LII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
João Pessoa - PB, 3 a 5 de novembro de 2020

TRANSPORTE DINÂMICO DE PACIENTES DENTRO DE UM HOSPITAL

Jean-François Côté
Department of Operations and Decision Systems, Laval University,
Rue de la Terrasse, 2325, Pavillon Palasis-Prince, G1V 0A6, Quebec City, Canada.
jean-francois.cote@fsa.ulaval.ca

Thiago Alves de Queiroz
Instituto de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Catalão,
Av. Dr. Lamartine P. Avelar, 1120, Setor Universitário, 75704-020, Catalão-GO, Brasil.
taq@ufg.br

Manuel Iori e Matteo Vignoli
Department of Sciences and Methods for Engineering, University of Modena and Reggio Emilia,
Via Amendola, 2, 42122, Reggio Emilia, Italy.
manuel.iori@unimore.it, matteo.vignoli@unimore.it

RESUMO

O problema do transporte de pacientes entre os pavilhões de um hospital é resolvido neste trabalho. O hospital é composto por vários pavilhões, cada um contendo um determinado número de andares. O problema consiste em deslocar os pacientes entre os andares de diferentes pavilhões, com o objetivo de minimizar o atraso total ponderado. As informações sobre os pacientes chegam no decorrer do dia, de forma que o problema é resolvido em sua versão dinâmica, sendo proposta uma heurística geral com versões que diferem na forma como os veículos são posicionados após atender uma solicitação. As versões da heurística são comparadas entre si e com a versão estática do problema sobre instâncias derivadas de um caso real. Na versão estática, todas as informações do problema são conhecidas inicialmente e, então, aplica-se uma busca em vizinhança larga adaptativa para resolvê-la.

PALAVRAS CHAVE. Transporte de pacientes. Problema dinâmico de coleta e entrega. Heurísticas.

SA - PO na Área de Saúde. L&T - Logística e Transportes.

ABSTRACT

The problem of transporting patients between the area buildings of a hospital is solved in this work. The hospital is composed of different pavilions, each containing a given number of floors. The problem consists of moving the patients between the floors of separate buildings, aiming at minimizing the total weighted lateness. Information about patients arrives on the fly during the day, so that the problem is solved in its dynamic version. Then, a general heuristic is proposed with versions that differ in the way vehicles are positioned after servicing a request. These heuristic versions are compared with each other and with the static version of the problem on instances derived from a real case. In the static problem, all information about the problem is known initially, and then an adaptive large neighborhood search is applied to solve it.

KEYWORDS. Transportation of patients. Dynamic pickup and delivery problem. Heuristics.

SA - OR in the Health Area. L&T - Logistics and Transports.

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

1. Introdução

Na área da saúde, a eficiência dos serviços ofertados é um dos critérios essenciais na avaliação dos índices de desempenho [Landry e Philippe, 2004]. Em hospitais (grandes), com edifícios (ou pavilhões) diferentes, uma atividade que afeta os índices de desempenho é o transporte de pacientes. Em geral, esse tipo de serviço é realizado por um departamento interno de transportes, que recebe solicitações (relacionadas à movimentação de pacientes) e precisa concluí-las (dentro dos termos fornecidos).

Com base nos veículos e solicitações disponíveis, o departamento de transporte determina qual veículo atenderá cada solicitação, observando um objetivo fornecido (por exemplo, minimizar o atraso ou a distância percorrida). Como os pedidos chegam dinamicamente (em tempo real), as decisões precisam ser tomadas de acordo, levando em consideração as rotas atuais e a disponibilidade dos veículos. Nesse caso, as decisões não são tão simples de serem tomadas, pois dependem da posição atual, capacidade e *status* dos veículos. Outros fatores complicadores estão relacionados às solicitações, como o nível de urgência, as janelas de tempo e a equipe médica disponível.

No transporte de pacientes, um problema conhecido é o *Dial-A-Ride* - DARP [Toth e Vigo, 2014]. No DARP, as rotas dos veículos são projetadas para pacientes que possuem locais específicos de coleta e entrega, bem como restrições de janela de tempo. Outras aplicações do DARP ocorrem, por exemplo, no transporte de idosos, pessoas com deficiência e passageiros [Luo et al., 2019]. De acordo com Cordeau e Laporte [2007], o DARP é uma generalização do Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega (ou seja, *Pickup and Delivery Problem* - PDP) e o Problema de Roteamento de Veículos com Janelas de Tempo, que incorpora aspectos humanos. Uma revisão adequada da literatura é realizada na próxima seção.

Neste estudo, resolvemos uma variante do PDP dinâmico, no qual algumas solicitações iniciais são conhecidas enquanto outras são compartilhadas durante o dia (ou seja, chegam em tempo real). Isso significa que as decisões são tomadas dinamicamente, considerando as escolhas passadas e as novas solicitações não atendidas. Como cada solicitação possui um peso, que depende da urgência do paciente, e janelas de tempo não-rígidas (isto é, que podem ser violadas), o objetivo é minimizar o atraso total ponderado ao executar as rotas e concluir as solicitações. Não levamos em consideração o tempo gasto pelos pacientes dentro dos veículos, uma restrição comum do DARP, pois as janelas de tempo são curtas e o objetivo é minimizar o atraso. Uma descrição detalhada do problema em consideração é fornecida na Seção 3.

Para o problema em estudo, desenvolvemos uma heurística geral que considera decisões relacionadas ao posicionamento dos veículos após realizar uma entrega. Em outras palavras, depois que um veículo termina de atender uma solicitação, ele é movido para o piso atual do pavilhão onde atendeu essa solicitação; ou retorna a um depósito central e espera lá; ou aguarda no térreo do pavilhão onde atendeu a solicitação. Um busca em vizinhança larga adaptativa (ou seja, *Adaptive Large Neighborhood Search* - ALNS) otimiza as rotas seguindo a decisão aplicada. Essas decisões resultam em três versões da heurística geral discutidas na Seção 4.

Esse problema surgiu em um grande hospital na Itália, onde os dados foram coletados e usados para criar instâncias. O hospital possui mais de 25 pavilhões (com um número diferente de andares) e tipos distintos de veículos (entre ambulâncias e minicarros) de diferentes capacidades. Para os minicarros, existem estradas no subsolo (subterrâneas), enquanto as ambulâncias se movem na superfície. Os pacientes são transportados de um determinado andar de um pavilhão para um determinado andar de outro pavilhão. A descrição das instâncias e a análise dos experimentos computacionais são apresentadas na Seção 5. Finalmente, a Seção 6 tem as conclusões e trabalhos futuros.

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

2. Revisão da Literatura

Os problemas relacionados ao transporte de objetos e pessoas podem ser resolvidos como variantes dos problemas de roteamento de veículos, em particular no contexto de problemas de coleta e entrega (PDP). Esses problemas são NP-difíceis e alguns deles vêm sendo investigados há um bom tempo. A pesquisa de Vidal et al. [2013] discutiu as principais restrições práticas vinculadas aos problemas de roteamento de veículos, resultando em muitas variantes conhecidas. Pillac et al. [2013] apresentaram uma revisão de problemas dinâmicos, levando em consideração o grau de dinamismo. Os autores apresentaram uma taxonomia de problemas pela evolução e qualidade da informação, discutindo também métodos de solução. Em Ritzinger et al. [2016] há uma revisão sobre problemas que combinam informações dinâmicas e estocásticas. Os autores resumem variantes do problema que são dinâmicas, estocásticas e a combinação delas, introduzindo uma classificação baseada nos métodos de otimização.

Em relação aos PDPs dinâmicos, nos quais as solicitações são reveladas com o passar do tempo, uma solução consiste em um conjunto de decisões de acordo com os dados conhecidos. Na pesquisa de Berbeglia et al. [2010] é proposta uma estrutura geral para um PDP dinâmico. Os eventos estão relacionados a (i) *esperar e ir*, acontecendo quando um veículo acaba de concluir uma solicitação e (ii) *aceitar ou rejeitar*, dependendo da chegada de novas solicitações. Esses autores discutiram abordagens com base na solução de um problema estático toda vez que novos dados são revelados e na atualização heurística da solução atual quando novos dados são exibidos. Considerando que as informações sobre solicitações futuras podem ser obtidas probabilisticamente, os autores comentaram abordagens baseadas na produção de amostras de solicitações futuras, bem como decisões de espera. Essas última impõem um tempo em que um veículo deve esperar em algum local. No trabalho de Bruck e Iori [2017], os problemas que surgem no transporte *courier* ou na logística reversa são tratados como PDPs. Com formulações que observam rotas não elementares, os autores propuseram algoritmos exatos *branch-and-cut* que consideram a decomposição de Benders e algumas desigualdades válidas.

No presente trabalho, uma variante do PDP dinâmico é abordada em relação ao transporte de pessoas. Essa variante vem de uma aplicação real relacionada ao transporte de pacientes entre edifícios de um grande hospital. O problema considera janelas de tempo não-rígidas para pacientes de diferentes urgências (pesos), uma frota heterogênea de veículos e viagens únicas e múltiplas, com o objetivo de minimizar o atraso total ponderado para atender a todas as solicitações. Uma heurística geral que utiliza decisões sobre o posicionamento dos veículos é proposta para lidar com a dinamicidade do problema, enquanto a otimização das rotas ocorre por meio de uma busca em vizinhança larga adaptativa.

Beaudry et al. [2010] lidaram com um problema similar ao nosso, com o objetivo de minimizar uma soma ponderada do tempo total de viagem, atraso total e antecipação total. Os autores consideraram janelas de tempo não-rígidas, frota heterogênea, a possibilidade de quebras de veículos e vários depósitos. Diferentemente do presente trabalho, eles permitiram apenas viagens únicas e propuseram uma heurística de duas fases, com um esquema de inserção para gerar rotas que são melhoradas com uma busca tabu. Foram realizados experimentos com dados reais de um hospital na Alemanha, mostrando que soluções de maior qualidade são obtidas com a ajuda da busca tabu, reduzindo o tempo de espera dos pacientes e o número de veículos usados. Por outro lado, em Ho et al. [2018] há uma pesquisa detalhada sobre DARPs, contemplando 86 artigos publicados desde 2007. Os autores apresentaram uma taxonomia baseada em quando uma decisão é tomada (estática ou dinâmica) e se a informação é conhecida com certeza ou não quando as decisões são feitos (determinístico ou estocástico). O problema resolvido aqui é dinâmico e determinístico, no

sentido em que as decisões são atualizadas de acordo com a chegada de novas solicitações, mas todas as informações das decisões são conhecidas com precisão no momento da decisão.

Considerando problemas de roteamento de veículos dinâmicos, Thomas [2007] identificou analiticamente situações nas quais um veículo sempre espera ou nunca espera, e também uma situação na qual se sabe onde é melhor esperar. Com resultados empíricos, o autor mostrou que as informações de localização do cliente são mais importantes que as informações sobre o próprio cliente que solicita o serviço. Para um PDP dinâmico, Vonolfen e Affenzeller [2016] analisaram empiricamente quando é benéfico aplicar decisões de espera e utilizar dados do passado. Por isso, eles propuseram uma estratégia de evolução para parametrizar automaticamente as decisões de espera de acordo com as características da instância. Os autores observaram que a incorporação de conhecimento não pode ser benéfica no caso de instâncias aleatórias e mistas cujas janelas de tempo são curtas.

3. Definição do Problema

O PDP dinâmico em consideração vem de um caso real de um grande hospital na Itália. O hospital ocupa uma área de 21 hectares e possui 1463 leitos, 5500 funcionários (881 médicos) e 30 pavilhões. Em 2018, o hospital realizou 51.763 internações, 39.136 cirurgias e 3.861.080 exames específicos. Devido ao tamanho do hospital, existe um departamento de transporte interno que cuida da movimentação de pacientes entre os andares de diferentes pavilhões de acordo com solicitações que chegam no decorrer do dia.

O problema tem um conjunto $\mathcal{P}$ de pavilhões, onde cada pavilhão $p \in \mathcal{P}$ tem um conjunto $\mathcal{F}_p$ de pisos (ou andares). Para modelar o problema é usado um grafo completo direcionado $G = (N, A)$. No conjunto N existem os nós, correspondentes à combinação entre pavilhões e pisos, onde um nó $p_i \in N$ representa o piso $i \in \mathcal{F}_p$ do pavilhão $p \in \mathcal{P}$. No conjunto A há os arcos entre os nós, em que um arco $(p_i, q_j) \in A$ tem uma distância estimada não negativa de viagem $d^v_{p_i,q_j}$ e tempo de viagem $t^v_{p_i,q_j}$, incluindo a distância/tempo do elevador, quando necessário. Esses valores dependem do tipo de veículo v usado.

O problema considera uma frota de veículos heterogênea, no conjunto $\mathcal{V}$, onde cada veículo $v \in \mathcal{V}$ tem uma capacidade de transporte específica c^v. No hospital, os veículos são posicionados inicialmente no depósito central em $\mathcal{P}$, que corresponde ao primeiro andar do pavilhão de emergência (a maioria dos pacientes vêm daqui). Dois tipos principais de veículos estão disponíveis: ambulâncias (pertencentes ao hospital e empresas terceirizadas) e minicarros elétricos (pertencentes ao hospital). Devido a legislação local, as ambulâncias podem transportar no máximo um paciente por vez (ou seja, viagens únicas), enquanto os minicarros podem carregar até quatro pacientes (várias viagens). Ambulâncias viajam na superfície do solo, enquanto minicarros viajam em estradas subterrâneas (no subsolo) que conectam pavilhões. Chamamos por "veículo" qualquer recurso de transporte, como ambulâncias e minicarros, incluindo a sua equipe (composta pelo motorista, enfermeiro e/ou médico).

O departamento de transporte toma decisões sobre solicitações, já disponíveis e outras chegando durante o dia de trabalho. Embora o horário de trabalho do hospital seja 24/7, presume-se que o dia de trabalho comece às 7:00 e termine às 20:00 devido à concentração excessiva de solicitações nesse período. Cerca de 7,5% das solicitações são conhecidas no horário de início (ou seja, elas são programadas antes), enquanto as demais chegam dinamicamente. Seja $\mathcal{R}$ o conjunto de solicitações para mover pacientes entre andares de diferentes pavilhões do hospital. Cada solicitação $r \in \mathcal{R}$ tem o tempo de liberação l_r, a janela de tempo flexível $[s_r,\ e_r]$ dentro da qual o paciente deveria ser transportado, o peso do paciente w_r que está relacionado à urgência do paciente, e os nós de coleta p^r_i e entrega q^r_j, indicando, respectivamente, onde coletar e entregar o paciente,

relacionado aos nós $p_i, q_j \in N$. A condição $l_r \leq s_r < e_r$ se mantém para todas as solicitações e $l_r < s_r$ implica que a solicitação foi programada antes.

O objetivo do problema é determinar até $|\mathcal{V}|$ rotas (ao longo do dia útil) para atender a todas as solicitações, visando minimizar o atraso total ponderado. O atraso é um indicador crucial de desempenho para o hospital, pois afeta o bem-estar dos pacientes (principalmente pacientes urgentes) e traz efeitos negativos no cronograma das equipes médicas (médicos, enfermeiros, técnicos, entre outros). Supondo que τ_r seja o horário em que a entrega da solicitação r é concluída, o atraso é definido como $\ell_r = \max\{0, \tau_r - e_r\}$. Portanto, o atraso total ponderado é $\sum_{r \in R} w_r \ell_r$. Além disso, uma solução viável satisfaz as seguintes restrições operacionais: (1) cada rota inicia e termina no depósito; (2) a capacidade do veículo não é excedida a qualquer momento (viagem); (3) as operações de coleta e entrega de uma solicitação são realizadas pelo mesmo veículo; (4) cada coleta é feita antes de sua própria entrega; (5) e, uma solicitação r não pode ser atendida antes de s_r, mas os veículos que chegam antes desse horário podem esperar. Além disso, assumimos que o tempo de serviço para coleta ou entrega está incorporado no tempo de viagem do veículo.

4. Heurística Geral

O problema é resolvido dinamicamente, o que significa que as decisões são tomadas sempre que um evento ocorre. Para isso, o dia útil é discretizado no conjunto $\mathcal{M} = \{0, \ldots, m, \ldots, M\}$ de momentos decisórios. Isso significa que o momento $m = 0$ corresponde ao início do dia útil (ou seja, 7:00), enquanto $m = M$ representa o final do dia útil (ou seja, 20:00). Como mencionado anteriormente, no momento $m = 0$, um conjunto de solicitações programadas é conhecido, onde algumas solicitações r estão prontas para serem atendidas agora ($s_r = m$), enquanto outras estarão prontas depois ($s_r > m$).

Supõe-se que um evento ocorra no momento m quando (i) um veículo tiver concluído uma solicitação (ou seja, uma entrega acabou de terminar), então agora ele é totalmente ou parcialmente desocupado. Outro caso é quando (ii) um ou mais solicitações r acabam de chegar ($l_r = m$), portanto, elas não foram designadas ou começaram a ser atendidas por algum veículo ainda. Sempre que um evento ocorre, o departamento de transportes toma uma decisão. As decisões dizem respeito a (a) um veículo começa a atender a uma solicitação agora; (b) mover um veículo para um nó específico; e, (c) um veículo aguarda um determinado tempo em seu nó atual.

Nas decisões do tipo (a), o veículo começa a se mover do nó atual para o nó de coleta relacionado à solicitação, portanto, essa solicitação é alterada para *em andamento*. Caso um veículo possa transportar mais de um paciente, após a coleta, ele poderá começar a atender a outra solicitação (buscar outro paciente) e assim por diante até atingir sua capacidade. Observa-se que isso não é permitido nas ambulâncias por causa de suas capacidades (limitadas a um único paciente); portanto, elas precisam concluir uma solicitação antes de começar a atender outra. Além disso, em alguns casos, quando o veículo chega ao nó de coleta, pode ser necessário esperar pelo início da janela de tempo do paciente.

Um veículo não tem acesso a todos os pisos de um pavilhão. Em geral, os veículos param/estacionam fora do pavilhão (na superfície do solo ou no subsolo). Portanto, o significado de uma decisão do tipo (b) ou (c) quando se refere a um piso em que o veículo não pode alcançar é: os operadores do veículo (isto é, a equipe que opera o veículo) permanece nesse nó enquanto o veículo está parado/estacionado aguardando.

A cada momento m as decisões passadas e as que estão em andamento no momento não podem ser desfeitas; no entanto, aquelas planejados para um momento futuro ($n > m$) ainda podem ser revisados se um evento ocorrer no momento o antes desse momento futuro ($m \leq o < n$). Supõe-se que solicitações em andamento não possam ser antecipadas e precisam ser concluídas em algum

momento. Portanto, a cada momento m em que um novo evento acontece, aplica-se a ALNS para resolver instâncias menores do problema para atualizar a solução atual. Nesses casos, as solicitações já atendidas ou em andamento em m são desconsideradas. Observando a solução atual (até m), a ALNS retorna uma solução otimizada, considerando as solicitações r novas e planejadas, mas não atendidas.

4.1. ALNS e o problema estático

A ALNS utilizada foi proposta por Ropke e Pisinger [2006]. Ela usa a função de aceitação do recozimento simulado para aceitar soluções piores, como uma maneira de escapar de ótimos locais. Uma solução x do problema é representada por um vetor em que cada posição representa um veículo v, para $v \in \mathcal{V}$. Para cada veículo v (ou seja, $x[v]$), há uma lista ordenada de solicitações ($x[v].R$), em que $x[v].R[1]$ representa a primeira solicitação a ser atendida (e assim por diante). Para uma determinada solicitação r atribuída a um veículo v, o momento em que ela começa a ser atendida é $x[v].R[r].S$, enquanto o momento em que for concluída é $x[v].R[r].E$. A rota de cada veículo v é então construída, começando no depósito central, depois visitando os nós de coleta e entrega na ordem das solicitações em $x[v].R$ e retornando ao depósito central. O custo da solução x é calculado como $\sum_{v\in\mathcal{V}} \sum_{r\in x[v].R} w_r(\max\{0, x[v].R[r].E - e_r\})$.

A ALNS funciona da seguinte maneira: (i) obtém-se uma solução viável x por uma heurística construtiva; (ii) aplica-se um operador de destruição em x para obter x'; (iii) aplica-se um operador de reparação em x' para obter x''; (iv) substitui-se x por x'' se x'' tiver um custo menor ou então aplicando a função de aceitação; (v) volta-se à etapa (ii) se o número máximo de iterações não for atingido ou, caso contrário, retorna-se x. Mais detalhes podem ser encontrados em Ropke e Pisinger [2006].

Na etapa (i), a solução inicial é construída por uma heurística de inserção e arrependimento. Na etapa (ii), utilizam-se operadores de destruição do tipo relacionado ou aleatório. No primeiro operador, as solicitações que estão intimamente relacionadas (ou seja, em termos de tempo) são removidas. No segundo, as solicitações a serem removidas são selecionadas aleatoriamente. As solicitações removidas são reinseridas na etapa (iii) por um dos dois operadores de reparação. O primeiro é um operador guloso que reinsere iterativamente cada uma das solicitações removidas em sua melhor posição. O outro é um operador de reinserção de arrependimento padrão, inserindo a solicitação na posição que resulta no melhor ganho objetivo.

Nas etapas (ii) e (iii), um operador é escolhido de acordo com o princípio de seleção por roleta, no qual um determinado peso é associado a cada operador. Esses pesos são atualizados dinamicamente usando estatísticas de iterações anteriores, bem como um fator de reação que controla a influência dos pesos. Além disso, ao final da etapa (iii), uma busca local é aplicada sobre x'', consistindo em determinar o melhor momento para começar a atender cada solicitação. Com relação à função de aceitação, uma determinada temperatura inicial diminui ao longo das iterações da ALNS e, portanto, diminui-se também a probabilidade de aceitar soluções piores em comparação com a atual.

A ALNS é usada para resolver o problema na sua versão estática. Nesta versão, supõe-se que todas as solicitações sejam perfeitamente conhecidas antecipadamente. A ALNS é executada apenas uma vez para retornar um conjunto de rotas. Isso serve para fornecer uma estimativa do atraso ponderado quando se resolve o problema dinâmico.

4.2. Problema dinâmico

Para o problema dinâmico em consideração, o Algoritmo 1 descreve a heurística geral que controla como as decisões são tomadas a cada momento $m \in \mathcal{M}$. Esse algoritmo possui três

Algoritmo 1: Heurística geral para o PDP dinâmico.

1 Seja $\mathcal{R}$ o conjunto de solicitações, contendo inicialmente aquelas conhecidas antes do início do dia útil.
2 Aplique a ALNS para determinar o conjunto de rotas parciais, uma solução x, considerando $\mathcal{R}$.
3 **para cada** *momento* $m \in \mathcal{M}$ **faça**
4 **para cada** *veículo* v *em* x *que completou uma solicitação no momento* m **faça**
5 Aplique a versão correspondente da heurística geral escolhida (isto é, HG1, HG2 ou HG3) em v.
6 Atualize a rota parcial de v de acordo.
7 Adicione todas as solicitações r que são conhecidas no momento m (ou seja, $l_r = m$) em $\mathcal{R}$.
8 Aplique a ALNS para atualizar o conjunto de rotas parciais, solução x, considerando $\mathcal{R}$.
9 Veículos de x começam a atender às solicitações que iniciam precisamente em m.
10 Atualize $\mathcal{R}$ removendo todas as solicitações r, atendidas ou em andamento, no momento m.

versões, diferindo uma da outra (linha 5) na estratégia aplicada se um evento do tipo (i) acontecer (ou seja, ao final de uma entrega).

A cada momento m, as decisões passadas e as em andamento não podem ser desfeitas; no entanto, aquelas planejadas para um momento futuro ($n > m$) ainda podem ser revisados se um evento ocorrer no momento o antes desse momento futuro ($m \leq o < n$). As três versões da heurística geral conforme as decisões tomadas são:

- HG1: uma decisão do tipo (c) é executada. Isso significa que a equipe do veículo permanece no mesmo andar em que uma solicitação foi atendida. Ela aguarda até que uma decisão do tipo (a) aconteça para atender uma nova solicitação;
- HG2: uma decisão do tipo (b) e depois uma do tipo (c) são executadas. Primeiro a equipe do veículo se move para onde o veículo está parado/estacionado. Assim, ela espera até que uma decisão do tipo (a) ocorra;
- HG3: uma decisão do tipo (b) e depois uma do tipo (c) são executadas. Primeiro o veículo e a equipe se movem para o depósito central. Em seguida, eles aguardam lá até que uma decisão do tipo (a) ocorra.

No Algoritmo 1, a solução x contém a rota parcial de cada veículo. Essas rotas são parciais porque são construídas dinamicamente enquanto o dia útil passa e as solicitações são atendidas. As rotas são criadas com a ALNS observando as solicitações em $\mathcal{R}$. No momento $m = 0$, a ALNS determina a solução x avaliando as solicitações programadas (conhecidas antes do início do dia útil) e as solicitações recém-liberadas. No caso de $m > 0$, o laço das linhas 4-6 é relacionado aos veículos v que acabaram de concluir uma solicitação. Portanto, as rotas desses veículos são atualizadas de acordo com a versão da heurística geral usada (HG1, HG2 ou HG3). Isso significa que,

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

antes de começarem a atender outras solicitações r, eles precisam cumprir a decisão da heurística geral usada, o que implica que o horário de início de r ($x[v].R[r].S$) pode ser empurrado para a frente. Observe que, na decisão da heurística geral usada, o nó de coleta corresponde ao nó em que o veículo acabou de concluir uma solicitação, enquanto o nó de entrega corresponde ao nó definido de acordo com a versão selecionada.

Nas linhas 7 e 8, o Algoritmo 1 adiciona em $\mathcal{R}$ solicitações que são reveladas em m. Portanto, a ALNS é usada para atualizar a solução x, onde todas as solicitações já atendidas e em andamento no momento m não podem ser alteradas (ou seja, são solicitações fixas). A ALNS otimiza x, atribuindo os pedidos não fixos, mas levando em consideração os pedidos fixos. Isso significa que apenas as solicitações não fixas podem ser otimizadas. Observe que, para minicarros, a ALNS também tenta tomar a decisão de começar a atender as outras solicitações após fazer a coleta de um paciente. Na linha 9, as solicitações atribuídas r, dos veículos v, cujo momento de início ($x[v].R[r].S$) é precisamente m, começam a ser atendidas, alterando seu *status* para *em progresso*. De fato, essas solicitações devem começar, porque no próximo laço (linhas 3-10), o momento é atualizado e, em seguida, é maior que $x[v].R[r].S$. Finalmente, na linha 10, as solicitações fixas são removidas de $\mathcal{R}$, o que significa que a ALNS não pode modificar suas posições na solução x.

5. Experimentos Computacionais

Todos os algoritmos foram codificados na linguagem de programação C++. Experimentos numéricos foram realizados em um computador com um processador Intel 2.667 GHz Westmere EP X5650, 128 GB de memória RAM e sistema operacional CentOS 7. Em relação às abordagens, apresentam-se resultados dos problemas: estático, resolvidos apenas com a ALNS; e dinâmico, com as heurísticas HG1, HG2 e HG3. Os experimentos dizem respeito a 50 instâncias coletadas do hospital. Cada instância corresponde a um dia útil real do ano de 2016 do hospital. Os parâmetros utilizados nas instâncias são os seguintes: número de veículos definido como duas ambulâncias e três minicarros; e, número de iterações ALNS definido como 5000 para o problema estático e 150 para o problema dinâmico.

As Tabelas 1 e 2 contém os resultados das 50 instâncias. Cada linha apresenta as seguintes informações sobre a instância: nome, dia da semana que ela representa e número de solicitações para aquele dia. Com relação aos problemas, apresentamos para a versão estática, sendo aplicado apenas a ALNS, e a versão dinâmica, para cada uma três versões da heurística geral: a distância total percorrida para atender todas as solicitações, o atraso total ponderado pela urgência dos pacientes (em minutos) e o tempo de otimização (em segundos).

Observando as 50 instâncias nas Tabelas 1 e 2, a distância total percorrida, o atraso total ponderado (em minutos) e o tempo de execução (em segundos) são, respectivamente, em média: 1.248,2, 1,7 e 197,6, para o problema estático, resolvido com a ALNS; 1.516,7, 45,7 e 57,0 para a heurística geral HG1; 1.593,2, 39,6 e 68,4 para a heurística geral HG2; e, 1.569,2, 46,2 e 60,8 para a heurística geral HG3, todas elas aplicadas sobre o problema dinâmico. Considerando o desvio percentual da distância total percorrida, do atraso total ponderado e do tempo de execução do problema estático com as heurísticas gerais, essas diferenças na média são de, respectivamente: 21,5%, 2.642,6% e -71,2% para a HG1; 27,6%, 2.277,1% e -65,4% para a HG2; e, 25,7%, 2.676,2% e -69,2% para a HG3. Assim, observamos que há um aumento na distância total percorrida e no atraso total quando o problema dinâmico é resolvido, enquanto que há uma redução no tempo computacional.

Nos resultados das Tabelas 1 e 2, quando se tem todas as informações (isto é, no problema estático) foi possível obter um atraso total ponderado igual a zero para 40 das 50 instâncias, enquanto essa quantidade de instâncias reduz para 5 com a HG1, 9 com a HG2 e 11 com a HG3.

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

Tabela 1: Resultado das primeiras 25 instâncias.

Instância			Versão Estática - ALNS			Versão Dinâmica - HG1			Versão Dinâmica - HG2			Versão Dinâmica - HG3		
Nome	Semana	#Solic.	Dist.	Atraso Pond.	Tempo (s)	Dist.	Atraso Pond.	Tempo (s)	Dist.	Atraso Pond.	Tempo (s)	Dist.	Atraso Pond.	Tempo (s)
1	Sexta	69	556,0	0,8	5,3	598,3	0,8	1,3	637,2	26,7	1,6	639,6	26,7	1,4
2	Sábado	90	712,7	0,8	22,4	791,4	31,7	7,5	826,2	1,4	6,5	836,1	5,5	5,3
3	Domingo	71	624,4	3,4	9,9	688,6	29,0	2,7	713,8	18,3	2,8	693,3	22,3	2,7
4	Segunda	211	1.682,5	0,0	201,7	2.044,5	113,9	78,9	2.034,0	32,5	93,6	2.112,3	69,2	86,1
5	Terça	187	1.339,2	0,8	201,1	1.652,6	24,9	85,8	1.777,4	24,9	92,0	1.717,7	94,5	93,7
6	Quarta	74	769,9	0,0	7,1	808,8	16,2	1,9	844,8	3,4	2,3	842,1	3,4	1,7
7	Quinta	203	1.567,8	0,0	332,1	1.932,1	153,4	78,7	2.067,2	64,3	93,8	1.974,1	107,4	101,9
8	Sexta	178	1.496,1	0,0	107,2	1.909,0	71,7	58,5	1.994,1	41,0	90,2	1.877,3	27,5	68,0
9	Sábado	99	894,0	0,8	15,4	996,5	44,3	6,5	1.038,4	6,1	8,1	1.005,4	18,0	7,6
10	Domingo	64	583,7	0,0	7,1	613,7	6,7	2,6	643,4	11,5	2,6	642,1	0,0	2,6
11	Segunda	211	1.355,9	0,0	435,8	1.779,0	31,5	126,5	1.828,9	33,9	122,9	1.777,9	39,8	128,9
12	Terça	194	1.407,0	19,3	400,5	1.749,2	26,3	75,7	1.874,5	29,1	73,7	1.858,1	42,4	80,3
13	Quarta	209	1.477,1	0,0	191,2	1.820,0	26,3	67,7	2.033,1	44,2	64,2	1.887,7	30,5	75,5
14	Quinta	172	1.309,3	0,0	78,7	1.553,5	6,9	24,7	1.599,3	5,2	32,0	1.684,0	0,0	28,8
15	Sexta	196	1.692,4	0,0	128,1	1.984,6	171,4	48,2	2.077,1	246,1	76,5	2.117,9	248,0	55,4
16	Sábado	90	740,5	0,0	10,5	825,1	0,0	3,4	861,7	0,0	3,5	871,1	0,0	3,2
17	Domingo	69	592,1	0,0	11,3	627,4	3,4	2,5	677,2	0,0	1,6	669,8	0,0	1,5
18	Segunda	204	1.485,8	0,0	293,4	1.836,7	123,2	83,3	2.028,0	76,4	93,2	2.026,9	175,2	94,6
19	Terça	226	1.557,1	0,0	456,6	2.094,0	62,0	132,6	2.042,8	25,5	189,8	1.946,3	2,4	124,4
20	Quarta	201	1.383,7	0,0	184,1	1.748,2	29,3	66,9	1.857,3	66,8	84,1	1.826,9	13,9	85,3
21	Quinta	196	1.314,7	20,4	226,1	1.599,8	65,7	94,6	1.767,0	53,4	94,4	1.776,4	61,8	70,3
22	Sexta	205	1.556,6	0,0	196,3	1.974,8	41,9	115,9	2.006,0	49,9	110,3	1.970,5	14,6	94,9
23	Sábado	101	758,5	0,0	21,7	857,1	3,4	7,0	903,8	0,0	9,8	916,1	1,6	9,1
24	Domingo	94	716,5	0,0	15,8	799,4	6,7	2,6	858,5	3,4	2,7	838,8	0,0	3,9
25	Segunda	240	1.529,8	0,0	570,2	1.989,5	36,0	114,1	2.093,1	63,6	130,3	1.963,0	61,6	99,2
Média	-	-	1.164,1	1,9	165,2	1.411,0	45,1	51,6	1.483,4	37,1	59,3	1.458,8	42,6	53,0

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

Tabela 2: Resultado das instâncias restantes.

Instância			Versão Estática - ALNS			Versão Dinâmica - HG1			Versão Dinâmica - HG2			Versão Dinâmica - HG3		
Dia	Semana	#Solic.	Dist.	Atraso Pond.	Tempo (s)	Dist.	Atraso Pond.	Tempo (s)	Dist.	Atraso Pond.	Tempo (s)	Dist.	Atraso Pond.	Tempo (s)
26	Terça	212	1.508,6	0,0	265,2	1.947,9	28,1	75,5	2.069,3	54,2	91,1	1.944,1	38,6	81,7
27	Quarta	181	1.386,5	0,0	161,4	1.678,6	42,5	72,4	1.696,6	32,0	64,5	1.661,8	0,0	47,6
28	Quinta	208	1.360,6	0,0	303,3	1.759,9	0,0	84,6	1.890,6	0,0	82,5	1.799,8	0,0	91,5
29	Sexta	165	1.242,2	0,0	92,1	1.508,3	35,5	22,0	1.565,3	53,0	23,8	1.543,4	25,6	17,8
30	Sábado	120	965,0	0,0	46,8	1.079,9	0,0	10,3	1.107,4	0,0	8,2	1.124,4	3,4	8,5
31	Domingo	70	592,2	0,0	8,7	645,0	0,0	2,4	703,4	0,0	2,7	706,8	0,0	1,9
32	Segunda	222	1.258,6	0,0	521,0	1.616,7	3,4	110,3	1.749,1	0,0	132,0	1.676,4	3,4	102,4
33	Terça	225	1.533,7	0,0	502,4	1.985,8	16,2	112,4	2.069,3	0,0	110,0	2.063,3	7,8	125,6
34	Quarta	197	1.209,5	0,0	634,8	1.666,6	0,0	49,1	1.678,9	0,0	71,7	1.706,2	0,0	78,5
35	Quinta	191	1.378,1	0,0	156,2	1.687,3	28,6	28,7	1.812,0	36,2	41,5	1.818,0	74,6	35,6
36	Sexta	202	1.588,9	0,0	337,7	2.015,5	83,4	68,7	2.154,3	72,4	96,9	2.089,8	85,7	96,9
37	Sábado	119	901,9	0,0	58,4	1.013,4	16,8	13,4	1.089,5	20,2	12,5	1.064,2	16,2	11,4
38	Domingo	80	623,6	0,0	18,4	710,6	3,4	2,4	735,2	3,4	4,2	735,9	3,4	3,7
39	Segunda	237	1.709,3	0,0	386,3	2.028,5	68,8	134,9	2.103,2	78,7	174,5	2.141,1	212,6	160,8
40	Terça	194	1.572,9	12,8	107,1	1.919,6	168,6	51,7	2.102,3	129,2	63,9	2.100,0	234,6	66,2
41	Quarta	229	1.508,5	0,0	344,6	1.967,6	7,7	87,5	2.016,8	2,1	155,6	1.977,3	0,0	92,9
42	Quinta	211	1.729,8	0,0	399,9	1.999,5	260,5	80,7	2.172,7	64,0	97,0	2.079,5	124,8	94,9
43	Sexta	223	1.490,2	0,0	261,3	1.877,4	4,2	66,6	1.936,6	3,4	81,8	1.915,1	5,1	52,9
44	Sábado	108	892,0	0,0	26,8	1.063,1	56,8	6,6	1.072,5	25,6	6,6	1.130,7	26,7	5,5
45	Domingo	77	594,0	12,8	8,3	659,6	25,6	2,6	687,1	50,2	2,5	675,6	34,3	2,5
46	Segunda	252	1.907,9	0,0	429,8	2.089,6	55,4	209,2	2.146,7	141,9	310,8	2.150,8	94,3	253,2
47	Terça	196	1.567,8	0,0	208,5	1.911,9	108,3	96,2	1.940,4	144,2	101,1	1.848,3	60,6	52,5
48	Quarta	190	1.383,1	0,0	165,1	1.686,6	5,2	45,8	1.772,4	2,1	54,2	1.688,1	0,0	64,4
49	Quinta	223	1.623,1	11,3	185,7	1.987,2	42,8	74,6	2.087,4	7,4	75,6	2.123,4	31,9	72,0
50	Sexta	211	1.778,5	0,0	121,8	2.055,4	95,4	49,1	2.214,2	131,8	73,8	2.223,4	162,2	93,4
Média	-	-	1.332,3	1,5	230,1	1.622,5	46,3	62,3	1.702,9	42,1	77,5	1.679,5	49,8	68,6

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

Olhando os resultados no geral, para o problema dinâmico, a versão da heurística HG1 tem resultado na melhor distância total percorrida e tempo computacional, enquanto a HG2 tem resultado no melhor atraso total ponderado. Como o objetivo do hospital tem sido reduzir o atraso total ponderado, a escolha pela HG2 é a mais favorável, indicando que é melhor o veículo e sua equipe esperarem no local onde o veículo está parado/estacionado após realizarem uma entrega.

6. Conclusões

O problema resolvido considera um hospital de extensão territorial grande. É composto por vários pavilhões conectados por estradas e túneis atravessados por ambulâncias e minicarros elétricos, respectivamente. Um dos fatores que afeta a qualidade dos serviços é a enorme solicitação de pacientes para mudar de um pavilhão para outro por razões médicas, que atribui uma solicitação a um veículo que irá coletar e entregar o paciente. As dificuldades surgem no gerenciamento do tráfego gerado pela execução dos serviços, uma vez que o gerenciamento deficiente leva ao atraso nas coletas e entregas de pacientes.

Fez-se a proposição de uma heurística geral, com diferentes versões conforme as decisões tomadas sobre o posicionamento dos veículos. Essa heurística utiliza uma busca em vizinhança larga adaptativa para atribuir solicitações a veículos e determinar as viagens. No problema estático, conhecemos todas as solicitações do dia com antecedência e apenas executamos a ALNS para encontrar rotas otimizadas. No caso dinâmico, a ALNS é aplicada sempre que um novo evento ocorre. Além disso, a heurística geral difere nas decisões adotadas ao final de cada entrega. Os resultados sobre dados reais mostram que o problema estático pode ter um atraso ponderado muito pequeno por paciente, o que é extremamente importante, porém o problema é dinâmico. Entre as versões da heurística geral para o problema dinâmico, a HG2 (isto é, em que o veículo e a equipe ficam esperando no local onde o veículo está parado/estacionado) é a melhor em termos do atraso total ponderado, que ficou abaixo dos 40 minutos na média geral.

Pesquisas futuras se concentrarão no desenvolvimento de novos algoritmos para o problema dinâmico. Tem-se também interesse na resolução do problema que considera o uso de cenários amostrados visando prever solicitações futuras e, assim, diminuir o atraso total ponderado.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro da University of Modena and Reggio Emilia (UNIMORE - *FAR 2018 Analysis and optimization of health care and pharmaceutical logistic processes*), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - 308312/2016-3) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG).

Referências

Beaudry, A., Laporte, G., Melo, T., e Nickel, S. (2010). Dynamic transportation of patients in hospitals. *OR Spectrum*, 32(1):77–107.

Berbeglia, G., Cordeau, J.-F., e Laporte, G. (2010). Dynamic pickup and delivery problems. *European Journal of Operational Research*, 202(1):8 – 15.

Bruck, B. P. e Iori, M. (2017). Non-elementary formulations for single vehicle routing problems with pickups and deliveries. *Operations Research*, 65(6):1597–1614.

Cordeau, J.-F. e Laporte, G. (2007). The dial-a-ride problem: models and algorithms. *Annals of Operations Research*, 153(1):29–46.

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

Ho, S. C., Szeto, W., Kuo, Y.-H., Leung, J. M., Petering, M., e Tou, T. W. (2018). A survey of dial-a-ride problems: Literature review and recent developments. *Transportation Research Part B: Methodological*, 111:395 – 421. ISSN 0191-2615.

Landry, S. e Philippe, R. (2004). How logistics can service healthcare. In *Supply Chain Forum: An International Journal*, volume 5, p. 24–30. Taylor & Francis.

Luo, Z., Liu, M., e Lim, A. (2019). A two-phase branch-and-price-and-cut for a dial-a-ride problem in patient transportation. *Transportation Science*, 53(1):113–130.

Pillac, V., Gendreau, M., Guéret, C., e Medaglia, A. L. (2013). A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 225(1):1 – 11.

Ritzinger, U., Puchinger, J., e Hartl, R. F. (2016). A survey on dynamic and stochastic vehicle routing problems. *International Journal of Production Research*, 54(1):215–231.

Ropke, S. e Pisinger, D. (2006). An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows. *Transportation science*, 40(4):455–472.

Thomas, B. W. (2007). Waiting strategies for anticipating service requests from known customer locations. *Transportation Science*, 41(3):319–331.

Toth, P. e Vigo, D., editors (2014). *Vehicle Routing: Problems, methods, and applications*. SIAM, Philadelphia, 2nd edition.

Vidal, T., Crainic, T. G., Gendreau, M., e Prins, C. (2013). Heuristics for multi-attribute vehicle routing problems: A survey and synthesis. *European Journal of Operational Research*, 231(1):1 – 21.

Vonolfen, S. e Affenzeller, M. (2016). Distribution of waiting time for dynamic pickup and delivery problems. *Annals of Operations Research*, 236(2):359–382.