

Campus São Mateus
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

OTIMIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE PACIENTES EM HOSPITAIS DE GRANDE PORTE

*OPTIMIZING PATIENT TRANSPORTATION IN LARGE HOSPITALS**OPTIMIZACIÓN DEL TRANSPORTE DE PACIENTES EN GRANDES HOSPITALES*

Ruan Myller Magalhães de Oliveira^{1*}, Layane Rodrigues de Souza Queiroz², &
Thiago Alves de Queiroz³

¹³ Instituto de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Catalão, Brasil² Instituto de Matemática e Estatística, Universidade Federal de Goiás, Brasil^{1*} ruanmyller@discente.ufcat.edu.br ² layanequeiroz@ufg.br ³ taq@ufcat.edu.br

ARTIGO INFO.

Publicado: 06.12.2024

PALAVRAS-CHAVE: Transporte de pacientes; Problema de coleta e entrega; Heurística de reotimização; Busca tabu.

KEYWORDS: Patient Transportation; Pickup and delivery problem; Reoptimization heuristic; Tabu search.

PALABRAS CLAVE: Transporte de pacientes; Problema de recogida y entrega; Heurística de reoptimización; Búsqueda tabú.

***Autor Correspondente:** Oliveira, R. M. M. de.

RESUMO

O presente trabalho lida com o problema de coleta e entrega de pacientes entre unidades distintas de um mesmo hospital, que particularmente surge em hospitais que ocupam uma grande área geográfica e, por isso, possuem diversos pavilhões com serviços distintos entre si. O problema considera uma frota de veículos, cada qual com capacidade de transporte limitada. As solicitações para o transporte de pacientes são recebidas ao longo do dia e são completamente desconhecidas até a sua emissão. O objetivo do problema é determinar rotas, atualizadas de forma dinâmica, para cada veículo de modo que o atraso total ponderado associado ao atendimento das solicitações seja mínimo. A proposta deste trabalho envolve uma heurística de reotimização baseada em políticas que observam características dos pacientes e do hospital, além de uma metaheurística de busca tabu. A heurística fornece soluções satisfatórias para o problema sobre instâncias de diferentes tamanhos.

ABSTRACT

This work handles the problem of picking up and delivering patients among the distinct units of a hospital. This problem arises in hospitals that occupy a large geographic area and, hence, they have several units with different services from each other. The problem assumes a fleet of vehicles, each with a limited transport capacity. Requests for patients' transportation are received over the day and are completely unknown once released. The problem's objective is to determine routes, updated dynamically, for each vehicle so that the total weighted tardiness associated with servicing the requests is minimal. The proposal of this work relies on a re-optimization heuristic based on policies that use characteristics from the patients and the hospital, besides a tabu search metaheuristic. The heuristic approach can provide satisfactory solutions to the problem, considering instances of different sizes.

RESUMEN

Este trabajo aborda el problema de recogida y entrega de pacientes entre las distintas unidades de un hospital. Este problema se presenta en hospitales que ocupan una gran área geográfica y, por lo tanto, cuentan con varias unidades con servicios diferentes entre sí. El problema supone una flota de vehículos, cada uno con una capacidad de transporte limitada. Las solicitudes de transporte de pacientes se reciben durante el día y son completamente desconocidas una vez que se liberan. El objetivo del problema es determinar rutas, actualizadas dinámicamente, para cada vehículo de modo que la tardanza total ponderada asociada a la atención de las solicitudes sea mínima. La propuesta de este trabajo se apoya en una heurística de reoptimización basada en políticas que utilizan características de los pacientes y del hospital, además de una metaheurística de búsqueda tabú. El método heurístico puede proporcionar soluciones satisfactorias al problema, considerando instancias de diferentes tamaños.

INTRODUÇÃO

Com o crescimento e a expansão da infraestrutura hospitalar, algumas instituições de saúde passaram a ocupar largas áreas geográficas. Particularmente nessas organizações, pisos, pavilhões e edifícios integram um mesmo ambiente. Entretanto, a distância entre cada uma dessas unidades não pode ser ignorada, principalmente diante de variáveis como bem-estar, satisfação e cuidado dos pacientes, que estão diretamente ligadas à qualidade do serviço oferecido (André et al., 2024).

Nesse sentido, o transporte de pacientes entre pavilhões e andares adquire relevância suficiente para ser resolvido de forma otimizada. Configura-se como uma atividade logística importante para a avaliação do desempenho geral do hospital (Landry & Philippe, 2004). O departamento ou setor responsável, ao longo de um intervalo de tempo estipulado (por exemplo, um dia), recebe solicitações em tempo real (isto é, dinamicamente) acerca dos pacientes a serem transportados. À medida em que é notificado, o setor busca, continuamente, atualizar a rota de cada veículo entre os diferentes locais em que se encontram os pacientes, de modo que o deslocamento seja otimizado. As decisões podem se orientar por critérios diversos, como a redução de custos ou satisfação do paciente (Beaudry et al., 2010), e estão restritas por condições tais como a capacidade e a disponibilidade de veículos, além de fatores como, por exemplo, a urgência de um paciente.

É possível identificar todo esse processo decisório dentro do Problema de Coleta e Entrega. Mais especificamente, como pontuado por Beaudry et al. (2010), no transporte de pessoas, sobretudo no contexto hospitalar, o problema assume características para ser integrado à classe dos problemas *Dial-a-Ride* (DARP). O DARP se distingue de um clássico problema de coleta e entrega pelo acréscimo de restrições relacionadas às pessoas, com a finalidade de lhes assegurar o bem-estar, o que impacta diretamente em como as rotas dos veículos são determinadas.

Este artigo busca dar continuidade a trabalhos da literatura, em especial, Fonseca (2023), ao lidar com uma variante dinâmica do DARP, na qual a solução (isto é, a definição de rotas) é obtida à medida que novas solicitações de pacientes chegam, no desenrolar de um dia. Propõe-se uma heurística de reotimização aliada a políticas baseadas em informações dos pacientes e do hospital, além de uma metaheurística de busca tabu. Com novas solicitações, deve-se tomar uma decisão com vistas a otimizar a solução, ou seja, minimizando o atraso total ponderado, dado que as janelas de tempo para o atendimento das solicitações não são rígidas (podem ser violadas).

O artigo está organizado da seguinte maneira. Na próxima seção é realizada uma breve revisão da literatura na área. Em seguida, em uma nova seção, o problema é adequadamente descrito, com suas restrições e seu objetivo. Depois, outra seção apresenta a ideia por trás da heurística de reotimização, trazendo detalhes da busca tabu e de duas políticas para a tomada de decisões. Após, tem-se os resultados experimentais em uma nova seção, com comparações e discussões sobre os algoritmos. Por fim, conclui-se o estudo em uma última seção, com perspectivas para o desenvolvimento futuro de outros trabalhos.

LITERATURA RELACIONADA

Como indicado por Vidal, Laporte e Matl (2020), apesar de boa parte da literatura sobre problemas de roteamento de veículos lidarem com a versão estática e determinística, na qual as informações são todas conhecidas do princípio ao fim e com exatidão, um número crescente de trabalhos está lidando com a versão dinâmica e considerando a parte estocástica desses problemas, como forma de se aproximar cada vez mais da realidade.

O DARP é um problema conhecido e abordado frequentemente na literatura de problemas de roteamento de veículos (Toth & Vigo, 2014). Quando relacionado ao transporte de pessoas, em um contexto de coleta e entrega, uma de suas características é a inclusão de janelas de tempo como forma de assegurar o bem-estar.

O DARP é considerado um problema NP-difícil e, no entanto, o transporte de pacientes deve ser decidido rapidamente, visto que a natureza dinâmica do problema e a urgência dos pacientes não permitem demora no atendimento das solicitações. Por isso, para se obter soluções dentro de um tempo computacional razoável e que se encaixe no contexto em questão, heurísticas e metaheurísticas são amplamente utilizadas (Beaudry et al., 2010).

À medida em que as solicitações são recebidas pelo setor vinculado ao transporte de pacientes, esse departamento lida com um processo decisório com vistas a assegurar o cumprimento do objetivo proposto. Neste trabalho, o objetivo segue a linha do trabalho de Fonseca (2023), que investiga a minimização do atraso total ponderado ao considerar a existência de janelas de tempo não-rígidas para o atendimento das solicitações.

Cordeau e Laporte (2003) desenvolveram uma metaheurística de busca tabu para resolver o DARP em sua versão estática e na presença de múltiplos veículos. Cordeau e Laporte (2007) apresentaram as características principais, além de alguns modelos e algoritmos para lidar com o DARP. Este problema consiste em determinar rotas para cada um dos veículos disponíveis, visando o atendimento de solicitações através da realização de coletas e entregas em pontos distintos de uma dada área geográfica. Em geral, busca-se planejar um conjunto de rotas de custo total mínimo.

Berbeglia et al. (2010) resolveram uma variante do DARP com aspectos dinâmicos, considerando possibilidades diferentes com respeito aos eventos que ocorrem no horizonte de decisões. Nesse sentido, existem ações a serem executadas por um veículo assim que este finaliza o atendimento a uma coleta ou a uma entrega, ou também com a chegada de novas solicitações. Os autores investigaram o impacto de ações do tipo “esperar”, “ir”, “aceitar” ou “rejeitar”. Outro importante ponto do trabalho deles fundamenta-se na criação de cenários, baseados em distribuições de probabilidade, para auxiliar na previsão de solicitações futuras.

Beaudry et al. (2010) lidaram com o DARP na sua forma dinâmica considerando uma frota heterogênea de veículos para o transporte de pacientes entre unidades de um hospital na Alemanha. As solicitações chegam de forma dinâmica, ou seja, não são conhecidas até que o paciente seja liberado para o transporte. Os autores forneceram uma descrição detalhada do problema e propuseram uma heurística de duas fases. Na primeira fase, uma heurística

simples de inserção gera uma solução viável. Esta solução é, então, melhorada com uma busca tabu que faz uso de dois tipos de estrutura de vizinhança.

O DARP também foi investigado por Luo et al. (2019). Um algoritmo de duas fases foi proposto para a resolução do problema, com o objetivo de minimizar a distância total percorrida pelos veículos, bem como maximizar o número de solicitações atendidas.

Uma variante do DARP envolvendo a prestação de serviços de caráter não emergencial por ambulâncias foi abordada por Zhao et al. (2022). A variante consiste na coleta de pacientes num contexto em que janelas de tempo devem ser respeitadas. O tempo de deslocamento durante o atendimento dos pacientes também possui restrições correlatas. Além disso, os autores combinaram uma busca em vizinhança larga e adaptativa com uma busca local, criando um algoritmo híbrido para resolver o problema.

Côté et al. (2020) lidaram com o problema de transporte de pacientes de um hospital na Itália. O DARP foi tratado na sua versão dinâmica e dinâmica-estocástica. O objetivo consistiu em atender todas as solicitações de forma a minimizar o atraso total ponderado utilizando veículos de capacidade e características diferentes. Os autores propuseram uma busca em vizinhança larga e adaptativa que foi incorporada em uma heurística de reotimização.

Fonseca (2023) implementou um recozimento simulado e cinco políticas para a tomada de decisão, todas incorporadas em uma heurística de reotimização. As políticas são baseadas na janela de tempo, horário de liberação e nível de urgência paciente, além do horário de chegada do veículo para atender a solicitação.

O presente artigo lida com a variante dinâmica do DARP também encontrada nos trabalhos de Beaudry et al. (2010), Côté et al. (2020) e Fonseca (2023), em virtude da similaridade quanto à definição do problema e do objetivo, bem como à proposta de resolução, que é baseada em uma heurística de reotimização. A diferença está nas políticas propostas e no uso de uma busca tabu para o processo de tomada de decisões. Além disso, o problema que é resolvido aqui não possui elementos estocásticos, mas as informações, uma vez reveladas, são conhecidas com exatidão, resultando na variante dinâmica e determinística.

METODOLOGIA

Seguindo a proposta de Creswell (2007), o presente artigo é classificado como uma pesquisa de natureza aplicada, uma vez que busca pela aplicação de conhecimentos existentes, é considerada explicativa, pois busca identificar e explicar os fatores que levam aos fenômenos existentes, e é de abordagem quali-quantitativa, pois envolve aspectos qualitativos e quantitativos, trazendo subjetividade e objetividade nas análises e comparações. Ela ainda faz uso de um procedimento bibliográfico, partindo de outros trabalhos da literatura para se fundamentar e contribuir com o estado-da-arte, e experimental, contendo a execução de testes numéricos sobre instâncias para validar o método de solução que é desenvolvido para o problema de interesse.

Os objetivos da pesquisa são alcançados com o estudo de um problema real, que envolve o transporte de pacientes entre unidades de um mesmo hospital, e a proposta de uma heurística de reotimização com diferentes estratégias para a tomada de decisões.

Inicia-se a pesquisa com uma revisão da literatura, para entender o problema, suas restrições e objetivo, bem como conhecer o que a literatura tem proposto em termos de métodos de solução. Em seguida, desenvolve-se uma heurística de reotimização com base em duas políticas e na metaheurística de busca tabu.

Todos os algoritmos são codificados com o uso da linguagem de programação de alto nível Python. Em seguida, instâncias de outros trabalhos da literatura são usadas para testar e validar a heurística de reotimização proposta. Com isso, comparações em termos de valor da solução e tempo computacional são feitas com outras heurísticas da literatura, resultando em discussões e comentários acerca da eficácia da heurística proposta e sua aplicabilidade.

DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

RESTRIÇÕES E OBJETIVO

O problema deste artigo consiste em uma variante do DARP relacionada ao transporte de pacientes, de natureza dinâmica e determinística. No desenrolar do tempo, as ações e decisões, como o movimento dos veículos e o atendimento das solicitações, acontecem, concomitantemente. Por isso, considera-se um horizonte de tempo discretizado em minutos, iniciando no tempo 0 e finalizando após atender todas as solicitações.

Para o contexto hospitalar, considera-se um conjunto P de pavilhões dispostos geograficamente pela área ocupada. A frota homogênea de veículos V é outro conjunto do problema. Cada veículo $v \in V$ é disposto a princípio em um depósito, que pertence ao conjunto P , e do qual partem em seu movimento inicial. Utiliza-se um grafo direcionado $G = (P, A)$, no qual o conjunto de nós P é o mesmo conjunto de pavilhões, enquanto A representa o conjunto de arcos, os quais, por sua vez, indicam a ligação direta entre cada par (p_x, p_y) de pavilhões. Estes arcos são ponderados e podem possuir uma distância de percurso ou um tempo de percurso entre os pares de nós. Neste artigo, considera-se o tempo gasto por um veículo $\Delta t_{(p_x, p_y)}$ para ir do pavilhão p_x diretamente para o p_y .

O problema possui ainda um conjunto de solicitações S . As solicitações surgem no horizonte de tempo e têm as informações dos pacientes a serem transportados. As informações presentes em uma solicitação $s \in S$ envolvem: momento em que o paciente é liberado l_s ; início e fim de sua janela de tempo, respectivamente, i_s e f_s ; grau de urgência do paciente u_s ; seu identificador d_s ; e, por fim, os nós (pavilhões) onde acontecem a coleta, n_s^c , e a entrega, n_s^e , do paciente.

No campo das restrições, uma solução é considerada viável se respeitar condições específicas. Uma delas considera a capacidade de cada veículo, que, em nenhum momento, pode ser extrapolada. Outra diz respeito a coleta e a entrega. Uma entrega deve ocorrer em um tempo superior ao da sua respectiva coleta e ambas devem ser feitas pelo mesmo veículo. Pelo fato de o problema ser dinâmico, uma solicitação s passa a ser conhecida pelo departamento de

transporte somente a partir da sua liberação l_s . Isto impõe que a coleta do paciente deve ocorrer após esse momento, assim como qualquer outra decisão relacionada a tal solicitação.

Por outro lado, não há imposições quanto ao fim da janela de tempo estipulada para cada paciente, pois, embora seja conhecida, ela pode ser violada. Entretanto, é a partir dessa violação que se mensura a qualidade de uma solução: o atraso a_s indica se o cumprimento de uma solicitação aconteceu após o fim da sua janela de tempo ou não. Em outras palavras, trata-se da diferença entre o momento em que a solicitação s teve o seu paciente entregue e o fim de sua janela de tempo f_s . O objetivo do problema é determinar uma rota para cada veículo de forma a minimizar o atraso total ponderado, o qual equivale à soma dos atrasos ponderados pela urgência de cada solicitação.

HEURÍSTICA PROPOSTA

DETALHES E ALGORITMO

Heurísticas têm sido usadas continuamente para lidar com problemas de otimização complexos, produzindo de forma rápida soluções satisfatórias, ainda que sem garantir a otimalidade. A heurística implementada neste trabalho faz decisões sobre o horizonte de tempo discretizado em minutos. As solicitações são conhecidas pelo departamento de transporte devido à liberação do paciente, sendo então incluídas em uma lista de coleta L_c . Os pacientes cujas solicitações se encontram nessa lista permanecem à espera da coleta. As decisões seguintes, portanto, devem prever o deslocamento de algum veículo com vistas a assegurar a coleta dos pacientes em espera. Uma vez coletado o paciente, sua solicitação é retirada da lista de coleta e adicionada na lista de entrega L_e^v do veículo v .

Cada veículo está associado a um vetor M_v contendo cada um de seus movimentos de coleta e de entrega, desde os já executados ou em andamento, até aqueles atribuídos ao veículo para o futuro, conforme as decisões tomadas sobre as listas de coleta e de entrega. Os veículos com uma ação em andamento não podem iniciar outra ação de imediato. É necessário que se termine o movimento e, em seguida, inicie outra ação ou permaneça em espera. Em virtude do contexto dinâmico, os movimentos executados ou em andamento não podem ser remanejados e realocados no vetor M_v , visto que representam o passado ou um presente inalterável. O mesmo, porém, não se aplica aos movimentos programados para o futuro.

À medida que novas solicitações surgem nos instantes t e exista algum veículo disponível, diz-se que há a ocorrência de um evento. Com a inserção de novas informações a partir de um evento, uma rota planejada anteriormente pode levar a uma solução de menor qualidade se comparada a outra possível rota. Da mesma forma, a solução anterior pode continuar como estava em termos de valor objetivo, ou até melhor. Assim, para otimizar as rotas de cada veículo, propõe-se aplicar uma metaheurística de busca tabu na ocorrência de cada evento. Desta forma, trata-se de uma heurística de reotimização que faz uso da busca tabu na ocorrência dos eventos.

A heurística de reotimização está descrita no algoritmo da Figura 1. A princípio, a lista de coleta L_c é criada (linha 1) e permanece vazia até que o laço que representa o horizonte de tempo se inicie. Com o decorrer do tempo, novas solicitações são conhecidas e os pacientes

são liberados para o transporte. Assim, quando $l_s \leq t$, a lista L_c deve ser atualizada (linha 3), uma vez que existem pacientes à espera para serem coletados. O laço de repetição das linhas 4-8 percorre todos os veículos. Dentro deste laço, o condicional (linha 5) aponta que a reotimização acontecerá caso algum veículo esteja disponível no momento, ou seja, não está em movimento, mas se encontra parado em determinado nó. Se sim, uma política é utilizada, na linha 6, para fornecer uma solução prévia e viável antes da aplicação da busca tabu.

Figura 1. Heurística de reotimização proposta para o problema

- 1. Sejam as listas de coleta e entrega inicialmente vazias**
- 2. Para $t = 0$ até o fim do horizonte de tempo faça:**
- 3. Atualize a lista de coleta com solicitações, ou seja, quando $l_s \leq t$**
- 4. Para cada veículo $v \in V$ faça:**
- 5. Se o veículo v estiver disponível então:**
- 6. Utilize uma política para atualizar a solução M_v**
- 7. Aplique a busca tabu para otimizar M_v**
- 8. Atualize o status de solicitações em andamento em M_v**

Fonte: Autores (2024).

Neste artigo, apresentam-se duas políticas para definir movimentos em M_v conforme as solicitações disponíveis no tempo t , nas listas de coleta e de entrega: Pol₁, que calcula o produto entre o tempo de deslocamento do nó onde o veículo está até o nó solicitado pelo fim da janela de tempo do paciente; Pol₂, que calcula o produto entre o grau de urgência pela taxa de progresso da janela de tempo de um paciente. Assim, dentre todas as solicitações possíveis, escolhe-se aquela mais promissora no instante t , sob dada política aplicada. Essas políticas podem também ser aplicadas isoladamente para obter uma solução do problema. Isso é feito para a obtenção de resultados a título de comparação na seção de experimentos computacionais.

A busca tabu é aplicada na linha 7 do algoritmo sobre as decisões planejadas para cada veículo, em uma tentativa de otimizá-las ainda mais. Na linha 8, qualquer movimento de um veículo v que se inicie no instante t é referenciado como “em andamento” e não pode mais ser alterado por operadores da busca tabu.

A busca tabu foi proposta por Glover (1989). É uma metaheurística e, por isso, como definido por Talbi (2009), fornece uma estratégia de orientação para o projeto de heurísticas. Ela apresenta um comportamento muito similar ao da busca local ao procurar, no espaço de busca, soluções que minimizem (ou maximizem) o objetivo do problema. Entretanto, é em sua memória (de curto, médio e/ou longo prazo) que se encontra o principal destaque da busca tabu. Tal característica é uma tentativa de evitar soluções repetidas e diversificar a busca, de modo que elas sejam diferentes das anteriores uma vez que passam a compor uma lista tabu de soluções, resultando em uma melhor exploração do espaço de soluções.

Em seu funcionamento, a busca tabu explora a vizinhança de uma solução inicial (obtida, por exemplo, por uma das políticas anteriores) para atualizar as decisões ao passo em que os eventos ocorram. Diferentes operadores podem ser usados para explorar a vizinhança de uma solução. Isso se dá pela modificação das decisões no vetor M_v de cada veículo v , o qual contém os movimentos de coleta e entrega. Desenvolvem-se os operadores N_1 e N_2 para modificar as decisões neste vetor. Através de movimentos de troca e inserção sobre M_v , os operadores obtêm novas soluções. No entanto, não há sempre garantia de que as novas soluções serão viáveis, sendo necessário que estas respeitem as restrições do problema.

Cabe ao operador N_1 escolher, aleatoriamente, duas posições dentro do vetor M_v , representadas por i e j , e trocar os seus conteúdos. A partir da escolha dessas posições, surgem diferentes casos: pares (I) coleta-coleta, (II) coleta-entrega, (III) entrega-coleta, (IV) entrega-entrega. Supondo que essas situações descrevam posições escolhidas, mas ainda não alteradas, e que o operador sempre atue sobre soluções viáveis, tal operação pode resultar em excesso no número de pacientes em um veículo, possível nas situações em que as posições são de tipos diferentes (isto é, II e III). Outra violação pode ocorrer ao desrespeitar a ordem de coleta e de entrega para um mesmo paciente, possibilidade que pode ser encontrada nas situações I, II e IV. Lidar e corrigir tais violações é essencial para o correto funcionamento da busca tabu e, então, garantir soluções viáveis para o problema após a aplicação do operador.

O operador N_2 , por sua vez, é responsável por escolher duas posições, aleatoriamente, dentro do vetor M_v , por exemplo, i e j , e inserir o conteúdo da posição em i na posição imediatamente anterior à posição em j . Tal operação se denomina inserção. Da mesma forma que para o operador N_1 , de acordo com o tipo de cada posição e a ordem assumida dentro do vetor, casos diversos naturalmente se manifestam: (a) avanço de coleta, (b) avanço de entrega, (c) recuo de coleta e (d) recuo de entrega. Um avanço acontece quando $i < j$. Do contrário, quando $i > j$, tem-se um recuo. Não há operação quando i e j indicam a mesma posição ou i encontra-se imediatamente antes de j . A aplicação do operador N_2 sobre o vetor de decisões de um veículo pode resultar em violação das restrições do problema. Em todas as situações o número de pacientes se altera ao se fazer uma operação de inserção. Por isso, é necessário verificar se a capacidade máxima foi ou não extrapolada. Há também um cuidado quanto às situações (a) e (d), pois são potenciais pontos de violação da ordem de coleta e de entrega.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A seguir são apresentados resultados experimentais obtidos pela resolução do DARP dinâmico, que envolve o transporte de pacientes entre unidades de um hospital, pela heurística de reotimização. Todos os algoritmos foram implementados na linguagem de programação Python e a realização dos testes ocorreu em um computador com processador Intel Core i5-1135G7 2,40GHz, 8 GB de RAM e sistema operacional Windows 11. Tais experimentos computacionais se basearam em 50 instâncias, considerando um hospital com 5 pavilhões distintos. Cada instância foi resolvida 10 vezes, para que uma média fosse obtida e garantisse mais confiabilidade ao resultado reportado. Essas instâncias foram usadas por Fonseca (2023) e, por isso, são usadas para comparar com os seus melhores resultados.

As instâncias de Fonseca (2023) foram geradas de forma aleatória. O número de solicitações varia de 20, 40, 60, 80 e 100. Elas ainda consideram um fator de chegada, que representa um intervalo de tempo entre cada liberação de paciente, sendo eles: 0,2 (mais próximos uns dos outros); 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,25; 1,50; 1,75; 2,0; 3,0 (mais distantes uns dos outros). Para cada número de solicitações, foram geradas 10 instâncias distintas, que consideram somente o fator de chegada como diferença. O tempo de deslocamento de um veículo entre dois pavilhões quaisquer foi gerado aleatoriamente entre 1 e 20 minutos.

Para a resolução das instâncias, considera-se uma configuração de hospital com dois veículos, cada um com capacidade máxima de até dois pacientes simultaneamente transportados. Para a busca tabu, usa-se uma memória de curto prazo, tal que a cada operador aplicado, guarda-se na lista tabu as posições i e j escolhidas, bem como as solicitações que ali se encontram. Elas são bloqueadas para não se repetirem por duas vezes, até que saem da lista tabu e podem ocorrer novamente.

As Tabelas 1 e 2 contêm os resultados obtidos com a heurística de reotimização, bem como com as políticas aplicadas individualmente sobre cada uma das 50 instâncias. Cada linha da tabela apresenta a solução obtida pelo método (VS é o atraso total ponderado), bem como o tempo de execução em segundos. Os resultados são comparados com a política G5 e a heurística de reotimização com recozimento simulado (SA - D) de Fonseca (2023). As duas políticas propostas na seção anterior são referenciadas como Pol₁ e Pol₂, enquanto “TS - Dinâmico” representa a heurística de reotimização que usa a política Pol₁ para atualizar a solução (linha 6 do algoritmo na Figura 1) e, em seguida, aplicar a busca tabu (linha 7 do algoritmo na Figura 1).

Observando os resultados das Tabelas 1 e 2, acerca do desempenho de cada heurística, a política Pol₁ apresenta um tempo de execução médio de 0,007 segundos e um atraso médio de 608,36. Para a política Pol₂, tem-se um tempo médio de 0,011 segundos e 1283,22 como valor médio da solução. Para a heurística de reotimização com busca tabu, tais valores são de, respectivamente, 11,13 segundos e 817,6. Ressalta-se que para 6 instâncias, o valor da solução é igual a 0, ou seja, sem atraso, com a heurística de reotimização proposta. No entanto, há também soluções relativamente de baixa qualidade, tal qual a da instância O100_H5_R1 calculada pela política Pol₂.

Com exceção da política Pol₂, as demais heurísticas, Pol₁ e TS - Dinâmico, possuem valores de solução similares e relativamente condizentes com a literatura. Entretanto, vale destacar que a heurística de reotimização com busca tabu não consegue superar, na média, a política Pol₁, cujo valor de solução médio é igual a 608,36. Percebe-se que há um baixo desempenho da TS - Dinâmico, particularmente, em instâncias com os menores fatores, como é o caso das instâncias O100_H5_R1 e O80_H5_R1, nas quais o valor da solução é relativamente pior do aquele reportado pela política Pol₁.

Tabela 1. Resultados para as instâncias com 20, 40 e 60 solicitações

Instância	G5	SA - D	Pol ₁		Pol ₂		TS - Dinâmico	
	VS	VS	Tempo	VS	Tempo	VS	Tempo	VS
O20_H5_R1	56	33	0,001	160	0,001	180	0,98	230
O20_H5_R2	486	112	0,001	561	0,003	469	1,22	182
O20_H5_R3	104	104	0,005	399	0,001	12	2,00	12
O20_H5_R4	24	18	0,005	196	0,006	36	2,06	16
O20_H5_R5	80	80	0,003	80	0,005	76	2,33	28
O20_H5_R6	92	53	0,003	38	0,008	76	1,72	32
O20_H5_R7	40	40	0,002	4	0,003	8	1,88	4
O20_H5_R8	84	84	0,003	28	0,005	28	2,02	28
O20_H5_R9	36	36	0,002	0	0,006	0	2,02	0
O20_H5_R10	76	76	0,003	0	0,002	0	1,28	0
O40_H5_R1	985	985	0,006	1123	0,006	1615	5,10	924
O40_H5_R2	435	435	0,008	595	0,006	971	5,38	324
O40_H5_R3	103	103	0,005	322	0,009	130	10,01	177
O40_H5_R4	104	104	0,008	295	0,008	196	6,75	96
O40_H5_R5	132	132	0,008	84	0,014	104	7,75	64
O40_H5_R6	372	372	0,006	220	0,016	321	7,63	252
O40_H5_R7	120	120	0,009	144	0,017	124	7,08	144
O40_H5_R8	348	348	0,002	44	0,006	48	3,20	44
O40_H5_R9	8	8	0,005	8	0,008	12	4,32	8
O40_H5_R10	156	156	0,001	0	0,008	0	1,50	0
O60_H5_R1	1018	1018	0,014	1638	0,008	4794	14,33	1828
O60_H5_R2	682	682	0,011	798	0,013	2949	18,49	1613
O60_H5_R3	33	33	0,011	297	0,011	304	15,91	136
O60_H5_R4	448	448	0,025	163	0,016	150	21,23	228
O60_H5_R5	280	280	0,011	480	0,016	256	19,08	276
O60_H5_R6	164	164	0,002	76	0,008	68	10,42	32
O60_H5_R7	84	84	0,005	16	0,013	16	6,74	16
O60_H5_R8	156	156	0,006	48	0,006	88	7,33	48
O60_H5_R9	280	280	0,003	40	0,009	28	13,90	40
O60_H5_R10	272	272	0,001	44	0,003	48	10,05	44

Fonte: Autores (2024).

Ao comparar com Fonseca (2023), nota-se que o SA-D apresenta melhor valor de solução para 12 instâncias, enquanto a heurística de reotimização com busca tabu conseguiu ser melhor em 35 instâncias. Nota-se que o SA - D é melhor nas instâncias menores e com fator menor, enquanto a heurística TS - Dinâmico consegue ser melhor nas instâncias com mais solicitações e maior fator.

No que diz respeito ao tempo de execução, como esperado, a heurística de reotimização com busca tabu obtém uma média de tempo computacional elevado em relação às demais políticas, uma vez que invoca a busca tabu por cada evento ocorrido. Os tempos de execução das políticas Pol₁ e Pol₂, ainda que somados, não ultrapassam 0,012 segundos. A instância que requer o maior tempo computacional é a O100_H5_R2, com a heurística TS - Dinâmico necessitando de 43,25 segundos.

Tabela 2. Resultados para as instâncias com 80 e 100 solicitações

Instância	G5	SA - D	Pol ₁		Pol ₁		TS - Dinâmico	
	VS	VS	Tempo	VS	Tempo	VS	Tempo	VS
O80_H5_R1	6114	6114	0,022	6233	0,016	12319	30,14	9704
O80_H5_R2	712	712	0,019	1180	0,023	5405	26,86	2947
O80_H5_R3	479	479	0,006	931	0,028	1410	32,74	1022
O80_H5_R4	286	286	0,011	211	0,009	336	16,01	497
O80_H5_R5	228	228	0,008	131	0,017	346	13,60	132
O80_H5_R6	496	496	0,008	160	0,013	213	9,36	128
O80_H5_R7	144	144	0,005	0	0,011	0	8,54	0
O80_H5_R8	124	124	0,003	28	0,011	28	6,36	28
O80_H5_R9	264	264	0,003	4	0,005	4	6,49	4
O80_H5_R10	260	260	0,003	0	0,009	0	2,22	0
O100_H5_R1	8720	8720	0,014	10562	0,022	25531	33,75	16990
O100_H5_R2	1046	1046	0,017	1174	0,030	2852	43,25	1198
O100_H5_R3	1344	1344	0,022	1083	0,028	1421	39,77	831
O100_H5_R4	638	638	0,008	72	0,020	370	14,53	153
O100_H5_R5	416	416	0,009	223	0,013	308	22,62	140
O100_H5_R6	536	536	0,009	112	0,027	104	14,47	104
O100_H5_R7	208	208	0,006	121	0,009	107	5,04	0
O100_H5_R8	496	496	0,003	56	0,014	60	7,09	56
O100_H5_R9	164	164	0,003	184	0,011	188	6,03	68
O100_H5_R10	192	192	0,001	52	0,003	52	3,94	52

Fonte: Autores (2024).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho propõe uma heurística de reotimização com o emprego da busca tabu para lidar com o problema de coleta e entrega de pacientes na sua variante dinâmica. O objetivo é reduzir o atraso total ponderado que ocorre devido ao desrespeito das janelas de tempo associadas as solicitações de transporte de pacientes. Além dessa heurística, duas políticas foram definidas e usadas para comparar com o uso da busca tabu.

Os experimentos computacionais envolveram 50 instâncias da literatura, para um hospital com 5 pavilhões. Os resultados desses experimentos sugerem que, a depender do fator, as políticas desenvolvidas podem alcançar resultados melhores em um tempo substancialmente menor (abaixo de 0,012 segundos em média), sendo um bom indicativo de eficiência. Em outras instâncias, com fatores maiores, ou seja, quando se tem um maior intervalo no tempo entre a liberação dos pacientes, a aplicação da heurística de reotimização se configura como ideal para a obtenção de soluções de qualidade, inclusive superando os resultados publicados recentemente por Fonseca (2023).

Em trabalhos futuros, pretende-se utilizar técnicas de inteligência artificial como uma maneira de tornar as escolhas dos operadores menos aleatórias. Outras propostas estão também relacionadas com o desenvolvimento de novos operadores para a busca tabu, bem como de novas políticas. Uma direção bastante promissora diz respeito ao uso de cenários para avaliar o impacto de informações estocásticas sobre o problema e, desta forma, usar alguma técnica para a predição de solicitações ao longo do horizonte de tempo, como feito em Queiroz et al. (2023) e Bolsi et al. (2024).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido das agências de fomento: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) [processos 405369/2021-2, 408722/2023-1 e 315555/2023-8] e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG).

REFERÊNCIAS

- André, M. V. de C., Silva, H. L. R. da, & Silva, Y. L. T. V. (2024). A local search heuristic for nurse assignment problems with personal preferences. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 10(2), 70–81. <https://doi.org/10.47456/bjpe.v10i2.44130>
- Beaudry, A., Laporte, G., Melo, T., & Nickel, S. (2010). Dynamic transportation of patients in hospitals. *OR Spectrum*, 32, 77–107. <https://doi.org/10.1007/s00291-008-0135-6>
- Berbeglia, G., Cordeau, J.-F., & Laporte, G. (2010). Dynamic pickup and delivery problems. *European Journal of Operational Research*, 202(1), 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.04.024>
- Bolsi, B., Queiroz, T. A., Lima, V. de, Kramer, A., & Iori, M. (2024). Assigning multi-skill configurations to multiple servers with a Scenario-Based Planning and Recombination Approach. *Computers & Operations Research*, 169, 106719. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2024.106719>
- Cordeau, J.-F., & Laporte, G. (2007). The dial-a-ride problem: models and algorithms. *Annals of Operations Research*, 153, 29–46. <https://doi.org/10.1007/s10479-007-0170-8>
- Cordeau, J.-F., & Laporte, G. (2003). A tabu search heuristic for the static multi-vehicle dial-a-ride Problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 37(6), 579–594. [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(02\)00045-0](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(02)00045-0)
- Côté, J.-F., Queiroz, T. A., Iori, M., & Vignoli, M. (2020). Transporte dinâmico de pacientes dentro de um Hospital. *Anais do Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, João Pessoa, PB, Brasil, 1–12. <https://doi.org/10.59254/sbpo-2020-122524>
- Creswell, J. (2023). *Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e mistos*. Porto Alegre: Artmed.
- Fonseca, G. S. (2023). *Heurísticas para o transporte dinâmico de pacientes dentro de hospitais*. (Dissertação de Mestrado). Instituto de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Catalão. Catalão, GO, Brasil, 113p.
- Glover, F. Tabu Search - Part I. (1989) *ORSA Journal on Computing*, 1(3), 190–206. <https://doi.org/10.1287/ijoc.1.3.190>
- Landry, S., & Philippe, R. (2004). How logistics can service healthcare. *Supply Chain Forum: An International Journal*, 5(2), 24–30. <https://doi.org/10.1080/16258312.2004.11517130>
- Luo, Z., Liu, M., & Lim, A. (2019). A two-phase branch-and-price-and-cut for a dial-a-ride problem in patient transportation. *Transportation Science, Informs*, 53(1), 113–130. <https://doi.org/10.1287/trsc.2017.0772>
- Queiroz, T. A., Iori, M., Kramer, A., & Kuo, Y.-H. (2023). Dynamic Scheduling of Patients in Emergency Departments. *European Journal of Operational Research*, 310, 100–116. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.03.004>
- Talbi, E.-G. (2009). *Metaheuristics: from design to implementation*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Toth, P., & Vigo, D. (2014). *Vehicle Routing: Problems, methods, and applications*. 2ª ed. Philadelphia: SIAM.
- Vidal, T., Laporte, G., & Matl, P. (2020). A concise guide to existing and emerging vehicle routing problem variants. *European Journal of Operational Research*, 286(2), 401–416. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.10.010>
- Zhao, J., Poon, M., Zhang, Z., & Gu, R. (2022). Adaptive large neighborhood search for the time-dependent profitable dial-a-ride problem. *Computers & Operations Research*, 147, 105938. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105938>