabelecer funções vitais de um órgão ou tecido doente [9] e é a melhor, e às vezes a única, forma de tratamento para muitos pacientes com falência de órgãos em estágio terminal [10].

Ao contrário de outras modalidades de tratamento, o procedimento de transplante inclui não apenas o paciente e a equipe médica, mas também uma terceira entidade crucial: o doador. O doador desempenha um papel essencial ao disponibilizar órgãos e tecidos que oferecerão aos receptores a oportunidade de tratamento. Assim, ele se torna um elemento fundamental para o êxito do ciclo de doação-transplante. No Brasil há dois tipos de doadores permitidos pela legislação: doadores vivos e doadores falecidos por morte encefálica. No caso de doadores vivos, apenas podem sê-los maiores de idade, dotados de capacidade e que concedam seu consentimento informado, além da necessidade de ter parentesco até quarto grau com o receptor, ser conjugue ou ser submetido à aprovação da comissão de ética do hospital, da central de transplantes do estado e uma autorização judicial, em caso de não parentesco ou matrimônio [1].

Já nos casos de doadores falecidos, o potencial doador é o paciente com diagnóstico de morte encefálica (parada total e irreversível das funções encefálicas, mas mantimento dos batimentos cardíacos e a pressão sanguínea de forma artificial e temporária), no qual tenham sido descartadas as contra indicações clínicas que representam riscos aos receptores dos órgãos [1, 11]. Um único doador em boas condições tem o potencial de proporcionar tratamentos a uma significativa quantidade de pacientes por meio do transplante de diversos órgãos e tecidos, beneficiando dez ou mais receptores [11].

Um esquema do processo transplante-doação encontra-se na Figura 1.1. O processo tem início com a identificação dos possíveis doadores, procedendo em seguida aos testes de morte encefálica. Posteriormente, há a comunicação do falecimento aos

familiares e a notificação aos profissionais encarregados de buscar doadores. Estes iniciam a logística da doação, conduzindo a entrevista familiar para obter a autorização necessária, seguida pelo acionamento da equipe de remoção dos órgãos, transporte até o receptor e o transplante em si.

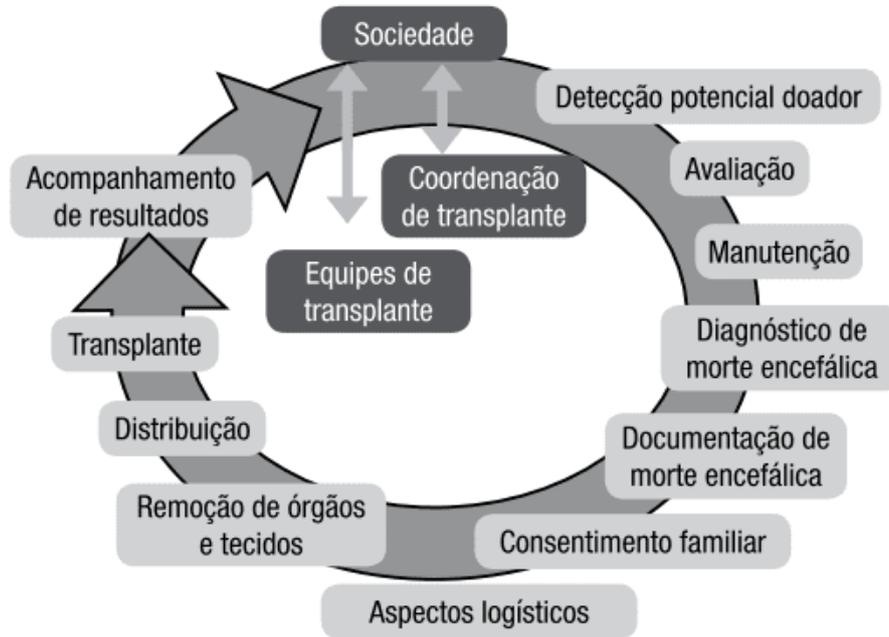


Figura 1.1: Esquema das etapas do processo de doação-transplante [1]

A partir do momento em que o processo de doação de um órgão se inicia, o tempo se torna a principal restrição, uma vez que o órgão doado tem um curto intervalo de tempo, desde sua alocação ao receptor apropriado até a realização da cirurgia em seu corpo, sendo esse o tempo máximo que o órgão pode permanecer funcional fora do organismo, o chamado tempo de isquemia fria, que varia de acordo com o órgão, como ilustrado na Figura 1.2 [2, 12, 13].

Embora o Brasil seja reconhecido internacionalmente pelos avanços em transplantes de órgãos, persistem desafios no âmbito logístico [14]. Segundo as Diretrizes Básicas para Captação e Retirada de Múltiplos Órgãos e Tecidos da Associação Brasileira de Transplante de Órgãos (2009) [15], os desafios logísticos constituem aproximadamente 5 a 10% das incidências relacionadas a não efetivação dos transplantes [14, 16], uma vez que a demora no processo resulta na irreversibilidade das lesões nos tecidos e na possível perda do órgão, visto que um maior tempo de isquemia está diretamente associado a prognósticos menos favoráveis [17]. No período de 2011 a 2015, a CNT registrou a perda de 982 órgãos devido a falta de transportes para colaboradores (equipe médica associada ao transplante) e para o material [14, 16].

Portanto, no contexto de perdas logísticas, o transporte dos órgãos é uma parcela fundamental do processo. Um dos desafios prementes enfrentados pelos bancos de

					
Coração	Pulmão	Rim	Fígado	Intestino	Pâncreas
4 horas	6 horas	48 horas	12 horas	6 horas	12 horas

Figura 1.2: Tempo máximo de isquemia de cada órgão [2]

órgãos, centros de transplantes, profissionais especializados e, de forma abrangente, pelo governo, reside na busca por estratégias que diminuam as filas de espera e, principalmente, as perdas de órgãos atribuíveis a questões como transporte e conservação. Desse modo, aprimoramento do transporte de órgãos pode desempenhar um papel substancial [18].

Em países com extensas dimensões geográficas, como o Brasil, o transporte aéreo é a única opção viável dada sua rapidez [19, 20] quando a distância entre o doador e o receptor implica em riscos para o sucesso da operação, aumentando as possibilidades de preservação. Apesar da queda do desperdício de órgãos relacionados à falta de transportes aéreos devido ao decreto presidencial disponibilizando aviões da Força Aérea Brasileira para o transporte de órgãos e ao acordo de 2013 [21] que possibilita o transporte gratuito de órgãos em voos comerciais, o país ainda perde mais de três órgãos por dia, por conta da falta de transporte adequado [18]. Ademais, problemas associados ao transporte aéreo englobam atrasos nos voos e envio para locais errados, como apontado em [22, 23].

Além do interesse por parte do receptor, a melhoria no sistema de transplantes é também de interesse do governo, uma vez que os custos associados ao transporte de órgãos tornam-se uma alternativa mais acessível quando comparados à estimativa de despesas relacionadas à permanência de um paciente na Unidade de Terapia Intensiva (UTI). Considerando os custos inerentes à internação hospitalar, o transporte de órgãos emerge como uma opção economicamente mais viável, uma vez que manter um paciente em leito resulta em custos superiores [17, 18].

Desse modo, a estruturação e os investimentos direcionados ao transporte aéreo representam uma abordagem crucial para otimizar o deslocamento de órgãos disponíveis para transplante em distâncias mais extensas, aumentando a resiliência do processo e garantindo armazenamento seguro do órgão, especialmente considerando

as vastas dimensões do Brasil [17, 24].

1.1 Objetivos e contribuições

A presente dissertação de mestrado tem como objetivo geral desenvolver um procedimento para a combinação de voos comerciais de passageiros tendo como base três métodos: o atualmente empregado pela CNT, o anteriormente desenvolvido por [9] e aprimorado por [25] e um novo método desenvolvido ao longo dessa dissertação. O novo método visa aprimorar a logística do transporte interestadual de órgãos para transplantes no Brasil de modo a respeitar parte das restrições impostas no acordo de 2013 entre o Ministério da Saúde e órgãos de aviação, o que não era feito anteriormente em [9, 25]. Dada a urgência e relevância desse procedimento, o tempo emerge como uma variável crítica, sendo a cadeia logística o estágio mais demorado. Assim, otimizar essa etapa é crucial para assegurar o atendimento eficiente dos pacientes em lista de espera e a preservação da qualidade dos órgãos doados.

Essa dissertação tem como objetivos específicos:

1. Avaliar modos de otimizar o transporte de órgãos para transplante por meio aéreo;
2. Utilizar o método de caminhos mínimos com restrição na solução do problema; e
3. Analisar as características das regiões que mais podem se beneficiar com a flexibilização do acordo entre a CNT e as companhias aéreas.

Nesse contexto, a contribuição desta dissertação reside na demonstração de como uma abordagem mais flexível nas escolhas de voos comerciais de passageiros, impacta positivamente o tempo de entrega ao destino. Esse intervalo temporal é de extrema importância para garantir a qualidade dos órgãos e, em alguns casos, possibilita alcançar destinos que não seriam acessíveis apenas por meio das opções comerciais disponíveis nos sites das companhias aéreas, como previsto no acordo assinado em 2013 [21]. Dessa forma, o procedimento proposto contribui para tornar o sistema de distribuição de órgãos mais equitativo entre as diversas regiões do país.

1.2 Organização da dissertação

Esse documento está organizado em seis capítulos, além deste capítulo introdutório. O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica abrangente sobre os sistemas de transplantes em todo o mundo, destacando as abordagens adotadas na Espanha,

nos Estados Unidos e no Brasil. Adicionalmente, realiza-se uma análise dos estudos existentes sobre a logística dos sistemas de transplantes. No Capítulo 3, detalha-se o procedimento seguido no desenvolvimento da pesquisa, abordando questões como o problema do caminho mínimo e problemas com restrições de recursos para, então, introduzir o modelo matemático utilizado. O Capítulo 4 ressalta como o modelo foi resolvido computacionalmente, apontando o algoritmo base para este trabalho e suas modificações, além de apresentar os cenários estudados e como os mesmos foram construídos. No Capítulo 5, os resultados do algoritmo empregado são expostos e discutidos. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as considerações finais do trabalho, proporcionando uma conclusão abrangente sobre os resultados e contribuições alcançados ao longo da pesquisa.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

No presente capítulo são apresentados conceitos e definições utilizados no desenvolvimento desta pesquisa que envolvem o funcionamento de sistemas de transplantes em países tidos como referência no transplante de órgãos, segundo dados do Global Observatory on Donation and Transplantation de 2021 [3], e no Brasil, país onde o estudo de caso é realizado. Além do esclarecimento a respeito do funcionamento dos sistemas, uma revisão a respeito de métodos de otimização do transporte de órgãos, destacando dados usados por cada modelo, além do método em si também é realizada.

2.1 Os sistemas de transplantes

Dado que se trata de uma abordagem multidisciplinar que envolve a colaboração de diversas equipes, o aprimoramento do sucesso em transplantes de tecidos ou órgãos específicos tem sido consequência dos progressos no campo médico [26] e na eficiente gestão de informações. Isso inclui o planejamento e a coordenação das equipes médicas encarregadas da captação de órgãos, seu acondicionamento e o subsequente transporte [27].

Neste cenário, nos últimos anos, determinados países têm se destacado significativamente em termos de eficácia de suas redes de transplantes e suas diversas abordagens na estruturação, distribuição de órgãos e promoção da doação. Atualmente, os Estados Unidos lideram em termos de taxa de transplantes realizados em relação à sua população, demonstrando uma notável realização nessa área [3].

Enquanto os Estados Unidos lideram atualmente em transplantes em relação à sua população, a Espanha ostentou o título de líder mundial na taxa de transplantes de órgãos entre 1992 e 2018. Mesmo agora, a Espanha continua entre os países com uma das mais elevadas taxas de transplantes de órgãos por milhão de habitantes, em segundo lugar, registrando 102,38 por milhão em 2021. Embora tenha sido superada pelos Estados Unidos, mantém uma posição de destaque. Nesta seção, então, serão

examinados o modelo de transplantes e transporte de órgãos na Espanha, que serve como referência global, bem como nos Estados Unidos, devido à sua semelhança em termos de dimensões territoriais, e no Brasil.

2.1.1 O sistema espanhol: um exemplo mundial

Como dito anteriormente, desde 1992 a Espanha se mantém entre os países com maior taxa de transplantes de órgãos por milhão de habitante, com uma taxa de 102,38 doações em 2021, ficando atrás apenas dos EUA [3].

O modelo espanhol para coordenação de transplantes opera em três níveis distintos: o nacional, o autônomo e o hospitalar. Os dois primeiros níveis recebem financiamento da administração de saúde nacional e estabelecem conexões com as esferas política, administrativa e profissional. O nível hospitalar diz respeito à coordenação interna das instituições de saúde: um médico atua como coordenador, enquanto uma equipe capacitada dentro do próprio hospital realiza as atividades relacionadas à captação de órgãos. Nesse último modelo, as atividades de captação de órgãos realizadas nos hospitais são compensadas financeiramente, e são implementadas auditorias de protocolos de morte encefálica para assegurar a qualidade do processo. Além disso, o modelo espanhol incorpora um sistema de comunicação, educação e divulgação, bem como um canal telefônico dedicado, por meio do qual informações sobre o processo de doação e transplante são disponibilizadas ao público em geral [28, 29].

Na Espanha, o transporte de órgãos é planejado levando em consideração a distância a ser percorrida e a necessidade de uma equipe de extração de órgãos. Em todas as situações, existe um nível de coordenação, que pode variar de um simples ponto de referência entre o hospital doador e o hospital receptor a um envolvimento mais detalhado no processo de transporte.

Para distâncias inferiores a 200 km, a preferência é o uso de veículos motorizados de saúde ou helicópteros para a transferência das equipes envolvidas. No entanto, em situações em que as distâncias a serem percorridas são mais longas, excedendo os 200 km, devido à necessidade de minimizar o período de isquemia que os órgãos podem tolerar, o transporte é realizado utilizando aeronaves comerciais. Em ocasiões excepcionais, a intervenção da Força Aérea pode ser necessária para garantir a eficácia do processo [30].

2.1.2 O sistema estadunidense

Nos Estados Unidos, o sistema de transplantes de órgãos é uma colaboração entre a United Network for Organ Donation (UNOS) e as Organizações de Captação de Órgãos (Organ Procurement Organizations - OPOs), que operam conjuntamente no

âmbito do sistema nacional de transplantes. A UNOS é uma entidade privada sem fins lucrativos encarregada de supervisionar o sistema de transplantes de órgãos do país. Em estreita cooperação com a comunidade de doação e transplante, ela desenvolve políticas, fornece educação e avança em tecnologias, com o objetivo contínuo de aprimorar o sistema como um todo. As OPOs também são organizações privadas sem fins lucrativos, encarregadas da recuperação de órgãos de doadores falecidos nas áreas de serviço de doação específicas (conhecidas como Donation Service Areas - DAS), desempenhando um papel crucial na linha de frente da captação, estabelecendo contato direto com as famílias dos doadores falecidos para garantir a coleta adequada dos órgãos [31].

Segundo a mesma organização [31], ao obter consentimento para uma doação, a OPOs insere dados médicos, como o tipo sanguíneo e as dimensões corporais do doador, juntamente com a localização do hospital doador, em uma plataforma *web* segura fornecida pela UNOS. Essa plataforma conecta todas as organizações de captação de órgãos e hospitais de transplante. A partir desse ponto, o processo de busca por potenciais receptores é iniciado. Para cada correspondência bem-sucedida, a OPO atua na facilitação da autorização, condução de testes, recuperação dos órgãos do doador e na entrega desses órgãos ao hospital de transplante apropriado.

Assim como o modelo espanhol, em situações que envolvem doações de órgãos com longas distâncias a serem percorridas, o único meio de transporte viável é o transporte aéreo. Nos Estados Unidos, o país possui um acordo com companhias aéreas para viabilizar o transporte de órgãos com um limite de tempo de isquemia mais restrito, utilizando voos comerciais. Isso assegura que órgãos com maior restrição de tempo sejam transportados em tempo hábil [20].

A partir de 2019, o país superou a Espanha em número de doações por milhão, com 123,43 de doações por milhão frente a 117,44 [32]. A melhoria do sistema americano se deve a fatores como a adoção de novas métricas para as organizações de procura de órgãos [33], expansão de critérios de doação, como doação após a determinação de morte circulatória e avanços na preservação de órgãos [34, 35] além de melhores treinamentos aos estudantes de enfermagem sobre doação de órgãos [36].

2.1.3 O sistema de transplantes de órgãos no Brasil

Os primeiros transplantes de órgãos no Brasil datam da década de 1960, mas apenas em 1997 foram regulamentados por meio da Lei n. 9.434/1997 e seu Decreto n. 2.268, que sofreram alterações ao longo dos anos [11]. Atualmente, o sistema de busca e oferta de órgãos é organizado a partir de um modelo híbrido que combina entidades responsáveis pela busca de órgãos, comissões de doação intra hospitalares

e, adicionalmente, instituições fora do ambiente hospitalar que atuam na busca e distribuição, sendo uma estrutura específica para cada unidade federativa [37].

No âmbito nacional, a instituição encarregada da supervisão e acompanhamento do procedimento de doação de órgãos e tecidos para transplantes com fins terapêuticos é o Sistema Nacional de Transplantes (SNT), estabelecido em 1997 por meio do decreto Nº 2.268 de 30 de junho. Suas responsabilidades abrangem atividades de direção política, estímulo à doação, coordenação logística, certificação das equipes médicas e instituições hospitalares aptas a realizar os transplantes, determinação do financiamento e formulação de regulamentos por meio de portarias que orientam todas as etapas do processo, desde a obtenção de órgãos até o acompanhamento dos pacientes transplantados [38].

Sob um aspecto logístico, o procedimento de transplante envolve uma série de etapas que abrangem a preparação, conservação e transporte dos órgãos, respeitando os prazos estabelecidos com base na isquemia específica de cada órgão, levando em consideração as distâncias entre o local de captação e o de implantação. Adicionalmente, aspectos mais detalhados, como a programação das salas cirúrgicas e a disponibilidade de materiais e equipamentos especializados, também são levados em conta. O início desse processo ocorre após a identificação da morte encefálica do potencial doador e a comunicação desse fato à Central de Transplantes. A eficiência desse procedimento depende da rapidez e precisão com que é conduzido.

De acordo com o disposto na Portaria nº 2.600/2009, quando um órgão é coletado em um estado, a prioridade é alocá-lo para um paciente residente nesse mesmo estado, sempre respeitando a classificação na lista única nacional. No entanto, caso essa ação não seja viável, é imperativo que o órgão seja oferecido a um paciente que reside em um dos demais estados pertencentes à mesma macrorregião (uma área geográfica que abrange vários estados). Caso o órgão não consiga ser alocado em uma mesma macrorregião, ele deve, então, ser ofertado às demais.

Com o objetivo de otimizar e acelerar o transporte de órgãos, um termo de cooperação técnica foi estabelecido em 2013, envolvendo o Ministério da Saúde, a Secretaria de Aviação Civil, o Comando da Aeronáutica e as companhias aéreas. Por meio deste acordo, as empresas se comprometem a disponibilizar gratuitamente e com prioridade o transporte das equipes de transplante e dos órgãos doados em seus voos comerciais. Além disso, dão prioridade às escalas, quando necessárias, que estejam previamente planejadas pelas companhias. Dessa maneira, a Central Nacional de Transplantes (CNT) consegue alocar o órgão no voo mais apropriado, considerando o tempo de isquemia. Essa comunicação direta e imediata com as diversas entidades envolvidas no transporte de órgãos aprimora a eficiência do processo [21].

Adicionalmente, é importante ressaltar que todo o processo de doação e recepção de órgãos no país constitui o maior programa público de transplantes de tecidos e

órgãos em escala mundial. Esse programa é garantido pelo Sistema Único de Saúde (SUS), que é responsável por financiar aproximadamente 88% dos procedimentos de transplante [39]. No entanto, apesar desse suporte, o Brasil ainda registra taxas relativamente baixas de transplantes em comparação com outros países, como observado na Figura 2.1, além de apresentar baixas taxas de doação frente a necessidade nacional, como mostram dados de 2022 da ABTO (Associação Brasileira de Transplantes de órgãos) expressos na Figura 2.2.

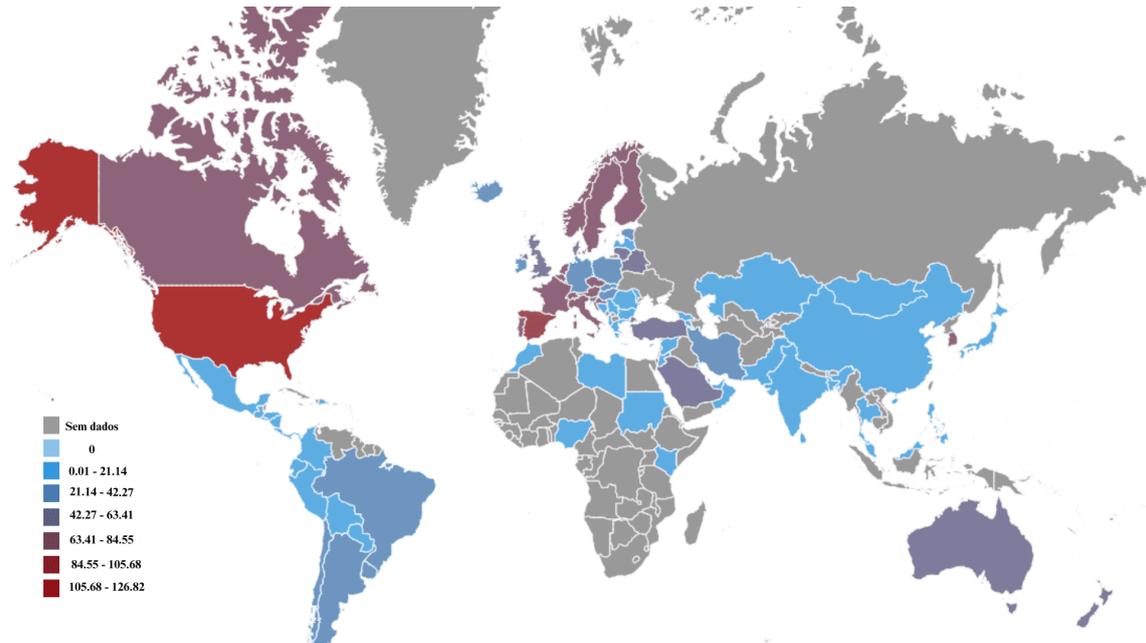


Figura 2.1: Taxa de doação de órgãos por milhão da população mundial em 2021. Fonte: ON DONATION e TRANSPLANTATION [3].

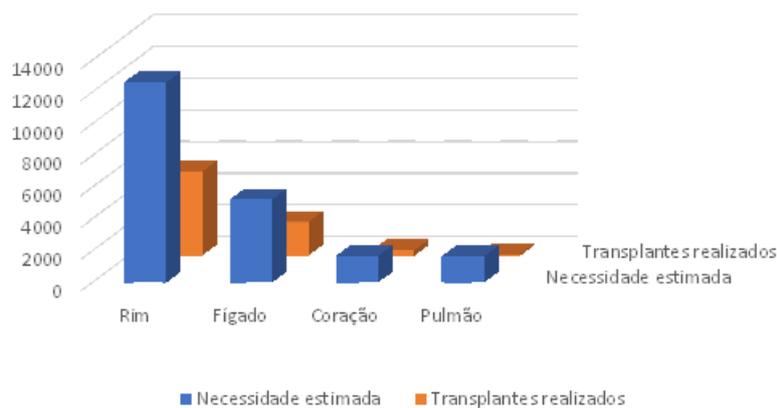


Figura 2.2: Estimativas da necessidade de cada órgão frente ao número de transplantes realizados no Brasil em 2022. Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TRANSPLANTE DE ÓRGÃOS [4]

Dados da ABTO de 2022 [4] apontam ainda as diferenças internas enfrentadas pelo país, como é possível perceber na Figura 2.3. A região Norte possui o menor

índice de doação por milhão de habitantes, aumentando a necessidade de órgãos advindos de outras regiões, quando há necessidade de transplantes, enquanto a região Sul possui a maior taxa de doação.



Figura 2.3: Dados gerais de doação e transplantes de órgãos por milhão de habitantes no Brasil em 2022. Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TRANSPLANTE DE ÓRGÃOS [4].

Com base no que foi apresentado nesta seção, fica evidente a relevância de um sistema eficiente de transplantes e a necessidade de abordar as deficiências existentes nos sistemas atuais. Na próxima seção, serão abordados os estudos que visam aprimorar a otimização desses sistemas.

2.2 Logística dos sistemas de transplantes

Os sistemas de transplantes passaram por mudanças significativas desde o primeiro procedimento realizado em 1954 [40]. Apesar dos avanços, muitos desafios logísticos ainda estão presentes no processo, como a alocação dos órgãos.

Os métodos de alocação visam obter um equilíbrio apropriado entre demandas conflitantes de utilidade, dever de cuidado aos pacientes individuais, justiça e benefício. Dada a escassez de órgãos de doadores falecidos, as regras para seleção de pacientes a serem transplantados devem ser criteriosamente consideradas, além da necessidade de serem transparentes e contar com apoio do público e de profissionais de saúde [41]. A alocação apresenta ainda como desafios a compatibilidade do órgão, a coordenação correta das equipes de transporte [26] e as distâncias a serem percorridas até o receptor uma vez que os doadores podem estar localizados em qualquer cidade, enquanto os receptores estão restritos a hospitais com centros de transplante de órgãos. Além disso, prolongar o tempo sem suprimento sanguíneo reduz a probabilidade de sucesso da operação. Isso destaca a relevância da localização da cidade do doador [42].

Com os rápidos avanços na compreensão da imunologia e nos cuidados cirúrgicos, a capacidade da infraestrutura de transporte de órgãos foi ultrapassada. As estratégias atuais de alocação exigem que órgãos doadores percorram distâncias mais extensas ao longo de períodos prolongados, afetando a qualidade dos órgãos [40]. Um estudo realizado por GENÇ [43] mostrou que o dano aos órgãos sobe de uma taxa de 14%, quando o transplante ocorre no mesmo centro médico da retirada do órgão, para 29% quando são transferidos para outros centros médicos, apontando os efeitos negativos de elevados tempo de viagem e do modo como os órgãos são transportados.

No contexto de elevados tempos de viagem, se o intervalo de transporte entre o hospital do doador e o do receptor exceder o tempo máximo, torna-se imperativo encontrar outra instituição receptora; caso contrário, a realização do transplante fica inviabilizada [24, 44].

Já quanto aos transportes, os desfechos das atividades de transplante são consideravelmente influenciados pela habilidade de transportar órgãos e equipes médicas de forma ágil e segura. Embora os critérios de alocação e uso de órgãos tenham apresentado melhorias ao longo do tempo, com uso da imunologia, da estratificação da doença do paciente e do viés geográfico, o mesmo avanço ainda não foi alcançado no que diz respeito à perspectiva da infraestrutura de movimentação de órgãos [24, 40].

Para além do tempo prolongado de isquemia a frio, a segurança dos passageiros também tem sido desafiada no caso da escolha por transporte aéreo (caso de

longas distâncias), visto que diversos acidentes com membros da equipe de recuperação de órgãos foram notificados, como o ocorrido com uma equipe de recuperação composta por dois cirurgiões, dois perfusionistas e dois pilotos, vítimas da queda do avião enquanto retornavam com pulmões para transplantes no Centro Médio da Universidade de Michigan [45]. Com o aumento do número de órgãos doadores que exigem transporte aéreo para entrega pontual, as equipes de aquisição têm enfrentado níveis cada vez mais elevados de risco de acidentes [40].

Diante do exposto, nota-se que a logística pode e deve ser aprimorada [42] afim de reduzir acidentes e otimizar o tempo de chegada ao receptor, reduzindo riscos de perda dos órgãos.

2.3 Utilização da programação matemática nos estudos sobre a logística dos sistemas de transplantes

Afim de entender o atual panorama dos estudos que consideram programação matemática e logística nos sistemas de transportes, foi realizada uma pesquisa bibliográfica por meio de pesquisas diretas nas bases de dados, empregando as expressões-chave sugeridas na Tabela 2.1 e aplicando uma seleção nos estudos, nove artigos foram identificados, além de uma dissertação. Notou-se uma prevalência de pesquisas provenientes do Irã, com um notável incremento no volume de publicações a partir de 2018, atingindo o ápice em 2022, quando foram registradas três publicações.

É interessante avaliar as principais palavras-chave obtidas nos artigos incluídos, conforme expresso na rede de palavras-chave interligadas da Figura 2.4 desenvolvida com auxílio do *software* VOSviewer. Nela, é possível observar 170 itens, 6 *clusters* e 1002 conexões e que as principais palavras-chave utilizadas pelos autores foram: programação inteira (*integer programming*), transplante de órgãos (*organ transplant*), cadeia de suprimentos (*supply chain*) e gestão de saúde (*healthcare management*). Apesar do enfoque da busca no transporte, é possível perceber que, apesar de abordarem a temática, os estudos em questão não possuíam por foco o transporte em si, mas sim a otimização da cadeia como um todo. Observa-se também, a partir das palavras chaves, a preocupação com as incertezas relacionadas a esse processo (*uncertainty analysis*) e a necessidade de uma boa gestão (*managers*).

Tabela 2.1: Estratégias de busca de estudos.

Critério	Descrição
Bases de dados	Web of Science, Scopus
Palavras-chave	Primeira busca: em todos os campos - "OPTIM*"AND "AIR TRANSPORT*"AND "ORGAN TRANSPLANT*" Segunda busca: tópico - OPTIM* AND TRANSPORT* AND "ORGAN TRANSPLANTATION" Terceira busca: todos os campos - "LINEAR PROGRAMMING*"AND TRANSPORT* AND "ORGAN TRANSPLANTATION"
Método de busca	Busca direta Tempo de cobertura: todos os anos do banco de dados;
Inclusão	Tipo de documento: apenas artigos; Abordar métodos de otimização e novos parâmetros de otimização para o transporte de órgãos a serem transplantados. Relevância da fonte.
Data da busca	De 19 a 23 de maio de 2023

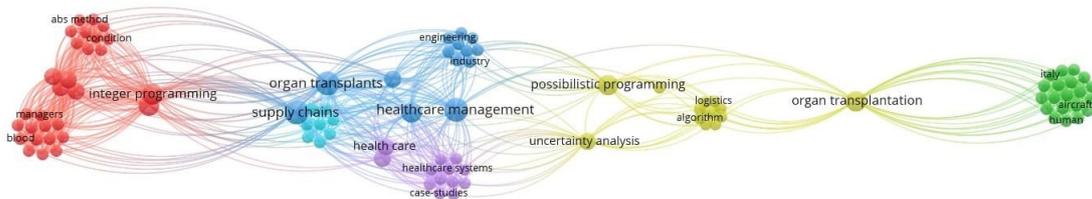


Figura 2.4: Conexões entre palavras-chave dos estudos obtidos.

Além das palavras-chave, uma análise dos periódicos em que foram publicados também é relevante, uma vez que o prestígio do periódico é um bom indicador da qualidade dos artigos obtidos. A partir da Figura 2.5 é possível perceber que o periódico de maior destaque é o Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review (Fator de impacto JCR: 10,6) seguido do Expert Systems with Applications (Fator de impacto JCR: 8,5).

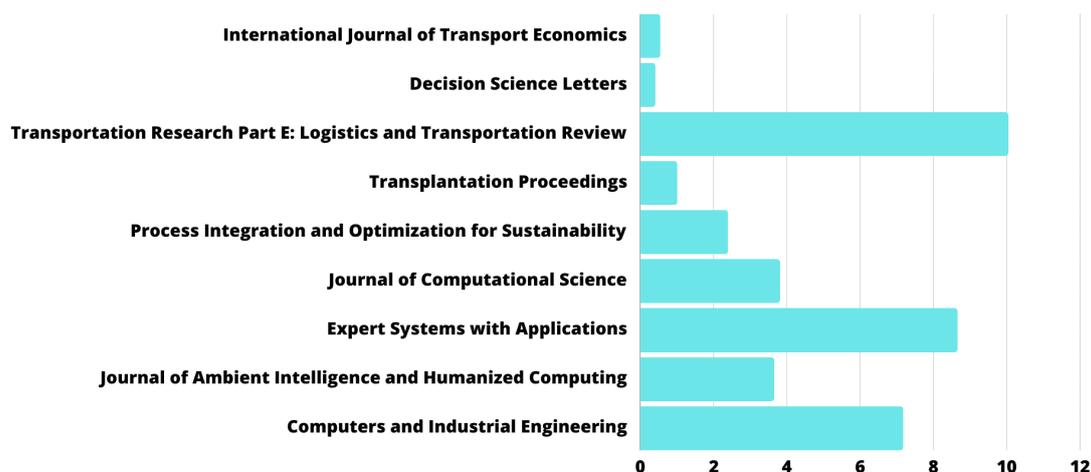


Figura 2.5: Fator de impacto dos periódicos das publicações obtidas na busca.

Dos nove estudos destacados na pesquisa, seis deles concentram-se na otimização dos modelos abrangentes de redes de transplante. Isto é, eles se dedicam a identificar a melhor maneira de coordenar todas as fases envolvidas no transporte e alocação de órgãos em redes específicas. Em contrapartida, duas pesquisas exploram a alocação estratégica de aeronaves em território italiano, com o intuito de otimizar o transporte de órgãos, enquanto uma única pesquisa se concentra no cenário brasileiro, visando aprimorar a seleção de voos comerciais para esse fim. A dissertação incluída no estudo introduz um novo algoritmo destinado a otimizar a escolha de voos no contexto brasileiro.

No estudo conduzido por CACCHIANI *et al.* [46] e no trabalho de PAGANELLI *et al.* [47], abordagens distintas de modelagem linear inteira em cenários relacionados à Itália são realizadas. No primeiro caso, [46] visam à distribuição estratégica de aeronaves dedicadas ao transporte de órgãos em território italiano, selecionando *hubs* com base em padrões históricos de demanda. O estudo inclui a avaliação de dois cenários reais para validar o modelo proposto. Por outro lado, [47] utilizam modelagem para mitigar a duplicação e o uso excessivo de recursos associados à alocação de aeronaves especializadas para o transporte de órgãos em determinados centros na Itália, aplicando restrições relacionadas à utilização de aeronaves e à duração real das missões.

JALILVAND *et al.* [48] empregaram uma abordagem de programação não linear inteira mista (MINLP) biobjetiva. O objetivo era a minimização dos custos globais, abrangendo tanto os custos estratégicos como operacionais, bem como a redução do número de demandas não atendidas. Os autores deram prioridade aos receptores

considerados de alto risco e incorporou questões relativas a restrições de transporte, com o intuito de reduzir as emissões de carbono.

No trabalho de SALIMIAN e MOUSAVI [49], um modelo distinto de programação linear inteira mista multiobjetivo é adotado com o intuito de otimizar simultaneamente o custo e o tempo da rede, enquanto maximiza a qualidade dos órgãos transmitidos em termos econômicos e sociais. O autor também leva em consideração a variedade de tipos de veículos disponíveis, ajustando-se às condições meteorológicas e à qualidade dos órgãos. No âmbito de SALIMIAN e MOUSAVI [50], uma nova análise é conduzida, desta vez contemplando a compatibilidade de tipo sanguíneo entre doador e receptor, além da implementação de um sistema de filas de transplantes.

No estudo realizado por ROUHANI *et al.* [51], a probabilidade de sucesso nos procedimentos de transplantes é um fator crucial considerado. Para abordar essa questão, os autores empregaram um modelo de programação biobjetiva (BOPP) visando tomar decisões estratégicas apropriadas na concepção de redes de transplantes de órgãos, especialmente em meio a incertezas relacionadas ao suprimento e ao orçamento. Os autores desenvolveram funções de utilidade que se alinham com os critérios de transporte pertinentes.

No Brasil, CARRARA *et al.* [52] empreenderam um estudo com o propósito de selecionar as melhores opções de voos comerciais para o transporte de órgãos destinados a transplante: empregaram uma abordagem de programação linear inteira mista (MILP) e desenvolveram um modelo destinado a otimizar a escolha de voos e suas combinações, visando à minimização do tempo necessário para atingir o destino. Por sua vez, BALSTER [25] abordou a mesma problemática apresentada por CARRARA *et al.* [52], porém adotou um algoritmo de rotulação por programação dinâmica para a seleção dos voos comerciais mais adequados, resolvendo os casos reais em menos de um segundo. Ambos os estudos fundamentaram suas análises em dados históricos fornecidos pela CNT e pela ANAC.

É notável que uma variedade de métodos de otimização é empregada em diversos estudos, todos com o propósito central de minimizar um fator crítico: o tempo. A eficiência nesse quesito é fundamental para reduzir as chances de perda de órgãos e, conseqüentemente, elevar as probabilidades de sucesso nos transplantes.

Além da diversidade de métodos de otimização, diferentes ferramentas são utilizadas para resolver os modelos matemáticos a serem otimizados. Autores como CACCHIANI *et al.* [46], SALIMIAN e MOUSAVI [49], PAGANELLI *et al.* [47] e CARRARA *et al.* [52] recorrem ao *solver* CPLEX para a resolução dos modelos. Enquanto isso, JALILVAND *et al.* [48] adotam o *software* GAMS com o *solver* BARON para resolver seu modelo. Outros pesquisadores, por sua vez, optam por métodos e técnicas de programação com o intuito de encontrar as melhores soluções. Em

ROUHANI *et al.* [51], é adotada uma abordagem de programação de metas *fuzzy* para resolver modelos com múltiplos objetivos e controlar seus desvios em relação aos níveis de aspiração correspondentes. KARGAR *et al.* [53] empregam uma abordagem interativa híbrida de duas fases, que incorpora programação de metas *fuzzy*, para resolver o modelo de alocação de órgãos desenvolvido. No estudo de SALIMIAN e MOUSAVI [50], dois métodos de otimização (meta-heurísticas) são aplicados para solucionar o problema, incluindo o algoritmo genético (GA) e o algoritmo da Black Widow Optimization (BWO). Além disso, um novo método de ϵ -*constraint* aprimorado é utilizado para solucionar o modelo multiobjetivo em ROUHANI e AMIN [54]. Por último, BALSTER [25], em sua dissertação de 2019, emprega o algoritmo de rotulagem de programação dinâmica para otimizar o transporte de órgãos destinados a transplantes.

Também se observa variações significativas no que diz respeito ao método de transporte de órgãos por aeronaves, particularmente nos estudos que exploram o transporte aéreo. No cenário brasileiro, os órgãos são geralmente transportados por meio de voos comerciais, aproveitando as redes de transporte existentes. Por outro lado, na Itália, é comum a alocação exclusiva de aeronaves dedicadas ao transporte de órgãos, o que ressalta uma abordagem distinta e mais direcionada para esse propósito específico. A Tabela 2.2 proporciona um resumo abrangente dos resultados obtidos nesta análise.

Tabela 2.2: Foco dos estudos de otimização do transporte de órgãos a serem transplantados.

Publicação	Objetivo	Dados de entrada	País
Cacchiani et al. (2018)	Distribuir aeronaves especializadas para o transporte de órgãos em um conjunto selecionado de centros de operação na Itália, com base nos padrões de demanda histórica.	Data do falecimento do doador; Data da chegada da equipe médica ao aeroporto próximo ao de retirada; Data da saída do aeroporto; Data de aterrissagem no destino; Data do início do transplante.	Itália

Tabela 2.2: Foco dos estudos de otimização do transporte de órgãos a serem transplantados.

Publicação	Objetivo	Dados de entrada	País
Paganelli et al. (2019)	Minimizar a duplicação e otimizar a utilização dos recursos relacionados à atribuição de aeronaves especializadas para o transporte de órgãos em alguns centros específicos no território italiano.	Horários de início e término de cada atividade; Definição de atividades incompatíveis.	Itália
Jalivand et al. (2022)	Reduzir os custos globais estratégicos e operacionais, além de minimizar o número de solicitações não atendidas.	Tipos de veículos escolhidos pelos hospitais; Capacidade de cada tipo de veículo; Possíveis locais de instalação de subcentros; Inventário de órgãos por hora nos hospitais da rede; Emissão de gás carbônico por veículo.	Irã
Rouhani et al. (2021)	Adotar as decisões estratégicas adequadas para o planejamento de redes de transplante de órgãos, levando em consideração as incertezas relacionadas ao suprimento e ao orçamento disponível.	Número de hospitais da rede; Localização dos doadores; Localização dos centros de identificação e unidades de procura de órgãos.	Irã
Rouhani e Amin (2022)	Reduzir o tempo total e os gastos globais, enquanto assegura uma distribuição equitativa dos recursos em diferentes regiões geográficas na rede, mesmo diante da incerteza associada à oferta e demanda.	Distribuição de ofertas de órgão no país de acordo com o meio de transporte (aéreo ou terrestre); Tempos entre nós da rede; Custos de alocação de hospitais; Custos de transporte.	Irã

Tabela 2.2: Foco dos estudos de otimização do transporte de órgãos a serem transplantados.

Publicação	Objetivo	Dados de entrada	País
Salimian e Mousavi (2022a)	Reduzir tanto em termos de custo quanto de tempo na rede, ao mesmo tempo em que se busca maximizar a qualidade dos órgãos transmitidos, considerando as dimensões econômica e social de forma simultânea.	Localização dos receptores; Capacidade e os recursos de cada centro de transplante; O tempo que cada tipo de órgão leva em cada centro de transplante.	Irã
Kargar et al. (2020)	Aumentar a taxa de sobrevivência dos pacientes ao mesmo tempo em que se reduz o custo e o tempo de transporte.	Os possíveis modos de transporte; Custo de transporte de pacientes e órgãos entre os centros de transplantes; Tempo de viagem entre nós; Probabilidade de sucesso do transplante.	Irã
Carrara et al. (2018)	Escolher as opções de voos mais adequadas para o transporte de órgãos destinados a transplante por meio de companhias aéreas comerciais.	Dados de saídas e chegadas de todos os voos dos 32 aeroportos considerados.	Brasil
Balster (2019)	Desenvolver um algoritmo que efetue a seleção de voos para o transporte de órgãos em procedimentos de transplante, com o objetivo de minimizar o tempo necessário para a chegada ao destino.	Dados de saídas e chegadas de todos os voos dos 32 aeroportos considerado; Lista de espera.	Brasil

Tabela 2.2: Foco dos estudos de otimização do transporte de órgãos a serem transplantados.

Publicação	Objetivo	Dados de entrada	País
Salimian e Mousavi (2022b)	O objetivo central é reduzir ao mínimo o tempo de entrega de órgãos, mesmo após ocorrerem interrupções, enquanto simultaneamente maximiza-se a qualidade dos órgãos transportados.	Localização de todos os hospitais e centros de transplantes da rede; Lista de espera de doadores; Tipos de veículos disponíveis; Unidades auxiliares de centros de transplantes e seus recursos.	Irã

Sendo assim, o procedimento apresentado no Capítulo 3 é diferente dos já publicados, pois busca trazer mais elementos observados na prática no cenário brasileiro: com base no método do caminho mínimo com restrições de recursos e com base em dados de voos entre 30 aeroportos do Brasil, busca-se comparar três métodos distintos de possibilidades de voos entre uma dada origem e um dado destino, buscando a rota com menor tempo possível em cada caso dada uma lista de espera de pacientes por órgão.

Além disso, a dissertação em questão apresenta um novo ponto em relação ao trabalho de CARRARA *et al.* [9] e BALSTER [25]. Ambos os estudos consideram o mesmo modelo, em que há total liberdade de escolha de voos ao se realizar uma escala, podendo haver combinações de companhia aéreas deferentes, caso essa fosse a melhor opção. Esse modelo de escolha, no entanto, não é permitido pelo acordo de 2013, que prevê apenas escolhas de combinações de voos pré-definidas pelas companhias aéreas, e possui limitações práticas, uma vez que uma troca de companhia aérea ao se realizar uma escala implica em maior risco de extravio do órgão. Nesse sentido, a presente dissertação busca explorar uma flexibilização do acordo, permitindo que qualquer combinação de voos da mesma empresa aérea seja realizada, comparando com resultados obtidos atualmente considerando-se a máxima restrição.

Capítulo 3

Procedimento proposto

Neste capítulo, é feita uma introdução ao caminho mínimo, seguindo para o caminho mínimo com restrições de recursos, destacando sua relevância para o estudo dos cenários em questão e introduzindo os modelos matemáticos utilizados nesta pesquisa. Por último, o procedimento seguido para desenvolvimento do estudo é apresentado, destacando as etapas a serem seguidas para implementação da resolução computacional do problema.

3.1 O caminho mínimo

Seja N um conjunto finito, cujos elementos são chamados de nós ou vértices e E um conjunto finito de pares de nós, cujos elementos (i, j) são denominados arestas. O par $G = (N, E)$ é um grafo. Quando os nós e/ou arestas possuem um valor a elas associados, o grafo recebe o nome de rede. Se as arestas são pares ordenados, tem-se um dígrafo, cujos pares ordenados (i, j) são denominados arcos, e quando os arcos e/ou nós possuem valores a eles associados, tem-se uma rede orientada [55].

Um dos problemas em grafos é o problema do caminho mínimo, que consiste em encontrar um caminho entre dois vértices (nós) em um grafo dado, de modo que a soma das distâncias das arestas que o compõem seja a menor possível. Este problema tem sido amplamente estudado ao longo dos anos, devido à sua gama de aplicações na teoria dos grafos, inteligência artificial, redes de computadores e no projeto de sistemas de transporte [56].

A definição do problema do caminho mínimo aqui utilizada segue a definição apresentada em WOLSEY [57]. Seja $G = (V, A)$ um grafo orientado (dígrafo), em que V é o conjunto de nós e A , o de arcos, cujos arcos $(i, j) \in A$ possuem custos $c_{i,j}$ e sejam $\{s, t\} \in V$, nós de origem e destino, respectivamente. Sejam $V^-(i)$ e $V^+(i)$ o conjunto de arcos entrando e saindo do nó i , respectivamente.

Definindo o custo do caminho como a soma dos custos de cada arco que o constitui, o problema do caminho mínimo consiste em obter o caminho de menor custo

total entre s e t . A modelagem matemática do problema é apresentada a seguir.

$$z = \min \sum_{(i,j) \in A} c_{i,j} x_{i,j} \quad (3.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{(k \in V^+(s))} x_{s,k} - \sum_{(k \in V^-(s))} x_{k,s} = 1 \quad (3.2)$$

$$\sum_{(k \in V^+(i))} x_{i,k} - \sum_{(k \in V^-(i))} x_{k,i} = 0 \quad \forall i \in V \setminus \{s\} \quad (3.3)$$

$$\sum_{(k \in V^+(t))} x_{t,k} - \sum_{(k \in V^-(t))} x_{k,t} = -1 \quad (3.4)$$

$$x_{i,j} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A : i \neq j \quad (3.5)$$

A função objetivo (3.1) busca minimizar a soma os custos de todos os arcos selecionados ($x_{i,j} = 1$) entre a origem s e o destino t . A restrição (3.2) garante que um arco pode ser escolhido saindo da origem, mas nenhum é selecionado voltando para ele. Já as restrições (3.3), garantem a conservação do fluxo nos nós intermediários. A restrição (3.4), que todos um arco pode ser escolhido para chegar em t , mas nenhum pode ser escolhido para deixá-lo. Por último, as restrições (3.5) representa uma variável binária, indicando se o arco pertence ao caminho ($x_{i,j} = 1$) ou não ($x_{i,j} = 0$) [57, 58].

O problema do caminho mínimo possui diversas aplicações na logística, como em BEKER *et al.* [59], em que o caminho mínimo é utilizado para reduzir custos operacionais em um armazém típico, otimizando o roteamento de empilhadeiras; já em FRANCESCHETTI *et al.* [60], os autores fornecem uma aplicação do problema do caminho mais curto para otimizar o horário de partida e a velocidade de um veículo que visita uma sequência fixa de locais de clientes. Os autores apresentam um algoritmo de caminho mais curto para determinar um cronograma ótimo para um veículo, levando em consideração congestionamento de tráfego, custo de emissões e custo de mão de obra. Os autores analisam ainda duas políticas salariais distintas para os motoristas e demonstram, por meio de um exemplo numérico, as diferenças em suas soluções ótimas.

Ainda no contexto de redução de emissões, SAWADOGO *et al.* [61] apresentam uma proposta para redução dos impactos diretos e indiretos dos sistemas de transporte no meio ambiente e na sociedade por meio de uma abordagem de caminho mais curto multiobjetivo, que consiste na tomada de decisão com base em três critérios: econômicos ou industriais (custo de transporte, tempo de viagem e danos devido a transbordos), ambientais (poluição do ar e consumo de energia) e sociais

(ruído e risco de acidentes). A implementação se deu por meio de um novo algoritmo denominado Algoritmo de Colônia de Formigas Multiobjetivo para o Problema do Caminho Mais Curto Multiobjetivo (MOSPACO), que visa auxiliar os tomadores de decisão na escolha de um caminho com menor impacto ambiental em uma rede intermodal.

Outros estudos englobam ainda o problema do caminho mínimo para o transporte aéreo, como em GAO *et al.* [62]. Nesse trabalho, os autores analisam a rede área doméstica da China, estudando a acessibilidade para cada aeroporto, a qual pode refletir seu nível de conectividade regional e a qualidade do serviço de aviação civil, por meio de várias características, como grau do nó, intermediação, proximidade, entre outras. Para tal, os autores desenvolveram um algoritmo eficiente de caminho mínimo para todos os pares, baseado em Dijkstra com requisitos de tempo e orçamento; enquanto em BLANCO *et al.* [63], alterações nas redes de rotas aéreas são estudadas por meio de caminhos mínimos também com utilização do algoritmo de Dijkstra.

3.2 O caminho mínimo com restrição de recursos

O problema do caminho mínimo se apresenta de diferentes maneiras. Uma forma de explorá-lo é quando há restrições de recursos.

Recursos são quantidades, como o tempo ou uma carga, que variam ao longo do caminho de acordo com funções denominadas funções de extensão de recursos (FERs). Uma FER é definida para cada arco da rede e para cada recurso em questão. Ela pode fornecer, por exemplo, um limite inferior sobre o valor que o recurso pode assumir no nó de origem do arco correspondente, dado o valor de todos os recursos no nó de destino. Essas restrições são apresentadas na forma de intervalos, que limitam os valores de cada recurso ao longo do caminho, sendo definida para cada nó e para cada recurso do problema. Desse modo, o objetivo final ainda consiste em obter o caminho de menor custo que parte da origem e chegada a um destino, satisfazendo um novo conjunto de restrições definidas sobre os recursos [64].

Considere o mesmo dígrafo G da seção anterior, com s e t como origem e destino, respectivamente. Um custo $c_{i,j}$ deve ser pago para transpor o arco $(i, j) \in A$. Seja R o número de recursos e $T = (T^1, \dots, T^R)^\top \in \mathbb{R}^R$, o vetor de recursos, cujas componentes são as variáveis de recursos, T é menor que $S = (S^1, \dots, S^R)^\top \in \mathbb{R}^R$ se a desigualdade $T^i \leq S^i$ vale para todos $i = 1, \dots, R$. O consumo de determinado recurso associado a um arco $(i, j) \in A$ é dado pela FER $f_{i,j}^r : \mathbb{R}^R \rightarrow \mathbb{R}$, de modo que $f_{i,j}(T_i) \in \mathbb{R}^R$ [64]. Um caminho p é definido como uma sequência ordenada de l arcos ($p = \langle (i_0, i_1), \dots, (i_{l-1}, i_l) \rangle$, tal que $(i_{q-1}, i_q) \in A$). O custo de um caminho p é definido como $c(p) = \sum_{(i,j) \in p} c_{i,j}$ e ele apenas será viável quanto aos recursos

se existirem vetores de recursos tais que $f_{i_{q-1}, i_q}(T_{i_q}) \leq T_{i_{q+1}}$ para todos os arcos de p . Desse modo, objetivo do problema de caminho mínimo com restrição de recursos consiste em obter p de menor custo respeitando o consumo máximo [65].

O problema do caminho mínimo com restrições de recursos surge como tema central em diversos estudos como em GARCÍA-HEREDIA *et al.* [66], em que a definição de trajetos ideais para uma série de voos, considerando restrições de capacidade, que implica em uma limitação do número de aeronaves permitidas em um setor do espaço aéreo simultaneamente, além de limitar a capacidade dos aeroportos, é estudada (cenário de Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo). A definição dos trajetos é representada por um caminho em uma rede temporal expandida, sendo o problema em questão o Problema do Caminho Mais Curto Compartilhado com Restrições de Recursos Múltiplos (SRMSPP). Já em FEILLET *et al.* [67], uma nova estratégia para resolução de problemas de caminho mínimo elementar com restrições de recursos é apresentada e aplicada ao Problema de Roteamento de Veículos com janelas de tempo relacionadas às entregas ou coletas realizadas pelos veículos em um determinado local.

Em LOZANO e MEDAGLIA [68], os autores propõe um método de solução exata para o problema do caminho mínimo com restrição de recursos aplicado ao caso dos problemas auxiliares de escalonamento de turnos de várias atividades e um problema de *design* de rotas de ônibus de trânsito rápido. Os autores obtiveram melhoras em comparação com esquemas alternativos de geração de colunas que resolvem o problema auxiliar com otimizadores comerciais (lineares). Em DERIGS *et al.* [69], os autores visam otimizar a geração de horários de voos no contexto do processo de planejamento para transporte de carga aérea sob restrições operacionais, maximizando os lucros em toda a rede, determinando a melhor combinação de uma lista de voos obrigatórios e opcionais, alocando esses voos às aeronaves e identificando fluxos de carga ótimos por meio de algoritmos de caminho mínimo.

Por último, PAYNE [70] realiza um estudo de caso em Portland com crianças expostas à poluição no trajeto até a escola. A abordagem de caminhos mínimos demonstrou um potencial na diminuição da exposição pessoal, em que para pelo menos algumas superfícies e rotas de poluição, foi identificada uma rota alternativa com reduções significativas na exposição à poluição. Em algumas rotas, uma redução relativamente considerável na poluição poderia ser alcançada ainda com um aumento proporcionalmente pequeno na distância. Uma posterior restrição de distância máxima foi incluída, resultando em rotas que reduzem a exposição quase tanto quanto o obtido pelo modelo anterior, mas com um aumento muito menor na distância, sugerindo que, em alguns casos, a inclusão de um limite máximo de distância pode ser útil e resultar em uma rota significativamente mais curta com benefícios quase equivalentes em comparação com o caminho menos poluído.

3.3 O transporte aéreo de órgãos

Um caso de caminho mínimo com restrição de recursos é o problema do transporte de órgãos. Nesse problema, um órgão parte de uma cidade de origem (s) e precisa chegar a um determinado destino (t) dentro de seu tempo máximo de isquemia, associado ao estado de conservação do órgão. O presente estudo baseou-se na modelagem proposta por CARRARA *et al.* [52], buscando aprimorá-la para situações mais próximas do cenário real.

Para fins de comparação, três modelos são considerados no procedimento: o Modelo 1, que permite a escolha e qualquer combinação de voos sem restrições de companhia aérea e de escalas; o Modelo 2, que leva em conta todas as restrições de companhia aérea e escalas previstas no acordo de 2013 para escolha dos voos comerciais em cada cenário estudado e o Modelo 3, que considera apenas as restrições de companhias aéreas ao escolher a melhor combinação, porém utiliza também escalas não comerciais. Para fim de melhor visualização, a Tabela 3.1 apresenta os três modelos propostos. Em todos os modelos o intervalo de 30 minutos entre uma escala e outra deve ser respeitado na tomada de decisões. Esse tempo é destinado ao tempo necessário para manuseio do órgão e troca de aeronave.

Tabela 3.1: Descrições dos modelos elaborados

Modelo	Descrições
Modelo 1	Qualquer combinação de voos é permitida: alterações de companhias aéreas em escalas podem ser realizadas, assim como escalas podem ser livremente escolhidas
Modelo 2	Apenas opções comercialmente ofertadas nos sites da mesma companhia aérea podem ser escolhidas: apenas escalas comercialmente ofertadas são permitidas.
Modelo 3	Há uma liberdade de escolha de escalas, no entanto, os voos combinados devem ser da mesma companhia aérea.

Um exemplo hipotético simplificado, com cidades representadas pelas letras de A a I, elaborado com a finalidade de melhor visualização, para operações comerciais de uma mesma companhia se encontra na Figura 3.1, em que linhas da mesma cor indicam combinações de voos entre origem e destino comercialmente oferecidas. Na figura, é possível perceber que há outras opções para além das comercialmente ofertadas entre pontos da malha e que alguns destinos não conseguem ser atingidos, se apenas opções comerciais forem levadas em conta. Um exemplo é ter como origem o ponto A e como destino o ponto E da malha, considerando apenas escalas comerciais, como previsto no Modelo 2, essa rota não é possível, se essa hipótese for flexibilizada, é possível atingir o destino a partir de outras escalas não comerciais.

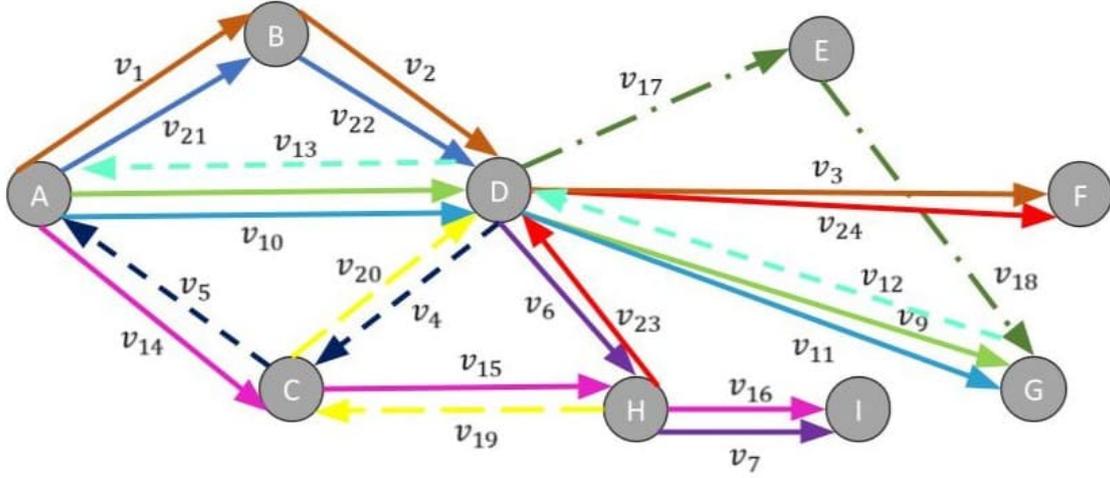


Figura 3.1: Exemplo hipotético simplificado de malha aérea de uma companhia em uma rede com cidades A-I [5]

No estudo proposto para os 30 aeroportos brasileiros, tem-se que os Modelos 1 (sem restrições) e 3 (apenas com restrições de escolhas de voos da mesma companhia) diferem apenas quanto ao grafo orientado. Para o Modelo 1, têm-se : seja $D = (V, A)$ um grafo orientado, em que V é o conjunto de nós (aeroportos) e A , o de arcos (voos) das três companhias aéreas consideradas. Seja ainda $A_{i,j}$ o conjunto de todos os arcos disponíveis entre o nó $i \in V$ e o nó $j \in V : i \neq j$ de modo que A possa ser escrito como $A = \bigcup_{(i,j)} A_{i,j}, \forall i, j \in V : i \neq j$. A diferença para o Modelo 3 consiste no grafo orientado D , que assume a forma $D^c = (V, A)$, tal que c representa cada uma das companhias aéreas, ou seja, a alteração consiste em reduzir o grafo a opções apenas de uma empresa ao invés de considerar as três como possibilidades de escolhas.

Para todos os modelos, tem-se que o órgão fica disponível em um determinado instante de tempo T_{disp} , de modo que ele não pode deixar o nó de origem antes desse instante ($T_s \geq T_{disp}$) e precisa chegar ao destino em um tempo máximo T_{max} ($T_t \leq T_{max}$). Para tal, deve-se escolher a melhor rota possível a ser realizada levando em consideração as restrições de cada modelo: no Modelo 1 não há restrições, no Modelo 2 há restrições apenas da mesma companhia aérea e no Modelo 3 há restrições de voos da mesma companhia, além de haver restrições quanto a combinações comercialmente ofertadas.

Seja ainda $h_{i,j}^a$ o horário de partida do voo de i para j associado ao voo $a \in A_{i,j}$ e $d_{i,j}^a$ a duração do voo a de i para j . Como a transferência do órgão de uma aeronave para outra na escala não é imediata, é adicionado um tempo $\tau_{i,j}$, aqui considerado de 30 minutos, para manuseio do órgão de um aeronave para outra ao se realizar uma escala em pontos diferentes da origem e do destino. Seja ainda T_i o horário que o órgão deixa um determinado nó i da malha. Desse modo, a representação matemática do problema é a proposta por [9], com remoção do termo aditivo de

número de voos multiplicado por uma penalidade da função objetivo, dada pelo modelo (3.6-3.15), em que a função Z representa o tempo a ser minimizado.

$$\text{Min } Z = T_t \quad (3.6)$$

Sujeito a :

$$\sum_{j \in V \setminus \{s\}} \sum_{a \in A_{s,j}} x_{s,j}^a = 1 \quad (3.7)$$

$$\sum_{i \in V \setminus \{t\}} \sum_{a \in A_{i,t}} x_{i,t}^a = 1 \quad (3.8)$$

$$\sum_{i \in V \setminus \{j,t\}} \sum_{a \in A_{i,j}} x_{i,j}^a = \sum_{i \in V \setminus \{j,s\}} \sum_{a \in A_{j,i}} x_{j,i}^a \quad \forall j \in V \setminus \{s, t\} \quad (3.9)$$

$$x_{i,j}^a (T_i + d_{i,j}^a - T_j + \tau_{i,j}) \leq 0 \quad \forall i \in V \setminus \{t\}, j \in V \setminus \{s\}, a \in A_{i,j} \quad (3.10)$$

$$T_i = h_{i,j}^a x_{i,j}^a \quad \forall i \in V \setminus \{t\}, j \in V \setminus \{i\}, a \in A_{i,j} \quad (3.11)$$

$$T_s \geq H_{\text{disponivel}} \quad (3.12)$$

$$T_t \leq T_{\text{max}} \quad (3.13)$$

$$x_{i,j}^a \in \{0, 1\} \quad \forall i \in V \setminus \{t\}, j \in V \setminus \{i\}, a \in A_{i,j} \quad (3.14)$$

$$T_i \geq 0 \quad \forall i \in V \setminus \{t\} \quad (3.15)$$

A função objetivo (3.6) minimiza o tempo de chegada ao destino t . As restrições (3.7) e (3.8) garantem o fluxo na origem e no destino, de modo que um voo saindo de s e um chegando a t serão escolhidos; as restrições (3.9) garantem o fluxo em cada nó, de modo a assegurar que o órgão chegue a cada ponto de transbordo e o deixe; as restrições (3.10) garantem um tempo de manuseio do órgão em i de $\tau_{i,j}$ minutos, de modo que apenas após esse tempo o órgão estará disponível para transporte para j ; as restrições (3.11) estabelecem o horário de partida de um nó i como o horário de partida do voo escolhido de i para j ; a restrição (3.12) garante que o órgão deixa o aeroporto de origem apenas após a data e horário em que chegou a s (data em que ficou disponível para transporte); a restrição (3.13) garante que o órgão chega ao destino t em um instante anterior ao tempo máximo disponível; por último, as restrições (3.14) e (3.15) estão relacionadas ao domínio das variáveis de decisão.

Devido às restrições (3.10), o modelo matemático em (3.6 - 3.15) se torna não linear. Essas restrições podem, no entanto, ser linearizadas a partir da inequação mostrada em (3.16)

$$T_j \geq T_i + d_{i,j}^a + \tau_{i,j} - M_{i,j}(1 - x_{i,j}^a) \quad \forall i \in V \setminus \{t\}, j \in V \setminus \{s\}, a \in A_{i,j} \quad (3.16)$$

em que $M_{i,j}$ é uma constante suficientemente grande.

No Modelo 3, que considera todas as restrições do acordo, o modelo (3.6 - 3.15)

é válido, a diferença consiste no conjunto de voos. Dado que apenas um conjunto definido pelas companhias aéreas de voos entre s e t podem ser escolhidos, os voos $a_{i,j}$ entre um nó i e um nó j pertencem a um subconjunto de A^E de A , que contém apenas os voos intermediários possíveis entre origem e destino.

Desse modo, todos os modelos fornecem o caminho de menor tempo entre o aeroporto de origem e o aeroporto de destino representado por um conjunto de voos que devem respeitar as janelas de tempo em cada escala e o tempo máximo de isquemia de cada órgão, porém com restrições diferentes.

3.4 Procedimento proposto

Para que o processo de alocação inter-regional de órgãos se dê de modo mais eficiente, o presente trabalho dividiu o procedimento em cinco etapas, expostas na Figura 3.2.

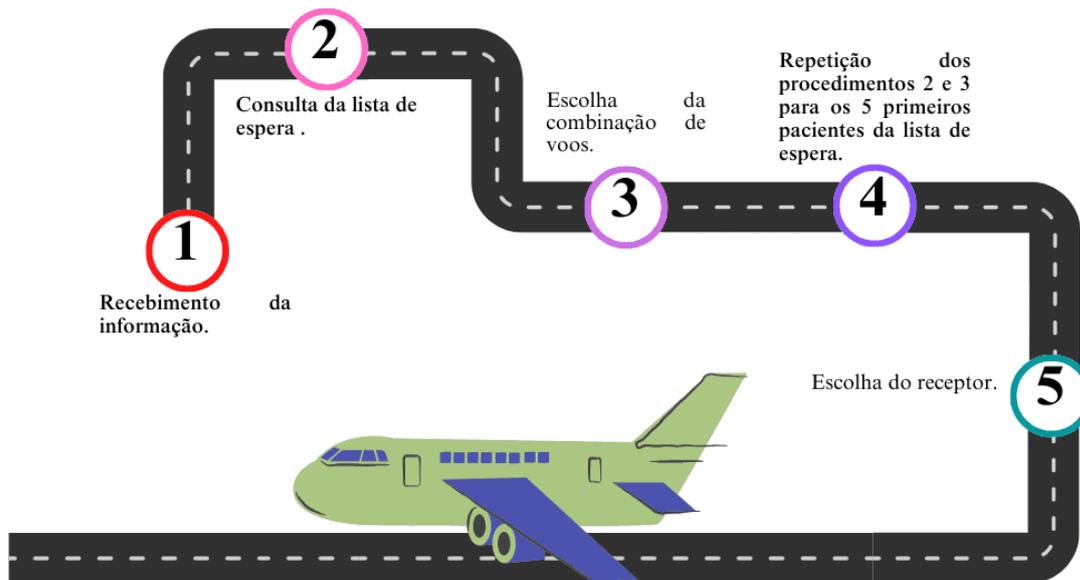


Figura 3.2: Esquema do procedimento seguido

A Etapa 1 se dá após o falecimento do doador. Nela, a CNT é notificada a respeito dos órgãos disponíveis e recebe informações relevantes sobre o doador para que o processo de alocação dos órgãos possa ocorrer. A distribuição se dá sempre na ordem de entrada de notificações de órgãos e cada órgão é tratado de modo individual. Quando mais de um órgão fica disponível por doador, o tempo de isquemia

de cada um é levado em conta e os de menor tempo são tratados primeiro.

Após o recebimento da informação de disponibilidade, a lista de espera de receptores, com suas informações pessoais relevantes, como tipo sanguíneo e grau de prioridade, é consultada (Etapa 2) e o primeiro paciente da lista é selecionado. O sistema busca, então, sua localização para dar continuidade ao processo de envio do órgão.

Dada a localização do receptor, a melhor combinação de voos entre a origem e o destino é escolhida na Etapa 3 com menor tempo total. Para tal, é considerada a data (dia, mês, ano, hora, minutos) em que o órgão foi removido e os horários dos voos disponíveis. Nessa etapa, para efeitos de comparação, os três modelos matemáticos da Seção 3.3 são considerados: o modelo que leva em conta a restrição das escalas prevista no acordo de 2013 entre o Ministério da Saúde e as companhias aéreas, o modelo que permite a livre combinação de voos de uma mesma companhia ao se realizar a escala e o modelo que permite a livre combinação de voos de uma mesma companhia, porém considerando apenas escalas comerciais.

Após a escolha ideal até o destino do receptor, a Etapa 4 consiste em repetir os processos 2 e 3 para todos os 5 primeiros receptores da lista de espera, visto que algumas vezes os primeiros pacientes da lista não conseguem ser atendidos devido às restrições de tempo e da malha aeroviária. Após o processamento para cada um, os dados são dispostos de modo que o tomador de decisões possa compará-los.

Por fim, na Etapa 5, as opções são comparadas para cada receptor, tendo o tempo total como referência, assim como a localização e chance de sucesso do transplante, para assim o paciente final ser escolhido para envio do órgão.

Capítulo 4

Resolução computacional

O procedimento proposto na Seção 3.4 foi implementado para nove cenários sintéticos distintos. Os cenários consistem na disponibilidade de diferentes órgãos em três dias consecutivos do mês de outubro e na presença de uma lista de espera para cada tipo de órgão, de modo que o objetivo do presente estudo é obter o caminho de menor tempo até os possíveis destinos. Para tal, o estudo se baseia em combinações de dados de operações aéreas do Brasil sob três circunstâncias: o caso em que qualquer combinação é permitida entre as companhias aéreas ao se realizar escalas (Modelo 1 apresentado na Seção 3.3), como feito em CARRARA *et al.* [52] e em BALSTER [25]; o caso atualmente em vigor, previsto pelo acordo de 2013 entre o Ministério da Saúde, as companhias aéreas, a Secretaria de Aviação Civil e o Comando da Aeronáutica; (apresentado na Seção 3.3 como Modelo 2); e o caso em que apenas combinações da mesma empresa aérea são permitidas, mas há uma liberdade de escolhas de escalas para além das comercialmente ofertadas pelas companhias (Modelo 3 da Seção 3.3).

O procedimento em questão necessita de dados de operações de três dias consecutivos dos voos comerciais de transporte de passageiros das principais companhias aéreas do Brasil: Gol, Latam e Azul. Uma vez que um órgão pode ficar disponível próximo a 00h e o maior tempo de isquemia, como observado na Figura 1.2, é de 32h, sendo necessário considerar o dia seguinte ao da disponibilidade e o consecutivo a esse.

Como o estudo em questão visa comparar soluções ótimas em três modelos distintos, informações referentes ao planejamento diário de operação das empresas aéreas são essenciais. Os dados necessários, no entanto, não foram fornecidos, de modo que um cenário sintético foi elaborado combinando informações de voos fornecidos abertamente pela ANAC.

Após a obtenção do cenário hipotético para os três dias consecutivos de operações no Brasil, o algoritmo de Dijkstra adaptado foi implementado como resolução computacional para o problema de transporte de órgãos, um problema de caminho

mínimo com restrições de recursos.

O algoritmo em questão foi escolhido pela sua eficiência em grafos com arestas, cujos valores são não negativos, sua facilidade de implementação e pelo seu amplo uso na literatura, como em GAO *et al.* [62] e BLANCO *et al.* [63], apresentados na seção 3.1 além de trabalhos como KÖHLER *et al.* [71], em que dois métodos baseados no algoritmo de Dijkstra para cálculo de caminhos mínimos e outros dois baseados em uma generalização desse algoritmo são usados para aceleração de cálculos de caminhos mais curtos em redes rodoviárias e ferroviárias.

O algoritmo também recebe destaque no trabalho de KAI *et al.* [72], sendo usado para encontrar rotas adequadas para atingir o destino em situações de emergência, minimizando eventos perigosos em redes de tráfego; em ALAM e FARUQ [73] para obtenção de caminhos mais curtos em redes viárias e em WEI *et al.* [74], em que uma versão modificada do algoritmo é utilizada para obtenção de um trajeto que respeite as restrições de limite de peso da estrada, ao mesmo tempo em que maximiza a capacidade de carga do veículo.

Para implementação e desenvolvimento dos cenários e algoritmos abordados nessa dissertação, a linguagem de programação Python foi utilizada.

4.1 Algoritmo de Dijkstra

O algoritmo de Dijkstra resolve o problema de caminhos mínimos com fonte única em um grafo orientado $G = (V, A)$, quando todos os arcos têm pesos não-negativos [55, 75].

O algoritmo parte de um conjunto de vértices V e arestas A que possuem um determinado custo a elas associado. À princípio, uma origem $s \in V$ é selecionada e visitada e s é, então, adicionado ao conjunto N dos vértices visitados, em seguida, todos os vértices vizinhos imediatos (apenas uma aresta de distância) de s que ainda não estão em N são localizados. O custo da origem até cada vértice vizinho é calculado e armazenado. O próximo vértice a ser visitado deve, então, ser escolhido: de acordo com o algoritmo, esse vértice deve ser o vizinho de s que possui o menor custo. Seja b o vizinho de menor custo, ele deve ser visitado e adicionado ao conjunto dos nós visitados N . Em seguida, os vizinhos imediatos ainda não visitados de b devem ser localizados e o custo para cada um deles, calculado considerando o vértice intermediário b . O processo enumerado é, então, repetido até que todos os vértices com origem em s sejam visitados. Ao final, tem-se o caminho de menor de custo até cada um dos vértices do grafo orientado G [76].

Uma forma de escrever o algoritmo de Dijkstra encontra-se no Algoritmo 1, como apresentada em ARENALES *et al.* [55]. O algoritmo necessita do grafo $G = (V, A)$, em que $V = 1, \dots, n$ é o conjunto dos vértices, 1 é a origem e n , o destino e dos

comprimentos $c_{i,j}$ dos arcos $(i,j) \in A$ entre os nós (sendo $c_{i,j} \geq 0$) como valores de entrada e retorna $d(n)$, a menor distância entre o nó 1 e o nó n e C , o caminho mínimo entre o nó 1 e o nó n .

Algorithm 1 Algoritmo de Dijkstra

```

1: Passo 1: início
2:  $R = \{1\}$ 
3:  $NR = \{2, \dots, n\}$ 
4:  $d(1) = 0$ 
5:  $p(1) = 0$ 
6: for  $i \in NR$  do
7:    $d(i) = +\infty$ 
8:    $p(i) = n + 1$ 
9:    $a = 1$ 
10: end for
11: Passo 2:
12: for  $i \in NR$  do
13:    $d(i) = \min\{d(i), d(a) + c(a, i)\}$ 
14:   if  $d(i) = d(a) + c(a, i)$  then
15:      $p_i = a$ 
16:   end if
17: end for
18: for  $i \in NR$  do
19:   if  $d(i) = +\infty$  then
20:     Pare
21:   else
22:      $d(k) = \min(d(i), i \in NR)$ 
23:     Excluir  $k$  de  $NR$  e incluí-lo em  $R$ 
24:      $a = k$ 
25:   end if
26: end for
27: Passo 3:
28: if  $a = n$  then
29:   Recupere o caminho mínimo  $C$  a partir dos valores armazenados em  $p(\cdot)$ ,
   começando por  $k_1 = p(n)$ , em seguida  $k_2 = p(k_1)$  até que o nó 1 seja atingido
30: else
31:   Retornar ao Passo 2
32: end if

```

Notas:

- Linha 2: nó 1 é rotulado
 - Linha 2: os demais nós não são rotulados
 - Linha 4: a distância do nó 1 ao nó 1 é zero
 - Linha 5: o nó 1 é o nó inicial
 - Linha 7: a distância do nó 1 aos não rotulados é $+\infty$
 - Linha 8: o nó i não tem predecessor
 - Linha 9: último nó incluído em R
-

Além do modelo clássico, alterações podem ser realizadas no algoritmo, tornando-o ideal para soluções de outros problemas, como os caminhos mínimos entre todos os pares: dado um grafo direcionado ponderado por arestas, dado um vértice de

origem e um vértice de destino, busca o menor caminho entre ambos, caso exista.

Para o problema de transportes de órgãos em questão, uma nova modificação foi implementada no algoritmo, seguindo o modelo usado em BALSTER [25], que é apresentada na Seção 4.2.

4.2 Algoritmo de Dijkstra modificado

Seja $G = \{V, A\}$ um grafo orientado, V o conjunto dos nós (aeroportos) atendidos por todas as empresas aéreas (Gol, Latam e Azul), A o conjunto de arestas (voos). Seja N o conjunto que armazena subconjuntos N^v de vizinhos imediatos de cada nó v , L o conjunto dinâmico que armazena o tempo em que o órgão fica disponível em cada nó (o tempo de chegada no nó mais o tempo de manuseio, caso seja um nó intermediário), D o conjunto dinâmico que armazena o par tempo até cada nó v e nó em si $\{[t_v, v] | t_v \in L, v \in V\}$, P o conjunto dinâmico dos antecessores ótimos de cada nó, com elementos p_i e K o conjunto de datas de partida dos voos de i para j , com elementos $k_{i,j}^a$. Seja ainda T_{max} o tempo máximo disponível para o órgão chegar ao destino t e seja s o aeroporto de origem do órgão. Nos casos em que cada companhia aérea possui seu próprio conjunto de aeroportos e voos, tem-se a substituição de G por G^c , em que $c \in C$ e $C = \{Azul, Latam, Gol\}$ ou seja, passa-se a considerar um grafo para cada companhia aérea.

Para o algoritmo em questão, são necessários como entrada: o grafo $G = \{V, A\}$ ($G^c = \{V, A\}$), uma origem s , tal que $s \in V$, um destino t que pertença igualmente a V , os tempos $d_{i,j}^a$ entre cada nó para cada opção de voo e o conjunto K das datas de partida dos voos. O algoritmo retorna o trajeto de menor tempo total entre a origem e o destino selecionados, fornecendo o número dos voos, os nós intermediários e a data de partida de cada etapa. O Algoritmo 2 descreve os passos do algoritmo modificado para o Modelo 1. Para o caso de distinção entre companhias aéreas, o algoritmo em questão deve ser executado separadamente para cada companhia aérea.

Algorithm 2 Algoritmo de Dijkstra modificado

Input : $D = \emptyset$; $R = s$; $p_s = 0$;

```
1: Passo 1: Inicialização
2: for  $p_i \in P \setminus \{p_s\}$  do
3:    $p_i = -1$ 
4: end for
5:  $d_{s,s} = 0$ ;
6: for  $v \in V \setminus \{s\}$  do
7:    $t_v = +\infty$ 
8:   Buscar todos os vizinhos imediatos de  $v$  e armazenar no subconjunto  $N^v$  de
      $N$ 
9: end for
10: Passo 2: Atualizar conjuntos e caminhos
11: for  $v \in V$  do
12:   Inserir  $[t_v, v]$  em  $D$ 
13:   Reorganizar  $D$ , de modo que o menor tempo ocupe a primeira posição .
14: end for
15: while  $D \neq \emptyset$  do
16:   Extrair  $[t_v, v] = \min(D)$ ;
17:   for  $j \in N^v$  do
18:      $R = j$ 
19:      $t'_j = k_{v,j}^a + d_{v,j}^a + \tau_{v,j}^a \mid \tau_{v,j} = 0,5 \text{ horas}, v, j \neq s, t$ 
20:     if  $t'_j < t_j$  e  $t_v < k_{v,j}^a$  e  $k_{v,j}^a < T_{max}$  e  $t'_j < T_{max}$  then
21:        $t_j = t'_j$ 
22:       Atualizar  $[t_j, j]$  em  $D$  e reordenar a prioridade.
23:        $p_j = v$ 
24:     end if
25:   end for
26: end while
27: if  $t_t > T_{max}$  then
28:   Informar que não há opções de voos disponíveis.
29: else
30:   Retornar melhor caminho até  $t$ .
```

Notas:

- No *input*, temos: $D = \emptyset$: o conjunto de tempos e nós não possui elementos
 - $R = s$: o nó s é rotulado; $p_s = 0$: s é a origem.
 - Linha 4: Os demais nós não possuem antecessores;
 - Linha 6: O tempo total de s para s' é zero;
 - Linha 8: O tempo disponível em cada nó não rotulado é $+\infty$;
 - Linha 19: o nó j é rotulado;
 - Linha 20: O tempo total a partir do qual o órgão está disponível em j é atualizado como o tempo de partida de v mais a duração do voo mais um tempo de transbordo;
 - Linha 21: o novo tempo de disponibilidade em j deve ser menor que o anterior, a chegada em v deve se dar antes da próxima partida de v para j , a partida do próximo voo de v para j deve ocorrer antes do tempo máximo e a chegada em j se dá antes do tempo máximo disponível
 - Linha 22: atualizar a disponibilidade em j para o tempo menor; e
 - Linha 24: atualizar o antecessor de p_j
 - Linha 28: o tempo até o destino ultrapassa o tempo máximo
-

4.3 Cenários estudados

Para comparação dos modelos e aplicação do algoritmo da Seção 4.2, dados de operações aéreas foram elaborados tendo como base os 30 aeroportos mais movimentados do Brasil, cobrindo todos os estados e considerando mais de um aeroporto para o estado de São Paulo, dado o alto fluxo diário de voos para os 4 aeroportos considerados, seguindo o proposto por [52], presentes na Tabela 4.1 e ilustrados na Figura 4.1, ou seja, tanto a lista de espera quanto a disponibilidade de órgãos foram consideradas apenas para aeroportos presentes nesta lista.

Tabela 4.1: Aeroportos considerados no modelo

Cidade	Estado	Código do aeroporto	Cidade	Estado	Código do aeroporto
Maceió	AL	SBMO	Macapá	AP	SBMQ
Salvador	BA	SBSV	Belém	PA	SBBE
Fortaleza	CE	SBFZ	Porto Velho	RO	SBPV
São Luís	MA	SBSL	Boa Vista	RR	SBBV
João Pessoa	PB	SBJP	Palmas	TO	SBPJ
Recife	PE	SBRF	Campinas	SP	SBKP
Teresina	PI	SBTE	Ribeirão Preto	SP	SBRP
Natal	RN	SBSG	Guarulhos	SP	SBGR
Aracaju	SE	SBAR	São Paulo	SP	SBSP
Brasília	DF	SBBR	Vitória	ES	SBVT
Goiânia	GO	SBGO	Belo Horizonte	MG	SBCF
Campo Grande	MS	SBCG	Rio de Janeiro	RJ	SBRJ
Cuiabá	MT	SBCY	Curitiba	PR	SBCT
Rio Branco	AC	SBRB	Porto Alegre	RS	SBPA
Manaus	AM	SBEG	Florianópolis	SC	SBFL



Figura 4.1: Aeroportos considerados no estudo

Para implementação do procedimento proposto, três dias de operações no sistema doação-transplante foram simulados, expostos na Tabela 4.2, assim como uma lista de espera hipotética para cada órgão disponível foi elaborada. As listas de espera encontram-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.2: Órgãos e datas em que ficaram disponíveis para transporte

	Órgão	Local do doador	Horário
01/10/2023	Coração	SBRJ	05:30
	Rim	SBFZ	12:00
	Pulmão	SBSP	15:30
02/10/2023	Intestino	SBEG	07:30
	Pâncreas	SBGR	09:30
	Fígado	SBSV	13:00
03/10/2023	Coração	SBAR	09:00
	Fígado	SBCY	12:30
	Pulmão	SBBR	17:45

Tabela 4.3: Aeroportos referentes aos pacientes da lista de espera pelos respectivos órgãos

Coração	Rim	Pulmão	Intestino	Fígado	Pâncreas
SBMO	SBCT	SBGO	SBMQ	SBFL	SBMO
SBFZ	SBEG	SBEG	SBMO	SBVT	SBTE
SBBE	SBBR	SBCT	SBPJ	SBRF	SBRB
SBMQ	SBGO	SBBV	SBBR	SBMO	SBPV
SBCY	SBRJ	SBRF	SBGO	SBAR	SBCG

Para cada dia de simulação, 3 órgãos distintos foram considerados, de modo a formar 9 cenários, expostos na Tabela 4.4. Para a obtenção das melhores opções entre origem e destino propostos em cada cenário, é relevante destacar que um intervalo de 30 minutos foi somado ao horário que o órgão ficou disponível, para todos os modelos, tempo considerando o deslocamento do hospital de origem até o aeroporto de onde será transportado.

Tabela 4.4: Cenários considerados

Cenário	Órgão	Origem	Data da diponibilidade
1	Coração	SBRJ	01/10/2023 05H30
2	Rim	SBFZ	01/10/2023 12H
3	Pulmão	SBSP	01/10/2023 15H30
4	Intestino	SBEG	02/10/2023 07H30
5	Pâncrea	SBGR	02/10/2023 09H30
6	Fígado	SBSV	02/10/2023 13H
7	Coração	SBAR	03/10/2023 09H
8	Fígado	SBCY	03/10/2023 12H30
9	Pulmão	SBBR	03/10/2023 17H45

Além disso, o algoritmo, empregado para estudo dos três modelos necessita como entrada os dados presentes na Tabela 4.5. Os dados empregados no planejamento de operações aéreas são referentes às três principais companhias aéreas atuantes no Brasil: Gol, Latam e Azul, escolhidas com base em entrevista a membros do CNT (companhias mais utilizadas para o transporte de órgãos), como já mencionado. Apesar dos três modelos necessitarem do planejamento de operações como entrada, esse é distinto para cada um: o Modelo 1 (Tabela 3.1) necessita de dados referentes a operação de todas as três empresas, sem distinção; o Modelo 2 (Tabela 3.1) necessita de dados referentes ao planejamento completo de cada companhia aérea, ou seja, quais escalas são ofertadas comercialmente; enquanto o Modelo 3 (Tabela 3.1), de dados separados referentes a cada companhia, para uma análise por empresa de modo separado.

Tabela 4.5: Dados de entrada para resolução computacional

Dados de entrada
->Data que o órgão ficou disponível (DD/MM/AAAA - HH:MM)
->Dados de operações aéreas no Brasil no dia desejado com horários de chegadas e partidas de voos
->Aeroportos de origem e destino
->Tempo máximo para transporte do órgão

Visto que os dados necessários para execução do Modelo 2 não estão disponíveis abertamente em bases da ANAC, uma vez que são dados privados das empresas, tornou-se necessária a elaboração de dados sintéticos.

Para elaboração dos dados, informações das operações aéreas diárias no Brasil disponíveis na plataforma SIROS da ANAC [8] no período de 01/10/2023 a 05/10/2023 foram filtrados e combinados de diferentes modos de acordo com o modelo empregado: para o Modelo 1, um filtro à coluna das companhias aéreas foi aplicado, selecionando Gol, Latam e Azul e gerando um único arquivo para cada um dos três dias analisados; para o Modelo 2, os dados gerados para o Modelo 3 foram usados como base para criação de combinações comerciais hipotéticas; já para o Modelo 3, o filtro foi aplicado para cada companhia, gerando arquivos distintos para operação de cada companhia. Apesar da disponibilidade de órgãos em apenas 3 dias, dados até o dia 05 de outubro são relevantes, uma vez que alguns órgãos possuem tempo de isquemia superiores a 24 horas, ultrapassando as datas de disponibilidade dos órgãos.

Na criação das opções comerciais, os dados gerados para o Modelo 2, referentes a operação diária de cada companhia, foram combinados aleatoriamente (respeitando datas de partida e chegada em cada ponto de transbordo), considerando um tempo mínimo padrão de 1h30 entre escalas, através de um programa desenvolvido em Python, simulando voos entre origem e destino com escalas já previamente definidas e comercialmente disponibilizadas. O programa foi compilado através do ambiente de desenvolvimento integrado *Spyder* e os testes referentes aos cinco dias para cada companhia aérea foram executados com o apoio de um laptop com processador Intel(R) Core(TM) i3-1005G1 CPU @ 1.20GHz 1.19 GHz, com 8GB de RAM e sistema operacional Windows 11 Home Single Language versão 22H2.

Após a definição dos dados, o algoritmo da Seção 4.2 foi implementado em Python e compilado através do ambiente de desenvolvimento integrado *Spyder*. Os três modelos foram executados no mesmo *laptop* do programa desenvolvido em Python para criação dos dados do Modelo 2.

Capítulo 5

Resultados

Neste capítulo, os principais resultados obtidos a partir da resolução computacional apresentada no Capítulo 4 são expostos e uma comparação dos diferentes modelos considerados é feita, apontando as principais diferenças e benefícios de possíveis alterações e trazendo uma análise das consequências dos resultados para as diferentes regiões do Brasil.

5.1 Resultados computacionais

Para combinação dos dados disponibilizados pela ANAC, um código em Python foi desenvolvido para realizar as combinações de voos para cada companhia aérea em cada dia de operações considerado, de modo que para órgãos disponíveis no dia 01/10/2023, dados do dia 02/10/2023 e 03/10/2023 foram incluídos na base para escolha de voos; de modo análogo, para órgãos disponíveis no dia 02/10/2023 e 03/10/2023, a base formada referente a cada dia de disponibilidade de órgãos incorporou informações operacionais referentes aos dois dias consecutivos.

Obtidos todos os dados, nove cenários distintos foram propostos na Tabela 4.4 para análise, levando em conta os órgãos possíveis de serem doados, expostos na Figura 1.2, o aeroporto mais próximo da origem do doador e a data em que ficaram disponíveis.

Com base nesses cenários, os três modelos foram aplicados para cada paciente da lista do respectivo órgão. Os resultados obtidos para a execução encontram-se na Tabela 5.1. Os tempos de execução referentes a cada modelo e cenário encontram-se na Tabela 5.2.

Tabela 5.1: Resultados obtidos para os nove cenários analisados em cada um dos três modelos

Cenário	Destinos	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3				
		Partida	Chegada	Operador	Partida	Chegada	Operador	Partida	Chegada	Operador
1	SBMO	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SBFZ	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SBBE	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SBMQ	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SBCY	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	SBCT	13H	18H10	AZUL-GOL	14H10	22H20	LATAM	12H35	18H20	AZUL
	SBEG	14H50	18H15	LATAM	14H50	18H15	LATAM	14H50	18H15	LATAM
	SBRB	14H10	00H10	LATAM-GOL	17H05	00H10	GOL	17H05	00H10	GOL
	SBGO	12H35	18H30	GOL	13H15	19H05	AZUL	12H35	18H30	GOL
	SBRJ	12H35	18H	GOL	16H25	21H50	LATAM	12H35	18H30	GOL
	SBGO	16H15	17H50	GOL	16H15	17H50	GOL	16H15	17H50	GOL
	SBGE	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	SBCT	16H35	17H40	GOL	16H35	17H40	GOL	16H35	17H40	GOL
	SBBV	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SBRF	17H55	21H	AZUL	17H55	21H	AZUL	17H55	21H	AZUL
	SBMQ	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	SBMO	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SBPJ	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SBBR	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SBRB	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SBGO	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	SBMO	12H50	15H35	LATAM	12H50	15H35	LATAM	12H50	15H35	LATAM
	SOTE	14H50	17H55	LATAM	14H50	17H55	LATAM	14H50	17H55	LATAM
	SBRB	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SBPV	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SBCG	10H05	17H20	GOL-LATAM-LATAM	16H30	18H20	GOL	16H30	18H20	GOL
6	SBFL	13H35	18H55	LATAM	16H35	22H45	LATAM	13H35	18H55	LATAM
	SBSBVT	15H	16H35	GOL	15H	16H35	GOL	15H	16H35	GOL
	SBRF	15H	16H25	GOL	15H	16H25	GOL	15H	16H25	GOL
	SBMO	14H55	16H05	GOL	14H55	16H05	GOL	14H55	16H05	GOL
	SBAR	15H	18H30	GOL-AZUL	14H25	00H45	GOL	15H15	18H30	AZUL
	SBMO	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SBFZ	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	SBBE	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SBMQ	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SBCY	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SBFL	14H55	18H55	AZUL-LATAM	17H40	22H50	GOL	17H40	22H50	GOL
	SBSBVT	14H55	19H25	AZUL-LATAM	18H	23H55	AZUL	18H	23H55	AZUL
8	SBRF	14H55	20H55	AZUL	18H10	22H35	LATAM	14H55	20H55	AZUL
	SBMO	14H55	20H30	AZUL-LATAM	-	-	-	14H55	00H05	AZUL
	SBAR	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SBGO	20H45	21H30	LATAM	20H45	21H30	LATAM	20H45	21H30	LATAM
9	SBGE	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SBCT	20H25	22H20	LATAM	20H25	22H20	LATAM	20H25	22H20	LATAM
	SBBV	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SBRF	20H05	22H35	LATAM	20H05	22H35	LATAM	20H05	22H35	LATAM
	SBRF	20H05	22H35	LATAM	20H05	22H35	LATAM	20H05	22H35	LATAM

Tabela 5.2: Tempo de execução para cada cenário

Cenário	Tempo de execução(s)		
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
1	1,34	2,34	0,26
2	0,65	2,29	0,22
3	0,53	2,18	2,42
4	0,94	11,10	2,05
5	0,78	11,30	0,70
6	0,70	11,06	2,45
7	0,74	11,20	1,71
8	0,89	10,76	0,66
9	0,59	20,43	0,73

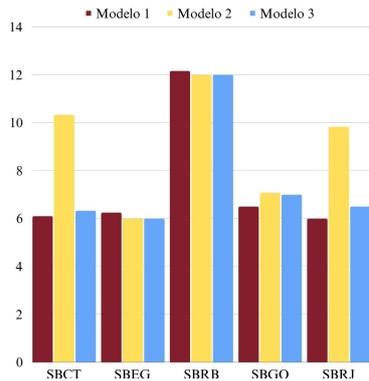
5.2 Análise dos resultados

A Tabela 5.1 contém os resultados obtidos para cada cenário estudado e fila de espera e destaca em vermelho a/as opção/opções de menor tempo até o destino. Analisando os dados nela apresentados e os tempos até cada um dos cinco destinos para cada cenário, expressos na Figura 5.1 - colunas em branco representam a inexistência de opções viáveis, é possível observar algumas diferenças e semelhanças nos resultados dos modelos.

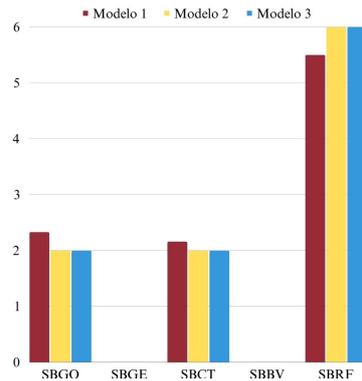
Nos Cenários 1, 4 e 7, nenhum dos modelos obteve resultados viáveis para os pacientes da lista de espera. A Figura 5.2 exibe a malha aérea do país em 2021, permitindo observar a influência dos aeroportos de origem e destino na falta de opções: é possível notar uma concentração de rotas na região sudeste, sendo esta região a única que possui conexão com todas as capitais do país, possuindo concentração de rotas (diversas rotas) principalmente para as regiões mais movimentadas do nordeste, como Recife e Salvador e sul, como Porto Alegre e Curitiba; além disso, é notório o baixo número de rotas na região norte, sendo essa região a com menor integração à malha aérea brasileira.

Para o Cenário 1, nota-se que, apesar do alto grau de conectividade da região sudeste com a região nordeste e da existência de diversas opções entre origem e destino para alguns dos aeroportos dos receptores, como Maceió (SBMO) e Fortaleza (SBFZ), o baixo tempo de isquemia do órgão (apenas 4 horas) impossibilita o atendimento desses pacientes. Já para os demais aeroportos (Belém, Macapá e Cuiabá) além do fator do tempo de isquemia do órgão, há ainda menos opções de rotas, impossibilitando a viagem em tempo hábil.

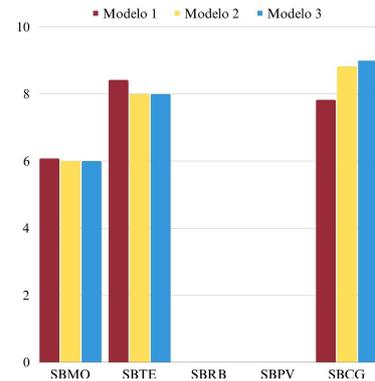
No Cenário 2 observa-se variações nos resultados para os destinos Curitiba e Rio de Janeiro, com uma diferença significativa entre os modelos mais flexíveis e o mais restrito, chegando a aproximadamente 4 horas para ambos os destinos, como



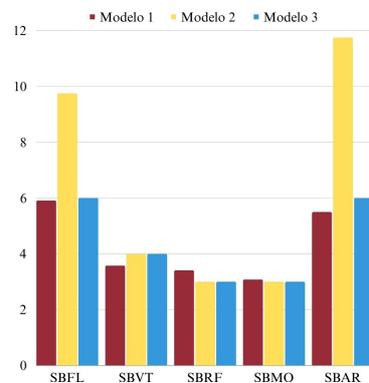
(a) Tempo total até o destino para os 3 modelos no Cenário 2.



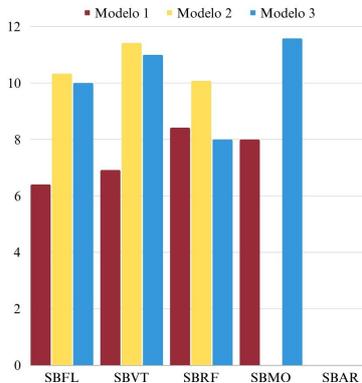
(b) Tempo total até o destino para os 3 modelos no Cenário 3.



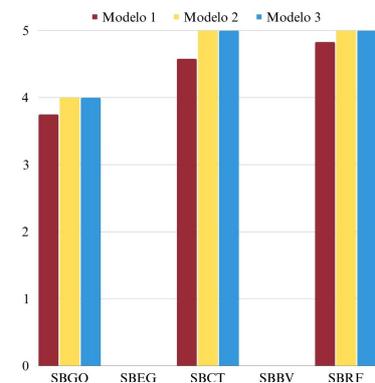
(c) Tempo total até o destino para os 3 modelos no Cenário 5.



(d) Tempo total até o destino para os 3 modelos no Cenário 6.



(e) Tempo total até o destino para os 3 modelos no Cenário 8.



(f) Tempo total até o destino para os 3 modelos no Cenário 9.

Figura 5.1: Diferenças nos tempos totais entre os três modelos estudados até cada destino para cenários que apresentaram pelo menos um destino viável.

apresentado na Figura 5.1a. A diferença entre os demais destinos também pode ser vista na Figura 5.1a: apesar da marcante diferença entre os Modelos 1 e 3 em comparação com o Modelo 2, a discrepância entre os modelos mais abrangentes é menos expressiva, mantendo-se dentro de uma janela de 30 minutos. Para os demais destinos no mesmo cenário, os resultados foram semelhantes, com variações dentro de 30 minutos. Esses resultados em conjunto com a Figura 5.2 indicam que destinos mais amplamente favorecidos em opções de rotas possibilitam maior flexibilidade de escolhas e favorecimento dos Modelos 1 e 3 propostos frente ao Modelo 2, atualmente em uso, com conseqüente melhor atendimento dos pacientes da lista de espera.

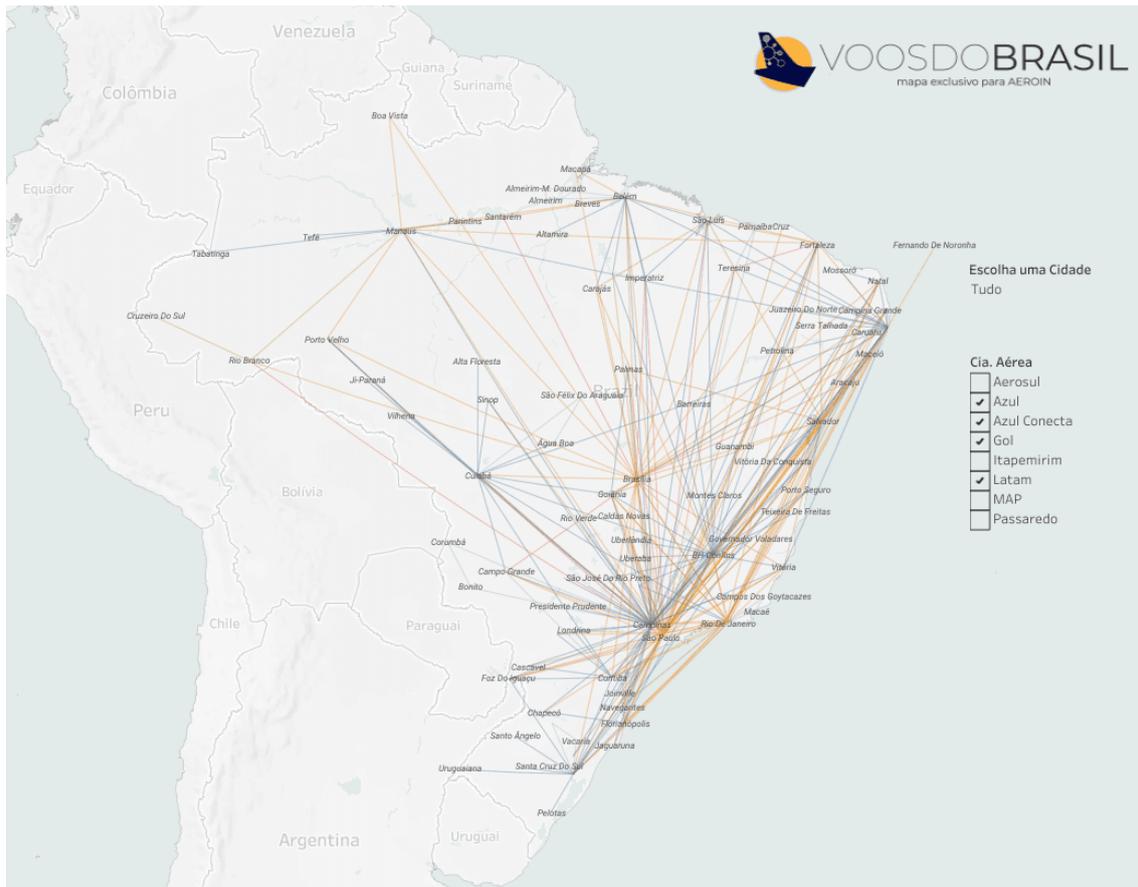


Figura 5.2: Malha aérea do Brasil em 2021 para a Azul, Latam e Gol [6]

Quanto aos Cenários 3 e 9, referentes ao pulmão (6 horas de isquemia), as Figuras 5.1b e 5.1f ilustram as diferenças e semelhanças entre os modelos. Nota-se uma diferença entre os modelos para os casos viáveis (Goiânia, Curitiba e Recife). Em ambos os casos é interessante notar que os mesmos destinos permanecem fora da capacidade de atendimento, mesmo quando a distância diminui, como no Cenário 9 para o paciente localizado em Manaus (SBEG), apesar da menor distância entre origem (Brasília) e destino, o baixo número de opções diárias, como observado na Tabela 5.3, com os voos de Brasília para Manaus nos dias 03/10/2023 e 04/10/2023, não permite a chegada do órgão em tempo hábil (dado que o órgão ficou disponível às 17H45, ele deve chegar antes de 23H45 do mesmo dia).

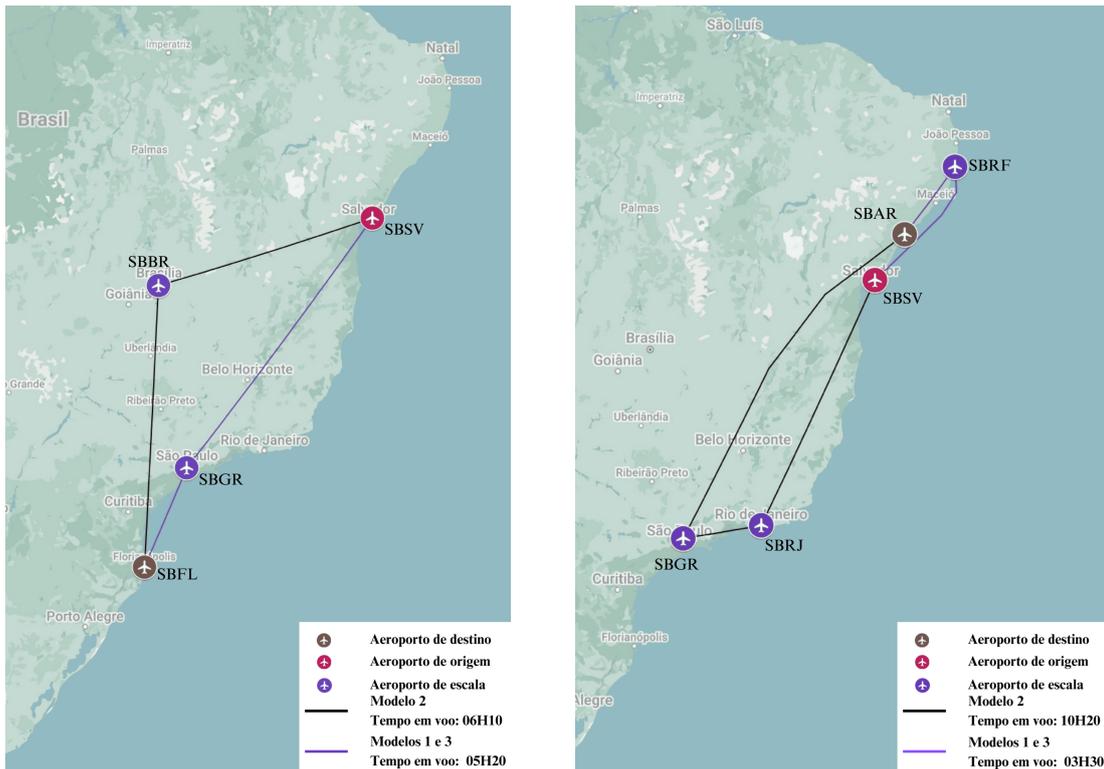
Tabela 5.3: Horários e operadores aéreos dos voos de Brasília para Manaus referentes aos dias 03/10/2023 e 04/10/2023

Horário de partida	Horário de chegada	Operador
03/10/2023 10H00	03/10/2023 13H05	GOL
03/10/2023 10H30	03/10/2023 13H30	LATAM
03/10/2023 21H05	04/10/2023 00H05	GOL
03/10/2023 21H10	03/10/2023 00H10	LATAM
04/10/2023 10H00	04/10/2023 13H05	GOL
04/10/2023 10H30	04/10/2023 13H30	LATAM
04/10/2023 21H05	04/10/2023 00H05	GOL
04/10/2023 21H10	04/10/2023 00H10	LATAM

Já para o Cenário 4, é possível notar uma deficiência no número de rotas entre Manaus (SBEG) e todas as regiões do Brasil, de modo que, mesmo quando a distância física pode ser transposta dentro do tempo de isquemia dos órgãos, não há voos diretos até a maior parte dos destinos, aumentando, assim, o tempo de viagem. Mesmo para o caso em que voos diretos são possíveis, como Brasília (SBBR), o baixo número de voos (com uma média de 4 voos diários - segundo dados da ANAC [8]) impede o transporte em tempo hábil.

No Cenário 5, Figura 5.1c, há apenas uma discrepância entre os modelos para o último destino da lista de espera (Campo Grande - SBCG), com uma diferença de 1 hora entre o modelo mais flexível (1) e os demais. O alto grau de conectividade entre São Paulo e a região nordeste permite a escolha de voos diretos que são, quase sempre, as opções mais rápidas, gerando uma convergência dos modelos. Já para cidades como Porto Velho (SBPV) e Rio Branco (SBRB), além da baixa integração entre a região Sudeste e a região Norte que resulta em poucas opções de voos diários, o longo tempo de viagem com diversas escalas, impossibilita a chegada do órgão em tempo hábil, o que agrava ainda mais o cenário da região, que, como observado na Figura 2.3, apresenta o menor número de doadores por milhão de habitantes.

Já no Cenário 6 algumas observações podem ser feitas quanto à origem e aos destinos através da Figura 5.1d. O órgão parte de Salvador, uma capital com 81 voos saindo no dia 02/10/2023, acima da média nacional de 64,1 voos por capital para o dia 02/10/2023 [8], apesar disso, apenas duas opções diferem entre os modelos: Florianópolis (SBFL) e Aracaju (SBAR), como expresso nas Figuras 5.3a e 5.3b, nela, as linhas representando as rotas estão dispostas para fins de melhor visualização apenas, não expressando as rotas reais das aeronaves. No primeiro caso, o fato de ser um aeroporto de grande porte, com diversas conexões, permite combinações diferentes daquelas comercialmente ofertadas, dessa forma, os Modelos 1 e 3 retornam a mesma opção, com uma redução de 3 horas e 40 minutos no tempo de viagem



(a) Rota entre Salvador e Florianópolis

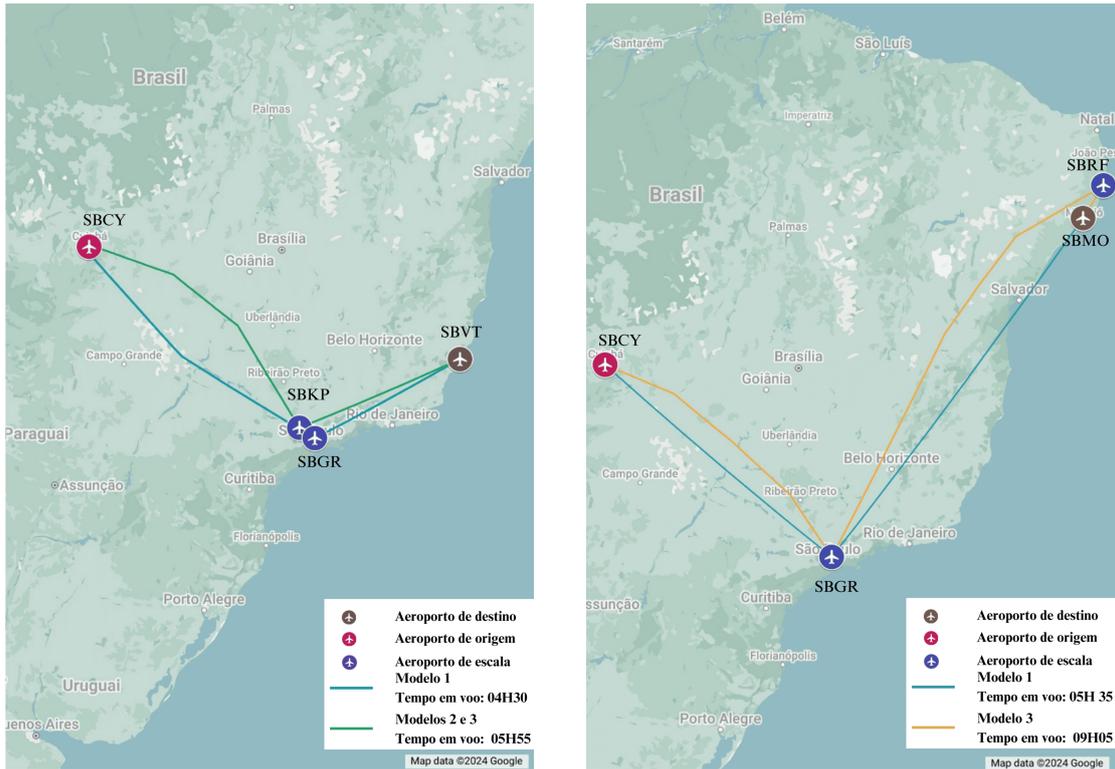
(b) Rota entre Salvador e Aracaju

Figura 5.3: Representação de algumas rotas partindo de Salvador. Mapa elaborado com o My Maps Google 2024 [7].

se comparado ao Modelo 2. Já no segundo caso, apesar de ser uma cidade próxima, não há voos diretos, o que gera maior liberdade de combinações para o modelo e chegando ao destino 6 horas e 15 minutos antes da opção comercial representada pelo Modelo 2. Apesar de chegarem ao mesmo tempo, os Modelos 1 e 3 apresentam resultados diferentes: o Modelo 1 prevê combinação de 2 companhias aéreas (Gol e Azul) para se chegar ao destino, enquanto o Modelo 3 prevê a chegada no mesmo horário utilizando apenas a Azul. Para os demais destinos, os resultados convergiram, apresentando como melhor solução voos diretos entre Salvador e as localidades, indicando novamente a boa integração de Salvador na malha aérea nacional.

Para o Cenário 7, apesar da proximidade entre origens e destinos, como Aracaju (SBAR) e Maceió (SBMO) e Aracaju e Fortaleza (SBFZ), a inexistência de voos diretos e o tempo tomado como padrão de 1h30 para escala, no caso do Modelo 2, e de 30 minutos para os outros modelos, impossibilita que o órgão chegue ao destino em tempo hábil; já para os outros destinos (Belém, Macapá e Cuiabá), além de não haver voos diretos, a distância física é um fator adicional de impossibilidade.

Por último, o Cenário 8 foi o que apresentou maior discrepância entre os modelos, como apresentado na Figura 5.1e para os três modelos. Para o destino SBFL (Florianópolis), o Modelo 1 permite que o paciente seja atendido 3 horas e 55 minutos



(a) Rota entre Cuiabá e Vitória

(b) Rota entre Cuiabá e Maceió

Figura 5.4: Representação de algumas rotas partindo de Salvador. Mapa elaborado com o My Maps Google 2024 [7].

antes das opções previstas pelos Modelos 2 e 3. Já para SBVT (Vitória), a redução é de 4 horas e 30 minutos, enquanto na situação em que o receptor se encontra em SBMO (Maceió), a redução é de 3 horas e 35 minutos em relação ao Modelo 3, o Modelo 2 não apresenta opções viáveis ao destino, como observado nas figuras 5.4a e 5.4b para os destinos Vitória e Maceió .

Quanto a SBRF (Recife), nota-se resultados coincidentes nos Modelos 1 e 3, com chegada 1 hora e 40 minutos mais cedo do que a opção apenas comercial. Já para o destino SBAR (Aracaju), nenhum resultado viável foi obtido para nenhum dos modelos propostos. As discrepâncias entre os modelos demonstra o observado na Figura 5.2 com origem em Cuiabá: o aeroporto em questão possui maior integração com aeroportos próximos, se comparado a outras capitais em cidades vizinhas, e com aeroportos estratégicos, de maior porte e maior grau de integração, permitindo que quase todos os destinos fossem atingidos em tempo hábil e antes das opções comerciais.

Dados os modelos desenvolvidos e os cenários analisados, nota-se que uma maior flexibilidade de combinações de voos recebem especial destaque para origens ou destinos com baixa integração na malha aérea nacional. Essa baixa integração impossibilita voos diretos, aumentando significativamente o tempo até o destino para

opções comercialmente ofertadas e afetando a qualidade do atendimento de pacientes nessas regiões. Já para os casos com melhores integrações, diversas opções de voos diretos estão disponíveis, evitando assim o tempo de transbordo.

Nota-se, como visto no Cenário 6 (com origem em Salvador), que, para regiões com integração intermediária, uma mera flexibilização de escolhas de voos da mesma companhia proporcionam resultados significativamente melhores, enquanto para casos de regiões com menor grau de integração ao cenário nacional, como Cuiabá (Cenário 8), a flexibilização máxima torna-se necessária para melhor atendimento dos pacientes da lista de espera.

Em algumas situações notou-se, ainda, que mesmo uma maior flexibilização de combinações de voos não foi suficiente para o atendimento dos pacientes, devido à extensa dimensão territorial do Brasil, a baixa conectividade de algumas regiões, como a região norte, e o baixo número de voos diários em outras, como observado na Tabela 5.4 que apresenta o número de voos do dia 02/10/2023 para os 30 aeroportos considerados, impossibilitando que órgãos com baixos tempos de isquemia cheguem ao destino. Nos dois últimos casos (Brasília - Manaus e Brasília - Boa Vista), quando o fator que não permite o atendimento de um determinado paciente da lista de espera não é a distância, torna-se necessário acionar a FAB para a realização do transporte do órgão, gerando custos adicionais ao Ministério da Saúde.

Tabela 5.4: Número de voos para os 30 aeroportos considerados no dia 02/10/2023 [8]

Aeroporto	Número de voos	Aeroporto	Número de voos
SBFZ	51	SBMQ	4
SBFL	38	SBEG	27
SBPA	83	SBRB	3
SBCT	81	SBCY	33
SBRJ	146	SBCG	15
SBCF	142	SBGO	39
SBVT	33	SBBR	150
SBSP	292	SBAR	14
SBGR	261	SBTE	13
SBRP	11	SBMO	21
SBKP	165	SBSV	81
SBPJ	9	SBSL	15
SBBV	4	SBJP	13
SBPV	5	SBRF	111
SBBE	43	SBSG	19

Como pôde ser visto, o procedimento adotado atualmente para escolhas de voos para transporte de órgãos não é capaz de atender pacientes que poderiam ser atendidos caso um novo procedimento pudesse ser adotado.

Apesar da escolha de dados sintéticos para análise dos cenários, o que pode afetar positiva ou negativamente os resultados, não sendo possível definir ao certo o efeito das combinações, eles indicam que uma maior liberdade de escolhas de voos da mesma companhia já apresenta melhores resultados. Desse modo, a discussão a respeito de novos procedimentos de escolhas de voos para transportes de órgãos é fundamental para o melhor atendimento dos pacientes da lista de espera.

Capítulo 6

Conclusões

Os avanços significativos na área da medicina tornaram o transplante de órgãos viável, sendo, em certos casos, a única possibilidade de cura para o paciente. Apesar da importância dos transplantes, o processo é caracterizado pelos desafios logísticos do transporte, devido à padronização do procedimento e a ao alto grau de urgência [53]. Nesse contexto, países com vastas dimensões geográficas veem-se compelidos a optar pelo transporte aéreo no caso de doadores e receptores distantes. Com o intuito de contornar essa situação, o Brasil possui, desde 2013, um acordo entre as companhias aéreas, o Ministério da Saúde, a Secretaria de Aviação Civil e o Comando da Aeronáutica, que prevê o transporte gratuito em aeronaves comerciais de passageiros de órgãos de transplante [21].

Apesar do transporte gratuito, as limitações previstas no acordo, em que apenas combinações de voos comercialmente ofertadas nos *sites* das companhias aéreas podem ser escolhidos, culmina no prejuízo da qualidade do serviço, aumentando o tempo de viagem e, conseqüentemente, a chance de deterioração do órgão, o que pode ser um dos motivos da baixa taxa de transplantes realizados diante da necessidade estimada mostrada na Figura 2.2.

Nesse contexto, o presente estudo propôs, com base no trabalho de CARRARA *et al.* [52], contribuir com um novo procedimento baseado em um modelo alternativo de escolha de voos, além do apresentado em BALSTER [25] e do atualmente adotado pela CNT, com explanação matemática descrita na Seção 3.3, que busca otimizar a rota até o destinatário, diminuindo o tempo total de viagem. Os três modelos empregados para comparação foram: um modelo com liberdade total de escolha de voos e companhias aéreas em cada escala, denominado Modelo 1, que é resolvido pelo algoritmo de Dijkstra modificado, um modelo com restrições de escolhas de companhias aéreas e de escalas comercialmente ofertadas pelas companhias, denominado Modelo 2 e um modelo com restrições de companhias aéreas, mas livre escolha de voos da mesma empresa, denominado Modelo 3.

Apesar do cenário ser sintético, dada a indisponibilidade de dados reais, é possível

observar que em algumas ocasiões a opção ofertada pelas companhias aéreas não é a mais ágil, especialmente para regiões com menor número de conexões. Nesses casos, não há voos diretos para a maior parte dos aeroportos do país, de modo que escalas são necessárias, aumentando o tempo de viagem e tornando as opções comerciais não ótimas. Em uma realidade em que cada segundo conta para a qualidade do órgão, minutos a menos podem ser a diferença entre salvar a vida de um paciente ou perder o órgão.

Uma discrepância entre as alternativas em si sobressaiu-se no caso especial do Cenário 8, em que quase todas os destinos apresentaram melhor resultado para o Modelo 1, com maior liberdade. Além do cenário em questão, não foram notadas maiores diferenças entre os resultados do Modelo 1 e do Modelo 3, indicando que, dada a maior facilidade de implementação, uma vez que não envolveria comunicação e troca entre diferentes companhias, uma implementação da alternativa com maior liberdade de escolha de voos de uma mesma empresa aérea já seria capaz de minimizar o tempo de chegada aos possíveis destinos.

Além de uma análise dos resultados dos modelos, é possível notar, por meio da Figura 5.2 e da base de dados da ANAC [8] que mesmo para regiões vizinhas, como capitais de estados vizinhos da região Norte e Nordeste, ou não há rotas que interliguem essas capitais diretamente ou o número de voos diários é baixo, como observado na Tabela 5.4, o que dificulta o transporte de órgãos dentro da própria macrorregião, impossibilitando o atendimento de pacientes e afetando o número de transplantes realizados regionalmente.

A presente pesquisa apresenta limitações quanto aos dados empregados, uma vez que dados comerciais não foram disponibilizados pelas companhias aéreas e apenas os 30 principais aeroportos foram considerados para melhor efeito de validação e análise. Desse modo, trabalhos futuros poderiam dedicar-se a expansão do número de aeroportos considerados, de modo a incluir aeroportos de cidades com mais de duzentos mil habitantes e, quando disponíveis, aplicação dos modelos com base em dados reais de planejamento operacional das empresas aéreas brasileiras, além de estudar a influência da expansão da malha aérea do Brasil sobre o tempo de chegada aos destinos e, conseqüentemente, sobre a qualidade do sistema doação-transplante de órgãos. Além disso, as dimensões continentais e o conceito de uma única lista de espera para transplantes contribuem para a necessidade de análise de compatibilidade dos recursos disponíveis para transporte, o que indica que a etapa de transporte no Brasil enfrenta desafios relacionados aos recursos disponíveis e à necessidade de transporte eficiente para minimizar atrasos e perdas de órgãos [27], o que poderia ser abordado em estudos futuros para o caso específico do transporte aéreo.

O estudo em questão apontou para tomadores de decisões importantes alternati-

vas ao atual acordo existente para transporte gratuito de órgãos em voos comerciais: uma flexibilização das combinações de voos permite o melhor atendimento dos pacientes da lista de espera. Para regiões menos integradas à malha nacional, uma flexibilização máxima, com liberdade de trocas de companhias aéreas é necessária; já para regiões um pouco mais integradas, a flexibilização para escolhas de voos apenas da mesma companhia já permitiria a chegada antecipada de órgãos em diversos destinos. Regiões com maior destaque, que se beneficiariam das melhorias propostas são também as com baixos índices de doação e recepção de órgãos, como a região Norte, vide Figura 2.3, possibilitando o melhor atendimento dos pacientes em espera de transplantes de órgãos e a redução do tempo de chegada ao destino, fator crucial para a garantia da qualidade do órgão.

Referências Bibliográficas

- [1] GARCIA, V. D., WERENICZ, A., ONZI, G., et al. “Importância do processo doação-transplante”. In: *Doação e transplante de órgãos e tecidos*, p. 61–79, São Paulo, Segmento Farma, 2015.
- [2] DA SAÚDE, M. “Quais são os tipos de doador?” Disponível em: <<https://www.gov.br/saude/pt-br/composicao/saes/snt/doacao-de-orgaos/quais-sao-os-tipos-de-doador>>.
- [3] ON DONATION, G. O., TRANSPLANTATION. “Total Rate (pmp) Transplant Sum: Kidney+heart+lung+liver+pancreas+small Bowel”, 2021. Disponível em: <<https://www.transplant-observatory.org/data-charts-and-tables/chart/>>.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TRANSPLANTE DE ÓRGÃOS. *Dimensionamento dos Transplantes no Brasil e em cada estado*. 2022.
- [5] DARZE, G. M., BALTAR, M. L. D. B., RIBEIRO, G. M. “Procedimento Para Logística de Doação de Órgãos Baseado Em Caminhos Minimos”. In: *Rio de Transportes*, 2023.
- [6] AEROIN. “Todos os voos domésticos do Brasil”, Sep 2021. Disponível em: <<https://aeroin.net/rotas-domestico/>>.
- [7] GOOGLE. “Meus Mapas”, 2024. Disponível em: <<https://www.google.com/intl/pt-BR/maps/about/mymaps/>>.
- [8] ANAC. “Consulta de voos planejados”, 2023. Disponível em: <<https://siros.anac.gov.br/SIROS/view/registro/frmConsultaVoos>>.
- [9] CARRARA, B. A., RIBEIRO, G. M., LEAL JR, I. C., et al. “Definição da matriz de compatibilidade entre pares de aeroportos para o transporte de órgãos”, *TRANSPORTES*, v. 23, n. 3, pp. 100, Dec 2015. doi: 10.14295/transportes.v23i3.917.

- [10] RUDGE, C., MATESANZ, R., DELMONICO, F., et al. “International practices of organ donation”, *British Journal of Anaesthesia*, v. 108, pp. i48–i55, Jan 2012. doi: 10.1093/bja/aer399.
- [11] MATTIA, A. L. D., ROCHA, A. D. M., DE FREITAS FILHO, J. P. A., et al. “Análise das dificuldades no processo de doação de órgãos: uma revisão integrativa da literatura”, *Bioethikos*, v. 4, n. 1, 2010.
- [12] FUZZATI, R., FALTINGS, B., CALISTI, M. *Organ Transplantation Management*. 2005.
- [13] GARCIA, V. D., PACINI, G. S. “Recomendações de nomenclatura no processo de doação e transplante”. In: *Doação e Transplante de Órgãos e Tecidos*, p. 23–31, Segmento Farma, 2015.
- [14] LACERDA, L., GENARO, M. R. C., ZIOLI, E. G. D. O. “A Logística Do Transporte de Órgãos Para Transplante No Brasil”, *Revista NEADS*, v. 1, n. 1, 2020.
- [15] DE TRANSPLANTES DE ÓRGÃOS, A. B. *Diretrizes básicas para captação e retirada de múltiplos órgãos e tecidos da Associação Brasileira de Transplantes de Órgãos*. ABTO - Associação Brasileira de Transplante de Órgãos, 2009.
- [16] LIMA, E. R. D., HEIS, R. D. M. F. V. “Análise Dos Processos Logísticos Do Transporte Aéreo de Órgãos No Estado de Santa Catarina”, *Revista Brasileira de Aviação Civil; Ciências Aeronáuticas*, v. 1, n. 2, pp. 33–62, 2021.
- [17] LIRA, A. R., REIS, E. L. D., SANTOS, M. V. D. O. “Processo de transporte de órgãos para transplante na Cidade de São Paulo”, *Revista Fatec Zona Sul*, v. 2, n. 3, 2016.
- [18] SILVA, A. L. A. D., JESUS, L. S. D., SILVA, B. A. D., et al. “O Cenário Atual E as Dificuldades Encontradas No Transporte de Órgãos No Brasil”. In: *X Fateclog*, 2019.
- [19] FERNANDES, S. A., CORRÊA, N. L. D. S. “LOGÍSTICA DE TRANSPORTE DE ÓRGÃOS: Etapas e Oportunidades de Otimização da Operação de Transporte”. In: *9a Fateclog*, 2018.
- [20] WANG, G., ZHENG, R., DAI, T. “Does Transportation Mean Transplantation? Impact of New Airline Routes on Sharing of Cadaveric Kid-

neys”, *Management Science*, v. 68, n. 5, pp. 3660–3679, May 2022. doi: 10.1287/mnsc.2021.4103.

- [21] DE AVIAÇÃO CIVIL DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, S., DE AEROPORTOS, S. *Facilitação e ampliação do acesso gratuito ao transporte aéreo de órgãos, tecidos e equipes para transplantes*. 2016.
- [22] ALECCIA, J. “How Lifesaving Organs For Transplant Go Missing In Transit”. Feb 2020. Disponível em: <<https://kffhealthnews.org/news/how-lifesaving-organs-for-transplant-go-missing-in-transit/>>.
- [23] COLE, H. “The organ supply chain: Geography and the inequalities of transplant logistics”, *Transactions of the Institute of British Geographers*, v. 46, n. 4, pp. 1008–1021, May 2021. doi: 10.1111/tran.12458.
- [24] MANTECCHINI, L., PAGANELLI, F., MORABITO, V., et al. “Transportation of Organs by Air: Safety, Quality, and Sustainability Criteria”, *Transplantation Proceedings*, v. 48, n. 2, pp. 304–308, Mar 2016. doi: 10.1016/j.transproceed.2015.12.050.
- [25] BALSTER, I. *A Dynamic Programming Labeling Algorithm to Optimize the Transportation of Organs for Transplantation*. Dissertação, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Feb 2019.
- [26] EREN, U., ANIL, G., AFŞIN EMRE, K., et al. “Organ Transplantation in Turkey: Experience of Organ Transportation by Airway”, *International Journal of Transplantation Research and Medicine*, v. 6, n. 2, Nov 2020. doi: 10.23937/2572-4045.1510057.
- [27] BELLOTTI, H. B., FRANCOSE, M. T. “System for transporting human organs”, *Case Studies on Transport Policy*, v. 9, n. 2, pp. 431–442, Jun 2021. doi: 10.1016/j.cstp.2021.01.005.
- [28] COELHO, G. H. D. F., BONELLA, A. E. “Doação de órgãos e tecidos humanos: a transplantação na Espanha e no Brasil”, *Revista Bioética*, v. 27, n. 3, pp. 419–429, Sep 2019. doi: 10.1590/1983-80422019273325.
- [29] AZZOPARDI, M. C. “In Spain you are automatically an Organ Donor or Opt Out in Writing”. Aug 2022. Disponível em: <<https://www.citizensadvice.org.es/in-spain-you-are-automatically-an-organ-donor-or-opt-out-in-writing/>>.

- [30] MIRANDA, B., GONZÁLEZ-POSADA, J. M. “Principles for allocation of cadaver organs to transplant recipients and coordinating procedures in Spain”. In: *Organ Allocation*, p. 3–21, Dordrecht, Springer Netherlands, 1998. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-011-4984-6_1>.
- [31] UNOS. “The national organ transplant system”. Jan 2020. Disponível em: <<https://unos.org/about/national-organ-transplant-system/>>.
- [32] ON DONATION, G. O., TRANSPLANTATION. “Total Rate (pmp) Transplant Sum: Kidney+heart+lung+liver+pancreas+small Bowel”, 2019. Disponível em: <<https://www.transplant-observatory.org/data-charts-and-tables/chart/>>.
- [33] DOBY, B. L., HANNER, K., JOHNSON, S., et al. “Results of a data-driven performance improvement initiative in organ donation”, *American Journal of Transplantation*, v. 21, n. 7, pp. 2555–2562, Jul 2021. doi: 10.1111/ajt.16442.
- [34] TIMAR, J., BLEIL, M., DALY, T., et al. “Successful strategies to increase organ donation: the Gift of Life Donor Program Philadelphia model”, *Indian Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, v. 37, n. S3, pp. 380–394, Sep 2021. doi: 10.1007/s12055-021-01219-9.
- [35] MORI, M., WILSON, L., ALI, A., et al. “Evaluation of Case Volumes of a Heart Transplant Program and Short-term Outcomes After Changes in the United Network for Organ Sharing Donor Heart Allocation System”, *JAMA Network Open*, v. 3, n. 9, pp. e2017513, Sep 2020. doi: 10.1001/jamanetworkopen.2020.17513.
- [36] ALLAHVERDI, T. D., ALLAHVERDI, E., AKKUŞ, Y. “The Knowledge of Nursing Students About Organ Donation and the Effect of the Relevant Training on Their Knowledge”, *Transplantation Proceedings*, v. 52, n. 10, pp. 2877–2882, Dec 2020. doi: 10.1016/j.transproceed.2020.04.1815.
- [37] DA SAÚDE, S. “Entenda o Sistema Nacional de Transplantes”. Mar 2017. Disponível em: <<https://saude.rs.gov.br/entenda-o-sistema-nacional-de-transplantes>>.
- [38] BRASIL. *Decreto No 2.268*. Jun 1997. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1997/decreto-2268-30-junho-1997-341459-publicacaooriginal-1-pe.html>>.

- [39] DA SAÚDE, M. “Brasil é o segundo maior transplantador de órgãos do mundo”, *Ministério da Saúde*, Feb 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/noticias/2022/fevereiro/brasil-e-o-segundo-maior-transplantador-de-orgaos-do-mundo>>.
- [40] GAVZY, S. J., SCALEA, J. R. “Organ Transportation Innovations and Future Trends”, *Current Transplantation Reports*, v. 9, n. 2, pp. 143–147, Jun 2022. doi: 10.1007/s40472-021-00341-2.
- [41] AKYOL, M., TSWEN WEN, V. L. “Organ Retrieval Logistics”, *Abdominal Organ Retrieval and Transplantation Bench Surgery*, p. 1–8, Apr 2013. doi: 10.1002/9781118513125.ch1.
- [42] SAVAŞER, S., KINAY, B., KARA, B. Y., et al. “Organ transplantation logistics: a case for Turkey”, *OR Spectrum*, v. 41, n. 2, pp. 327–356, Nov 2018. doi: 10.1007/s00291-018-0538-y.
- [43] GENÇ, R. “Organ transplantation surgery in Turkey and in the world: The management of transplantation logistics”, *Turkish Journal of Surgery*, v. 25, n. 1, pp. 40–44, 2009.
- [44] BELIËN, J., DE BOECK, L., COLPAERT, J., et al. “Optimizing the facility location design of organ transplant centers”, *Decision Support Systems*, v. 54, n. 4, pp. 1568–1579, Mar 2013. doi: 10.1016/j.dss.2012.05.059.
- [45] BUNKLEY, N. “Transplant Team Dies in Jet Crash; Mechanical Problems Suspected”, *The New York Times*, Jun 2007. Disponível em: <<https://www.nytimes.com/2007/06/06/us/06docs.html>>.
- [46] CACCHIANI, V., MALANDRI, C., MANTECCHINI, L., et al. “A study on the optimal aircraft location for human organ transportation activities”, *Transportation Research Procedia*, v. 30, pp. 314–323, 2018. doi: 10.1016/j.trpro.2018.09.034.
- [47] PAGANELLI, F., MANTECCHINI, L., PERITORE, D., et al. “Network Model for Optimal Aircraft Location for Human Organ Transportation Activities”, *Transplantation Proceedings*, v. 51, n. 1, pp. 100–105, Jan 2019. doi: 10.1016/j.transproceed.2018.04.069.
- [48] JALILVAND, S., HEIDARI, S., MOHAMMADNAZARI, Z., et al. “A Bi-objective Organ Transplant Supply Chain Network with Recipient Priority Considering Carbon Emission Under Uncertainty, a Case Study”, *Process Integration and Optimization for Sustainability*, v. 7, n. 4, pp. 709–727, Feb 2023. doi: 10.1007/s41660-023-00314-1.

- [49] SALIMIAN, S., MOUSAVI, S. M. “A robust possibilistic optimization model for organ transplantation network design considering climate change and organ quality”, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, Jun 2022. doi: 10.1007/s12652-022-03863-4.
- [50] SALIMIAN, S., MOUSAVI, S. M. “A new scenario-based robust optimization approach for organ transplantation network design with queue condition and blood compatibility under climate change”, *Journal of Computational Science*, v. 62, pp. 101742, Jul 2022. doi: 10.1016/j.jocs.2022.101742.
- [51] ROUHANI, S., PISHVAEE, M. S., ZARRINPOOR, N. “A fuzzy optimization approach to strategic organ transplantation network design problem: A real case study”, *Decision Science Letters*, v. 10, n. 3, pp. 195–216, 2021. doi: 10.5267/j.dsl.2021.5.001.
- [52] CARRARA, B., M. RIBEIRO, G., C. L. JUNIOR, I., et al. “Optimizing the Organ Transportation for Transplant in Brazil by Commercial Domestic Flights”, *International Journal of Transport Economics*, v. XLV, n. 0391–8440, pp. 185–211, Jun 2018.
- [53] KARGAR, B., PISHVAEE, M. S., JAHANI, H., et al. “Organ transportation and allocation problem under medical uncertainty: A real case study of liver transplantation”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 134, pp. 101841, Feb 2020. doi: 10.1016/j.tre.2020.101841.
- [54] ROUHANI, S., AMIN, S. H. “A robust convex optimization approach to design a hierarchical organ transplant network: A case study”, *Expert Systems with Applications*, v. 197, pp. 116716, Jul 2022. doi: 10.1016/j.eswa.2022.116716.
- [55] ARENALES, M., ARMENTANO, V., MORABITO, R., et al. “Otimização em redes”. In: *Pesquisa Opeacional*, p. 297–327, São Paulo, Elsevier, 2007.
- [56] ZHANG, Z., JIGANG, W., DUAN, X. “Practical algorithm for shortest path on transportation network”. In: *2010 International Conference on Computer and Information Application*. IEEE, Dec 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/iccia.2010.6141534>>.
- [57] WOLSEY, L. “Well-Solved Problems”. In: *Integer Programming*, John Wiley; Sons, 1998.
- [58] AGNETIS, A. “Shortest Path problems”. Disponível em: <https://www3.diism.unisi.it/~agnetis/shortest_pathENG.pdf>.

- [59] BEKER, I., JEVTIĆ, V., DOBRILLOVIĆ, D. “Shortest-path algorithms as a tools for inner transportation optimization”, *International Journal of Industrial Engineering and Management*, v. 3, n. 1, pp. 39–45, 2012.
- [60] FRANCESCHETTI, A., HONHON, D., LAPORTE, G., et al. “A Shortest-Path Algorithm for the Departure Time and Speed Optimization Problem”, *Transportation Science*, v. 52, n. 4, pp. 756–768, Aug 2018. doi: 10.1287/trsc.2018.0820.
- [61] SAWADOGO, M., ANCIAUX, D., ROY, D. “Reducing intermodal transportation impacts on society and environment by path selection: a multiobjective shortest path approach”. In: *Proceedings of the 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing Bucharest*, 2012.
- [62] GAO, X., XIANZANG, Y., YOU, X., et al. “Reachability for airline networks: fast algorithm for shortest path problem with time windows”, *Theoretical Computer Science*, v. 749, pp. 66–79, Nov 2018. doi: 10.1016/j.tcs.2018.01.016.
- [63] BLANCO, M., BORNDÖRFER, R., HOANG, N.-D., et al. “Solving Time Dependent Shortest Path Problems on Airway Networks Using Super-Optimal Wind”. Jan 2016. Disponible em: <http://drops.dagstuhl.de/opus/volltexte/2016/6536/>.
- [64] DESAULNIERS, G., DESROSIERS, J., SOLOMON, M. “Shortest Path Problems with Resource Constraints”. In: *Column Generation*, Springer, 2005.
- [65] DI PUGLIA PUGLIESE, L., GUERRIERO, F., POSS, M. “The Resource Constrained Shortest Path Problem with uncertain data: A robust formulation and optimal solution approach”, *Computers and Operations Research*, v. 107, pp. 140–155, Jul 2019. doi: 10.1016/j.cor.2019.03.010.
- [66] GARCÍA-HEREDIA, D., MOLINA, E., LAGUNA, M., et al. “A solution method for the shared resource-constrained multi-shortest path problem”, *Expert Systems with Applications*, v. 182, pp. 115193, Nov 2021. doi: 10.1016/j.eswa.2021.115193.
- [67] FEILLET, D., DEJAX, P., GENDREAU, M., et al. “An exact algorithm for the elementary shortest path problem with resource constraints: Application to some vehicle routing problems”, *Networks*, v. 44, n. 3, pp. 216–229, Aug 2004. doi: 10.1002/net.20033.

- [68] LOZANO, L., MEDAGLIA, A. L. “On an exact method for the constrained shortest path problem”, *Computers and Operations Research*, v. 40, n. 1, pp. 378–384, Jan 2013. doi: 10.1016/j.cor.2012.07.008.
- [69] DERIGS, U., FRIEDERICHS, S., SCHÄFER, S. “A New Approach for Air Cargo Network Planning”, *Transportation Science*, v. 43, n. 3, pp. 370–380, Aug 2009. doi: 10.1287/trsc.1090.0282.
- [70] PAYNE, E. *A Resource Constraint Constrained Shortest Paths Approach to Reducing Personal Pollution Exposure*. 2019. Disponível em: <https://pdxscholar.library.pdx.edu/reu_reports/15>.
- [71] KÖHLER, E., MÖHRING, R. H., SCHILLING, H. “Acceleration of Shortest Path and Constrained Shortest Path Computation”. In: *Experimental and Efficient Algorithms*, p. 126–138, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/11427186_13>.
- [72] KAI, N., YAO-TING, Z., YUE-PENG, M. “Shortest Path Analysis Based on Dijkstra’s Algorithm in Emergency Response System”, *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, v. 12, n. 5, May 2014. doi: 10.11591/telkomnika.v12i5.3236.
- [73] ALAM, M. A., FARUQ, M. O. “Finding Shortest Path for Road Network Using Dijkstra’s Algorithm”, *Bangladesh Journal of Multidisciplinary Scientific Research*, v. 1, n. 2, pp. 41–45, Jul 2019. doi: 10.46281/bjmsr.v1i2.366.
- [74] WEI, K., GAO, Y., ZHANG, W., et al. “A Modified Dijkstra’s Algorithm for Solving the Problem of Finding the Maximum Load Path”. In: *2019 IEEE 2nd International Conference on Information and Computer Technologies (ICICT)*. IEEE, Mar 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/infoc.2019.8711024>>.
- [75] SEDGEWICK, R., WAYNE, K. “Graphs”. In: *Algorithms*, p. 652–657, Addison-Wesley, 2011.
- [76] JAVAID, M. A. “Understanding Dijkstra Algorithm”, *SSRN Electronic Journal*, 2013. doi: 10.2139/ssrn.2340905.