São José dos Campos - SP
LV SBPO
LV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
São José dos Campos, SP - 6 a 9 de novembro de 2023

O Problema do Ônibus Escolar Caminhante num Contexto Brasileiro

Beatriz Martins Bassi
Franklina M. B. Toledo
Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação - Universidade de São Paulo (USP)
beatrizmb@usp.br, fran@icmc.usp.br

Larissa Tebaldi Oliveira
Departamento de Matemática, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
larissa.tebaldi@unesp.br

RESUMO

Segurança e falta de tempo são os principais motivos para os pais preferirem levar seus filhos de carro à escola. Para reverter essa situação e promover uma vida mais saudável às crianças, é estudado, na literatura, o problema do Ônibus Escolar Caminhante. A ideia é definir rotas para as crianças caminharem até a escola acompanhadas por monitores. Neste trabalho, consideramos o contexto brasileiro, em que crianças de diferentes idades estudam num mesmo turno escolar, demandando diferentes níveis da atenção do monitor. O primeiro objetivo é gerar rotas que minimizem a quantidade de monitores necessários para levar todas as crianças à escola. Um segundo objetivo é minimizar a distância que percorrem. Dessa forma, temos um problema biobjetivo. Os resultados mostram que a idade das crianças influencia diretamente no número de monitores necessários e que, em alguns casos, é importante aumentar esse valor para reduzir a distância percorrida.

PALAVRAS CHAVE. Ônibus Escolar Caminhante, Otimização em arco, Modelagem matemática.

PM - Programação Matemática

ABSTRACT

Safety and lack of time are the main reasons why parents prefer to drive their children to school. In order to reverse this situation and promote a healthier lifestyle for children, the Walking School Bus problem is being studied in the literature. The idea is to define routes for children to walk to school accompanied by monitors. In this work, we consider the Brazilian context, where children of different ages study in the same school shift, requiring different proportions of the monitor's attention. The first goal is to generate routes that minimize the number of monitors needed to take children to school. A second goal is to minimize the distance traveled by the children. Thus, we have a bi-objective problem. The results show that the children's ages directly impact the number of monitors required and that, in some cases, it is important to increase this value to reduce the distance traveled.

KEYWORDS. Walking School Bus. Arc optimization. Mathematical modeling.

MP - Mathematical Programming

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174965
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174965

1. Introdução

Com o passar dos anos, foi possível notar um aumento significativo no número de pais que preferem levar seus filhos de carro à escola. Diversos estudos acerca desses dados foram realizados, apontando como principais motivações para essa decisão a segurança das crianças e a economia de tempo (p.e., McDonald e Aalborg [2009] e Westman et al. [2017]).

Por outro lado, muitas pesquisas foram realizadas para analisar os benefícios obtidos pelas crianças quando caminham até a escola. As pesquisas destacam proveitos para o desenvolvimento pessoal das crianças. Como afirmam Kingham e Ussher [2007], a princípio a caminhada até a escola promove o convívio social das crianças, o que faz com que se sintam mais independentes e autoconfiantes. Além disso, se estiverem acompanhadas de monitores, elas aprendem comportamentos seguros para andar pelas ruas como pedestres [Mendoza et al., 2012].

Paralelo a isso, outras vantagens também foram analisadas, como a efetividade no combate à obesidade na infância [Kingham e Ussher, 2007] e a redução do risco de doenças cardiovasculares no futuro [Lambiase et al., 2010]. Os autores também indicam que a caminhada até a escola ajuda os alunos a lidarem com situações de estresse vividas no ambiente escolar, além de contribuir positivamente para atividades que exercitam o planejamento e o raciocínio das crianças [Van Dijk et al., 2014]. Por fim, Sunyer et al. [2017] estudaram a relação entre a poluição do meio ambiente ao redor das escolas com a falta de atenção e de memória das crianças ao longo do dia na escola, e foi constatado um impacto negativo no neurodesenvolvimento delas.

Visando incentivar as crianças a caminharem até a escola e convencer os pais de que é possível melhorar a segurança de seus filhos durante o trajeto, surgiram diferentes iniciativas no mundo, como o Ônibus Escolar Caminhante (em inglês, *Walking School Bus Problem* ou *Pedibus*). Nessa estratégia, as crianças caminham até a escola acompanhadas por monitores ("motoristas caminhantes"). Como destacam Chillón et al. [2011], os monitores passam na casa das crianças e as acompanham durante todo o percurso.

A implantação de ônibus escolares caminhantes enfrenta vários desafios, dentre eles destacamos dois: i) reduzir o número de monitores necessários para acompanhar as crianças; e ii) encontrar trajetos (rotas) em que as crianças cheguem à escola em segurança e não cansadas. Logo, vários trabalhos da literatura trataram o problema como um problema de otimização (p.e. Tresoldi et al. [2021] e Hayes et al. [2022]).

No estudo realizado por Tresoldi et al. [2021], os autores analisam o problema em duas versões distintas, abordando cada uma delas de forma isolada.. A primeira visa encontrar uma solução que minimize o número de monitores necessários para levar todas as crianças à escola. Vale destacar que os autores consideram que todas as crianças requerem o mesmo nível de atenção dos monitores e que o número de crianças que um monitor pode acompanhar é limitado. Já na segunda, o número de monitores disponíveis é conhecido e busca-se minimizar o percurso. Mais recentemente, Hayes et al. [2022] procuraram encontrar áreas em que o Ônibus Escolar Caminhante tivesse sucesso em sua aplicação, as quais, de acordo com os resultados, deveriam ter como características um grande número de crianças, maior disponibilidade dos pais e poucas viagens de carro desses para o trabalho.

Neste trabalho, abordamos o problema do Ônibus Escolar Caminhante no contexto das escolas brasileiras, nas quais crianças de diferentes idades estudam num mesmo turno escolar. Nesse

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174965
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174965

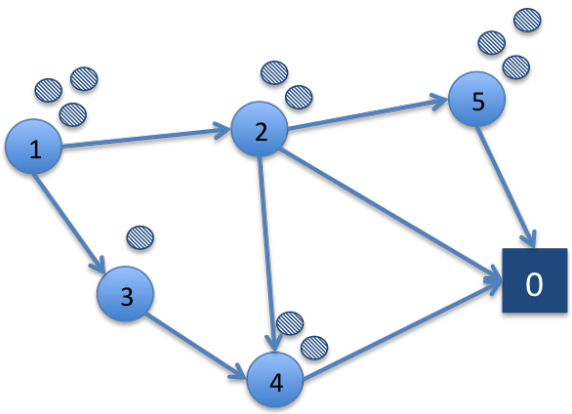
caso, o número de crianças que um monitor pode acompanhar depende da idade das crianças do grupo, pois, em geral, as menores requerem mais atenção do que as maiores. Assim, inicialmente, adaptamos o modelo de [Tresoldi et al., 2021] para considerar a idade das crianças e avaliamos como o número mínimo de monitores é afetado neste contexto. Em seguida, tratamos o problema considerando conjuntamente os dois objetivos propostos em Tresoldi et al. [2021], ou seja, resolvemos um problema biobjetivo que busca: i) minimizar o número de monitores necessários para levar as crianças à escola em segurança; e ii) minimizar a distância percorrida pela criança que mais caminha. Resolvemos o problema biobjetivo utilizando a estratégia do ϵ-restrito. Os resultados mostram que com um número um pouco maior de monitores, a distância de caminhada reduz significativamente.

Assim, este artigo está organizado da seguinte forma: na Seção 2, apresentamos a definição do problema estudado e a modelagem matemática utilizada para representá-lo; na Seção 3, reportamos os experimentos computacionais realizados; e, por fim, na Seção 4, discutimos as conclusões e as perspectivas para trabalhos futuros.

2. Descrição do Problema e Modelagem Matemática

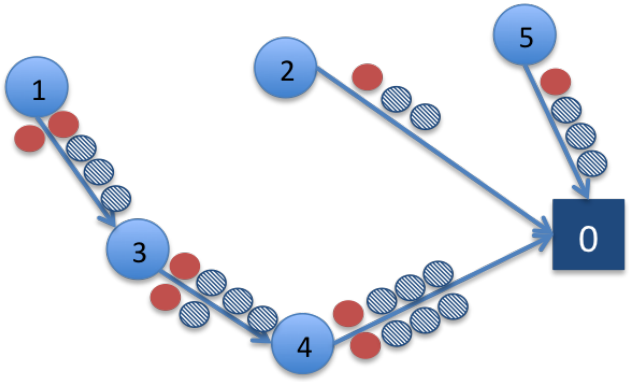
O problema do Ônibus Escolar Caminhante baseia-se na ideia de definir trajetos para os monitores passarem pela casa de cada criança para levá-las à escola. Cada casa é visitada por pelo menos um monitor, dependendo do número de crianças que residem ali. Na Figura 1, ilustramos um conjunto de alunos (círculos hachurados) em suas casas (círculos maiores) e os trajetos conectando as casas e a escola (quadrado). Uma solução para este exemplo é apresentada na Figura 2 em que é definido um conjunto de rotas nas quais as crianças são acompanhadas por monitores (círculos vermelhos). Para esse exemplo, consideramos que um monitor pode supervisionar no máximo três crianças.

Figura 1: Exemplo para o problema considerando cinco casas e 11 crianças.



DOI: 10.59254/sbpo-2023-174965
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174965

Figura 2: Uma solução para o exemplo da Figura 1.



Abordamos o problema considerando dois objetivos conflitantes em conjunto: i) minimizar o número de monitores necessários para acompanhar as crianças em segurança até a escola; e ii) minimizar o trajeto percorrido pelas crianças. No contexto brasileiro, crianças de 6 a 10 anos estudam num mesmo turno escolar. Em geral, crianças mais novas demandam uma supervisão mais atenta que crianças mais velhas. Logo, neste estudo consideramos a capacidade de supervisão dos monitores dependente da idade dos alunos.

2.1. Modelagem Matemática

Tresoldi et al. [2021] apresentaram um modelo matemático para o problema do ônibus escolar caminhante. Os autores consideram que cada monitor pode acompanhar no máximo um dado número de alunos. Neste trabalho, adaptamos o modelo proposto por Tresoldi et al. [2021] para tratar de forma diferente o nível de atenção necessário para acompanhar crianças de idades distintas. Em seguida, consideramos o problema biobjetivo em que buscamos minimizar conjuntamente o número de monitores e minimizar a distância máxima percorrida pelo aluno que mais caminha. Vale destacar que os autores analisam estes dois objetivos separadamente. O modelo adaptado é descrito em (1)–(16). Os conjuntos, os índices, os parâmetros e as variáveis do modelo são descritos nas Tabelas 1 a 3.

Tabela 1: Conjuntos do modelo (1)–(16).

Conjuntos	
H	conjunto de nós que representam as casas das crianças ($H = \{1, ..., nt\}$, em que nt é o número de casas.
$\overline{H}$	união do conjunto H com o nó que corresponde à escola (nó 0), ou seja, $\overline{H} = H \cup \{0\}$.
A	conjunto de arestas que representam os caminhos entre dois nós i e j, em que $i, j \in \overline{H}$.
I	conjunto de idades das crianças.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174965
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174965

Tabela 2: Parâmetros do modelo (1)–(16).

Parâmetros	
d_{ij}	coeficiente que representa a qualidade do caminho do nó i ao nó j (quanto maior seu valor, pior o caminho).
q_i^k	quantidade de crianças de idade k que moram no nó i.
p^k	nível de atenção que uma criança de idade k exige de um monitor (quanto mais nova uma criança é, maior seu valor).
ρ	número máximo de crianças que um monitor consegue supervisionar. Este valor é definido supondo que todas as crianças demandam nível 1 de atenção do monitor.
S_i	distância direta entre a escola e o nó i.
Δ_i	distância máxima que as crianças do nó i podem percorrer. Este valor é dado por $\Delta_i = \delta_i S_i$ em que δ_i é a porcentagem adicional que as crianças do no i podem caminhar.
c_{ij}	distância doo nó i ao nó j.
α	representa o peso da segurança do trajeto.
M	é um número suficientemente grande.

Tabela 3: Variáveis do modelo (1)–(16).

Variáveis	
z_i	quantidade de monitores que começam a rota no nó i (variável inteira).
y_{ij}	igual a 1 se o caminho de i para j é utilizado, e igual a 0 caso contrário (variável binária).
θ	valor do caminho mais longo (variável contínua).
w_{ij}^k	quantidade de crianças de idade k que vai do nó i ao nó j (variável inteira).
x_{ij}	quantidade de monitores que vão do nó i para o nó j (variável inteira).
π_i	distância do nó i até a escola considerando o percurso escolhido (variável contínua).

$$f_1(z,y) = \text{Min} \sum_{i \in H} z_i + \alpha \sum_{(i,j) \in A} d_{ij} y_{ij} \tag{1}$$

$$f_2(\theta,y) = \text{Min}\ \theta + \alpha \sum_{(i,j) \in A} d_{ij} y_{ij} \tag{2}$$

s. a

$$-\sum_{(j,i) \in A} w_{ji}^k + \sum_{(i,j) \in A} w_{ij}^k = q_i^k \qquad \forall i \in H, \forall k \in I \tag{3}$$

$$-\sum_{(j,i) \in A} x_{ji} + \sum_{(i,j) \in A} x_{ij} = z_i \qquad \forall i \in H \tag{4}$$

$$\sum_{k \in I} p^k w_{ij}^k - \rho x_{ij} \leq 0 \qquad \forall (i,j) \in A \tag{5}$$

$$y_{ij} - \sum_{k \in I} w_{ij}^k \leq 0 \qquad \forall (i,j) \in A \tag{6}$$

$$y_{ij} - x_{ij} \leq 0 \qquad \forall (i,j) \in A \tag{7}$$

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174965
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174965

$$x_{ij} - My_{ij} \leq 0 \qquad \forall (i,j) \in A \qquad (8)$$

$$\sum_{(i,j)\in A} y_{ij} = 1 \qquad \forall i \in H \qquad (9)$$

$$\pi_i \leq \Delta_i \qquad \forall i \in H \qquad (10)$$

$$\pi_i \leq \theta \qquad \forall i \in H \qquad (11)$$

$$\pi_j - \pi_i + (\Delta_j - S_i + c_{ij})y_{ij} + (\Delta_j - S_i - c_{ji})y_{ji} \leq \Delta_j - S_i \qquad \forall (i,j) \in A : i \neq 0 \qquad (12)$$

$$\sum_{(j,i)\in A} y_{ji} + z_i \geq 1 \qquad \forall i \in H \qquad (13)$$

$$z_i - M(1 - y_{ji}) \leq 0 \qquad \forall (j,i) \in A \qquad (14)$$

$$w_{ij}^k \in \mathbb{Z}^+,\ x_{ij} \in \mathbb{Z}^+, y_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall (i,j) \in A, \forall k \in I \qquad (15)$$

$$z_i \in \mathbb{Z}^+, \pi_i \geq 0 \qquad \forall i \in H \qquad (16)$$

A primeira função objetivo (1) visa minimizar a quantidade de monitores necessários para que todas as crianças sejam acompanhadas em seu caminho para a escola, enquanto o segundo objetivo (2) busca minimizar o trajeto de caminhada da criança que mais caminha. As duas funções objetivo têm como critério de desempate a escolha das rotas mais seguras, em que sua relevância é definida pelo valor de α. Por ser apenas um critério de desempate, α assume um valor pequeno. As restrições (3) asseguram a continuidade dos caminhos, ou seja, todas as crianças de idade k que entram em um nó devem deixá-lo seguindo em direção à escola. Analogamente, as restrições (4) garantem a continuidade dos caminhos para os monitores. As restrições (5) impõem que o número de monitores que percorre o arco (i, j) seja suficiente para supervisionar as crianças que também percorrem este arco. O parâmetro ρ é definido supondo que toda criança demande um nível de atenção igual a 1, no entanto, nesta restrição, a atenção exigida por crianças de diferentes idades é contabilizada com o auxílio do parâmetro p^k. As restrições (6)–(8) asseguram que a distância percorrida no arco (i, j) seja contabilizada se este arco for percorrido por uma criança ou por um monitor. As restrições (9) impõem que todos os nós sejam visitados. A distância limite que uma criança pode percorrer é dada pelas restrições (10), enquanto as restrições (11) contabilizam a distância percorrida pela criança que mais caminha. A distância percorrida de cada nó i até a escola é contabilizada nas restrições (12). As restrições (13) e (14) asseguram que os monitores só podem começar seu percurso em nós folhas. Finalmente, o domínio das variáveis é definido pela restrições (15) e (16).

3. Experimentos Computacionais

Os experimentos computacionais foram realizados em duas fases: i) avaliamos a influência da idade dos alunos no número de monitores necessários para acompanhá-los à escola em segurança; e ii) geramos soluções de compromisso entre os objetivos avaliados, assim, o tomador de decisões pode escolher a solução mais adequada para o contexto local.

Os testes computacionais foram realizados utilizando dez instâncias geradas artificialmente como descrito na Seção 3.1. O modelo foi descrito utilizando a linguagem de programação Python versão v3.10.11 e as instâncias foram resolvidas utilizando o software de otimização Gurobi

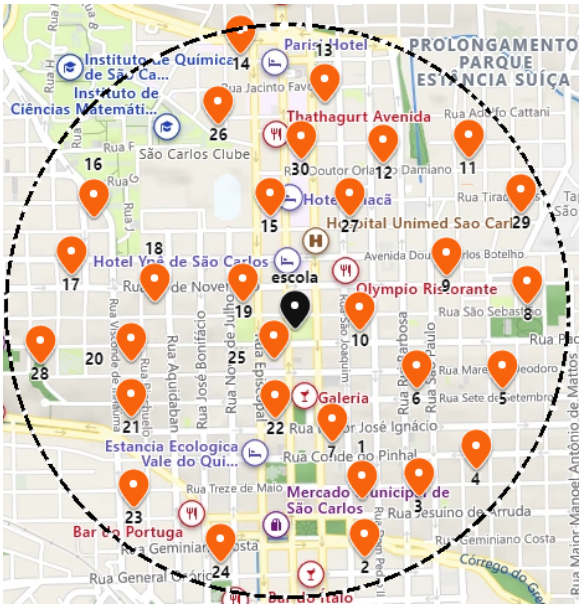
DOI: 10.59254/sbpo-2023-174965
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174965

v10.0.1. Os experimentos foram realizados em um *notebook* Inspiron 3480, Intel Core i5-8265U com 4 GB, sistema operacional Windows 21H2. Foi estabelecido o tempo limite de uma hora (3.600 segundos) para resolução de cada instância.

3.1. Geração das Instâncias

Geramos dez instâncias artificiais com base em endereços da cidade de São Carlos, SP. Escolhemos como ponto central a Escola Estadual Doutor Álvaro Guião. Considerando um raio de um quilômetro, centrado na escola, geramos 30 pontos aleatórios a partir do mapa da cidade. Estes pontos representam as casas dos alunos e são ilustrados na Figura 3. A escola está destacada em preto.

Figura 3: Pontos gerados ao redor da E. E. Dr. Álvaro Guião.



* Coordenadas representadas utilizando Google Maps [2023].

Para cada instância, selecionamos aleatoriamente 25 dos 30 pontos disponíveis. Consideramos a distância euclidiana entre os pontos, calculada em metros. O valor de S_i corresponde à distância do menor caminho do ponto i para a escola, ou seja, a distância euclidiana entre ambos. A proporção adicional que cada criança pode percorrer é definida por δ_i da seguinte forma:

$$\delta_i = \begin{cases} 2,0 & \text{para nós mais próximos da escola;} \\ 1,7 & \text{para nós “medianos”;} \\ 1,4 & \text{para nós mais afastados da escola.} \end{cases}$$

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174965
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174965

O número de crianças de cada idade em cada nó (q_i^k) e a qualidade do caminho entre os nós (d_{ij}) foram uniformemente gerados de acordo com as seguintes distribuições: q_i^k: $U[0;3]$ e d_{ij}: $U[0,01;0,3]$. O valor de α foi fixado em $0,01$ e $M = \sum_{i \in H,\ k \in I} q_i^k$.

Consideramos que os alunos possuem de 6 a 10 anos de idade, exigindo os seguintes níveis de atenção: $2,0$ para alunos de 6 anos, $1,5$ para alunos de 7 e 8 anos e $1,0$ para alunos com idade de 9 e 10 anos. Os monitores são capazes de supervisionar, com segurança, um grupo de alunos cuja somatória do níveis de atenção não ultrapasse $5,0$ unidades.

3.2. Influência da idade dos alunos na demanda de monitores

Nesta primeira etapa, realizamos testes computacionais para avaliar o efeito das faixas etárias dos alunos na quantidade de monitores necessários para que as rotas sejam realizadas em segurança. Estes experimentos foram conduzidos considerando apenas o objetivo de minimizar o número de monitores, ou seja, *Min* $f_1(z, y)$, o que resulta num modelo mono-objetivo.

Os resultados obtidos são reportados na Tabela 4. Na primeira coluna da tabela, descrevemos a instância. Nas três colunas seguintes, reportamos o número de monitores demandados ("N.Monitores (z)"), a distância máxima percorrida pelo aluno que mais caminha ("D.Max. (θ)") e o desvio percentual entre a melhor solução encontrada e o limitante dual do problema (GAP) considerando que todos os alunos demandam o mesmo nível de atenção (igual a 1,0). As três últimas colunas trazem as mesmas informações considerando que alunos de diferentes idades demandam níveis diferentes de atenção.

Tabela 4: Resultados computacionais considerando ou não as idades das crianças.

Instância	Mesmo nível atenção			Níveis de atenção distintos		
	N.Monitores (z)	D.Max. (θ)	GAP (%)	N.Monitores (z)	D.Max. (θ)	GAP (%)
1	38	1234	0,01	44	**1228**	1,10
2	38	**1165**	0,00	43	**1165**	1,47
3	37	**1131**	0,00	42	1232	0,69
4	36	**1244**	0,01	42	**1244**	1,95
5	34	1228	0,57	39	**1186**	0,91
6	36	**1161**	0,00	41	1228	0,00
7	39	1232	0,00	44	**1226**	0,67
8	33	**1228**	0,01	37	**1228**	0,30
9	39	**1244**	0,00	45	**1244**	1,01
10	34	**1237**	0,00	39	**1237**	1,88

Como podemos observar na Tabela 4, a solução ótima foi obtida para seis instâncias quando consideramos que todas as crianças demandam o mesmo nível de atenção e para apenas uma instância quando são considerados níveis de atenção distintos. Isso indica que é mais difícil obter uma solução comprovadamente ótima para a segunda versão do problema. Também constatamos que ao considerarmos as idades dos alunos, o número de monitores necessários para que eles caminhem em segurança para a escola aumenta. Como as crianças mais novas demandam

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174965
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174965

mais atenção dos monitores, esse comportamento era esperado, reafirmando a necessidade de tratar as idades dos alunos. Quanto à distância da criança que caminha mais, nem sempre ela diminui, indicando que é preciso tratá-la explicitamente como um objetivo.

3.3. Análise biobjetivo do problema estudado

Nesta segunda etapa dos testes computacionais, analisamos o problema biobjetivo definido na Seção 2.1. Como proposto, leva-se em consideração o nível de atenção diferenciado que cada criança demanda. Destacamos que modelos biobjetivo não têm solução ótima única, mas sim um conjunto de soluções eficientes que definem, na otimalidade, a chamada fronteira de Pareto. Para obter uma aproximação da fronteira de Pareto, utilizamos o método clássico ϵ-restrito.

Primeiramente, resolvemos as instâncias visando somente minimizar o número de monitores necessários para que as crianças caminhem em segurança até a escola (*Min* $f_1(z, y)$). Assim, obtivemos o número mínimo de monitores para cada instância (NM_{min}) e também o valor da distância percorrida θ_{f_1} para esse caso. Em seguida, resolvemos as instâncias tendo como objetivo minimizar a distância percorrida pela criança que mais caminha (*Min* $f_2(\theta, y)$). Obtivemos a distância mínima (θ_{min}) e o número mínimo de monitores considerando este objetivo (NM_{f_2}). Vale destacar que, do ponto de vista da distância mínima, a solução nesse caso é trivial, pois $\theta_{min} = \text{Max}\{S_i : i \in H\}$, ou seja, a menor distância é determinada pelo aluno que reside mais longe da escola. Desta forma, temos duas soluções da fronteira de Pareto, cada uma considerando apenas um dos objetivos estudados. Estes valores e o desvio da melhor solução obtida para seu limante dual são descritos na Tabela 5.

Tabela 5: Soluções obtidas considerando cada um dos objetivos separadamente.

Instância	**Min** $f_1(z, y)$			***min*** $f_2(\theta, y)$		
	NM_{min}	θ_{f_1}	GAP	NM_{f_2}	θ_{min}	GAP
1	44	1228	1,10	59	924	0,00
2	43	1165	1,47	56	924	0,00
3	42	1232	0,69	54	924	0,00
4	42	1244	1,95	56	924	0,00
5	39	1186	0,91	50	924	0,00
6	41	1228	0,00	50	896	0,00
7	44	1226	0,67	56	924	0,00
8	37	1228	0,30	49	924	0,00
9	45	1244	1,01	57	924	0,00
10	39	1237	1,88	50	924	0,00

Em seguida, mantemos $f_2(\theta, y)$ como função objetivo do problema e o número de monitores é adicionado como uma restrição, ou seja,

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174965
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174965

$$f_2(\theta, y) = \text{Min } \theta + \alpha \sum_{(i,j)\in A} d_{ij} y_{ij}$$

s. a

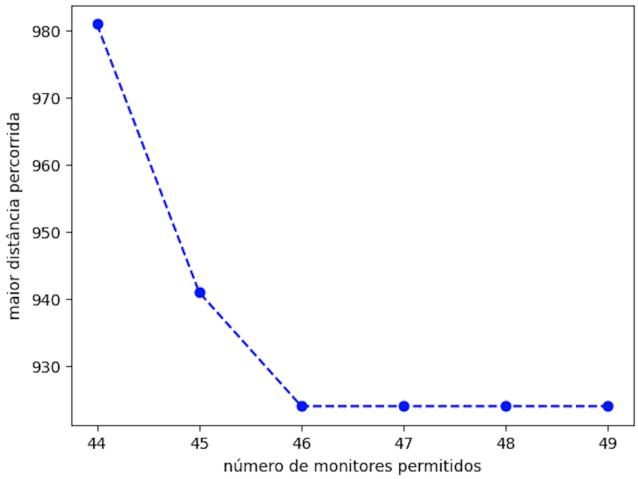
$$\sum_{i\in H} z_i \leq NM_{min} + \epsilon$$

$(3) - (16)$

O número mínimo de monitores (NM_{min}) é acrescido de ϵ unidades a cada resolução do problema. Assim, minimizamos a distância máxima percorrida considerando que podemos utilizar até $NM_{min} + \epsilon$ monitores com $0 \leq \epsilon \leq NM_{f_2} - NM_{Min}$ e inteiro. Desta forma, obtemos uma solução aproximada de Pareto para cada instância.

Na Figura 4, ilustramos a solução aproximada de Pareto para a Instância 7. Podemos observar que, ao aumentar o número de monitores em uma unidade, a distância percorrida pelo aluno que mais caminha diminui consideravelmente. A menor distância percorrida é atingida com 46 monitores, as soluções a partir de 47 monitores são dominadas, inclusive a com 56 monitores. Resultados análogos foram obtidos para as demais instâncias.

Figura 4: Aproximação da Fronteira de Pareto para a Instância 7.

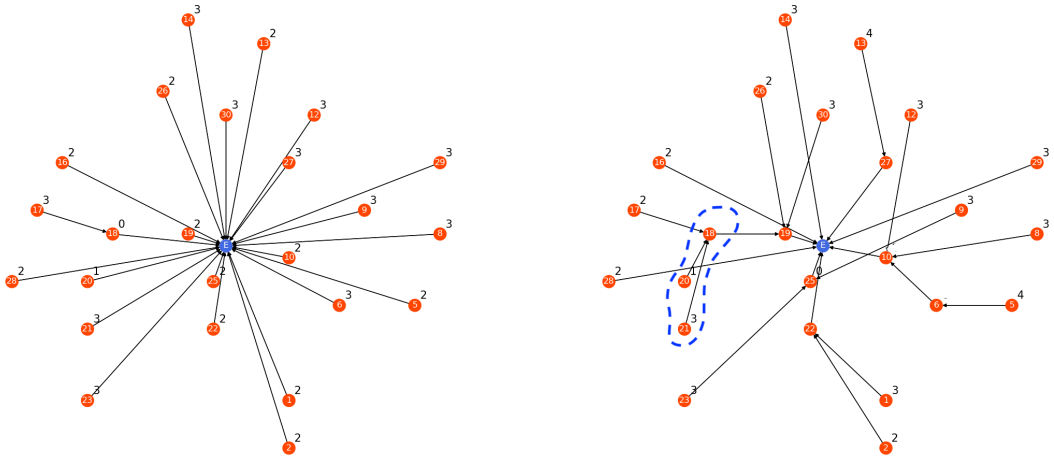


Além disso, é possível observar que na solução em que as crianças caminham menos são necessários 46 monitores, enquanto que, considerando apenas a minimização da distância como objetivo a solução demandava 56 monitores. Ilustramos essas duas soluções na Figura 5. É possível observar que na solução em que apenas a distância mínima é considerada, o número de monitores

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174965
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174965

em cada nó é suficiente para acompanhar as crianças do nó à escola, enquanto na solução em que o número de monitores é limitado, muitos monitores têm rotas que passam por mais de um nó (como destacado na Figura 5b), o que reduz consideravelmente o número total de monitores (aproximadamente 18%).

Figura 5: Soluções da Instância 7 considerando 56 e 46 monitores.



(a) 56 monitores

(b) 46 monitores

4. Conclusões e Pesquisa Futuras

Neste trabalho, abordamos o problema do ônibus escolar caminhante. No Brasil, é comum que alunos do primeiro ao quinto ano estudem num mesmo horário, ou seja, temos alunos de 6 a 10 anos indo num mesmo turno para a escola. Em geral, os alunos mais novos, quando caminham pelas ruas, demandam mais atenção de seu supervisor (monitor) que os mais velhos. Logo, na abordagem desenvolvida, tratamos esta questão.

Dois objetivos foram analisados em conjunto: i) minimizar o número de monitores necessários para que os alunos sigam caminhando para a escola com supervisão adequada; e ii) minimizar o trajeto percorrido pela criança que caminha mais até a escola. Estes objetivo são conflitantes e, para tratá-los, utilizamos a abordagem do ϵ-restrito.

Os experimentos computacionais realizados mostram que, como esperado, considerar a idade dos alunos é relevante na definição do número de monitores necessários para obter rotas seguras. Ao tratar o problema biobjetivo, pudemos gerar um conjunto de soluções aproximadas da fronteira de Pareto, a partir das quais o decisor poderá escolher a solução mais apropriada para o contexto da escola.

Como trabalhos futuros, pretendemos avaliar a resolução do problema estudado considerando instâncias de dimensões reais, utilizando tanto um software de otimização comercial quanto um software de otimização não comercial.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174965
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174965

Agradecimentos

Agradecimento à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro concedido (Processos 2021/11943-0 (bolsa país) e 2013/07375-0 (CEPID-CeMEAI)) e ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) (309161/2022-3). As autoras também agradecem ao Laboratório de Otimização do ICMC/USP (LOt) e ao ICMC/USP.

Referências

Chillón, P., Evenson, K. R., Vaughn, A., e Ward, D. S. (2011). A systematic review of interventions for promoting active transportation to school. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 8:10.

Google Maps (2023). Google my maps. `https://www.google.com/maps/d/`. Acessado: 2023-05-17.

Hayes, A., Wang, J. Y. T., e Nikitas, A. (2022). Spatial multicriteria decision analysis for walking school bus target development strategies. *Journal of Transport & Health*, 26:101481.

Kingham, S. e Ussher, S. (2007). An assessment of the benefits of the walking school bus in Christchurch, New Zealand. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41:502–510.

Lambiase, M. J., Barry, H. M., e Roemmich, J. N. (2010). Effect of a simulated active commute to school on cardiovascular stress reactivity. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42(8): 1609–1616.

McDonald, N. C. e Aalborg, A. E. (2009). Why parents drive children to school: implications for safe routes to school programs. *Journal of the American Planning Association*, 75(3):331–342.

Mendoza, J. A., Watson, K., Chen, T., Baranowski, T., Nicklas, T. A., Uscanga, D. K., e Hanfling, M. J. (2012). Impact of a pilot walking school bus intervention on children's pedestrian safety behaviors: A pilot study. *Health & Place*, 18:24–30.

Sunyer, J., Suades-González, E., García-Esteban, R., Rivas, I., Pujol, J., Alvarez-Pedrerol, M., Forns, J., Querol, X., e Basagaña, X. (2017). Traffic-related air pollution and attention in primary school children: short-term association. *Epidemiology*, 28(2):181–189.

Tresoldi, E., Malucelli, F., e Nonato, M. (2021). A personalized walking bus service requiring optimized route decisions: A real case. *European Journal of Operational Research*, 289(3): 855–866.

Van Dijk, M. L., De Groot, R. H. M., Van Acker, F., Savelberg, H. H. C. M., e Kirschner, P. A. (2014). Active commuting to school, cognitive performance, and academic achievement: an observational study in Dutch adolescents using accelerometers. *BMC Public Health*, 14:799.

Westman, J., Friman, M., e Olsson, L. E. (2017). What drives them to drive? Parents' reasons for choosing the car to take their children to school. *Frontiers in Psychology*, 8:1970.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174965
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174965