



ConBRepro

XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

I CIGELUBRA

Congresso Internacional de Gestão e Engenharia Luso-Brasileiro

04 a 06 de dezembro de 2024

Energias Limpas nas Engenharias

Modelo de programação matemática para atualização de rotas para transporte de colaboradores devido a novas contratações

Hellen Rayssa Oliveira de Souza¹, Raphael Kramer²

^{1,2} Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção – Universidade Federal de Pernambuco

Resumo: O fretamento de veículos para o transporte de colaboradores em substituição ao transporte público é uma prática cada vez mais comum em diversas empresas. Esta opção traz uma série de benefícios, incluindo o conforto dos colaboradores e um melhor controle de entrada e saída nos diferentes turnos de trabalho, contribuindo significativamente para a eficiência operacional da empresa. Neste contexto, este artigo aborda o problema de roteamento de veículos, inspirado em um problema real de uma empresa situada na região metropolitana do Recife-PE, utilizando uma formulação baseada no Problema de Roteamento de Ônibus Escolar. Foram realizadas adaptações no modelo e nas instâncias de teste, experimentos computacionais com o objetivo de investigar o impacto no planejamento rotas eficientes em termos da quantidade de colaboradores, número de paradas e da distância total percorrida tanto pelos veículos quanto pelos colaboradores, para auxiliar na tomada de decisão.

Palavras-chave: Otimização Combinatória, Roteamento de Veículos, Transporte Corporativo.

Mathematical programming model for updating employee transportation routes due to new hires

Abstract: The chartering of vehicles for collaborators transportation as a replacement for public transportation is an increasingly common practice in various companies. This option offers several benefits, including collaborators comfort and better control over entry and exit during different work shifts, significantly contributing to the company's operational efficiency. In this context, this article addresses the vehicle routing problem, inspired by a real-world problem from a company located in the metropolitan area of Recife-PE, using a formulation based on the School Bus Routing Problem. Adaptations were made to the model and test instances, computational experiments were conducted to investigate the impact on planning efficient routes in terms of the number of employees, number of stops, and the total distance traveled by both vehicles and collaborators, to support decision-making.

Keywords: Combinatorial Optimization, Vehicle Routing, Corporate Transport.

1. Introdução

É inegável que a logística moderna enfrenta desafios cada vez mais complexos, especialmente no transporte de bens e pessoas. Um desses desafios é o Problema de Roteamento de Veículos (PRV) cujo primeiro estudo foi realizado em 1959, quando dois

pesquisadores propuseram uma abordagem para otimizar rotas de distribuição de gasolina para postos de combustíveis (Dantzig e Ramser, 1959). Desde então, o PRV evoluiu e se tornou um dos temas mais estudados da Pesquisa Operacional (PO), ganhando ainda mais relevância com uma formulação mais abrangente cinco anos depois (Braekers *et al.*, 2016).

Para lidar de forma mais eficiente com questões relacionadas a custos e eficiência no transporte, técnicas de PO podem ser empregadas (Siqueira *et al.*, 2016). Segundo Arenales *et al.* (2015), a PO oferece ferramentas e métodos de programação capazes de modelar e resolver problemas de roteamento de veículos, com o objetivo de otimizar rotas, minimizar custos e ampliar o número de clientes atendidos.

Nos últimos anos, a industrialização intensa no Brasil, especialmente em Pernambuco, atraiu grandes fábricas para áreas próximas a centros urbanos do interior, muitas vezes afastadas da região metropolitana do Recife. Esse distanciamento da capital e das áreas urbanizadas ocorre por vários motivos, como a proximidade de áreas portuárias e outras indústrias, bem como a escassez de grandes terrenos disponíveis em Recife e os custos associados.

Como essas indústrias empregam centenas de trabalhadores de diferentes níveis socioeconômicos, o acesso a veículos particulares não é uma opção viável para todos. Uma solução adotada por muitas empresas é a contratação de veículos para buscar os colaboradores em suas residências, ou o mais próximo possível delas, e levá-los de volta ao final do expediente. No entanto, essa solução só é eficaz se houver um planejamento adequado que assegure a eficiência do serviço de transporte (Maior *et al.*, 2019).

Com esse propósito, a Lei nº 7.418, de 16 de dezembro de 1985, artigo 1º, exige que os empregadores forneçam vale-transporte aos colaboradores para cobrir as despesas de deslocamento entre a residência e o local de trabalho (Brasil, 1985). Contudo, esse benefício nem sempre é eficiente, já que, em áreas distantes dos centros urbanos, as rotas de transporte público coletivo são escassas. Nessas situações, cabe ao empregador garantir uma alternativa viável de transporte para os colaboradores.

Para assegurar um serviço eficiente, é fundamental que a administração faça um bom gerenciamento dos recursos disponíveis. No entanto, planejar o roteamento de pessoas não é uma tarefa simples. Embora reconheça-se amplamente que melhorias são necessárias nessa área, é essencial ter acesso a uma grande quantidade de dados. Em muitos casos, as empresas carecem desses dados ou os possuem de forma desorganizada e/ou imprecisa. Esse cenário, aliado à complexidade do problema, dificulta ainda mais a implementação das melhorias necessárias.

Por exemplo, se a empresa contratar mais ônibus do que o necessário, os custos aumentarão desnecessariamente. Da mesma forma, a definição de rotas não otimizadas pode resultar em maior tempo de deslocamento e maior consumo de combustível. Portanto, é importante definir pontos de parada estratégicos que permitam agrupar o maior número possível de colaboradores em cada parada, reduzindo o tempo total das rotas e os custos operacionais (Maior *et al.*, 2019).

Dado que há um custo de transporte associado aos colaboradores, o objetivo é definir rotas de menor custo. Este problema é de natureza combinatória, o que significa que o domínio da função a ser otimizada é finito, e a solução ótima é determinada pelas possibilidades de viagem entre paradas e pela alocação entre colaborador e parada. Inicialmente, Newton e Thomas (1969) descreveram esse problema como o Problema de Roteamento de Ônibus Escolar (PROE), conhecido em inglês como *School Bus Routing Problem* (SBRP). Esse problema é uma variante do PRV, conhecido em inglês como *Vehicle Routing Problem* (VRP). Ambos os problemas são classificados como NP-Difíceis, o que indica que o tempo

necessário para encontrar a solução ótima aumenta exponencialmente com o tamanho do problema.

Diante disso, este estudo apresenta a aplicação de um modelo de otimização para o SBRP adaptado ao contexto empresarial. O objetivo é integrar novos colaboradores ao serviço de transporte sem comprometer a qualidade oferecida aos colaboradores antigos já vinculados ao serviço. A proposta visa minimizar o impacto dessa integração, garantindo que a eficiência do serviço e a satisfação dos colaboradores permaneçam em níveis elevados.

Além desta seção introdutória, na Seção 2, há uma descrição do problema real enfrentado pela empresa estudo de caso, a seguir é descrito o modelo matemático conforme detalhado na Seção 3. Na Seção 4, são descritos os experimentos computacionais realizados para resolver o problema, acompanhados pela análise dos resultados obtidos. Por fim, na Seção 5, são apresentadas as conclusões do estudo e sugestões para pesquisas futuras.

3. Definição do Problema

O setor de logística e transporte é encarregado por diversas atribuições, incluindo: i) definir os pontos de parada dos veículos; ii) organizar a alocação dos colaboradores às paradas; iii) estabelecer os pontos de embarque e desembarque que cada veículo deverá atender; e iv) determinar o tipo de veículo apropriado para cada rota. No entanto, a problemática que a empresa enfrenta envolve a alocação de novos colaboradores às rotas de veículo existentes, minimizando o aumento de tempo de viagem, considerando o limite máximo de distância percorrida pelos colaboradores até as paradas, além de assegurar que a capacidade dos veículos não seja excedida.

Além disso, é primordial garantir que a inclusão dos novos colaboradores nas rotas não prejudique os que já utilizam o serviço, preservando o equilíbrio entre a eficiência operacional e a satisfação de todos os colaboradores (antigos e novos). A finalidade é garantir um serviço de transporte que atenda a todos de maneira eficaz, equitativa e sem comprometer a qualidade do serviço para os colaboradores antigos.

Para o presente estudo, foi selecionado um modelo matemático adaptado às especificidades do transporte dos colaboradores, com base no trabalho de Schittekat *et al.* (2013), no qual os autores apresentaram uma formulação de Programação Linear Inteira Mista para o SBRP, abordando uma única escola, um único tipo de estudantes, e veículos com capacidades homogêneas. Além disso, o critério convencional de roteamento de veículos é focado na minimização da distância total percorrida por todos os veículos.

Seja $G = (V, A)$ um grafo orientado composto por um conjunto V de vértices e um conjunto A de arcos. O conjunto de vértices é definido como $V = V_p \cup V_s$, sendo $V_p = \{0, \dots, n + 1\}$ representação dos $n + 2$ possíveis locais de paradas de veículos, onde $\{0, 1\}$ são os vértices que representam a sede da empresa e $V_s = \{n + 2, \dots, n + m + 1\}$ representação das m residências dos colaboradores. O conjunto de arcos é definido como $A = A_p \cup A_s$, sendo $A_p = \{(i, j): i, j \in V_p, i \neq j\}$ os arcos que estão associados à distância necessária para se deslocar entre os potenciais pontos de parada de ônibus e/ou a sede da empresa, e serão segmentos de rotas considerados para construção das soluções, e $A_s = \{(s, j): s \in V_s, j \in V_p, d_{sj} < D_s\}$ os arcos que conectam a residência dos colaboradores (s) aos potenciais pontos de ônibus (j), onde D_s representa a distância máxima que o colaborador (s) pode caminhar. Os vértices de V_p que são alcançados por um colaborador (s) são representados pelo conjunto P_s .

O SBRP consiste em alocar cada colaborador do conjunto V_s a uma parada de ônibus do conjunto P_s , além de determinar um conjunto de rotas que minimize a distância total percorrida pela frota de ônibus e que satisfaça as seguintes restrições: (i) as paradas com colaboradores alocados devem ser visitadas uma única vez, (ii) cada estudante deve ser

alocado a exatamente uma parada, e (iii) a quantidade de estudantes alocados por rota não deve exceder a capacidade homogênea C dos veículos.

Tomando como base os dados e variáveis apresentados nos Quadros 1 e 2, a seguir é demonstrada a formulação matemática fundamentada no modelo do SBRP proposto por Schittekat *et al.* (2013).

Quadro 1 – Conjuntos, Índices e Parâmetros utilizados no modelo

Conjuntos, Índices e Parâmetros	
C	Capacidade do veículo
V_p	Conjunto de vértices, incluindo a garagem e potenciais paradas
A_s	Conjunto de arcos entre paradas
V_s	Conjunto de colaboradores
c_{ij}	Custo de percorrer o arco da parada i até a parada j
t_{ij}	Tempo de percorrer o arco da parada i até a parada j
d_{il}	Distância do colaborador l à parada i
s_{il}	1 se o colaborador l puder alcançar a parada i , 0 caso contrário
T_l	Tempo máximo que o colaborador l pode permanecer no veículo

Fonte: Autores (2024)

Quadro 2 – Variáveis de decisão utilizadas no modelo

Variáveis de Decisão	
x_{ijk}	1 se o veículo k percorre o arco $(i, j) \in A_p$, 0 caso contrário
y_{ik}	1 se o veículo k visita a parada i , 0 caso contrário
z_{ilk}	1 se o estudante l for pego pelo veículo k na parada i , 0 caso contrário
u_i	Ordem em que a parada i é visitada, onde $u_i \in \mathbb{R}^+$
r_{ik}	Tempo que o veículo k chega na parada i , onde $r_{ik} \in \mathbb{R}^+$
w_{lk}	Tempo que o colaborador l embarca no veículo k , onde $w_{lk} \in \mathbb{R}^+$

Fonte: Autores (2024)

$$\min \sum_{i \in V_p} \sum_{j \in V_p} c_{ij} \sum_{k=1}^n x_{ijk} \quad (1)$$

sujeito a:

$$\sum_{j \in V_p \setminus \{0\}: j \neq i} x_{ijk} = \sum_{j \in V_p \setminus \{0, n\}: j \neq i} x_{jik} = y_{ik} \quad \forall i \in V_p \setminus \{0, n\}, k = 1, \dots, n; \quad (2)$$

$$\sum_{j \in V_p \setminus \{0, n\}} x_{0jk} = y_{0k} \quad k = 1, \dots, n; \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V_p \setminus \{n, 0\}} x_{ink} = y_{nk} \quad k = 1, \dots, n; \quad (4)$$

$$y_{0k} \geq y_{ik} \quad \forall i \in V_p \setminus \{0, n\}, k = 1, \dots, n; \quad (5)$$

$$y_{nk} \geq y_{ik} \quad \forall i \in V_p \setminus \{0, n\}, k = 1, \dots, n; \quad (6)$$

$$\sum_{i \in Q} \sum_{j \in Q} x_{ijk} \leq |Q| - 1 \quad \forall Q \subseteq V_p \setminus \{0, n\}, k = 1, \dots, n; \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^n y_{ik} \leq 1 \quad \forall i \in V_p \setminus \{0, n\}; \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^n z_{ilk} \leq s_{il} \quad \forall l \in V_s, \forall i \in V_p; \quad (9)$$

$$\sum_{i \in V_p} \sum_{l \in V_s} z_{ilk} \leq C \quad k = 1, \dots, n; \quad (10)$$

$$z_{ilk} \leq y_{ik} \quad \forall i \in V_p, l \in V_s, k = 1, \dots, n; \quad (11)$$

$$\sum_{i \in V_p} \sum_{k=1}^n z_{ilk} = 1 \quad \forall l \in V_s; \quad (12)$$

$$r_{ik} + t_{ij} - M_{ijk}(1 - x_{ijk}) \leq r_{jk} \quad \forall i, j \in V_p, k = 1, \dots, n; \quad (13)$$

$$r_{n+1,k} - w_{lk} \leq T_l \quad \forall l \in V_s, k = 1, \dots, n; \quad (14)$$

$$w_{lk} \leq r_{ik} + M(1 - z_{ilk}) \quad \forall l \in V_s, i \in V_p, k = 1, \dots, n; \quad (15)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in V_p, i \neq j, k = 1, \dots, n; \quad (16)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in V_p, k = 1, \dots, n; \quad (17)$$

$$z_{ilk} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in V_p, l \in V_s, k = 1, \dots, n. \quad (18)$$

A Função Objetivo (1) minimiza a distância total percorrida por todos os veículos. As Restrições (2) garantem que, se a parada i é visitada pelo veículo k , então um arco deve ser percorrido pelo veículo k ao entrar na parada i e ao sair da parada i . As Restrições (3) e (4) asseguram que, se o veículo k é utilizado, exatamente um arco saindo da garagem (vértice 0) deve ser utilizado e exatamente um arco entrando na garagem (vértice $n+1$) deve ser percorrido. As Restrições (5) e (6) indicam que, se o veículo k visita alguma parada, então ele deve visitar obrigatoriamente a garagem (vértices 0 e $n+1$). As Restrições (7) estabelecem a interligação da rota realizada pelo veículo k , servindo como restrições de eliminação de subrotas.

O conjunto de Restrições (8) assegura que cada parada seja visitada no máximo uma vez, exceto para a parada correspondente à garagem. As Restrições (9) e (12) garantem que cada colaborador seja pego em uma parada que ele ou ela possa alcançar. As Restrições (10) certificam que as capacidades dos veículos não sejam ultrapassadas. As Restrições (11) determinam que o colaborador l só pode ser pego na parada i pelo veículo k se o veículo k visita a parada i . As Restrições (13) estabelecem que, se o arco (i, j) é percorrido pelo veículo k , então o tempo de chegada em j não deve ser inferior ao tempo de chegada em i acrescido do tempo de viagem de i para j .

As Restrições (14) certificam que o tempo de permanência do colaborador l no veículo não exceda D_l . Já as Restrições (15) demonstram que o tempo em que o colaborador embarca no ônibus não seja superior ao tempo em que o ônibus chega na parada em que o colaborador está alocado. No contexto real, esse tempo não pode ser inferior; porém, para permitir certa flexibilidade e ajustar a modelagem a variações no tempo de chegada, w_{lk} é utilizada para controlar, em conjunto com a variável $r_{n+1,k}$ que controla o tempo total de permanência do colaborador no veículo. Por fim, as Restrições (16) - (18) estabelecem que todas as variáveis de decisão assumem valores binários.

Como na formulação original são necessárias um número exponencial de restrições de eliminação de subrotas ($O(2^n)$) o conjunto de Restrições (7) foi substituído pelas restrições de Miller *et al.* (1960) apresentadas em (19) e (20). Ainda que esta formulação resulte em um relaxamento de programação linear mais fraco Langevin *et al.* (1990) ela requer apenas n restrições adicionais, tornando-a adequada para instâncias maiores.

$$u_i - u_j + n \sum_{k=1}^n x_{ijk} \leq n - 1 \quad \forall i, j = 2, \dots, n, i \neq j, \quad (19)$$

$$u_1 = 1 \quad (20)$$

É importante ressaltar que nas Restrições (13) indicamos que o valor descrito para M e M_{ijk} seja correspondente à Equação (21).

$$M_{ijk} = \sum_{i=0}^n d_{i,i+1} \quad \forall i, j, k \in V_p \quad (21)$$

4. Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados dos experimentos computacionais realizados. O objetivo principal foi analisar a eficácia das soluções geradas, considerando as especificidades operacionais da empresa e as variáveis envolvidas no processo de roteamento de veículos.

4.1 Experimentos Computacionais

Os experimentos computacionais foram realizados utilizando o modelo matemático, apresentado em Schittekat *et al.* (2013) e o modelo matemático descrito na Seção 3, ambos implementados em linguagem de programação Julia. As simulações foram executadas em

um computador com processador Intel® Core™ i5-1135G7 com CPU de @2.40GHz, 8 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 11. Para a resolução dos problemas de otimização, foi utilizado o solver CPLEX Optimization Studio 22.1.1.

4.2 Adaptação das Instâncias

O estudo foi estruturado em dois cenários distintos. No Cenário 1, as instâncias propostas por Schittekat *et al.* (2013) foram adaptadas para refletir de maneira mais precisa o contexto atual da empresa, já que os dados reais da Empresa Estudo de Caso (EEC), no momento da elaboração deste estudo, ainda estavam em fase de coleta e análise. Nessa adaptação, considerou-se que 90% dos colaboradores (equivalentes aos “estudantes” nas instâncias originais) já faziam uso do serviço de transporte, representando os colaboradores antigos. Esses 90% foram selecionados aleatoriamente em cada instância, enquanto os 10% restantes modelaram os novos colaboradores contratados.

No Cenário 2, considerou-se a totalidade dos colaboradores, ou seja, tanto os antigos quanto os novos contratados, representando 100% dos usuários do serviço de transporte. A análise foi realizada com foco em avaliar que a qualidade do serviço oferecido aos colaboradores antigos não fosse prejudicada, pois isso poderia gerar insatisfação e impactos negativos na operação. Além disso, o Cenário 2 depende da solução do Cenário 1, pois no Cenário 2 os valores de distância percorrida pelos colaboradores antigos e de tempo de permanência nos ônibus serão restrições (para não piorar o serviço para cada colaborador).

Em ambos cenários o número de paradas candidatas foi aumentado, sendo estabelecido como 80% da quantidade total de colaboradores de cada instância, o que possibilitou uma maior flexibilidade na definição das rotas e pontos de embarque, assegurando um equilíbrio entre eficiência operacional e a satisfação dos usuários.

As instâncias contêm quatro parâmetros principais: i) coordenadas geográficas dos locais de paradas candidatas de veículos; ii) coordenadas geográficas dos locais de origem dos colaboradores que utilizam o serviço (por exemplo, residências); iii) capacidade dos veículos; e iv) distância máxima permitida de caminhada dos usuários do local de origem para a parada de veículos (no primeiro cenário é um valor comum a todos, no Cenário 2 é um valor para cada colaborador, baseado na solução do Cenário 1). Essas instâncias estão disponíveis em <https://github.com/HellenSouza24/InstanciasSBRP.git>.

Para as instâncias do Cenário 1, o modelo proposto por Schittekat *et al.* (2013) foi utilizado, considerando o tempo limite de 600 segundos. A solução obtida foi utilizada para simular as rotas em uso pela empresa antes da inclusão dos novos colaboradores (ou seja, os 10% adicionais). Com base nessa solução, foram calculadas as distâncias percorridas por cada colaborador até a parada selecionada, bem como o tempo que cada um permanece no veículo até chegar à empresa. Esses valores foram definidos como limites máximos (isto é, não podem ser excedidos) para a geração de novas rotas (Cenário 2) que incluirão os “novos” funcionários. As instâncias geradas, que contêm os dados necessários para a resolução do modelo apresentado na Seção 3 estão disponíveis em <https://github.com/HellenSouza24/InstanciasSBRP2etapa.git>.

4.3 Resultados Computacionais

Com base nas abreviações e parâmetros descritos no Quadro 3, os resultados referentes ao Cenário 1 são apresentados na Tabela 1. É oportuno ressaltar que o número de paradas candidatas varia entre 20, 40 e 80; a quantidade de colaboradores no Cenário 1 é de 22, 45 e 90; a capacidade máxima de cada veículo varia entre 25 e 50; além disso, a distância máxima permitida de caminhada foi definida em 5, 10, 20 e 40 unidades de comprimento.

Vale enfatizar que o tempo para a resolução do modelo foi limitado a 600 segundos. Para as instâncias 19, 23 e 24 o tempo de execução do algoritmo foi aumentado para 3600 segundos, para o Cenário 1, pois dentro do primeiro tempo estabelecido, não foi encontrada nenhuma solução para o problema. No entanto, mesmo com este aumento significativo, as três instâncias (19, 23 e 24) não retornaram nenhuma solução. Para isso, no total, foram analisadas 21 instâncias, considerando diferentes combinações dos parâmetros.

Quadro 3 - Abreviações e parâmetros utilizados para a apresentação dos resultados

Parâmetros	
#inst	Número das instâncias
n	Quantidade de paradas candidatas
m	Quantidade de colaboradores em cada instância
C	Capacidade máxima do(s) veículo(s)
d_max	Capacidade máxima permitida de caminhada
Abreviações	
BestSol	Valor da Solução Ótima do Cenário 1 (em unidades de comprimento)
BestSol2	Valor da Solução Ótima do Cenário 2 (em unidades de comprimento)
Time(s)	Tempo de execução (em segundos)
StatusSol	Status da solução
$\bar{x}_{walkdist}$	Média da distância máxima (em unidades de comprimento) de caminhada permitida
$\bar{x}_{durationInBus}$	Média do tempo máximo (duração máxima) de viagem que o colaborador passa dentro do veículo (em unidades de comprimento)
QV	Quantidade de veículos utilizada na instância

Fonte: Autores (2024)

Tabela 1 – Resultado – 1º Cenário

#inst	n	m	C	d_max	$\bar{x}_{walkdist}$	$\bar{x}_{durationInBus}$	BestSol	Time(s)	QV	StatusSol
1	20	22	22	5	3,34	127,75	141,01	600	1	TIME_LIMIT
2	20	22	45	5	3,17	142,39	161,62	187,89	1	OPTIMAL
3	20	22	22	10	6,32	142,20	182,14	15,18	1	OPTIMAL
4	20	22	45	10	5,57	201,87	195,80	25,67	1	OPTIMAL
5	20	22	22	20	12,88	120,18	106,07	600	1	TIME_LIMIT
6	20	22	45	20	13,17	95,39	95,97	600	1	TIME_LIMIT
7	20	22	22	40	24,00	55,34	1,43	2,00	1	OPTIMAL
8	20	22	45	40	25,45	64,50	17,22	7,54	1	OPTIMAL
9	40	45	22	5	2,62	210,82	286,68	600	3	TIME_LIMIT
10	40	45	45	5	2,60	272,33	197,20	600	1	TIME_LIMIT
11	40	45	22	10	6,13	193,71	193,85	600	3	TIME_LIMIT
12	40	45	45	10	5,62	301,60	238,83	600	2	TIME_LIMIT
13	40	45	22	20	13,73	131,84	138,45	600	3	TIME_LIMIT
14	40	45	45	20	13,80	128,58	105,97	600	2	TIME_LIMIT
15	40	45	22	40	21,89	84,03	14,32	600	3	TIME_LIMIT
16	40	45	45	40	23,95	115,32	19,34	600	1	TIME_LIMIT
17	80	90	22	5	2,84	389,75	537,07	600	6	TIME_LIMIT
18	80	90	45	5	2,97	408,41	4396,85	600	18	TIME_LIMIT
19	80	90	22	10	-	-	-	600	-	TIME_LIMIT
20	80	90	45	10	6,20	397,47	287,14	600	3	TIME_LIMIT
21	80	90	22	20	14,58	190,94	126,51	600	6	TIME_LIMIT
22	80	90	45	20	11,10	254,17	177,43	600	3	TIME_LIMIT
23	80	90	22	40	-	-	-	600	-	TIME_LIMIT
24	80	90	45	40	-	-	-	600	-	TIME_LIMIT

Fonte: Autores (2024)

Tabela 2 – Resultado – 2º Cenário

#inst	n	m	C	d_max	$\bar{x}_{walkdist}$	$\bar{x}_{durationInBus}$	BestSol2	Time(s)	QV	StatusSol
1	20	25	22	5	3,06	41,77	163,82	544,44	2	OPTIMAL
2	20	25	45	5	2,79	85,93	161,62	236,76	1	OPTIMAL
3	20	25	22	10	5,35	50,71	185,37	155,40	2	OPTIMAL
4	20	25	45	10	4,75	108,89	195,80	225,68	1	OPTIMAL
5	20	25	22	20	12,09	36,39	127,69	7200	2	TIME_LIMIT
6	20	25	45	20	11,79	46,39	97,00	591,19	1	OPTIMAL
7	20	25	22	40	0,86	22,21	5,38	93,16	2	OPTIMAL
8	20	25	45	40	8,83	24,32	18,82	24,05	1	OPTIMAL
9	40	50	22	5	2,41	52,71	292,65	1816,41	3	OPTIMAL
10	40	50	45	5	2,38	85,21	233,27	4195,54	2	OPTIMAL
11	40	50	22	10	-	-	-	-	-	TIME_LIMIT
12	40	50	45	10	5,14	65,78	234,89	1101,50	2	OPTIMAL
13	40	50	22	20	-	-	-	-	-	TIME_LIMIT
14	40	50	45	20	-	-	-	-	-	TIME_LIMIT
15	40	50	22	40	-	-	-	-	-	TIME_LIMIT
16	40	50	45	40	-	-	-	-	-	TIME_LIMIT
17	80	100	22	5	-	-	-	-	-	TIME_LIMIT
18	80	100	45	5	-	-	-	-	-	TIME_LIMIT
19	80	100	22	10	-	-	-	-	-	-
20	80	100	45	10	-	-	-	-	-	TIME_LIMIT
21	80	100	22	20	-	-	-	-	-	TIME_LIMIT
22	80	100	45	20	-	-	-	-	-	TIME_LIMIT
23	80	100	22	40	-	-	-	-	-	-
24	80	100	45	40	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autores (2024)

Pode-se observar que a instância 18 revelou uma necessidade considerável de recursos para o serviço de transporte, exigindo a utilização de 18 veículos para atender a todas as demandas. Além disso, o custo associado a essa instância alcançou 4.396,85 unidades de comprimento, o que representa um cenário desafiador e custoso para a EEC. Este alto custo sugere que a instância possui características que dificultam sua solução, como maior complexidade na distribuição das paradas ou restrições mais rigorosas e apontando para

uma carga financeira substancial que a EEC terá que enfrentar para garantir a eficiência operacional. Outras instâncias, como 7 e 15, têm custos significativamente menores e foram resolvidas dentro de limites de tempo razoáveis, indicando que são menos complexas em comparação com a instância 18.

O tempo de execução varia amplamente entre as instâncias, com algumas soluções encontradas em poucos segundos (por exemplo, instância 4 com 15,18 segundos) e outras levando mais tempo (como a instância 9 e as instâncias com maior número de colaboradores). O aumento do tempo de execução é geralmente associado ao aumento da complexidade do problema. No que tange a média da distância de caminhada permitida e o tempo máximo dentro do veículo, ambos variam entre as instâncias, impactando a eficiência e a qualidade das soluções encontradas.

O objetivo deste teste foi obter uma solução para cada instância, simulando a solução (rotas) adotada pela EEC. Os valores obtidos serviram como referência para avaliar os impactos da inclusão de novos colaboradores no serviço de transporte. Por exemplo, os resultados permitiram estimar o aumento nos custos, representados pela distância total percorrida pelos veículos, além de analisar a duração da viagem de cada colaborador (tempo que cada colaborador passa dentro do veículo), a distância máxima que os colaboradores percorrem a pé até a parada designada e a quantidade total de veículos necessários para o transporte.

Sendo assim, para o Cenário 2, considerou-se a totalidade dos colaboradores, ou seja, tanto os antigos quanto os novos contratados. A análise foi realizada com foco em avaliar que a qualidade do serviço oferecido aos colaboradores antigos não fosse prejudicada (isto é, o tempo de permanência no veículo até a chegada na empresa e a distância de caminhada até a parada), pois isso poderia gerar insatisfação e impactos negativos na operação.

Foram analisadas um total de 21 instâncias (isto é, aquelas que se obteve solução no Cenário 1), levando em consideração as mesmas combinações de parâmetros mencionadas previamente. Assim, o número de colaboradores foi ajustado para 25, 50 e 100, representando a inclusão dos novos contratados nas análises. Os resultados desta abordagem são apresentados na Tabela 2, com as abreviações e parâmetros correspondentes detalhados no Quadro 3 apresentado anteriormente. No que se refere ao tempo de execução do algoritmo, foi estipulado um limite de 7.200 segundos, considerando o aumento da complexidade do problema em decorrência da inclusão de novos conjuntos de restrições.

A complexidade das instâncias do Cenário 2 está diretamente relacionada ao aumento do tamanho dos conjuntos de dados, o que faz com que o espaço de busca cresça exponencialmente. Além disso, o fato de o algoritmo não ter encontrado soluções para as instâncias (11, 13 até 24) sugere que o tempo limite de 7.200 segundos pode não ser suficiente para instâncias maiores e mais restritivas. Embora tenha sido possível resolver instâncias menores dentro desse tempo, as instâncias maiores exigem métodos mais sofisticados para explorar o espaço de soluções de maneira mais eficiente. Uma abordagem potencial para melhorar o desempenho em instâncias de grande escala será o uso de técnicas heurísticas ou meta-heurísticas, que, embora não garantam a otimalidade das soluções, tendem a encontrar soluções de boa qualidade em menos tempo computacional.

Por fim, a incapacidade de resolver estas instâncias (11, 13 até 24) também sugere que, além do aumento do tempo, o problema pode exigir ajustes na modelagem ou no algoritmo utilizado. Reformulações do modelo, como decomposições ou simplificações em subproblemas menores, poderiam ajudar a tornar o problema mais tratável dentro do tempo disponível.

Para ilustrar o aumento na quantidade de veículos entre os dois cenários, algumas representações das instâncias e suas respectivas soluções são apresentadas das Figuras 1 até 6. As instâncias analisam dois contextos distintos: no Cenário 1 há 22 e 45 colaboradores e 20, 40 e 80 paradas candidatas, enquanto no Cenário 2 apresenta 25 e 50 colaboradores e 20, 40 e 80 paradas candidatas. Nas figuras, o conjunto de paradas candidatas (V_p) é representado por círculos cinzas, enquanto o conjunto de colaboradores (V_s) é indicado por círculos pretos, as rotas percorridas pelos veículos são representadas pelas arestas nas cores vermelho, verde e amarelo, começando e terminando o percurso na empresa (representada por um ícone).

Figura 1 - Inst1_1etapa

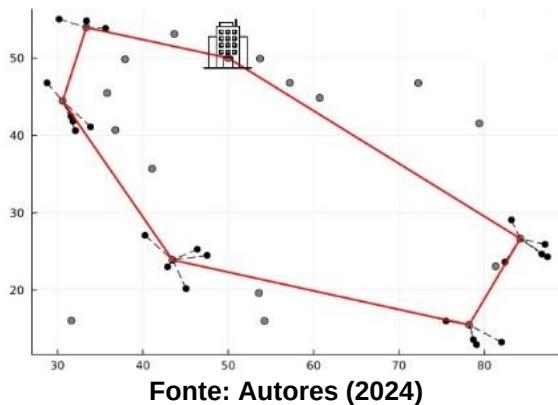


Figura 2 – Inst1_2etapa

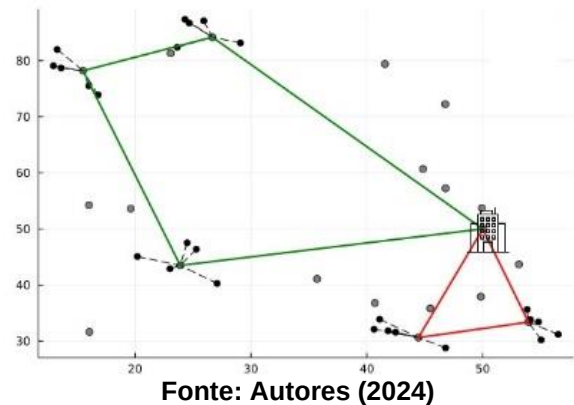


Figura 3 – Inst3_1etapa

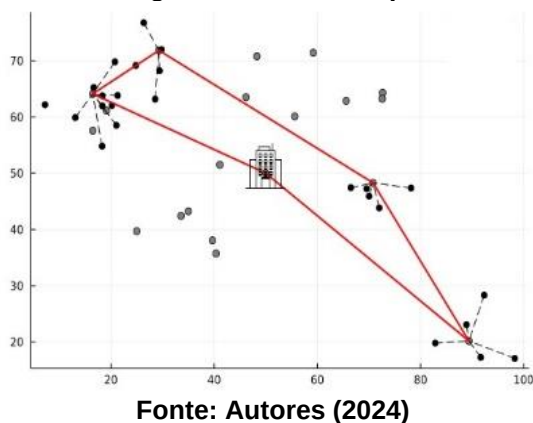


Figura 4 – Inst3_2etapa

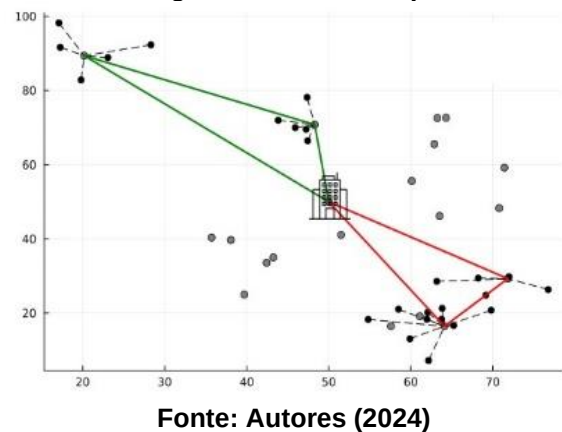


Figura 5 - Inst12_1etapa

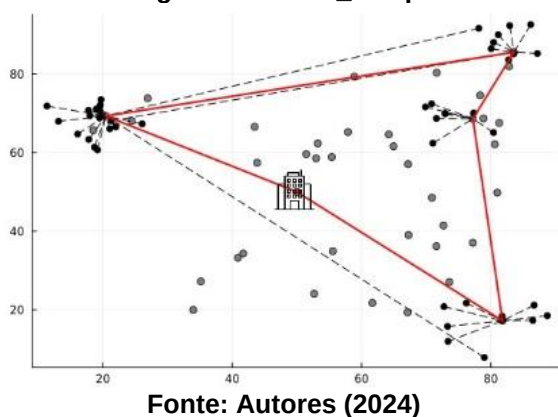
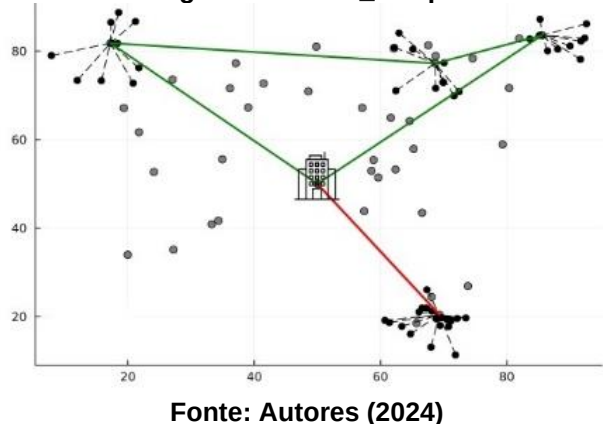


Figura 6 - Inst12_2etapa



Observa-se que, no Cenário 2, o aumento no número de colaboradores resultou na necessidade de mais veículos para atender à demanda. Assim, existe a necessidade de otimizar o transporte para garantir que todos os colaboradores sejam atendidos de forma

eficiente. Além disso, esse ajuste na frota teve um impacto direto nos custos operacionais, que aumentaram, no Cenário 2, devido ao maior número de veículos em operação, evidenciando a relação entre a demanda crescente e a necessidade de recursos adicionais para manter a qualidade do serviço. Essa análise destaca a importância de um planejamento de roteamento eficaz, que não apenas considere a quantidade de paradas e colaboradores, mas também as implicações financeiras associadas ao aumento da frota.

Do ponto de vista gerencial, a decisão de aumentar a frota de veículos é fundamental para assegurar que as operações de transporte se mantenham alinhadas às expectativas de desempenho da EEC. Com o aumento da quantidade de veículos, a gerência pode observar um melhor cumprimento dos horários de transporte e uma redução na espera dos colaboradores. Contudo, isso também implica em uma análise cuidadosa dos custos operacionais, pois o aumento na frota requer planejamento financeiro e gestão eficiente para evitar desperdícios. Os gestores devem avaliar estratégias que maximizem a eficiência do uso da frota, como rotas otimizadas e manutenção preventiva, a fim de garantir um equilíbrio entre custo e qualidade do serviço.

Ainda, a análise dos dois cenários evidencia o aumento na complexidade e no custo operacional ao se considerar a inclusão de novos colaboradores. As soluções encontradas para o Cenário 2, que envolve 100% dos colaboradores, mostram um desempenho pior em comparação ao Cenário 1, onde apenas os colaboradores antigos eram atendidos. O aumento no número de colaboradores elevou a demanda por veículos, gerando um impacto direto no custo do serviço de transporte.

Em contrapartida, em algumas instâncias, houve redução na distância total percorrida pelos colaboradores e no tempo de viagem dentro do veículo, o que pode ser explicado pela maior concentração de colaboradores em regiões geográficas semelhantes. A inclusão de novos colaboradores em áreas próximas às rotas já existentes permite otimizações no planejamento, resultando em trajetos mais curtos e menor tempo de viagem para alguns grupos. Isso demonstra que, embora a inclusão de novos colaboradores aumente a demanda global, a eficiência pode ser parcialmente recuperada quando há uma sobreposição geográfica favorável entre os novos e antigos colaboradores, otimizando as rotas sem comprometer consideravelmente o tempo total de transporte.

O equilíbrio entre a demanda e a proximidade geográfica é um ponto determinante para a gestão ao avaliar a viabilidade de expandir o serviço de transporte sem comprometer a qualidade. Para a gestão, os resultados sinalizam que, sem uma adaptação eficiente do serviço, a inclusão de novos colaboradores pode comprometer a qualidade, aumentando os custos de operação e gerando insatisfação, o que, em última análise, afetará a produtividade e o bem-estar dos colaboradores.

5. Conclusões

Este trabalho explora uma formulação para o problema de roteamento de ônibus escolares adaptado ao contexto empresarial, com o objetivo de avaliar o impacto da contratação de novos colaboradores e sua alocação às rotas e paradas predeterminadas pela EEC. A abordagem proposta busca criar uma sequência eficiente de coleta de passageiros, evitando a sobrecarga dos veículos e minimizando a distância total percorrida, sem comprometer a qualidade do serviço disponibilizado. O modelo foi testado como uma ferramenta de apoio ao planejamento das frotas, fornecendo soluções para os cenários testados e permitindo que os tomadores de decisão considerem diferentes perspectivas para o transporte dos colaboradores.

Uma expansão deste estudo inclui a consideração do embarque e desembarque simultâneo de colaboradores nos pontos de parada. Neste cenário, a troca de colaboradores nos terminais (paradas) afeta a capacidade dos veículos de maneira diferente do que foi tratado

neste estudo, exigindo ajustes no modelo matemático. Devido ao elevado tempo computacional dos métodos exatos é essencial o desenvolvimento de heurísticas e meta-heurísticas, que oferecem soluções práticas em um tempo de processamento reduzido. Essas técnicas permitem lidar com a complexidade do problema de forma mais eficiente, proporcionando soluções viáveis e rápidas mesmo para instâncias maiores e mais complexas.

A comparação das soluções obtidas com métodos heurísticos e meta-heurísticos, baseados em dados reais (que estão em processo de coleta e análise), é uma continuação importante do presente estudo. A redução dos custos operacionais e a melhoria da eficiência operacional podem levar a um aumento na rentabilidade e na capacidade de reinvestir em outras áreas da EEC, promovendo um crescimento sustentável a longo prazo. Além disso, uma gestão mais eficiente pode melhorar a imagem da EEC junto a clientes e parceiros, potencialmente resultando em novas oportunidades de negócios.

Referências

BRAEKERS, K., RAMAEKERS, K., and VAN NIEUWENHUYSE, I. The vehicle routing problem: State of the art classification and review. **Computers & Industrial Engineering**, 99:300–313. 2016.

Brasil. **Lei nº 7.418, de 16 de dezembro de 1985**. 1985. Disponível em <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l7418.htm>. Acesso em: 8-ago-2024.

DANTZIG, G. B.; RAMSER, J. H. The truck dispatching problem. **Management science**, Inform, v. 6, n. 1, p. 80–91, 1959.

LANGEVIN, A.; SOUMIS, F.; DESROSIERS, J. Classification of travelling salesman problem formulations. **Operations Research Letters**, Elsevier, v. 9, n. 2, p. 127–132, 1990.

MAIOR, C. B. S. *et al.* **Roteirização de veículos para transporte de funcionários – estudo de caso em Pernambuco**. p. 2504–2519, 2019.

MILLER, C. E.; TUCKER, A. W.; ZEMLIN, R. A. Integer programming formulation of traveling salesman problems. **Journal of the ACM (JACM)**, ACM New York, NY, USA, v. 7, n. 4, p. 326–329, 1960.

NEWTON, R. M.; THOMAS, W. H. Design of school bus routes by computer. **Socio-Economic Planning Sciences**, Elsevier, v. 3, n. 1, p. 75–85, 1969.

SCHITTEKAT, P.; KINABLE, J.; SÖRENSEN, K.; SEVAUX, M.; SPIEKSMAN, F.; SPRINGAEL, J. A metaheuristic for the school bus routing problem with bus stop selection. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 229, n. 2, p. 518–528, 2013.

SIQUEIRA, V. S. d. **Sisrouting: um sistema de apoio a decisão com a utilização da meta-heurística GRASP aplicada problema de roteamento do ônibus escolar**. Tocantins, 2016. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Tocantins.