



## APLICAÇÃO DO PACOTE ROUTER NA OTIMIZAÇÃO DE ROTAS PARA OPERAÇÕES LOGÍSTICAS AÉREAS

Eduarda Peres de Oliveira de Mello

Luciane Ferreira Alcoforado

Kátia Ferreira de Oliveira

### Resumo

O estudo teve como objetivo investigar a aplicabilidade do pacote RouteR na otimização de rotas de transporte aéreo logístico, visando a eficiência operacional e redução de custos nas missões da Força Aérea Brasileira envolvendo aeronaves de transporte. Para tal, os objetivos específicos foram simular uma operação de transporte aéreo logístico com base na análise de cenários reais, elaborar um modelo matemático para desenvolvimento de estratégias de roteirização a serem aplicadas na operação simulada e, por fim, avaliar a robustez das estratégias de roteirização propostas. Inicialmente, foram levantados os dados para construção do modelo matemático onde foram considerados critérios de otimalidade, determinadas as variáveis de decisão e por fim definida a função objetivo juntamente com suas restrições estruturais e de sinal. Finalizada a etapa de modelagem, iniciou-se a realização de simulações de cenários com o uso da plataforma online Posit Cloud, utilizando-se do pacote RouteR. Observou-se que a simulação realizada com base no modelo matemático construído demonstrou ser uma ferramenta que ajudaria a escolher o caminho mínimo a ser percorrido em uma operação aérea e, conseqüentemente, reduziria os custos despendidos.

**Palavras-chave:** Modelagem matemática; RouterR; roteirização; transporte aéreo logístico.

### Abstract

The study aimed to investigate the applicability of the RouteR package in optimizing air transport routes, aiming at operational efficiency and cost reduction in the missions of the Brazilian Air Force involving transport aircraft. For this, the specific objectives were to simulate a logistical air transport operation based on the analysis of real scenarios, to elaborate a mathematical model for the development of routing strategies to be applied in the simulated operation and, finally, to evaluate the robustness of the proposed routing strategies. Initially, data were collected for the construction of the mathematical model where optimality criteria were considered, decision variables were determined and finally the objective function was defined along with its structural and signal constraints. After the modeling stage, scenario simulations began using the online platform Posit Cloud, using the RouteR package. It was observed that the simulation carried out based on the constructed mathematical model proved to be a tool that would help choose the minimum path to be traveled in an air operation and, consequently, would reduce the costs incurred.

**Keywords:** Mathematical modeling; RouterR; routing; logistical air transport.

Academia da Força Aérea (AFA) [dudapmello24@gmail.com](mailto:dudapmello24@gmail.com)

Academia da Força Aérea (AFA) [luciane@id.uff.br](mailto:luciane@id.uff.br)

Academia da Força Aérea (AFA) [eng.katiaferoli@gmail.com](mailto:eng.katiaferoli@gmail.com)



## **Introdução**

O Transporte Aéreo Logístico (TAL) compreende a utilização de meios aeroespaciais para exercer o deslocamento de recursos humanos e materiais com vistas ao cumprimento dos objetivos estratégicos, operacionais ou táticos, por intermédio do pouso, carga e descarga das aeronaves (Ministério da Defesa, 2020).

Os custos do transporte aéreo logístico realizado em operações da Força Aérea Brasileira (FAB) são essencialmente associados a variáveis diretamente definidas pela rota aérea escolhida, como a distância percorrida pela aeronave e a quantidade de horas de voo. Nesse contexto, surge a utilização de um processo conhecido como roteirização.

A roteirização é um método que define rotas para que seja feito um planejamento eficiente da entrega ou do recebimento a fim de reduzir os gastos a partir da seleção do melhor trajeto, auxiliando no aumento da qualidade da operação (Silva et al., 2019). Assim sendo, esse processo desempenha um papel essencial quanto ao funcionamento bem-sucedido de uma operação de transporte aéreo logístico realizada pela FAB.

Na conjuntura da Força Aérea Brasileira, a roteirização de aeronaves enfrenta diversos obstáculos, como a minimização dos custos operacionais e a coordenação de operações em tempo real. Além disso, selecionar rotas em uma variedade de cenários e demandas instáveis como ambientes de conflitos e emergências representa um grande desafio e deve ser uma capacidade inerente à Aeronáutica. Portanto, a dinâmica operacional do transporte aéreo logístico na FAB exige abordagens inovadoras no planejamento e na execução das operações a fim de maximizar a eficiência e minimizar os custos logísticos.

Consoante essa perspectiva, tem-se a Pesquisa Operacional (PO), área que utiliza métodos como a modelagem matemática a fim de determinar a alocação mais adequada de recursos limitados e escassos (Arenales et al, 2007; Belfiore e Fávero, 2012), viabilizando a realização de simulações de casos reais de modo a possibilitar a previsão de possíveis resultados e avaliar alternativas (Silveira; Lavratti; Benito, 2004), auxiliando na tomada de decisões e redução dos custos.

Assim, em decorrência dos altos gastos envolvidos na função logística transporte às operações da Força Aérea Brasileira, acerca da efetivação da missão de integrar o território nacional, frente à extensa área territorial do Brasil e dos diversos desafios enfrentados na realização da roteirização de missões, surge a necessidade de pesquisar estratégias para serem aplicadas no planejamento e na execução dessas operações.



### **Objetivo**

Investigar a aplicabilidade do pacote RouteR na otimização de rotas de transporte aéreo logístico, visando a eficiência operacional e redução de custos nas missões da Força Aérea Brasileira envolvendo aeronaves de transporte.

O artigo tem como objetivos específicos simular uma operação de transporte aéreo logístico com base na análise de cenários reais, elaborar um modelo matemático para desenvolvimento de estratégias de roteirização a serem aplicadas na operação simulada e, por fim, avaliar a robustez das estratégias de roteirização propostas.

### **Material e Método**

À luz da pesquisa bibliográfica, realizou-se uma coleta de dados, de modo a viabilizar o conhecimento sólido e aprofundado do objeto a ser estudado (Zanella, 2011, p.38), e por conseguinte, o desenvolvimento de um modelo matemático de roteirização a fim de ser aplicado em uma operação simulada de transporte aéreo logístico realizado em uma base aérea, configurando-se como uma pesquisa básica de abordagem quantitativa e caráter descritiva.

Segundo Beuren e Raupp (2004, p.92), a pesquisa quantitativa pode ser caracterizada “pelo emprego de instrumentos estatísticos, tanto na coleta quanto no tratamento dos dados”.

A composição dos dados levou em consideração variáveis capazes de afetar a eficácia da roteirização como quantidade de horas de voo despendidas durante o transporte, a quantidade de carga e/ou pessoas transportadas, o tipo de aeronave utilizada, o local de origem e de destino da operação, tendo como referência as missões de transporte aéreo logístico realizadas pela FAB por meio das aeronaves C-130 Hércules, C-105 Amazonas e KC-390 Millennium no decorrer da Operação COVID-19, entre o período de abril de 2020 e maio de 2021, devido à acessibilidade dos dados e à maior capacidade de carga dessas em comparação às outras aeronaves de transporte utilizadas pela FAB durante a operação.

Para auxiliar na modelagem, simulação e obtenção da solução ótima do problema de roteirização, utilizou-se o pacote RouteR (Alcoforado, 2024a). As simulações levaram em conta variações no número de aeronaves e ocorrência de panes durante a execução das rotas, de modo a contemplar uma análise em diferentes cenários e condições operacionais a fim de verificar a robustez das estratégias propostas.

Para a construção do modelo matemático para o problema de roteamento, estabeleceu-se que o local de origem e destino final correspondem à base aérea que detém o Esquadrão de Transporte que utiliza a aeronave KC-390 Millennium, visto que essa aeronave foi a mais utilizada durante a Operação COVID-19 no período definido na coleta de

dados, e os locais intermediários equivalem às bases aéreas da Força Aérea Brasileira as quais mais foram utilizadas durante as missões da Operação COVID-19, vide Quadros 1 e 2.

**Quadro 1** Local de origem e destino

Origem/Destino	
1	BAAN

Fonte: elaboração própria com base em dados coletados no site oficial da Força Aérea Brasileira. Disponível em: <https://www.fab.mil.br/organizacaoes>. Acesso em: 07 fev. 2024.

**Quadro 2** Locais intermediários

Bases intermediárias			
2	BAGL	6	BAPV
3	BASP	7	BABV
4	BAMN	8	BABR
5	BABE	9	BANT

Fonte: elaboração própria com base em dados coletados no site oficial da Força Aérea Brasileira. Disponível em: <https://www.fab.mil.br/organizacaoes>. Acesso em: 07 fev. 2024.

O critério de otimalidade, ou seja, o objetivo que se quer alcançar com o uso do modelo é a minimização da distância total percorrida na operação a fim de reduzir os custos no transporte. As distâncias aproximadas entre cada base aérea dos locais de origem, intermediários e de destino estão detalhadas no Quadro 3.

**Quadro 3** Distância em quilômetros entre as bases aéreas

Base Aérea	Distância (em km)								
	BAAN	BAGL	BASP	BAMN	BABE	BAPV	BABV	BABR	BANT
BAAN	-	948	844	1890	1651	1824	2483	120	1898
BAGL	948	-	339	2842	2450	2706	3422	916	2067
BASP	844	339	-	2685	2462	2475	3306	856	2307
BAMN	1890	2842	2685	-	1292	755	662	1937	2764
BABE	1651	2450	2462	1292	-	1890	1437	1611	1553
BAPV	1824	2706	2475	755	1890	-	1333	1910	3182
BABV	2483	3422	3306	662	1437	1333	-	2513	2990
BABR	120	916	856	1937	1611	1910	2513	-	1784
BANT	1898	2067	2307	2764	1553	3182	2990	1784	-

Fonte: elaboração própria com base em dados coletados na pesquisa. Disponível em: <https://www.distanciascidades.com/pesquisa/>. Acesso em: 07 fev. 2024.

As variáveis de decisão são do tipo binária e indicam se o trecho é ou não incluído na rota, tendo como parâmetro associado, a distância a ser percorrida entre duas bases aéreas  $i$  e  $j$ , na aeronave  $k$ :



$d_{ij}$  = distância entre a base  $i$  e a base  $j$

$x_{ijk} = 1$  se a aeronave  $k$  percorre a distância entre a base  $i$  e a base  $j$

$x_{ijk} = 0$  se a aeronave  $k$  não percorre a distância entre a base  $i$  e a base  $j$

A função objetivo, bem como as restrições estruturais e de sinal são descritas a seguir, considerando 1 base de origem/destino, 8 bases aéreas a serem atendidas a partir da origem e 3 aeronaves em operação.

$$\text{Min } Z = \sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^9 \sum_{j=1}^9 d_{ij} \cdot x_{ijk}, \quad i \neq j$$

Sujeito a:

- I. Restrição que garante que alguma aeronave sai da base 1

$$\sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^9 x_{ijk} = 1, \quad i = 1; \quad i \neq j$$

- II. Restrição que garante que alguma aeronave retorna à base 1

$$\sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^9 x_{ijk} = 1, \quad j = 1; \quad i \neq j$$

- III. Restrição que garante que todas as bases serão atendidas por uma única aeronave

$$\sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^9 x_{ijk} = 1, \quad i = 2, \dots, 9; \quad i \neq j$$

- IV. Restrição que garante que a aeronave que chega à uma base intermediária, sai dessa base

$$\sum_{i=1}^9 x_{ijk} - \sum_{i=1}^9 x_{jik} = 0, \quad i \neq j, \quad j = 2, \dots, 9 \text{ e } k = 1, 2 \text{ e } 3$$

- V. Restrição que garante a eliminação de sub-rotas

$$\sum_{i=1}^9 \sum_{j=1}^9 x_{ijk} \leq |S| - 1, \quad i \neq j, \quad k = 1, 2 \text{ e } 3, \text{ onde } 2 \leq |S| \leq n$$

- VI. Restrição de sinal

$$x_{ijk} \geq 0$$

As simulações de cenários foram realizadas na plataforma online *Posit Cloud*, todas as equações do modelo foram geradas com o pacote *RouteR* cujos detalhes de implementação encontram-se em ALCOFORADO (2024b). Foram considerados dois cenários, o primeiro em que se variou o número de aeronaves e o segundo em que se considerou a ocorrência de panes. Neste último caso foram analisadas duas estratégias possíveis, uma considerando o envio de uma nova aeronave para completar a rota da



aeronave em pane e outra considerando um novo roteamento utilizando as aeronaves em operação.

### Resultados e Discussão

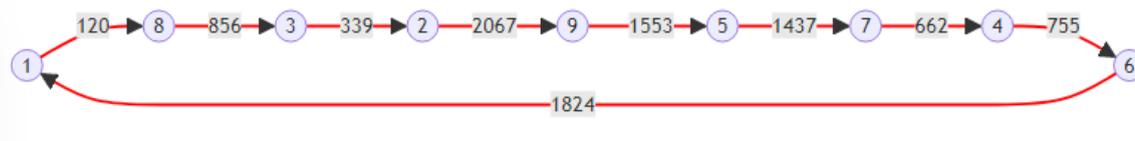
#### CENÁRIO 1: VARIAÇÃO DO NÚMERO DE AERONAVES

O primeiro cenário considerou a variação do número k de aeronaves disponíveis para uso durante a operação. As informações obtidas quanto ao número de restrições, número de variáveis, rota determinada pela solução ótima e valor da função objetivo encontram-se na Tabela 1. As rotas determinadas pelo pacote *RouteR* são representadas nas Figuras 1, 2, 3 e 4.

**Tabela 1** Simulação do cenário 1

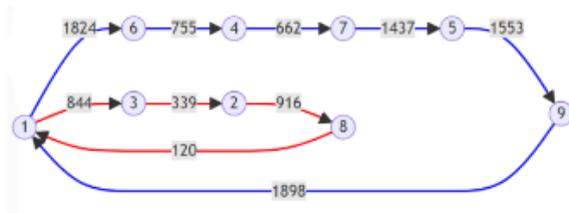
k	Número de restrições	Número de variáveis	Valor da Função Objetivo	Rota	Distância percorrida por cada aeronave
1	138	72	9613	Aeronave 1: 1-8-3-2-9-5-7-4-6-1	9.613 km
2	268	144	10348	Aeronave 1: 1-3-2-8-1 Aeronave 2: 1-6-4-7-5-9-1	Aeronave 1: 2.219 km Aeronave 2: 8.129 km
3	146	216	12262	Aeronave 1: 1-2-3-1 Aeronave 2: 1-5-7-4-6-1 Aeronave 3: 1-8-9-1	Aeronave 1: 2.131 km Aeronave 2: 6.329 km Aeronave 3: 3.802 km
4	192	288	15973	Aeronave 1: 1-2-3-1 Aeronave 2: 1-5-7-1 Aeronave 3: 1-6-4-1 Aeronave 4: 1-8-9-1	Aeronave 1: 2.131 km Aeronave 2: 5.571 km Aeronave 3: 4.469 km Aeronave 4: 3.802 km

Fonte: elaboração própria com base em resultados obtidos durante a realização da pesquisa, 2024.



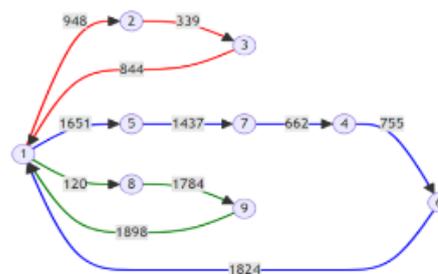
**Figura 1** Rota ótima para uma aeronave

Fonte: elaboração própria, 2024



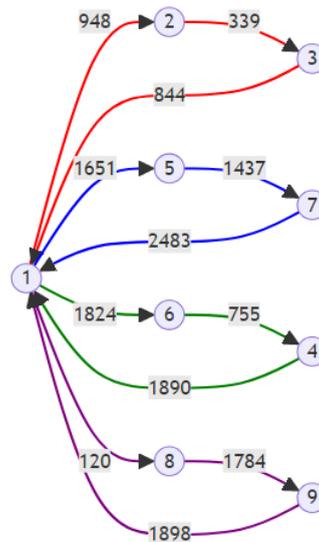
**Figura 2** Rota ótima para duas aeronaves

Fonte: elaboração própria, 2024.



**Figura 3** Rota ótima para três aeronaves

Fonte: elaboração própria, 2024.



**Figura 4** Rota ótima para quatro aeronaves

Fonte: elaboração própria, 2024.

De acordo com os resultados obtidos na simulação do cenário 1 descrito acima, tem-se que, na situação em que há apenas uma aeronave sendo utilizada na operação, o total da distância percorrida por ela é de 9.613 km, conforme a solução ótima calculada pelo *software*. Desse modo, a fim de discutir o resultado obtido e analisar a viabilidade da utilização dessa ferramenta, foram escolhidas as seguintes rotas para a aeronave de forma aleatória:

- a) Rota 1: 1-2-3-4-5-6-7-8-9-1
- b) Rota 2: 1-5-9-7-3-4-2-8-6-1
- c) Rota 3: 1-8-4-6-9-2-5-3-7-1

Para as rotas determinadas de modo aleatório acima, tem-se que a aeronave percorre a distância de 14.682 km, 19.677 km e 18.762 km, respectivamente. Assim, comparando esses resultados com o obtido pela solução ótima do modelo matemático desenvolvido é possível perceber a diferença de 5.069 km, 10.064 km e 9.149 km entre as distâncias. O mesmo ocorre ao analisar as simulações com duas, três e quatro aeronaves.

Nesse sentido, observa-se que a simulação realizada com base no modelo matemático construído demonstrou ser uma ferramenta que ajudaria a escolher o caminho mínimo a ser percorrido em uma operação aérea e, conseqüentemente, reduziria os custos despendidos.

CENÁRIO 2: SIMULAÇÃO DE PANES NAS AERONAVES DURANTE A EXECUÇÃO DA OPERAÇÃO



Este cenário tem em conta a ocorrência de uma pane em uma das aeronaves no decorrer da operação. Para isso, foram utilizadas como referência as rotas ótimas calculadas no cenário 1.

### Simulação da pane no início da operação com o uso de duas aeronaves

Baseando-se na rota ótima calculada no primeiro cenário, tem-se que a aeronave 1 percorreu a rota 1-3-2-8-1 e a aeronave 2 percorreu a rota 1-6-4-7-5-9-1. Supõe-se que ocorre uma pane na aeronave 1 no início da rota, quando a mesma está na base aérea 3 e a aeronave 2 está na base aérea 6. Nesse contexto, duas estratégias podem ser consideradas.

Na primeira estratégia, a aeronave 2 mantém a rota estabelecida previamente, enquanto uma terceira aeronave é despachada da origem 1 a fim de seguir a trajetória inicialmente designada à aeronave 1. A Tabela 2 e a Figura 5 demonstram os resultados alcançados.

**Tabela 2** Estratégia 1 para a simulação da pane na aeronave 1 quando há o uso de duas aeronaves

Aeronave	Rota percorrida	Distância percorrida por cada aeronave
1	1-3	844 km
2	1-6-4-7-5-9-1	8.129 km
3	1-2-8-1	1.984 km

Fonte: elaboração própria com base em resultados obtidos durante a realização da pesquisa, 2024

### Figura 5 Estratégia 1

Fonte: elaboração própria, 2024.

Seguindo essa abordagem, a distância total percorrida na operação seria de 10.957 km.

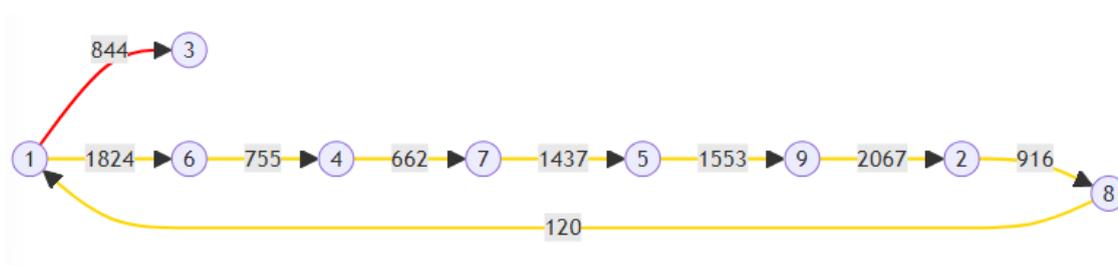
Na segunda estratégia, o trajeto percorrido pela aeronave 2 será refeito com a finalidade de atender tanto as bases as quais foram designadas inicialmente a ela quanto as bases que foram atribuídas à aeronave 1. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3 e na Figura 6.



**Tabela 3** Estratégia 2 para a simulação da pane na aeronave 1 quando há o uso de duas aeronaves

Aeronave	Rota percorrida	Distância percorrida por cada aeronave
1	1-3	844 km
2	1-6-4-7-5-9-2-8-1	9.334 km

Fonte: elaboração própria com base em resultados obtidos durante a realização da pesquisa, 2024.



**Figura 6** Estratégia 2

Fonte: elaboração própria, 2024.

Para a abordagem utilizada na estratégia 2, as aeronaves iriam percorrer, em conjunto, a distância de 10.178 km.

Ao comparar os resultados obtidos, conclui-se que a escolha mais vantajosa a se fazer no processo de tomada de decisão seria utilizar a segunda estratégia visto que resultaria em menores custos operacionais devido à menor distância percorrida pelas aeronaves durante a operação.

### Simulação da pane no início da operação com o uso de três aeronaves

Nessa simulação, supõe-se que houve pane na aeronave 3 após o pouso na base aérea 8. Nesse momento, as aeronaves 1 e 2 encontravam-se nas bases aéreas 2 e 5, respectivamente.

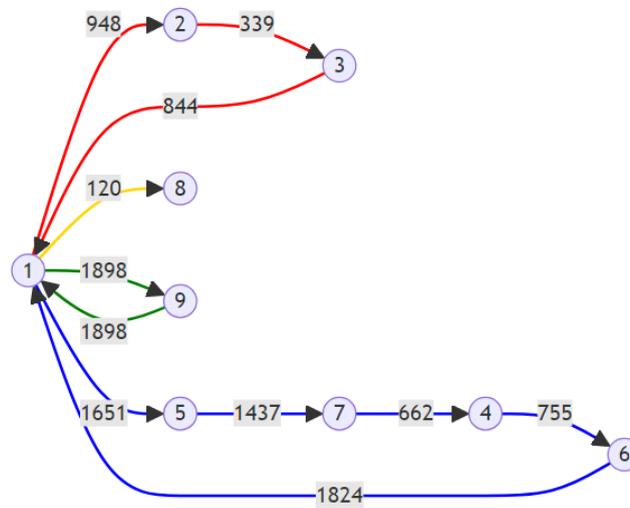
A primeira estratégia a ser analisada considera a inserção de uma quarta aeronave na missão para realizar a demanda inicialmente prevista para a aeronave 3. Nesse contexto, a distância total percorrida na operação seria de 12.376 km. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4 e na Figura 7.

**Tabela 4** Estratégia 1 para a simulação da pane na aeronave 3 quando há o uso de três aeronaves



Aeronave	Rota percorrida	Distância percorrida por cada aeronave
1	1-2-3-1	2.131 km
2	1-5-7-4-6-1	6.329 km
3	1-8	120 km
4	1-9-1	3.796 km

Fonte: elaboração própria com base em resultados obtidos durante a realização da pesquisa, 2024.



**Figura 7** Estratégia 1

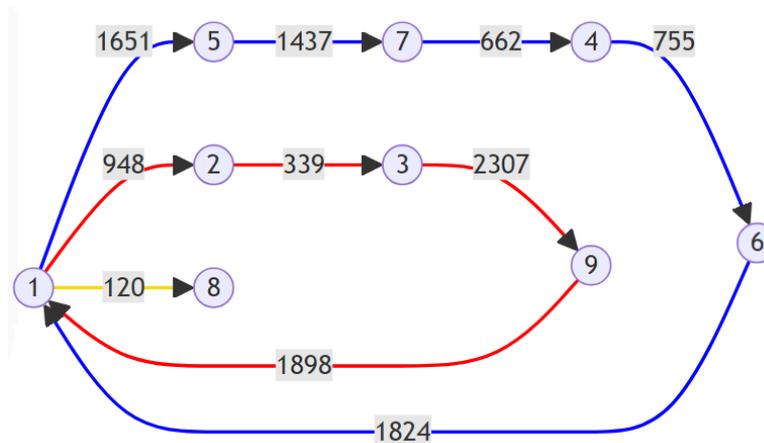
Fonte: elaboração própria, 2024.

Por outro lado, a estratégia 2 considera a reformulação das rotas das aeronaves 1 e 2 a fim de atender as bases restantes designadas à aeronave 3. Dentro dessa perspectiva, as aeronaves percorreriam uma distância total de 11.941 km. A Tabela 5 e a Figura 8 apresentam os dados obtidos.

**Tabela 5** Estratégia 2 para a simulação da pane na aeronave 3 quando há o uso de três aeronaves

Aeronave	Rota percorrida	Distância percorrida por cada aeronave
1	1-2-3-9-1	5.492 km
2	1-5-7-4-6-1	6.329 km
3	1-8	120 km

Fonte: elaboração própria com base em resultados obtidos durante a realização da pesquisa, 2024.



**Figura 8** Estratégia 2

Fonte: elaboração própria, 2024.

Do mesmo modo demonstrado na simulação do item 3.2.1 do artigo, a estratégia 2 seria a opção mais adequada a ser utilizada na situação em questão em virtude da menor quilometragem percorrida pelas aeronaves. Nesse sentido, ocorreria o consumo menor de combustível e horas de voo, além de diminuir o desgaste das aeronaves, exigindo menos manutenção e reparos, de modo a resultar na economia de recursos.

### Simulação da pane no meio da operação com o uso de duas aeronaves

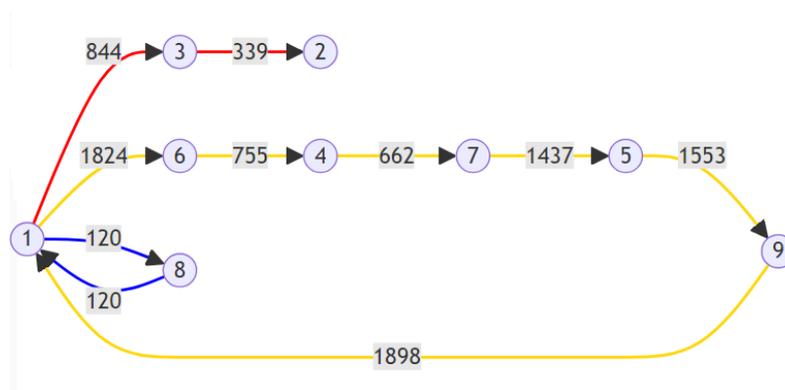
Considerando ainda a rota ótima estabelecida no cenário 1 do trabalho, supõe-se agora que ocorre a pane na aeronave 1 quando a mesma se encontra na base aérea 2. Para a estratégia 1, tem-se que a distância percorrida na operação seria de 9.552 km, conforme os dados apresentados na Tabela 6 e Figura 9 abaixo.



**Tabela 6** Estratégia 1 para a simulação da pane na aeronave 1 no meio da operação

Aeronave	Rota percorrida	Distância percorrida por cada aeronave
1	1-3-2	1.183 km
2	1-6-4-7-5-9-1	8.129 km
3	1-8-1	240 km

Fonte: elaboração própria com base em resultados obtidos durante a realização da pesquisa, 2024.



**Figura 9** Estratégia 1

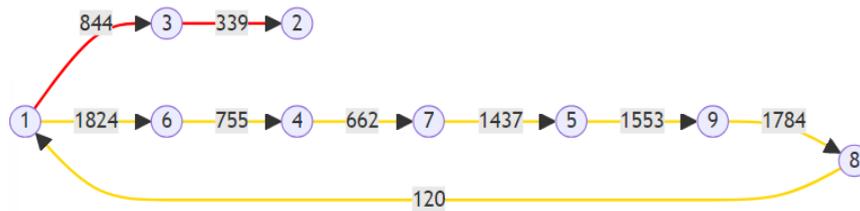
Fonte: elaboração própria, 2024.

Por outro lado, ao aplicar a estratégia 2 na situação ocorrida durante a operação, as aeronaves iriam percorrer a distância de 9.318 km. Nesse contexto, a estratégia 2 ainda permanece sendo a mais vantajosa para minimizar os custos da operação. A Tabela 7 e a Figura 10 demonstram os dados obtidos.

**Tabela 7** Estratégia 2 para a simulação da pane na aeronave 1 no meio da operação

Aeronave	Rota percorrida	Distância percorrida por cada aeronave
1	1-3-2	1.183 km
2	1-6-4-7-5-9-8-1	8.135 km

Fonte: elaboração própria com base em resultados obtidos durante a realização da pesquisa, 2024.

**Figura 10** Estratégia 2

Fonte: elaboração própria, 2024.

### Considerações Finais

O transporte aéreo logístico desempenha um papel crucial no âmbito da Força Aérea Brasileira quanto ao cumprimento de sua missão síntese. Ademais, com seus custos diretamente associados à rota percorrida, o transporte caracteriza-se como uma das funções logísticas mais dispendiosas.

Nesse sentido, o presente trabalho buscou utilizar técnicas da Pesquisa Operacional, tais quais a simulação e a modelagem matemática, a fim de cumprir o objetivo principal de analisar como a simulação de uma operação de transporte aéreo logístico gera estratégias de roteamento de aeronaves para a otimização da tomada de decisão relacionada aos custos de transporte.

Inicialmente, um modelo matemático de roteirização de aeronaves foi construído para, em seguida, ser aplicado em diferentes cenários de uma operação simulada, baseada na análise e coleta de dados da operação COVID-19 realizada pela Força Aérea Brasileira.

No primeiro cenário, aplicou-se o modelo matemático desenvolvido no trabalho em conjunto com o uso do *software* R e o pacote *RouteR*, variando o número de aeronaves utilizadas durante a realização dos transportes da operação. Os resultados obtidos pelo *software* foram então avaliados por meio da comparação com rotas escolhidas de forma aleatória, evidenciando considerável vantagem à favor da modelagem.

Após a comparação, observou-se que a rota estabelecida pelo *software* era a rota de menor distância, representando o caminho mínimo a ser percorrido pela aeronave no decorrer da operação. Por ser o caminho de menor quilometragem que seria percorrido pela aeronave, o consumo de combustível e de horas de voo seriam menores, resultando na redução de custos para a operação. Com essa análise, o modelo matemático formulado com o auxílio do pacote *RouteR* mostrou-se efetivo no estabelecimento da rota mínima a ser percorrida, resultando na minimização de custos.



Para o segundo cenário, considerou-se a ocorrência de panes em uma das aeronaves que estavam sendo usadas durante o andamento da operação. Utilizando a modelagem matemática, estratégias de roteamento puderam ser desenvolvidas para cada situação estabelecida no cenário.

Em todas as simulações de pane de aeronave realizadas, identificou-se que a estratégia de acrescentar uma aeronave na operação foi considerada a opção de maior custo visto que uma distância maior seria percorrida, de acordo com a solução ótima obtida pelo pacote *RouteR*.

Desse modo, por meio do uso da simulação de uma operação de transporte aéreo logístico, foi possível desenvolver potenciais estratégias a serem utilizadas caso os cenários considerados no trabalho ocorressem. Ainda, a simulação, em conjunto com o modelo matemático construído e o uso *software R* e do pacote *RouteR*, possibilitaram a percepção de qual seria a estratégia mais vantajosa a ser escolhida durante o processo de tomada de decisão. Por conseguinte, o objetivo principal e os objetivos específicos foram atingidos.

É importante ressaltar que as soluções ótimas apresentadas pelo *software* e pela modelagem matemática em todos os cenários simulados no trabalho não distribuíram de maneira equilibrada as distâncias percorridas pelas aeronaves utilizadas no transporte aéreo logístico, resultando em algumas aeronaves percorrendo uma distância maior que outras ao longo da operação.

Outro aspecto importante que não foi abordado nesta modelagem é considerar as capacidades de cargas das aeronaves. A inclusão desse aspecto permitiria uma distribuição mais eficiente da carga entre os veículos, otimizando o uso dos recursos disponíveis e potencialmente reduzindo os desequilíbrios de demanda entre as aeronaves. Além disso, considerar as capacidades de carga pode influenciar significativamente a seleção da rota.

Nesse sentido, sugere-se a continuidade da pesquisa em trabalhos futuros a fim de se estudar a viabilidade de construção de um modelo matemático capaz de selecionar o caminho mínimo, considerando as limitações de carga das aeronaves e, ao mesmo tempo, balanceando a demanda entre os veículos utilizados na operação. Ainda, os resultados apresentados evidenciam uma abordagem possível que não se pode prever de antemão, de modo que não podem ser generalizados. Explorar como integrar essas informações ao modelo matemático existente pode oferecer melhorias no sistema de roteamento de veículos em operações de transporte aéreo logístico.

Por fim, espera-se que o presente trabalho proporcione uma contribuição significativa para o avanço do conhecimento quanto a estratégias de roteamento de aeronaves a fim de minimizar os custos operacionais, auxiliando na economia de recursos da Força Aérea Brasileira.



## Referências

- ALCOFORADO, Luciane Ferreira. **RouteR: Um pacote para modelagem e resolução de problemas de roteamento de veículos em R** [Software], 2024a.  
\_\_\_\_\_. Modelagem de Problema de Roteamento de Veículos com o pacote RouteR. **Revista do Seminário Internacional de Estatística com R**, v.5, n. 1, abril, 2024b. Disponível em: <https://periodicos.uff.br/anaisdoser/article/view/62501>. Acesso em: 09 abr. 2024.
- ARENALES, Marcos *et al.* **Pesquisa Operacional para cursos de engenharia**. 1 ed. Elsevier, 2007. 524 p. Disponível em: [https://www.academia.edu/36203037/Pesquisa\\_Operacional\\_Arenales\\_et\\_al\\_2007](https://www.academia.edu/36203037/Pesquisa_Operacional_Arenales_et_al_2007). Acesso em: 19 jul. 2023.
- BELFIORE, Patrícia; FÁVERO, Luiz Paulo. **Pesquisa Operacional para Cursos de Administração, Contabilidade e Economia**. 1 ed. Elsevier, 2012. 360 p.
- BEUREN, Ilse Maria; RAUPP, Fabiano Maury. Metodologia da Pesquisa aplicável às Ciências Sociais. *In*: BEUREN, Ilse Maria; RAUPP, Fabiano Maury. **Como elaborar trabalhos monográficos em contabilidade: teoria e prática**. 2 ed. Atlas, 2004. cap. 3, p. 76-97.
- MINISTÉRIO DA DEFESA. Comando da Aeronáutica. Doutrina. **DCA 1-1. Doutrina Básica da Força Aérea Brasileira. Volume II**. Brasília, DF. Portaria nº 1.225/GC3. 2020. Disponível em: [https://www2.fab.mil.br/unifa/ppgca/images/conteudo/D-QBRN/DCA\\_1-1\\_DOCTRINA\\_BSICA\\_DA\\_FORA\\_AREA\\_BRASILEIRA\\_-\\_VOLUME\\_2\\_2020.pdf](https://www2.fab.mil.br/unifa/ppgca/images/conteudo/D-QBRN/DCA_1-1_DOCTRINA_BSICA_DA_FORA_AREA_BRASILEIRA_-_VOLUME_2_2020.pdf). Acesso em: 27 jul. 2023.
- SILVA, Diewelly Maria *et al.* **Aplicação de roteirização por meio da pesquisa operacional para redução de custos uma empresa em Penedo-AL**. Repositório Institucional da Universidade Federal de Sergipe. Sergipe, 2019. Disponível em: <https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/12585/2/AplicacaoRoteirizacaoPenedo.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2023.
- SILVEIRA, Carlos Augusto ; LAVRATTI, Fábio Beylouni; BENITO, Rafael Carlos Vélez . **Pesquisa Operacional no Ensino da Logística**. Repositório Institucional da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/35651/Carlos%20Augusto%20Silveira%20-%20Pesquisa%20operacional%20no%20ensino%20da%20.pdf?sequence=4>. Acesso em: 7 jul. 2023.
- ZANELLA, Liane Carly Hermes. **Metodologia de pesquisa**. 2 ed. Florianópolis, 2011. 134 p. Disponível em: <https://www.atfcursosjuridicos.com.br/repositorio/material/3-leitura-extra-02.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2023.



## Anexo A

## MODELAGEM MATEMÁTICA

## I. Função objetivo

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & d_{12} \cdot x_{121} + d_{13} \cdot x_{131} + d_{14} \cdot x_{141} + d_{15} \cdot x_{151} + d_{16} \cdot x_{161} + d_{17} \cdot x_{171} + \\ & + d_{18} \cdot x_{181} + d_{19} \cdot x_{191} + d_{21} \cdot x_{211} + d_{23} \cdot x_{231} + d_{24} \cdot x_{241} + d_{25} \cdot x_{251} + \\ & + d_{26} \cdot x_{261} + d_{27} \cdot x_{271} + d_{28} \cdot x_{281} + d_{29} \cdot x_{291} + d_{31} \cdot x_{311} + d_{32} \cdot x_{321} + \\ & + d_{34} \cdot x_{341} + d_{35} \cdot x_{351} + d_{36} \cdot x_{361} + d_{37} \cdot x_{371} + d_{38} \cdot x_{381} + d_{39} \cdot x_{391} + \\ & + d_{41} \cdot x_{411} + d_{42} \cdot x_{421} + d_{43} \cdot x_{431} + d_{45} \cdot x_{451} + d_{46} \cdot x_{461} + d_{47} \cdot x_{471} + \\ & + d_{48} \cdot x_{481} + d_{49} \cdot x_{491} + d_{51} \cdot x_{511} + d_{52} \cdot x_{521} + d_{53} \cdot x_{531} + d_{54} \cdot x_{541} + \\ & + d_{56} \cdot x_{561} + d_{57} \cdot x_{571} + d_{58} \cdot x_{581} + d_{59} \cdot x_{591} + d_{61} \cdot x_{611} + d_{62} \cdot x_{621} + \\ & + d_{63} \cdot x_{631} + d_{64} \cdot x_{641} + d_{65} \cdot x_{651} + d_{67} \cdot x_{671} + d_{68} \cdot x_{681} + d_{69} \cdot x_{691} + \\ & + d_{71} \cdot x_{711} + d_{72} \cdot x_{721} + d_{73} \cdot x_{731} + d_{74} \cdot x_{741} + d_{75} \cdot x_{751} + d_{76} \cdot x_{761} + \\ & + d_{78} \cdot x_{781} + d_{79} \cdot x_{791} + d_{81} \cdot x_{811} + d_{82} \cdot x_{821} + d_{83} \cdot x_{831} + d_{84} \cdot x_{841} + \\ & + d_{85} \cdot x_{851} + d_{86} \cdot x_{861} + d_{87} \cdot x_{871} + d_{89} \cdot x_{891} + d_{91} \cdot x_{911} + d_{92} \cdot x_{921} + \\ & + d_{93} \cdot x_{931} + d_{94} \cdot x_{941} + d_{95} \cdot x_{951} + d_{96} \cdot x_{961} + d_{97} \cdot x_{971} + d_{98} \cdot x_{981} \end{aligned}$$

## II. Restrições

a) Restrição que garante que a aeronave que saiu da base  $i$ , chegou a alguma base  $j$ 

$$\begin{aligned} x_{121} + x_{131} + x_{141} + x_{151} + x_{161} + x_{171} + x_{181} + x_{191} &= 1 (R_1) \\ x_{211} + x_{231} + x_{241} + x_{251} + x_{261} + x_{271} + x_{281} + x_{291} &= 1 (R_2) \\ x_{311} + x_{321} + x_{341} + x_{351} + x_{361} + x_{371} + x_{381} + x_{391} &= 1 (R_3) \\ x_{411} + x_{421} + x_{431} + x_{451} + x_{461} + x_{471} + x_{481} + x_{491} &= 1 (R_4) \\ x_{511} + x_{521} + x_{531} + x_{541} + x_{561} + x_{571} + x_{581} + x_{591} &= 1 (R_5) \\ x_{611} + x_{621} + x_{631} + x_{641} + x_{651} + x_{671} + x_{681} + x_{691} &= 1 (R_6) \\ x_{711} + x_{721} + x_{731} + x_{741} + x_{751} + x_{761} + x_{781} + x_{791} &= 1 (R_7) \\ x_{811} + x_{821} + x_{831} + x_{841} + x_{851} + x_{861} + x_{871} + x_{891} &= 1 (R_8) \\ x_{911} + x_{921} + x_{931} + x_{941} + x_{951} + x_{961} + x_{971} + x_{981} &= 1 (R_9) \end{aligned}$$

b) Restrição que garante que a origem 1 é o destino final

$$x_{211} + x_{311} + x_{411} + x_{511} + x_{611} + x_{711} + x_{811} + x_{911} = 1 (R_{10})$$

c) Restrição que garante que a aeronave que chega à uma base intermediária, sai dessa base

$$(x_{121} + x_{321} + x_{421} + x_{521} + x_{621} + x_{721} + x_{821} + x_{921}) - (x_{211} + x_{231} + x_{241} + x_{251} + x_{261} + x_{271} + x_{281} + x_{291}) = 0 (R_{11})$$

$$(x_{131} + x_{231} + x_{431} + x_{531} + x_{631} + x_{731} + x_{831} + x_{931}) - (x_{311} + x_{321} + x_{341} + x_{351} + x_{361} + x_{371} + x_{381} + x_{391}) = 0 (R_{12})$$

$$(x_{141} + x_{241} + x_{341} + x_{541} + x_{641} + x_{741} + x_{841} + x_{941}) - (x_{411} + x_{421} + x_{431} + x_{451} + x_{461} + x_{471} + x_{481} + x_{491}) = 0 (R_{13})$$

$$(x_{151} + x_{251} + x_{351} + x_{451} + x_{651} + x_{751} + x_{851} + x_{951}) - (x_{511} + x_{521} + x_{531} + x_{541} + x_{561} + x_{571} + x_{581} + x_{591}) = 0 (R_{14})$$

$$(x_{161} + x_{261} + x_{361} + x_{461} + x_{561} + x_{761} + x_{861} + x_{961}) - (x_{611} + x_{621} + x_{631} + x_{641} + x_{651} + x_{671} + x_{681} + x_{691}) = 0 (R_{15})$$



$$(x_{171} + x_{271} + x_{371} + x_{471} + x_{571} + x_{671} + x_{871} + x_{971}) - (x_{711} + x_{721} + x_{731} + x_{741} + x_{751} + x_{761} + x_{781} + x_{791}) = 0 (R_{16})$$

$$(x_{181} + x_{281} + x_{381} + x_{481} + x_{581} + x_{681} + x_{781} + x_{981}) - (x_{811} + x_{821} + x_{831} + x_{841} + x_{851} + x_{861} + x_{871} + x_{891}) = 0 (R_{17})$$

$$(x_{191} + x_{291} + x_{391} + x_{491} + x_{591} + x_{691} + x_{791} + x_{891}) - (x_{911} + x_{921} + x_{931} + x_{941} + x_{951} + x_{961} + x_{971} + x_{981}) = 0 (R_{18})$$

Restrição que garante a eliminação de sub-rotas

$$x_{231} + x_{321} \leq 1 (R_{19})$$

$$x_{241} + x_{421} \leq 1 (R_{20})$$

$$x_{251} + x_{521} \leq 1 (R_{21})$$

$$x_{261} + x_{621} \leq 1 (R_{22})$$

$$x_{271} + x_{721} \leq 1 (R_{23})$$

$$x_{281} + x_{821} \leq 1 (R_{24})$$

$$x_{291} + x_{921} \leq 1 (R_{25})$$

$$x_{341} + x_{431} \leq 1 (R_{26})$$

$$x_{351} + x_{531} \leq 1 (R_{27})$$

$$x_{361} + x_{631} \leq 1 (R_{28})$$

$$x_{371} + x_{731} \leq 1 (R_{29})$$

$$x_{381} + x_{831} \leq 1 (R_{30})$$

$$x_{391} + x_{931} \leq 1 (R_{31})$$

$$x_{451} + x_{541} \leq 1 (R_{32})$$

$$x_{461} + x_{641} \leq 1 (R_{33})$$

$$x_{471} + x_{741} \leq 1 (R_{34})$$

$$x_{481} + x_{841} \leq 1 (R_{35})$$

$$x_{491} + x_{941} \leq 1 (R_{36})$$

$$x_{561} + x_{651} \leq 1 (R_{37})$$

$$x_{571} + x_{751} \leq 1 (R_{38})$$

$$x_{581} + x_{851} \leq 1 (R_{39})$$

$$x_{591} + x_{951} \leq 1 (R_{40})$$

$$x_{671} + x_{761} \leq 1 (R_{41})$$

$$x_{681} + x_{861} \leq 1 (R_{42})$$

$$x_{691} + x_{961} \leq 1 (R_{43})$$

$$x_{781} + x_{871} \leq 1 (R_{44})$$

$$x_{791} + x_{971} \leq 1 (R_{45})$$

$$x_{891} + x_{981} \leq 1 (R_{46})$$

$$x_{121} + x_{211} \leq 1 (R_{47})$$

$$x_{131} + x_{311} \leq 1 (R_{48})$$

$$x_{141} + x_{411} \leq 1 (R_{49})$$

$$x_{151} + x_{511} \leq 1 (R_{50})$$

$$x_{161} + x_{611} \leq 1 (R_{51})$$

$$x_{171} + x_{711} \leq 1 (R_{52})$$

$$x_{181} + x_{811} \leq 1 (R_{53})$$

$$x_{191} + x_{911} \leq 1 (R_{54})$$



$$\begin{aligned}x_{131} + x_{311} + x_{121} + x_{211} + x_{231} + x_{321} &\leq 2 (R_{55}) \\x_{141} + x_{411} + x_{121} + x_{211} + x_{241} + x_{421} &\leq 2 (R_{56}) \\x_{151} + x_{511} + x_{121} + x_{211} + x_{251} + x_{521} &\leq 2 (R_{57}) \\x_{161} + x_{611} + x_{121} + x_{211} + x_{261} + x_{621} &\leq 2 (R_{58}) \\x_{171} + x_{711} + x_{121} + x_{211} + x_{271} + x_{721} &\leq 2 (R_{59}) \\x_{181} + x_{811} + x_{121} + x_{211} + x_{281} + x_{821} &\leq 2 (R_{60}) \\x_{191} + x_{911} + x_{121} + x_{211} + x_{291} + x_{921} &\leq 2 (R_{61}) \\x_{131} + x_{311} + x_{141} + x_{411} + x_{431} + x_{341} &\leq 2 (R_{62}) \\x_{131} + x_{311} + x_{151} + x_{511} + x_{531} + x_{351} &\leq 2 (R_{63}) \\x_{131} + x_{311} + x_{161} + x_{611} + x_{631} + x_{361} &\leq 2 (R_{64}) \\x_{131} + x_{311} + x_{171} + x_{711} + x_{731} + x_{371} &\leq 2 (R_{65}) \\x_{131} + x_{311} + x_{181} + x_{811} + x_{831} + x_{381} &\leq 2 (R_{66}) \\x_{131} + x_{311} + x_{191} + x_{911} + x_{931} + x_{391} &\leq 2 (R_{67}) \\x_{141} + x_{411} + x_{151} + x_{511} + x_{451} + x_{541} &\leq 2 (R_{68}) \\x_{141} + x_{411} + x_{161} + x_{611} + x_{461} + x_{641} &\leq 2 (R_{69}) \\x_{141} + x_{411} + x_{171} + x_{711} + x_{471} + x_{741} &\leq 2 (R_{70}) \\x_{141} + x_{411} + x_{181} + x_{811} + x_{481} + x_{841} &\leq 2 (R_{71}) \\x_{141} + x_{411} + x_{191} + x_{911} + x_{491} + x_{941} &\leq 2 (R_{72}) \\x_{151} + x_{511} + x_{161} + x_{611} + x_{561} + x_{651} &\leq 2 (R_{73}) \\x_{151} + x_{511} + x_{171} + x_{711} + x_{571} + x_{751} &\leq 2 (R_{74}) \\x_{151} + x_{511} + x_{181} + x_{811} + x_{581} + x_{851} &\leq 2 (R_{75}) \\x_{151} + x_{511} + x_{191} + x_{911} + x_{591} + x_{951} &\leq 2 (R_{76}) \\x_{161} + x_{611} + x_{171} + x_{711} + x_{671} + x_{761} &\leq 2 (R_{77}) \\x_{161} + x_{611} + x_{181} + x_{811} + x_{681} + x_{861} &\leq 2 (R_{78}) \\x_{161} + x_{611} + x_{191} + x_{911} + x_{691} + x_{961} &\leq 2 (R_{79}) \\x_{171} + x_{711} + x_{181} + x_{811} + x_{781} + x_{871} &\leq 2 (R_{80}) \\x_{171} + x_{711} + x_{191} + x_{911} + x_{791} + x_{971} &\leq 2 (R_{81}) \\x_{181} + x_{811} + x_{191} + x_{911} + x_{891} + x_{981} &\leq 2 (R_{82}) \\x_{231} + x_{321} + x_{241} + x_{421} + x_{341} + x_{431} &\leq 2 (R_{83}) \\x_{231} + x_{321} + x_{251} + x_{521} + x_{351} + x_{531} &\leq 2 (R_{84}) \\x_{231} + x_{321} + x_{261} + x_{621} + x_{361} + x_{631} &\leq 2 (R_{85}) \\x_{231} + x_{321} + x_{271} + x_{721} + x_{371} + x_{731} &\leq 2 (R_{86}) \\x_{231} + x_{321} + x_{281} + x_{821} + x_{381} + x_{831} &\leq 2 (R_{87}) \\x_{231} + x_{321} + x_{291} + x_{921} + x_{391} + x_{931} &\leq 2 (R_{88}) \\x_{241} + x_{421} + x_{251} + x_{521} + x_{451} + x_{541} &\leq 2 (R_{89}) \\x_{241} + x_{421} + x_{261} + x_{621} + x_{461} + x_{641} &\leq 2 (R_{90}) \\x_{241} + x_{421} + x_{271} + x_{721} + x_{471} + x_{741} &\leq 2 (R_{91}) \\x_{241} + x_{421} + x_{281} + x_{821} + x_{481} + x_{841} &\leq 2 (R_{92}) \\x_{241} + x_{421} + x_{291} + x_{921} + x_{491} + x_{941} &\leq 2 (R_{93}) \\x_{251} + x_{521} + x_{261} + x_{621} + x_{561} + x_{651} &\leq 2 (R_{94}) \\x_{251} + x_{521} + x_{271} + x_{721} + x_{571} + x_{751} &\leq 2 (R_{95}) \\x_{251} + x_{521} + x_{281} + x_{821} + x_{581} + x_{851} &\leq 2 (R_{96}) \\x_{251} + x_{521} + x_{291} + x_{921} + x_{591} + x_{951} &\leq 2 (R_{97}) \\x_{261} + x_{621} + x_{271} + x_{721} + x_{671} + x_{761} &\leq 2 (R_{98}) \\x_{261} + x_{621} + x_{281} + x_{821} + x_{681} + x_{861} &\leq 2 (R_{99}) \\x_{261} + x_{621} + x_{291} + x_{921} + x_{691} + x_{961} &\leq 2 (R_{100}) \\x_{271} + x_{721} + x_{281} + x_{821} + x_{781} + x_{871} &\leq 2 (R_{101})\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}x_{271} + x_{721} + x_{291} + x_{921} + x_{791} + x_{971} &\leq 2 (R_{102}) \\x_{281} + x_{821} + x_{291} + x_{921} + x_{891} + x_{981} &\leq 2 (R_{103}) \\x_{341} + x_{431} + x_{351} + x_{531} + x_{451} + x_{541} &\leq 2 (R_{104}) \\x_{341} + x_{431} + x_{361} + x_{631} + x_{461} + x_{641} &\leq 2 (R_{105}) \\x_{341} + x_{431} + x_{371} + x_{731} + x_{471} + x_{741} &\leq 2 (R_{106}) \\x_{341} + x_{431} + x_{381} + x_{831} + x_{481} + x_{841} &\leq 2 (R_{107}) \\x_{341} + x_{431} + x_{391} + x_{931} + x_{491} + x_{941} &\leq 2 (R_{108}) \\x_{351} + x_{531} + x_{361} + x_{631} + x_{561} + x_{651} &\leq 2 (R_{109}) \\x_{351} + x_{531} + x_{371} + x_{731} + x_{571} + x_{751} &\leq 2 (R_{110}) \\x_{351} + x_{531} + x_{381} + x_{831} + x_{581} + x_{851} &\leq 2 (R_{111}) \\x_{351} + x_{531} + x_{391} + x_{931} + x_{591} + x_{951} &\leq 2 (R_{112}) \\x_{361} + x_{631} + x_{371} + x_{731} + x_{671} + x_{761} &\leq 2 (R_{113}) \\x_{361} + x_{631} + x_{381} + x_{831} + x_{681} + x_{861} &\leq 2 (R_{114}) \\x_{361} + x_{631} + x_{391} + x_{931} + x_{691} + x_{961} &\leq 2 (R_{115}) \\x_{371} + x_{731} + x_{381} + x_{831} + x_{781} + x_{871} &\leq 2 (R_{116}) \\x_{371} + x_{731} + x_{391} + x_{931} + x_{791} + x_{971} &\leq 2 (R_{117}) \\x_{381} + x_{831} + x_{391} + x_{931} + x_{891} + x_{981} &\leq 2 (R_{118}) \\x_{451} + x_{541} + x_{461} + x_{641} + x_{561} + x_{651} &\leq 2 (R_{119}) \\x_{451} + x_{541} + x_{471} + x_{741} + x_{571} + x_{751} &\leq 2 (R_{120}) \\x_{451} + x_{541} + x_{481} + x_{841} + x_{581} + x_{851} &\leq 2 (R_{121}) \\x_{451} + x_{541} + x_{491} + x_{941} + x_{591} + x_{951} &\leq 2 (R_{122}) \\x_{461} + x_{641} + x_{471} + x_{741} + x_{671} + x_{761} &\leq 2 (R_{123}) \\x_{461} + x_{641} + x_{481} + x_{841} + x_{681} + x_{861} &\leq 2 (R_{124}) \\x_{461} + x_{641} + x_{491} + x_{941} + x_{691} + x_{961} &\leq 2 (R_{125}) \\x_{471} + x_{741} + x_{481} + x_{841} + x_{781} + x_{871} &\leq 2 (R_{126}) \\x_{471} + x_{741} + x_{491} + x_{941} + x_{791} + x_{971} &\leq 2 (R_{127}) \\x_{481} + x_{841} + x_{491} + x_{941} + x_{891} + x_{981} &\leq 2 (R_{128}) \\x_{561} + x_{651} + x_{571} + x_{751} + x_{671} + x_{761} &\leq 2 (R_{129}) \\x_{561} + x_{651} + x_{581} + x_{851} + x_{681} + x_{861} &\leq 2 (R_{130}) \\x_{561} + x_{651} + x_{591} + x_{951} + x_{691} + x_{961} &\leq 2 (R_{131}) \\x_{571} + x_{751} + x_{581} + x_{851} + x_{781} + x_{871} &\leq 2 (R_{132}) \\x_{571} + x_{751} + x_{591} + x_{951} + x_{791} + x_{971} &\leq 2 (R_{133}) \\x_{581} + x_{851} + x_{591} + x_{951} + x_{891} + x_{981} &\leq 2 (R_{134}) \\x_{671} + x_{761} + x_{681} + x_{861} + x_{781} + x_{871} &\leq 2 (R_{135}) \\x_{671} + x_{761} + x_{691} + x_{961} + x_{791} + x_{971} &\leq 2 (R_{136}) \\x_{681} + x_{861} + x_{691} + x_{961} + x_{891} + x_{981} &\leq 2 (R_{137}) \\x_{781} + x_{871} + x_{791} + x_{971} + x_{891} + x_{981} &\leq 2 (R_{138})\end{aligned}$$



REVISTA DO SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ESTATÍSTICA COM R | ISSN: 2526-7299

**VOL 5, Nº 2, JULHO DE 2024**

VIII SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ESTATÍSTICA COM R - AI IN DATA SCIENCE

**Anexo B**

## **PLANILHA DE RESTRIÇÕES**

Todas as planilhas desenvolvidas com o pacote Router e utilizadas durante a elaboração do cenário 1 do trabalho podem ser encontradas na plataforma online GitHub por meio do seguinte link: [dudaperes/Planilhas---TCC\(github.com\)](https://github.com/dudaperes/Planilhas---TCC).



```
Untitled1* x
1 Dados<- read.csv2("formulacao_1_veiculo.csv")
2 require(magrittr)
3 Dados<-Dados%>%dplyr::filter(b<=1)
4 View(Dados) #verificando como estão os dados
5 #n = n. variaveis e m = número restrições
6 n = ncol(Dados)-3 #descontar 3 devido coluna cod, direcao e b
7 m = nrow(Dados)-1 #descontar 1 devido a linha custo
8
9 coef.restricoes = as.matrix(Dados[2:(m+1),2:(n+1)])
10 direcao.restricoes = Dados$direcao[2:(m+1)]
11 limites.restricoes = Dados$b[2:(m+1)]
12 func.objetivo = as.vector(t(Dados[(1),2:(n+1)]))
13 solucao.problema =
14   lpSolve::lp(direction = "min",
15               objective.in = func.objetivo,
16               const.mat = coef.restricoes,
17               const.dir = direcao.restricoes,
18               const.rhs = limites.restricoes,
19               all.int=T)
20 # valor da função objetivo
21 solucao.problema$objval
22 # Valores para as variáveis de decisão
23 solucao.problema$solution
24
25 tabela<-data.frame(var=colnames(Dados)[2:(n+1)],solucao = solucao.problema$solution)
26 tabela
27 |
```

27:1 (Top Level) ↕ R Script ↕

Fonte: recuperado de <https://posit.cloud/content/7635002>.

```
Console Terminal x Background Jobs x
R 4.3.2 . /cloud/project/ ↕
> var<-gerar_variaveis(9,9,1)
> restricao_saida_origem=gerar_restricoes_saida_origem(9,9,1,1)
> restricao_retorno_origem=gerar_restricoes_retorno_origem(9,9,1,2)
> View(restricao_retorno_origem)
> restricao_unicidade=gerar_restricoes_unicidade(9,9,1,3)
> View(restricao_unicidade)
> restricao_equilibrio=gerar_restricoes_equilibrio(9,9,1,11)
> View(Restricção_equilibrio)
> restricao_subrota=gerar_restricoes_subrota(9,9,1,19,2)
> View(restricao_subrota)
> restricao_subrota1=gerar_restricoes_subrota(9,9,1,55,3)
> View(restricao_subrota1)
> |
```

Fonte: recuperado de <https://posit.cloud/content/7635002>.