



II *Sustentare* – Seminário de Sustentabilidade da PUC-Campinas  
V WIPIS – Workshop Internacional de Pesquisa em Indicadores de Sustentabilidade  
17 a 19 de novembro de 2020

## **PESQUISA OPERACIONAL E SUSTENTABILIDADE: ADAPTANDO UM CASO DE ENSINO EM PROGRAMAÇÃO EM REDES PARA APROXIMAR A SUSTENTABILIDADE À PESQUISA OPERACIONAL**

Igor Sgarbi Cavaliere [igor.sc1@puccampinas.edu.br](mailto:igor.sc1@puccampinas.edu.br) FEP/PUC-Campinas

Isabela Martins Alcantara [isabela.ma3@puccampinas.edu.br](mailto:isabela.ma3@puccampinas.edu.br) FEP/PUC-Campinas

Marcos Ricardo Rosa Georges [marcos.georges@puccampinas.edu.br](mailto:marcos.georges@puccampinas.edu.br) PPGS/PUC-Campinas

Nuri Eftekhari [nuri.e@puccampinas.edu.br](mailto:nuri.e@puccampinas.edu.br) FEP/PUC-Campinas

Victor Caodaglio do Amaral Gurgel [victor.cag@puccampinas.edu.br](mailto:victor.cag@puccampinas.edu.br) FEP/PUC-Campinas

### **Resumo**

Este artigo apresenta os resultados da aplicação do método do caso de ensino na disciplina de pesquisa operacional do curso de engenharia de produção de uma universidade católica do interior de São Paulo. O caso aplicado trabalha a metodologia da programação em redes, e o caso aqui resolvido é sobre uma empresa de transporte aéreo que está com dificuldades para determinar onde e quanto abastecer as aeronaves devido a três fatores: a variação do preço do combustível, o consumo de combustível em relação ao peso da aeronave e o consumo de combustível em relação às correntes de jato de ar. Foi realizada uma adaptação no caso, ela se dá pela abordagem na questão ambiental, foi analisado qual seria o custo com o combustível caso o abastecimento tivesse como critério emitir o menor nível de CO<sub>2</sub> possível. Para resolver o caso, uma fundamentação teórica sobre metodologias ativas, pesquisa operacional e programação em redes foi feita. A metodologia usada neste trabalho pode ser caracterizada como pesquisa ação com uso de revisão bibliográfica do ponto de vista científico, e como método do estudo de caso do ponto de vista pedagógico. Os resultados apresentam a utilização da programação em redes para resolver o problema apresentado, incluindo a formulação algébrica e solução com apoio de planilhas eletrônicas e solver, além de reflexões sobre o uso de estudo de caso como método de ensino.

**Palavras-chave:** Engenharia de Produção, Programação em Redes, Transporte Aéreo, Pesquisa Operacional, Sustentabilidade.

### **1. Introdução**

O estudo conduzido neste artigo será a aplicação da programação em redes para a solução de um caso de ensino adaptado através do método de aprendizagem ativa. Foi escolhido um problema de uma empresa de transporte aéreo que está com dificuldades em relação ao custo do combustível de aviação devido a alta variação do preço do combustível em diferentes aeroportos dos Estados Unidos.

As emissões de CO<sub>2</sub> derivadas da aviação, segundo o EESI (*Environmental and Energy Study Institute*), aumentaram consideravelmente nos últimos anos de 710 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> em 2013 para 905 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> em 2018, os Estados Unidos, com o maior sistema de tráfego aéreo do mundo, emitiram 23,5% do total, o equivalente a 202,5

milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>. Sendo assim, o transporte aéreo é responsável por volta de 3% do total da produção de gases causadores do efeito estufa.

Durante os últimos anos, vêm surgindo diversos movimentos ligados à sustentabilidade do transporte aéreo. Um dos principais é o “*Flight Shame*”, liderado pela conhecida ativista Greta Thunberg, apoiada pelo *Greenpeace*, que incentiva empresas e pessoas a reduzirem drasticamente o número de vôos. Conforme o Financial Times em “*Year in a Word: Flygskam*”, cada vez mais, mudanças de paradigmas da sociedade mundial aliada aos movimentos socioambientais, tornaram-se uma ameaça para o transporte aeroviário e influenciaram o segmento a buscar formas cada vez mais sustentáveis.

No atual ambiente competitivo, com uma economia dinâmica e acirrada, as organizações têm que tomar decisões sofisticadas e complexas com grande volume de dados. É a pesquisa operacional a ferramenta utilizada pelos profissionais da área para resolver este tipo de problema, porém sendo utilizada prioritariamente voltada para maximizar o lucro das empresas.

Através deste artigo temos como objetivo utilizar a pesquisa operacional para fazer a comparação entre duas abordagens diferentes das empresas de aviação, uma voltada para o econômico, em maximizar o lucro, e a outra voltada para a sustentabilidade, em minimizar a emissão de gases poluentes.

## **2. Fundamentação teórica**

Este capítulo se dedica a apresentar a fundamentação teórica necessária ao desenvolvimento do trabalho. Esta fundamentação teórica está dividida em metodologia ativa de ensino, seguida do caso de ensino, e programação em redes.

### **2.1 Metodologia Ativa**

Nas metodologias ativas, o aluno é responsável pelo seu próprio aprendizado, o que pode causar um certo estranhamento para o aluno acostumado com o método tradicional. A base da aprendizagem ativa é fazer o aluno interagir, ouvir, ver, perguntar, discutir, testar, fazer e ensinar, tudo isso leva a uma maior inovação, criatividade e colaboração no ambiente da sala de aula (BARBOSA; MOURA, 2014).

O método tradicional é baseado na aula expositiva em que o professor traz um conteúdo pré-elaborado para ser exposto aos alunos que devem ouvir e absorver o conhecimento. O professor é agente e o aluno é receptor de conteúdo, só é possível observar se o aluno adquiriu conhecimento ou não após a realização de provas (MIZUKAMU, 1986).

A aprendizagem ativa transforma o modo de se adquirir o conhecimento, no método ativo o aprendizado é mais interativo e próximo da realidade do ambiente de trabalho. Segundo Silberman (1996), o aluno ouvindo de forma expositiva tem probabilidade de esquecer e não compreender o que foi ensinado devido uma atitude individual mais passiva e a falta de interação com o professor que demais integrantes da sala. Para eficácia de aprendizagem é importante que o aluno tenha interação em sala de aula, ouvindo, vendo, discutindo, argumentando, testando e construindo. Com isso o aluno desenvolve a técnica de orientar outro aluno, fazendo com que tenha habilidade para ajudar e ensinar.

Prince (2004) diz que no ambiente de aprendizagem ativa, o professor é um condutor participante do grupo de construção do saber, repassando os conceitos, mas também apoiando. Diferentemente da aprendizagem expositiva em que apenas o professor é do dono do saber e não permite, ou talvez permite muito pouco a interação dos alunos.

As metodologias ativas vêm sendo implantadas com maior frequência em escolas e universidade em razão das aulas expositivas terem ficado retrógradadas, pois não condiz mais com a realidade dos alunos que estão mais interessados em aprender, entender e desenvolver ao invés de apenas escutar. Será utilizada a metodologia do caso de ensino, na seção seguinte tem-se o caso a ser resolvido.

### 2.1.1 Caso de ensino

A seguir tem-se o caso de ensino descrito de forma adaptada e traduzida extraído das páginas 229 e 230 do livro *Spreadsheet Modeling & Decision Analysis*, 5ª edição, do autor Cliff T. Ragsdale, publicado em 2007.

A US Express é uma empresa de entrega de pacotes noturnos com sede em Atlanta, Geórgia. O combustível de aviação é um dos maiores custos operacionais incorridos pela empresa e eles desejam a sua ajuda para administrar esse custo. O preço do combustível de aviação varia consideravelmente em diferentes aeroportos do país. Como resultado, parece que seria sábio abastecer com combustível de aviação em aeroportos onde seja mais barato. No entanto, a quantidade de combustível que um avião queima depende, em parte, do peso do avião e o excesso de combustível torna o avião mais pesado e, portanto, menos eficiente em termos de combustível. Da mesma forma, mais combustível é queimado em voos da costa leste para a costa oeste (indo contra a corrente de jato) do que da costa oeste para a costa leste (indo com a corrente de jato)

A tabela 1 a seguir resume a programação de voo (ou rotação) realizada todas as noites por um dos aviões da empresa. Para cada segmento de voo, a tabela 1 resume a quantidade mínima exigida e a máxima permitida de combustível a bordo na decolagem e o custo do combustível em cada ponto de partida. A coluna final fornece uma função linear que relaciona o consumo de combustível à quantidade de combustível a bordo na decolagem.

Tabela 1: Dados do problema.

Segmento	Partida	Chegada	Nível mínimo de combustível na decolagem (em 1000)	Nível máximo de combustível na decolagem (em 1000)	Custo por galão	Combustível usado em voo com galões G (em 1000) a bordo na decolagem
1	Atlanta	São Francisco	21	31	0,92	$3.20 + 0.45 \times G$
2	São Francisco	Los Angeles	7	20	0,85	$2.25 + 0.65 \times G$
3	Los Angeles	Chicago	18	31	0,87	$1.80 + 0.35 \times G$
4	Chicago	Atlanta	16	31	1,02	$2.20 + 0.60 \times G$

Fonte: Ragsdale (2007, pág. 229)

Por exemplo, se o avião saiu de Atlanta para São Francisco com 25.000 galões a bordo, deve chegar a São Francisco com aproximadamente  $25 - (3,2 + 0,45 \times 25) = 10,55$  mil galões de combustível.

A empresa tem muitos outros aviões que voam em horários diferentes todas as noites, então a economia potencial de custos com a compra eficiente de combustível é bastante significativa. Mas antes de deixá-lo livre em todos os seus horários de voo, a empresa deseja que você crie um modelo de planilha para determinar o plano de compra de combustível mais econômico para o horário anterior. (Dica: tenha em mente que a maior quantidade de combustível que você compraria em qualquer ponto de partida é o nível máximo de combustível permitido para a decolagem naquele ponto. Além disso, suponha que todo o combustível que estiver a bordo quando o avião retornar a Atlanta no final da rotação ainda estará a bordo quando o avião sair de Atlanta na noite seguinte.)

- a. Desenhe o diagrama de rede para este problema.
- b. Implemente o modelo para este problema em sua planilha e resolva.
- c. Quanto combustível a US Express deve comprar em cada ponto de partida e qual é o custo deste plano de compra?

E assim com as questões a, b e c citadas acima encerra-se o caso de ensino extraído do *Spreadsheet Modeling & Decision Analysis*, 5ª edição, do autor Cliff T. Ragsdale e na sessão seguinte o caso de ensino foi adaptado e foi feito uma releitura do caso pelo viés da sustentabilidade pelos presentes autores.

### 2.1.2 Caso de ensino adaptado

A adaptação realizada neste problema se dá pela abordagem na questão ambiental em relação ao caso, ou seja, queremos analisar o resultado obtido de quanto de CO<sub>2</sub> é emitido na melhor opção financeira e também gostaríamos de saber quanto é gasto com compra de combustível com o menor nível de CO<sub>2</sub> emitido e fazer a comparação entre esses dois casos. Para isso, utilizamos como base que cada 1 Kg de combustível de avião consumido é equivalente a emissão de uma quantidade de 3,15 Kg de CO<sub>2</sub>, conforme o FAQ da IATA (International Air Transport Association), de 30 de abril de 2020.

E assim apresentou-se o caso adaptado e para a resolução de ambos os casos, do livro e o adaptado, a fundamentação teórica apresenta a Pesquisa Operacional que é a disciplina que contém os métodos necessários para resolvê-los.

## **2.2 Pesquisa Operacional**

Pesquisa Operacional segundo publicação do site da SOBRAPO (Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional) é “a área de conhecimento que estuda, desenvolve e aplica métodos analíticos avançados para auxiliar na tomada de melhores decisões nas mais diversas áreas de atuação humana.” Podendo o problema ser de maximização, caso o objetivo seja obter um maior valor possível, ou de minimização, caso seja um problema para se obter um menor valor possível.

O termo Pesquisa Operacional surgiu durante a 2ª Guerra Mundial e ao longo das décadas seguintes foi se desenvolvendo devido ao fato de que o uso dos computadores foi se tornando cada vez mais acessível, principalmente após a década de 80, na qual os computadores pessoais ficaram mais habilidosos, facilitando assim, o emprego da pesquisa operacional por um maior número de pessoas e empresas (HILLIER, 2006).

Segundo Marins (2011) “pode-se, de uma forma simplificada, subdividir a resolução de um problema pela P.O. em cinco etapas: formulação do problema, construção do modelo matemático, obtenção da solução, teste do modelo da solução obtida e a implementação do modelo”.

Na formulação do problema real é necessário identificá-lo apropriadamente portanto obter as informações básicas, tais como, quem tomará as decisões, os objetivos, as variáveis de decisão e as restrições, torna-se fundamental.

A construção do modelo matemático se dá pela representação através de expressões que descrevem o problema e tem como objetivo definir  $n$  variáveis de decisão que estarão sujeitas às restrições. A partir dessas funções se obtém a função objetivo que deve ser minimizada, maximizada ou igualada a um valor específico.

Após a construção do modelo, deve-se partir para obter uma solução. Para isso existem diversos softwares, que disponibilizam alguns métodos importantes da Pesquisa Operacional. Um exemplo é o Solver do Excel®, que foi utilizado na resolução do problema deste artigo.

Tendo o conhecimento da complexidade destes problemas e dificuldade de compreensão de todos os fatores existentes e que podem haver falhas na elaboração do modelo e por consequência levará a soluções que não serão coerentes com a realidade. Por isso, deve-se testar o modelo a fim de comprovar sua coerência.

A última fase do estudo de P.O. é uma fase crítica, pois é nesta seção que os resultados do estudo serão obtidos. Toda documentação necessária deve ser muito bem organizada e detalhada, de forma a não suscitar dúvidas de sua fidedignidade.

De acordo com Belfiore (2013, apud Eom e Kim, 2006) uma classificação das ferramentas da Pesquisa Operacional foi separada em modelos determinísticos e estocásticos. Os determinísticos “são aqueles em que todas as variáveis envolvidas em sua formulação são constantes e conhecidas. É resultante, portanto, de uma única solução exata, por vezes a solução ótima.” que podem ser separados em Programação Linear, Programação Não-Linear, Programação Binária e Inteira, Programação em Redes, que foi o método utilizado neste artigo e será aprofundado no tópico 2.3, Programação por Metas ou Multiobjetivo ou Programação Dinâmica Determinística.

Os Modelos Estocásticos sendo aqueles que “utilizam uma ou mais variáveis aleatórias em que pelo menos uma de suas características operacionais é definida por meio de funções de probabilidade. Dessa forma, os modelos estocásticos geram mais de uma solução e buscam analisar os diferentes cenários, não tendo a garantia da solução ótima. Os modelos estocásticos são frequentemente resolvidos por meio de métodos numéricos (programas de computador)”, separados em Teoria das filas, Modelos de Simulação, Programação Dinâmica Estocástica ou a Teoria dos Jogos.

### **2.3 Programação em Redes**

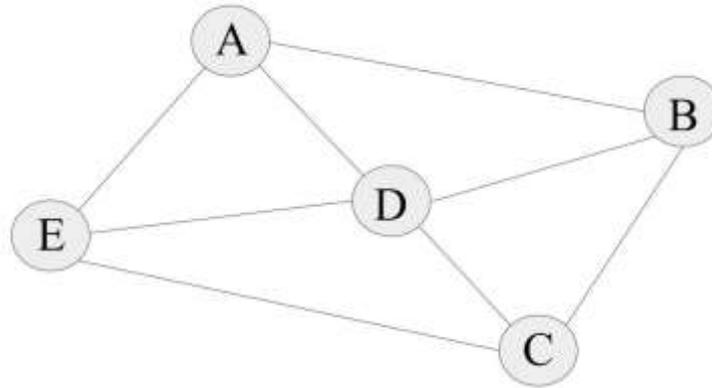
Ao resolvermos uma situação através do modelo de programação em redes temos que modelar o problema através de uma estrutura de grafo ou rede. Essa estrutura é formada através de vários nós, esses nós devem estar conectados a um ou mais arcos. Esse tipo de modelagem permite que consigamos visualizar melhor o problema e dessa forma consigamos compreender melhor as características do sistema.

A programação em redes está sendo cada vez mais utilizada em diversas áreas, por exemplo na produção, na área de finanças e na área de logística. Alguns problemas clássicos de programação em redes são: problema de transporte, problema de caminho mais curto, problema de designação de tarefas, entre outros.

Os grafos são um conjunto de nós que estão interconectados através de arestas. Os nós são identificados como círculos e representam pontos fixos do problema, como fábricas, portos, aeroportos, centros de distribuição, entre outros. Os arcos são identificados como segmentos de retas e representam as conexões do problema, como caminhos e cabos.

Os grafos são denotados como  $G = (N, A)$ , onde o  $G$  representa o grafo, o  $N$  representa o conjunto de nós e o  $A$  representa um conjunto de arcos.

Figura 1: exemplo de um grafo



Fonte: elaborado pelos autores

Quando os arcos de um grafo possuem uma variável numérica denominada fluxo (representa um valor mensurável como distância, custo ou tempo de transporte, entre outros) ou uma variável chamada capacidade (representa a carga de suprimentos por exemplo) ele passa a ser chamado de rede. Nas redes, os nós também são identificados com círculo e as arestas por segmentos de retas.

Os nós são divididos em três tipos: nós de oferta (locais onde o produto é produzido ou distribuído), nós de demanda (locais onde os produtos são consumidos) e nós de transbordo (locais de passagem dos produtos).

Os arcos podem ser ou não direcionados. O arco direcionado é indicado por uma seta de direção única. Já quando a seta não ocorre ou então ocorre em ambas as direções o arco é não direcionado. Quando todos os arcos são direcionados temos uma rede direcionada, caso contrário temos uma rede não direcionada.

A Programação de Redes pode ser utilizadas para resolver problemas de caminho mínimo, fluxo máximo, transporte e transbordo, estoque de produção, estoque no tempo e problema da árvore geradora mínima.

### 3. Metodologia

Essa seção apresenta a metodologia utilizada na realização deste trabalho. A metodologia pode ser dividida em três perspectivas: na de um trabalho científico, na de um caso de ensino e na resolução do problema. Estas perspectivas são complementares entre si, e cada uma tem particularidades metodológicas que justificam a apresentação separada.

Na perspectiva da pesquisa científica, este trabalho se caracteriza como pesquisa de natureza aplicada, pois visa resolver um problema prático, pontual e específico da aplicação da técnica da programação linear apresentado em um caso de ensino. Quanto à abordagem, este trabalho se caracteriza como quantitativo e qualitativo. Quantitativo porque a resolução do problema envolve valores numéricos e é esperada a formulação matemática para se encontrar a solução ótima, mas também qualitativo na perspectiva de compreender os fundamentos e conceitos básicos da programação em redes.

Na perspectiva de ensino, esse artigo é resultado da aplicação da metodologia do caso de ensino na disciplina de Pesquisa Operacional B do curso de Engenharia de Produção de uma prestigiada universidade privada do Estado de São Paulo. A disciplina foi dividida em equipes. Os autores são os integrantes de uma equipe mais o professor da disciplina. Cada equipe

escolheu um caso para si e o caso resolvido neste trabalho foi apresentado na seção 2.1.1 e foi realizada uma adaptação do caso na seção 2.1.2.

Na perspectiva da solução de um problema da pesquisa operacional, este trabalho também segue uma metodologia que consiste num conjunto de etapas no processo de solução de um problema, que se inicia com o entendimento do problema até a implantação da solução.

## 4. Resultados

### 4.1 Caso original

Esta seção é dedicada ao entendimento do caso e a construção da sua solução. Lendo o caso, fica claro, que é um problema de programação linear, que se enquadra na tipologia de modelos de rede.

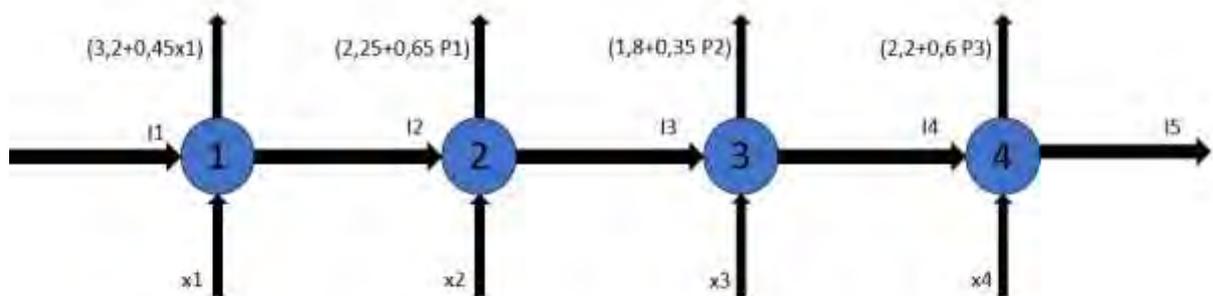
Figura 2: Segmentos realizados em uma noite.



Fonte: elaborada pelos autores.

Para modelagem do problema primeiro, modelamos o problema e criamos uma imagem do modelo de redes conforme descrito abaixo, atendendo ao ponto “a”.

Figura 3: Diagrama de Redes.



Fonte: elaborada pelos autores.

Este diagrama mostra a quantidade de combustível inicial e o abastecimento e consumo durante cada percurso.

A partir disso, modelamos o caso, para atender o tópico “b”, e demonstramos a seguir a resolução para o problema inicial.

Com relação a modelagem algébrica, vamos definir a variável de decisão a qual teremos que minimizar. Seguiu-se o que foi definido abaixo:

$$\text{Min } F(x) = (0,92x_1 + 0,85x_2 + 0,87x_3 + 1,02x_4) \times 1000$$

Em que  $P$  se refere a quantidade de gasolina quando o avião parte de um trecho para outro na ordem do problema. Por exemplo  $P_1$ , seria referente a quantidade de combustível na partida de Atlanta para São Francisco. Também, temos que  $I$ , seguindo a mesma referência de  $P$ , é igual a quantidade inicial em cada ponto logo após a chegada da viagem do trecho anterior.

$$I_1 = 0$$

$$I_2 = P_1 - (3,2 + 0,45 x_1)$$

$$I_3 = P_2 - (2,25 + 0,65 P_1)$$

$$I_4 = P_3 - (1,8 + 0,35 P_2)$$

$$I_5 = P_4 - (2,2 + 0,6 P_3)$$

$$P_1 = x_1 + I_1$$

$$P_2 = x_2 + I_2$$

$$P_3 = x_3 + I_3$$

$$P_4 = x_4 + I_4$$

$$R1: 21 \geq P_1 \geq 31$$

$$R2: 7 \geq P_2 \geq 20$$

$$R3: 18 \geq P_3 \geq 31$$

$$R4: 16 \geq P_4 \geq 31$$

$$P_1, P_2, P_3, P_4, I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 \geq 0$$

Em que  $x_1, x_2, x_3$  e  $x_4$  é a quantidade de combustível abastecida nos respectivos trechos de Atlanta, São Francisco, Los Angeles e Chicago antes de partir e R1, R2, R3 e R4, referem às restrições de máximo e mínimo de combustível necessário para poder partir.

Figura 4: Modelo do problema no Excel.

Segmento	Partida	Chegada	Nível mínimo de combustível na decolagem (em 1000)	Nível máximo de combustível na decolagem (em 1000)	Custo por galão (\$)	Combustível usado em voo com galões G (em 1000) a bordo na decolagem
1	Atlanta	São Francisco	21	31	0,92	$3,20 + 0,45 \times G$
2	São Francisco	Los Angeles	7	20	0,85	$2,25 + 0,65 \times G$
3	Los Angeles	Chicago	18	31	0,87	$1,80 + 0,35 \times G$
4	Chicago	Atlanta	16	31	1,02	$2,20 + 0,60 \times G$

	Combustível Inicial	Abastecimento	Combustível na Partida	Consumo de Combustível	Combustível Final	min	max	Custo total
1			21	21	12,65	8,35	21	R\$ 40.616,93
2	8,35	0	8,35	7,68	0,67	7	20	
3	0,67	17,33	18	8,1	9,9	18	31	Emissão de CO2
4	9,9	6,1	16	11,8	4,2	16	31	385657,02
1	4,2							

Fonte: elaborada pelos autores.

Os nomes dados para cada célula foram os seguintes:

- Combustível Inicial: (B10:B15)
- Abastecimento: (C10:C14)
- Combustível na Partida: (D10:D14)
- Consumo de Combustível: (E10:E14)
- Combustível Final
- min (F10:F14)
- max (G10:G14)
- (H10:H14)
- Custo Total: (J11)
- Emissão de CO2: (J14)

Para o modelo, foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Objetivo definido: CustoTotal
- Para: Minimizar
- Por células (variáveis): Abastecimento (C11:C14)
- Sujeito às restrições:  $\min (G11:G14) \geq \text{Partida} (D11:D14) \geq \max (H11:H14)$
- Opções do Solver: Crie variáveis não negativas
- Método do Solver: Simplex LP

Em relação aos comandos do modelo, os mesmos foram utilizados da seguinte forma:

- Custo total = SOMARPRODUTO (C11:C14; G3:G6) \* 1000
- Consumo 1 (E11) = 3,2 + 0,45 \* D11
- Consumo 2 (E12) = 2,25 + 0,65 \* D12
- Consumo 3 (E13) = 1,8 + 0,35 \* D13
- Consumo 4 (E14) = 2,2 + 0,6 \* D14
- Partida 1 (D11) = B11 + C11
- Partida 2 (D12) = B12 + C12
- Partida 3 (D13) = B13 + C13
- Partida 4 (D14) = B14 + C14
- Final 1 (F11) = D11 - E11
- Final 2 (F12) = D12 - E12
- Final 3 (F13) = D13 - E13
- Final 4 (F14) = D14 - E14

Assim, após aplicação do solver, obtivemos como melhor resultado, minimizando o custo \$ 40.616,92 de custo total, referente a soma do total abastecido em cada trecho, multiplicado pelo custo do local. A quantidade de galões abastecidos (em milhares) em cada cidade foi: 21 em Atlanta; 0 em São Francisco; 17,33 em Los Angeles; e 6,1 em Chicago. Por fim, concluindo o item “c”.

## 4.2 Caso modificado

Em relação a emissão de CO<sub>2</sub>, levando em conta que foi minimizado o custo total, obtivemos do “Aviation Carbon Offset Programme Frequently Asked Questions” que a combustão de 1 kg de combustível produz 3,15 kg de CO<sub>2</sub>. Cada galão de combustível equivale a 3,7854 litros e que a densidade do combustível é de 0,804 kg/L. Portanto, para calcular a quantidade de CO<sub>2</sub> (em kg), multiplicamos 3,15 \* 0,804 \* 3,7854 = 9,5869. Este é o número ao qual multiplicamos a soma de todo combustível consumido entre os percursos para saber o quanto de CO<sub>2</sub> foi produzido. A cada galão de combustível é produzido 9,5869 kg de CO<sub>2</sub>.

$$\text{Emissão de CO}_2 = \text{SOMA (E11:E14)} * 9,5869 * 1000$$

Obtendo a emissão total de 385.657,02 kg de CO<sub>2</sub>

Alterando a célula objetivo para minimizar a emissão de CO<sub>2</sub>, ainda cumprindo com os requisitos de viagem, mantendo os mesmos nomes das células e comandos utilizados no modelo anterior, obtivemos os seguintes resultados:

Figura 5: Modelo do problema no Excel.

Segmento	Partida	Chegada	Nível mínimo de combustível na decolagem (em 1000)	Nível máximo de combustível na decolagem (em 1000)	Custo por galão (\$)	Combustível usado em voo com galões G (em 1000) a bordo na decolagem
1	Atlanta	São Francisco	21	31	0,92	$3,20 + 0,45 \times G$
2	São Francisco	Los Angeles	7	20	0,85	$2,25 + 0,65 \times G$
3	Los Angeles	Chicago	18	31	0,87	$1,80 + 0,35 \times G$
4	Chicago	Atlanta	16	31	1,02	$2,20 + 0,60 \times G$

	Combustível Inicial	Abastecimento	Combustível na Partida	Consumo de Combustível	Combustível Final	min	max	Custo total
1		21	21	12,65	8,35	21	31	R\$ 57.250,00
2	8,35	7	15,35	12,23	3,12	7	20	
3	3,12	18	21,12	9,19	11,93	18	31	Emissão de CO2
4	11,93	16	27,93	18,96	8,97	16	31	181746,29
1	8,97							

Fonte: elaborada pelos autores.

Emissão de CO2 = 181.746,29 kg de CO2

Custo total = \$ 57.250,00

Comparando a 1ª versão com a 2ª, obtivemos um aumento do custo de 40,95% e uma redução na emissão de CO2 de 52,87%.

## 5. Conclusões

Conforme o exposto, conclui-se que a partir do momento que uma empresa de transporte aéreo busca a maximização do lucro ela está deixando de lado consideravelmente o viés ambiental. Porém, pode ser que uma política somente voltada para a sustentabilidade, seja inicialmente inviável economicamente. Portanto, não devemos só olhar para os 2 pontos como soluções únicas para o caso. Pode ser realizado diversos estudos para analisar e gradativamente diminuir a emissão dos gases poluentes, encontrando um meio termo entre lucratividade e sustentabilidade.

Ademais, é imprescindível destacar que este é um caso simplificado de uma questão que envolve diversos fatores, como quantidade de carga, peso da aeronave, tipo do combustível utilizado, clima, rota entre outros e também, a variabilidade de densidade do combustível por temperatura, altitude e a exatidão dos dados utilizados com bases de dados das companhias a serem estudadas.

De volta aos dados apresentados neste artigo, conseguimos atender as questões e objetivos levantados apresentando uma análise focada somente em lucro e outra somente e redução de emissão de CO2 e também vimos que a segunda opção, reduz mais que a metade da quantidade de CO2 emitida do que a abordagem de lucratividade, porém com um aumento de custo significativo.

Um estudo mais aprofundado, voltado para a sustentabilidade do transporte aéreo através das ações que as empresas têm tomado, pode chegar em um equilíbrio entre a maximização dos lucros e a minimização da emissão de gases poluentes. Ações como, utilização de biocombustíveis, aviões modernos como o Airbus A320Neo ou Boeing 787-8 que consomem de 15% a 20% a menos de combustível que antigos ou até mesmo uma compensação por parte das empresas ou passageiros pela emissão de gases poluentes para investir em iniciativas sustentáveis.

A importância da programação em redes na pesquisa operacional é substanciada pela interdisciplinaridade, uma vez que pode ser feita referências a diversas áreas do conhecimento, concentrando tudo em aprendizado e desenvolvimento na pesquisa operacional. No mundo que vivemos um fator bastante valorizado pelas empresas de queima de combustíveis é a sustentabilidade, tratando-se de um mundo com muita poluição, baixa qualidade de ar e umidificação, é muito importante a valorização dessa questão por parte de nossa empresa.

## 6. Referências

ARENALES, M. et al. Pesquisa Operacional para Cursos de Engenharia. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2011.

Aviation Carbon Offset Programme: Frequently Asked Questions. IATA, 2020. Disponível em: <<https://www.iata.org/contentassets/922ebc4cbcd24c4d9fd55933e7070947/icop20faq20general20for20airline20participants20jan202016.pdf>>. Acesso em 14 de outubro de 2020.

BARBOSA, E. F.; MOURA, D. G. DE. Metodologias Ativas De Aprendizagem No Ensino De Engenharia. Proceedings of International Conference on Engineering and Technology Education, v. 13, p. 111-117, 2014.

BELFIORE, P.; FÁVERO, L. P. Pesquisa Operacional para Cursos de Engenharia. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

HILLIER, F.S.; HILLIER, M.S. Introdução à Ciência da Gestão - Modelagem e Estudos de Caso com Planilhas Eletrônica: 4. ed. São Paulo: Editora AMGH, 2014.

HOOK, L. Year in a Word: Flygskam. Financial Times, 2019. Disponível em:

< <https://www.ft.com/content/5c635430-1dbc-11ea-97df-cc63de1d73f4> >. Acesso em 14 de outubro de 2020.

MARINS, F. A. S. Introdução à Pesquisa Operacional. São Paulo, Cultura Acadêmica: Universidade Estadual Paulista, Pró-Reitoria de Graduação, 2011.

MIZUKAMI, M DA G. N. ENSINO: As abordagens do processo. Editora Pedagógica e Universitária, p. 1-13, 1986.

OVERTON, J. Fact Sheet: The Growth in Greenhouse Gas Emissions from Commercial Aviation. EESI, 2019. Disponível em: <<https://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-the-growth-in-greenhouse-gas-emissions-from-commercial-aviation#:~:text=EPA%20reports%20that%20aircraft%20contribute,total%20CO2%20emissions%20in%202018>>. Acesso em: 14 de outubro de 2020.

PRINCE, M. Does Active Learning Work? A Review of the Research. Journal of Engineering education – Washington, v. 93, n. July, p. 223-232, 2004.

RAGSDALE, C. T. Spreadsheet Modeling & Decision Analysis. 5ª ed. Thomson, 2007

SILBERMAN, M. L. Active Learning: 101 Strategies to Teach Any Subject. PO Box 11071, Des Prentice-Hall, 1986.

SOBRAPO. O que é pesquisa operacional? Disponível em: <<https://www.sobrapo.org.br/o-que-e-pesquisa-operacional>>. Acesso em 14 de outubro de 2020.