UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Roteamento de Unidades Móveis de Mamografia em Minas Gerais

Patrick Moreira Rosa e Jéssica Natália Miranda Paiva
Universidade Federal de Ouro Preto

Orientador: Puca Huachi Vaz Penna

Coorientador: Marcone Jamilson Freitas Souza

Relatório técnico-científico apresentado à Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-graduação da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos exigidos do Programa de Iniciação à Pesquisa (PIVIC/UFOP).

Ouro Preto, 25 de Setembro de 2020

Observação: Referencie este trabalho como:[1]

[1] Rosa, P. M.; Paiva, J. N. M.; Penna, P. H. V. e Souza, M. J. F. Roteamento de Unidades Móveis de Mamografia em Minas Gerais. Relatório Técnico, Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-graduação, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, setembro de 2020. Disponível em `http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/projects/MULP/MMURP-RelatorioTecnico-PIVIC-2019-2020.pdf`.

Roteamento de Unidades Móveis de Mamografia em Minas Gerais

Patrick Moreira Rosa e Jéssica Natália Miranda Paiva
Universidade Federal de Ouro Preto

Orientador: Puca Huachi Vaz Penna

Coorientador: Marcone Jamilson Freitas Souza

Resumo

Este trabalho introduz o Problema de Roteamento de Unidades Móveis de Mamografia. Este problema consiste em roteirizar um conjunto de Unidades Móveis de Mamografia (MMU) para atender a demanda das localidades desprovidas de mamógrafos fixos ou em número insuficiente destes. O objetivo é maximizar a demanda atendida e minimizar a distância total percorrida pelas MMUs. Para tratar o problema, foi desenvolvido um algoritmo heurístico baseado no método de busca local *Randomized Variable Neighborhood Descent*. Para testá-lo, foi utilizada uma instância relativa a uma região do Estado de Minas Gerais composta por 444 localidades. Considerando o cenário atual da distribuição dos equipamentos de mamografia em Minas Gerais, com a solução apresentada seria possível realizar 358131 exames a mais no Estado apenas na região estudada.

Palavras-chave: Gestão de Recursos, Roteamento de veículos, Sistema Único de Saúde, Mamografia, Heurísticas.

Declaração

Este relatório é fruto de nosso próprio trabalho, exceto onde referência explícita é feita ao trabalho de outros, e não foi submetido a nenhuma outra instituição.

Patrick Moreira Rosa, Jéssica Natália Miranda Paiva, Puca Huachi Vaz Penna e Marcone Jamilson Freitas Souza

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, código de financiamento 001), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG, processo PPM CEX 0676/17), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, processos 428817/2018-1 e 303266/2019-8) e a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

Sumário

Lista de Figuras **11**

Lista de Tabelas **13**

1 Introdução **17**

1.1 Motivação 18

1.2 Objetivos 19

1.2.1 Objetivos gerais 19

1.2.2 Objetivos específicos 19

1.3 Estrutura do trabalho 20

2 Revisão de literatura **21**

2.1 Localização de Mamógrafos 21

2.2 Roteamento de Veículos 22

3 Caracterização do Problema **25**

4 Metodologia **27**

4.1 Algoritmo Heurístico 27

4.1.1 Representação da Solução 27

4.1.2 Avaliação da Solução 28

4.1.3 Construção da Solução 29

4.1.4 Estruturas de Vizinhança 30

4.1.5 Busca Local 33

5 Experimentos Computacionais **35**

6 Conclusões e Trabalhos Futuros **39**

Referências Bibliográficas **41**

Lista de Figuras

3.1 Exemplo de solução com distMax = 180 km 26

4.1 Representação de uma solução s 28

4.2 Inserção do local 4 entre os locais 1 e 2 na rota da MMU 1. 30

4.3 Troca entre o local 4 na rota da MMU 1 e o local 3 na rota da MMU 2 no mesmo depósito. 31

4.4 Troca entre o local 5 na rota da MMU 1 e o local 6 na rota da MMU 2 em depósitos diferentes. 31

4.5 Transferência do local 3 da rota da MMU 1 para a rota da MMU 2 no mesmo depósito. 32

4.6 Transferência do local 3 da rota da MMU 1 para a rota da MMU 2 em depósitos diferentes. 32

Lista de Tabelas

5.1 Resultados nos cenários em que distMax = 180 km 37

Lista de Algoritmos

4.1 RVND 33

Capítulo 1

Introdução

O combate ao câncer de mama é hoje um desafio dos órgãos de saúde pública para contornar o grande número de óbitos pela doença. Estima-se para o ano de 2019, no Brasil, 59700 casos novos da neoplasia maligna da mama em mulheres (INCA, 2019). A Secretaria de Estado de Saúde de Minas Gerais reforça que somente no ano de 2018 ocorreram 1576 óbitos de mulheres em Minas Gerais por câncer de mama (SES, 2019).

O exame de mamografia é atualmente o único método com eficácia comprovada para a detecção precoce de tumores da mama. Há evidências científicas que comprovam que não realizar o exame de rastreamento na faixa de idade indicada é prejudicial a saúde da mulher (SES, 2019).

A orientação do Instituto Nacional de Câncer José Alencar Gomes da Silva (INCA, 2009) e do Ministério da Saúde (BRASIL, 2015), é que 20% da população feminina de 40 a 49 anos realizem exames anuais de mamografia, sendo 10% por indicação diagnóstica e 10% por outras indicações. Além disso, recomenda-se que 100% das mulheres na faixa de 50 a 69 anos façam exames bianuais de rastreamento, com um adicional de 8,9% anual por indicação diagnóstica.

Muitos fatores dificultam o acesso ao exame de mamografia e contribuem para uma cobertura ineficiente de atendimentos. De acordo com da Cunha et al. (2019), além da utilização inadequada dos recursos de saúde e da falta de especialistas para a solicitação de exames, aspectos geográficos também limitam a acessibilidade às mulheres que residem em localidades afastadas dos leitos hospitalares, aonde o equipamento de mamografia está instalado.

A indicação do Ministério da Saúde (BRASIL, 2015) é que na alocação de mamógrafos fixos, isto é, os aparelhos que são instalados nos hospitais, seja considerada a distância máxima de 60 quilômetros entre a residência da mulher e o local onde o equipamento será instalado, justamente para facilitar o acesso ao exame. No entanto, diversos estudos da literatura apontam que a localização atual dos mamógrafos é inadequada, e que a restrição de distância máxima imposta nem sempre é respeitada (Amaral et al., 2017; Souza et al., 2020) . Além do mais, existem localidades não atendidas por mamógrafos

fixos que, em sua maioria, não possuem infraestrutura hospitalar para a aquisição de equipamentos, e que estão a um raio de distância que excede ao recomendado pelos órgãos de saúde. Para esses municípios, uma solução é visitá-los com unidades móveis equipadas com mamógrafos (Teixeira, 2016).

Tendo em vista a necessidade de tornar o exame de mamografia mais igualitário, é de grande relevância o estudo de estratégias para tornar os recursos de saúde cada vez mais acessíveis. Dessa forma, serviços de mamografia móvel são alternativas que devem ser consideradas para melhorar a aderência às diretrizes de rastreamento mamográfico e reduzir as desigualdades geográficas e sociais na participação em exames de mamografia (Mil et al., 2019). Por outro lado, roteirizar Unidades Móveis de Mamografia (MMU, da sigla em inglês *Mobile Mammography Unit*) não é uma tarefa trivial e exige algoritmos especializados. Para tanto, este trabalho introduz o Problema de Roteamento de Unidades Móveis de Mamografia (MMURP, da sigla em inglês *Mobile Mammography Unit Routing Problem*). No MMURP, pretende-se roteirizar um conjunto de MMUs disponíveis para atender a um conjunto de localidades desprovidas de equipamentos fixos ou em número insuficiente destes. O objetivo é maximizar a cobertura de exames e reduzir a distância total percorrida pelas MMUs. Para resolvê-lo, é desenvolvido um algoritmo heurístico, visto que o MMURP é um caso particular do problema de roteamento de veículos, o qual é NP-difícil (Penna et al., 2019).

1.1 Motivação

Garantir que o acesso ao exame de mamografia seja facilitado é de suma importância, pois as chances de cura aumentam quando a doença é detectada e tratada em estágios iniciais (INCA, 2019). A distância entre a residência das mulheres e os locais onde os mamógrafos estão instalados, bem como, os custos de transporte e infraestrutura das localidades para receber equipamentos de mamografia, estão entre os principais fatores que podem reduzir o números de exames realizados (Amaral et al., 2017).

A principal contribuição da presente pesquisa, que a torna relevante, é que ela apresenta uma efetiva proposta de roteamento das unidades móveis de mamografia para o Estado de Minas Gerais. Além do aspecto prático, também há contribuição científica. Não se tem conhecimento de trabalhos que contemplam uma solução para o problema objeto deste estudo. Espera-se com essa abordagem prover o tomador de decisão na área de saúde com ferramentas que possam auxiliá-lo nessa tarefa.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos gerais

O objetivo geral deste trabalho é estudar o Problema de Roteamento de Unidades Móveis de Mamografia (MMURP) e desenvolver métodos heurísticos para resolvê-lo.

1.2.2 Objetivos específicos

São objetivos específicos do projeto:

(1) Identificar as restrições impostas ao MMURP;

(2) Obter a atual distribuição dos mamógrafos existentes, a fim de identificar as localidades desprovidas de mamógrafos ou com número insuficiente desses equipamentos nos serviços públicos de saúde;

(3) Obter a relação de todas as localidades que compõem o Estado de Minas Gerais, juntamente com as distâncias reais entre todos os pares de localidades dessas regiões;

(4) Desenvolver e implementar um algoritmo heurístico de otimização baseado em metaheurísticas para resolver o problema formulado;

(5) Testar o método heurístico usando dados reais do Estado de Minas Gerais, e comparar os resultados com a situação atual das rotas das unidades móveis de mamografia;

1.3 Estrutura do trabalho

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: no Capítulo 2 é apresentada a revisão de literatura. No Capítulo 3 o problema é descrito com suas respectivas restrições. No Capítulo 4 é definida a metodologia a ser aplicada neste trabalho. No Capítulo 5 são realizados os experimentos computacionais. Por fim, no último capítulo são descritas as conclusões e trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão de literatura

Neste capítulo, inicialmente é feita a revisão da literatura sobre a distribuição geográfica dos equipamentos de mamografia no Brasil, bem como das pesquisas que tratam o Problema de Localização de Mamógrafos (PLM), e que fazem uma análise do uso de unidades móveis de mamografia como alternativa para tornar o exame mais acessível para a população feminina. Posteriormente, é organizada uma seção na qual são revisados alguns estudos a respeito do Problema de Roteamento de Veículos (PRV) e de suas variantes mais comuns. É importante destacar que o Problema de Roteamento de Unidades Móveis de Mamografia (MMURP) também é uma extensão do PRV; porém, não se tem conhecimento de trabalhos que abordam o mesmo problema apresentando um método de solução para otimizar a roteirização das unidade móveis de mamografia.

2.1 Localização de Mamógrafos

Amaral et al. (2017) observaram que a rede de oferta de mamógrafos no Brasil é ineficiente. Os autores mostraram que o número de mamógrafos disponíveis no território nacional excede ao necessário para atender toda a demanda feminina e, mesmo assim, nem todas as mulheres conseguem realizar o exame de mamografia.

A baixa cobertura de atendimentos em algumas regiões se deve à má distribuição dos aparelhos, pois existem municípios com uma quantidade de equipamentos que é mais do que suficiente para atender a própria demanda por exames, enquanto em outras localidades a demanda fica ociosa pela falta de mamógrafos (Xavier et al., 2016).

Além da má localização dos equipamentos, é constatado em Abreu (2015) que aspectos sociais e econômicos também devem ser levados em consideração em um cenário de baixa realização de exames de mamografia. Além do mais, há dificuldades em encontrar profissionais para operar os aparelhos e médicos capacitados para a solicitação de exames.

Verter e Lapierre (2002) formularam um modelo de programação matemática de máxima cobertura, do inglês *Maximal Covering Location Problem* (MCLP), para localizar unidades de saúde preventivas com o objetivo de maximizar a participação da população em programas de prevenção. Os autores defendem a utilização do modelo de otimização desenvolvido para auxiliar os gestores de saúde na tomada de decisões. Eles ainda reforçam que outras formas alternativas devem ser exploradas para melhorar a participação nos centros populacionais mal atendidos. Os autores sugerem a aderência de instalações móveis para atender a essas demandas.

Souza et al. (2019) definem o Problema de Localização de Mamógrafos (PLM) como um problema de localização de facilidades, em que o objetivo é decidir aonde instalar os mamógrafos para atender a demanda máxima de um conjunto de locais candidatos. Os autores propuseram modelos matemáticos e métodos heurísticos para tratar o problema em Minas Gerais. Os resultados apresentados pelos autores mostraram que a distribuição atual dos equipamentos de mamografia no Estado é inadequada, pois considerando-se redistribuir esses aparelhos a cobertura de atendimentos é maior do que a atual. Além disso, os autores mostraram que há locais que não podem ser atendidos por mamógrafos fixos, ou por não possuírem infraestrutura hospitalar para receber um equipamento, ou mesmo, por estarem afastados de locais onde há um mamógrafo instalado. Para atender a demanda desses locais, os autores sugerem roteirizar um conjunto de unidades móveis de mamografia.

Renck et al. (2014) analisaram o uso de uma unidade móvel de mamografia em 33 municípios do Rio Grande do Sul onde não haviam equipamentos fixos disponíveis para atender a demanda feminina. Eles apontam que com a unidade móvel foram examinadas 8607 mulheres e identificados 37 casos de câncer de mama que poderiam ter a descoberta mais tardia sem a utilização do mamógrafo móvel, trazendo prejuízos irreparáveis a saúde das mulheres que tiveram o diagnóstico positivo.

2.2 Roteamento de Veículos

Dantzig e Ramser (1959) foram pioneiros nas pesquisas sobre o Problema de Roteamento de Veículos (PRV), que no decorrer dos anos se tornou um problema clássico de logística de transporte de cargas (produtos, serviços, pessoas, etc.) na área de otimização combinatória. A partir desses estudos, surgiram diversas extensões do problema original, cada qual com um ou mais objetivos, com o intuito de melhorar os processos logísticos dos mais variados setores industriais.

Freitas et al. (2007) definem o PRV como um problema em que clientes precisam ser atendidos por veículos, sediados em um ou mais depósitos, sendo que cada cliente deve ser visitado uma única vez e por apenas um veículo. Kramer et al. (2016) complementam que o PRV está entre os mais estudados da literatura devido à sua ampla aplicabilidade na resolução de problemas reais envolvendo a definição de rotas para uma frota de veículos.

Manguino e Ronconi (2012) afirmam que existem diversas variantes do PRV clássico que levam em consideração diferentes aspectos, tais como: janelas de tempo; frota de veículos heterogêneas, ou seja, veículos de capacidades distintas; entregas fracionadas, em que um cliente pode ser atendido por múltiplos veículos; múltiplos depósitos, de onde os veículos podem iniciar suas rotas; e muitas outras características que tornam o PRV tão relevante.

Nos problemas de logística mais interessantes e difíceis de solucionar, o número de clientes que devem ser atendidos pelos veículos disponíveis é grande o suficiente para tornar o PRV inviável de ser resolvido em tempo de execução hábil, utilizando-se métodos exatos. Com a dificuldade de encontrar soluções ótimas de instâncias reais em tempo de processamento aceitável, uma alternativa é adotar métodos heurísticos, para solucionar o problema quando os métodos exatos não são capazes de tratá-lo (Heinen e Osório, 2006).

Bittencourt et al. (2012) focaram em tratar o Problema de Roteamento de Veículos Capacitado (PRVC) para determinar as rotas de entrega de um frigorífero aviário na região de Juiz de Fora, Minas Gerais. Os autores fizeram uma comparação dos resultados registrados manualmente pelos motoristas, com os resultados obtidos utilizando a meta-heurística Busca Dispersa (Scatter Search), proposta no estudo. Eles mostraram que o algoritmo heurístico desenvolvido apresenta soluções de qualidade e mais eficientes do que as soluções manuais obtidas.

De la vega et al. (2014) formalizaram um modelo matemático exato que serve de apoio na decisão de compra de veículos e na definição das rotas de coleta interna em uma empresa do setor automotivo no Brasil. O modelo é definido como um problema de roteamento de veículos com entregas fracionadas e coleta simultânea (SVRPPD), e se propõe a reduzir os custos de transporte, definindo a roteirização dos veículos para a entrega de *pallets* e coleta de produto terminado.

Lima et al. (2015) propuseram uma estratégia baseada em Algoritmos Genéticos (AG) para tratar o PRVC. Inicialmente, uma população inicial é obtida utilizando uma representação cromossômica por meio de uma matriz binária. Para obter soluções factíveis na população inicial, eles aplicam heurísticas de Gillett e Miller (1974), e após um certo número de gerações sem melhora utilizam um método de Descida para refinar as soluções produzidas pelo AG. A análise sobre o desempenho do método mostra que foi possível obter soluções satisfatórias comparando-se com as melhores soluções da literatura na época em que o estudo foi desenvolvido.

Capítulo 3

Caracterização do Problema

O Problema de Roteamento de Unidades Móveis de Mamografia (MMURP) possui as seguintes características:

(a) Existe um conjunto N de localidades que possuem uma demanda dem_j de mulheres na faixa de idade indicada para realizar o exame de mamografia;

(b) Há um conjunto K de MMUs disponíveis para visitar as localidades candidatas;

(c) Há um conjunto M de depósitos, cada qual com uma quantidade previamente conhecida de MMUs, e de onde as MMUs iniciam as suas rotas;

(d) Cada MMU $k \in K$ possui uma capacidade cap_k definida por:
cap_k = *Quantidade de mamógrafos transportado pela MMU* k $\times$ *capacidade do mamógrafo*;

(e) Há uma distância d_{ij} entre as localidades i e j;

(f) Há uma distância máxima, dada por *distMax*, permitida para uma MMU realizar o percurso de uma localidade a outra. Apenas a viagem inicial partindo do depósito não tem limite de quilometragem;

(g) Cada localidade deve ser visitada uma única vez e por apenas uma MMU. A demanda da localidade visitada deve ser totalmente atendida;

(h) O roteamento é aberto, isto é, as MMUs não retornam aos depósitos de origem, elas seguem um percurso enquanto for possível atender as demandas por exames e finalizam a rota na última localidade visitada.

O objetivo é determinar a roteirização para uma frota de MMUs que possibilite maximizar a cobertura de exames de mamografia minimizando a distância total percorrida pelas MMUs.

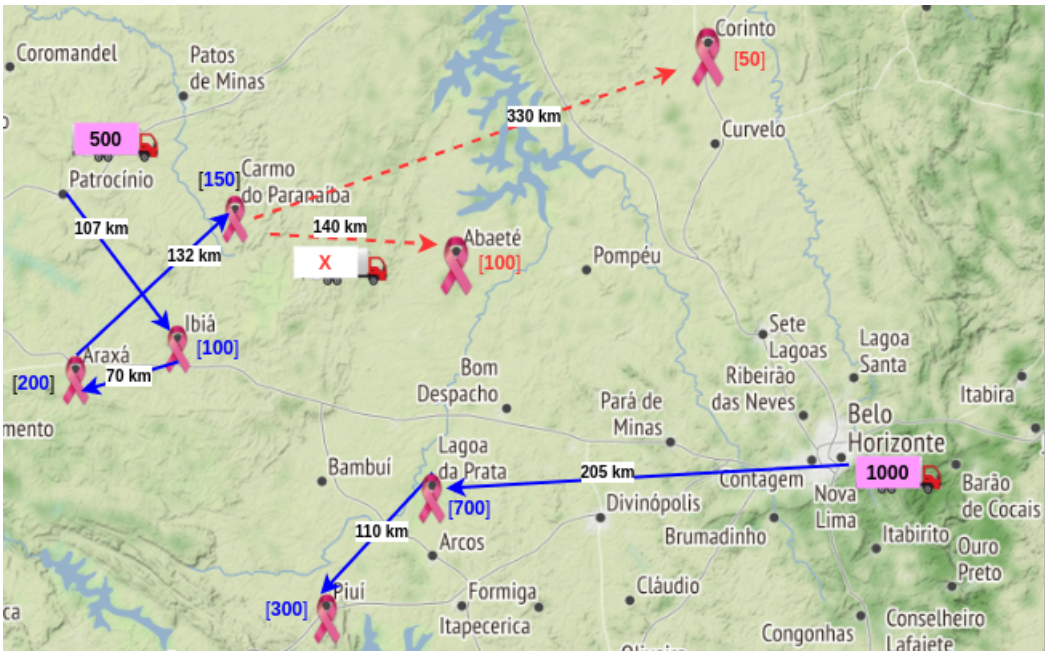

Figura 3.1: Exemplo de solução com distMax = 180 km

A Figura 3.1 mostra um exemplo de solução viável considerando que o limite máximo de deslocamento entre cada par de localidades é de 180 quilômetros, exceto quando o local de partida da MMU é o depósito. Neste exemplo, há 7 localidades candidatas (Abaeté, Araxá, Carmo do Paranaíba, Corinto, Ibiá, Lagoa da Prata e Piuí) e 2 depósitos (Patrocínio e Belo Horizonte), de onde as MMUs iniciam suas rotas. Cada depósito possui uma única MMU, sendo que a MMU de Patrocínio possui a capacidade de realizar 500 exames de mamografia, enquanto a MMU de Belo Horizonte pode atender até 1000 mulheres. Cada localidade possui uma demanda a ser atendida que está representada pelo valor entre colchetes, e a distância entre cada par de localidades é representada pelo valor sobre os arcos. Como pode ser observado na figura, a demanda de Ibiá é de 100 exames, e a distância entre Patrocínio e Ibiá é de 107 quilômetros. Na solução apresentada, os municípios de Ibiá (100), Araxá (200) e Carmo do Paranaíba (150) são atendidos pela MMU que inicia sua rota no depósito de Patrocínio, nesta mesma ordem de visita. Já a MMU que inicia a sua rota em Belo Horizonte atende a demanda dos municípios de Lagoa da Prata (700) e, logo em seguida, de Piuí (300). A demanda total coberta neste exemplo de solução foi de 1450 exames (100 + 200 + 150 + 700 + 300), e a distância total percorrida pelas MMUs foi de 624 quilômetros (107 + 70 + 132 + 205 + 110). Conforme está destacado pelos arcos na cor vermelha na figura, os municípios de Abaeté e Corinto não puderam ser visitados pela MMU de Patrocínio, pois ao percorrê-los haveria uma inviabilidade na solução, uma vez que as restrições de limite máximo de distância e de capacidade da MMU não seriam satisfeitos.

Capítulo 4

Metodologia

Neste capítulo, é apresentada a metodologia desenvolvida que possibilita alcançar os objetivos propostos na Seção 1.2. Na Seção 4.1, o algoritmo heurístico proposto para tratar o Problema de Roteamento de Unidades Móveis de Mamografia (MMURP) é descrito em detalhes.

4.1 Algoritmo Heurístico

Inicialmente, na Seção 4.1.1, é mostrado como uma solução s é representada. Na Seção 4.1.2 a função de avaliação da solução s é descrita em detalhes. Na Seção 4.1.2 é descrito o método construtivo desenvolvido para gerar uma solução inicial para o problema. Na Seção 4.1.4 são apresentadas as estruturas de vizinhança usadas para explorar o espaço de soluções e, por último, é apresentado o algoritmo de busca local que possibilita melhorar a qualidade da solução por meio de buscas por ótimos locais.

4.1.1 Representação da Solução

Representa-se uma solução s do MMURP por meio de até $|K|$ vetores que armazenam em cada posição as localidades percorridas pelas MMUs na ordem em que aparecem. O número $|K|$ de vetores corresponde à quantidade de MMUs disponíveis. Os vetores podem ou não ter tamanhos iguais, dependendo apenas da quantidade de localidades visitadas por cada MMU.

	1	2	3	4	5	6
MMU 1	13	4	11	5	3	2
MMU 2	14	8	1	6		
MMU 3	14	10	7	12	9	

Figura 4.1: Representação de uma solução s

A Figura 4.1 ilustra a representação computacional de uma solução s. Os índices de 1 a 6 representam as posições dos vetores, sendo que cada posição armazena a localidade visitada na ordem em que ela aparece. A primeira posição de cada vetor indica o depósito de onde as MMUs iniciam suas rotas. A MMU 1 tem como ponto de partida o depósito 13 e visita as localidades 4, 11, 5, 3 e 2, respectivamente. Já a MMU 2 inicia sua rota no depósito 14 e visita as localidades 8, 1 e 6. Por último, a MMU 3, que também inicia sua rota no depósito 14, percorre as localidades 10, 7, 12 e 9.

4.1.2 Avaliação da Solução

Uma solução s do MMURP é avaliada de modo hierárquico. A solução é avaliada inicialmente pela demanda total atendida, conforme é apresentado na Equação (4.1), e caso duas soluções obtiverem o mesmo valor nessa função, a melhor é aquela cuja soma das distâncias percorridas for a menor, como é apresentado na Equação (4.2):

Função de avaliação multiobjetivo: $f(s) = (f_{dem}(s), f_{dist}(s))$, sendo:

$$f_{dem}(s) = \sum_{(j,k)\in A_1} dem_j \tag{4.1}$$

$$f_{dist}(s) = \sum_{(i,j)\in A_2} d_{ij} \tag{4.2}$$

em que A_1 é o conjunto das associações entre uma localidade j e uma MMU k que a atende na solução s, dem_j é a demanda da localidade j, A_2 é o conjunto das arestas ligando as localidades i e j atendidas por uma MMU, e d_{ij} é a distância entre as localidades i e j.

4.1.3 Construção da Solução

A construção de uma solução para o MMURP é definida pelos passos seguintes:

Passo 1 - Ordenação: Seja LC a lista de localidades candidatas a serem visitadas pelas MMUs, ordene-a decrescentemente de acordo com a demanda de cada localidade;

Passo 2 - Clusterização: Para cada localidade i da LC ordenada, aloque a localidade i ao depósito mais próximo e elimine-a de LC. Passe para a próxima localidade da lista. Ao final desse passo tem-se uma lista de localidades candidatas para cada depósito.

Passo 3 - Heurística do vizinho mais próximo: Para cada depósito, enquanto houver MMU disponível e localidades ainda não visitadas da lista de candidatas do depósito:

3.1: Inicie a rota de uma nova MMU com a localidade onde se encontra o depósito;

3.2: Atenda a demanda do depósito e atualize a capacidade da MMU que foi utilizada para atender a essa demanda.

3.3: Determine a localidade mais próxima da última localidade inserida na rota da MMU que ainda não foi visitada;

3.4: Verifique se é possível atender a demanda da localidade mais próxima:

(a) Se a demanda da localidade mais próxima for menor ou igual à capacidade da MMU e a distância até a localidade mais próxima for menor ou igual a *distMax*, atenda-a e insira-a na rota da MMU. Atualize a capacidade da MMU e remova a localidade atendida da lista de candidatas do depósito. Volte ao item 3 do Passo 3;

(b) Caso contrário, finalize a rota da MMU na última localidade por ela visitada;

3.5: Se houver MMU disponível, retorne ao item 1 do Passo 3; caso contrário, encerre o método e retorne as rotas feitas pelas MMUs.

4.1.4 Estruturas de Vizinhança

Para explorar o espaço de soluções do MMURP são utilizados três movimentos: Inserção, Troca (1,1) e Realocação (1,0). O primeiro movimento é aplicado com o objetivo de aumentar a demanda total atendida, enquanto os demais movimentos visam reduzir a distância total percorrida pelas MMUs. As estruturas de vizinhança utilizadas são descritas como segue:

(i) **Inserção**: A vizinhança de Inserção consiste em inserir a localidade t que possua o maior valor de demanda, e que ainda não tenha sido visitada, na rota da MMU k com a maior capacidade residual ociosa, e que seja capaz de atendê-la. A posição em que a localidade t deve ser inserida na rota da MMU k, é a que forneça o menor custo de inserção entre dois locais já atendidos. No exemplo da Figura 4.2, o local de maior demanda dentre os candidatos ainda não percorridos por nenhuma MMU (Locais 4 e 5), é o que está representado pelo vértice de número 4 com a demanda de 150 exames. Como pode ser observado na figura, esta localidade é inserida na rota da MMU 1, que corresponde a MMU com a ociosidade mais alta, cujo valor é de 200 de capacidade de atendimentos. O menor custo de inserção obtido é o de valor 6, calculado de acordo com a heurística clássica da inserção mais barata. Com base nesse custo, têm-se que o local 4 deve entrar na rota da MMU 1 entre os locais 1 e 2, onde o custo de inserção retornado é o menor possível.

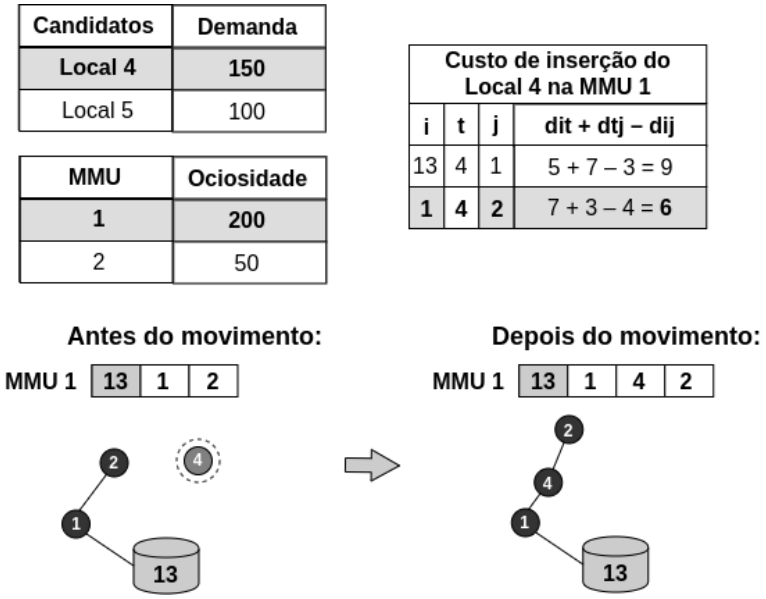

Figura 4.2: Inserção do local 4 entre os locais 1 e 2 na rota da MMU 1.

(ii) **Troca(1,1)**: A segunda vizinhança adotada consiste na troca de uma localidade i, visitada por uma MMU, com uma localidade j, percorrida por outra MMU. Esse movimento pode ser realizado em duas rotas que se iniciam no mesmo depósito ou em dois depósitos distintos, como pode ser observado nas Figuras 4.3 e 4.4.

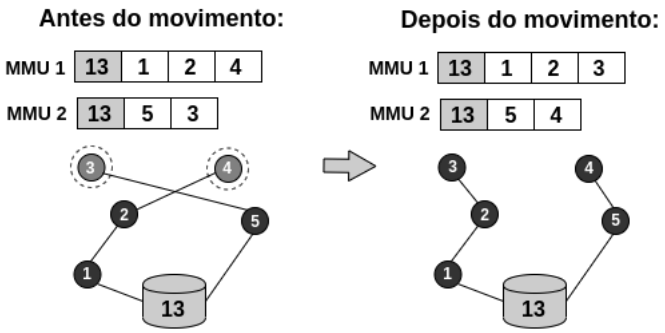

Figura 4.3: Troca entre o local 4 na rota da MMU 1 e o local 3 na rota da MMU 2 no mesmo depósito.

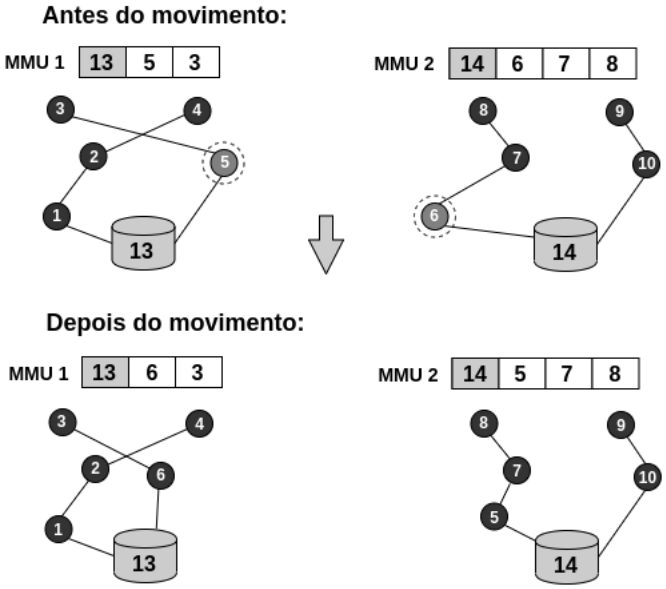

Figura 4.4: Troca entre o local 5 na rota da MMU 1 e o local 6 na rota da MMU 2 em depósitos diferentes.

(iii) **Realocação(1,0)**: Por fim, a última vizinhança consiste na transferência de uma localidade i de uma rota de uma MMU, para a rota de outra MMU. Assim como na vizinhança de troca, esse movimento também pode ser realizado em duas rotas que se iniciam no mesmo depósito ou em dois depósitos distintos, como pode ser observado nas Figuras 4.5 e 4.6.

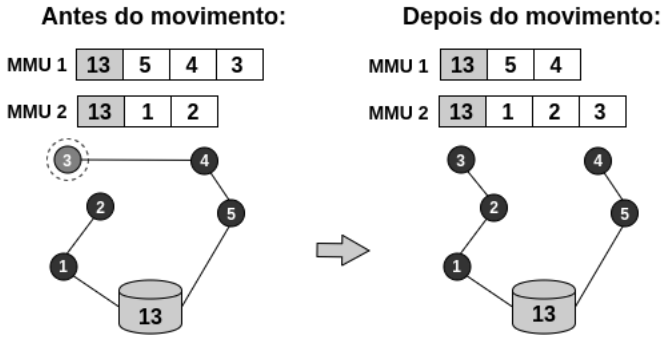

Figura 4.5: Transferência do local 3 da rota da MMU 1 para a rota da MMU 2 no mesmo depósito.

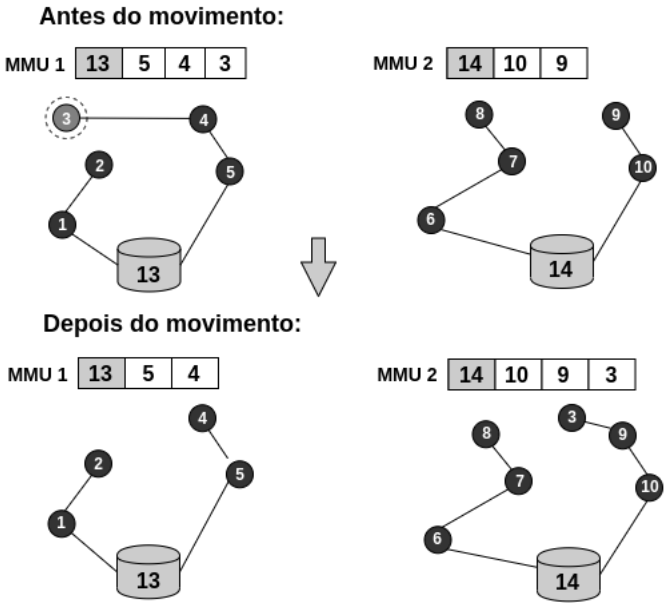

Figura 4.6: Transferência do local 3 da rota da MMU 1 para a rota da MMU 2 em depósitos diferentes.

4.1.5 Busca Local

A busca por ótimos locais para obter melhora na solução s é feita por meio do algoritmo *Randomized Variable Neighborhood Descent* (RVND) (Souza et al., 2010; Subramanian et al., 2010), utilizando a estratégia *First Improvement* (FI). O RVND consiste em explorar o espaço de soluções utilizando uma ordem aleatória na escolha da vizinhança a cada iteração do algoritmo. Caso a vizinhança escolhida melhore a solução corrente, a chamada do método é mantida considerando todas as vizinhanças iniciais, e uma nova vizinhança é escolhida. Caso contrário, a vizinhança adotada é removida do conjunto inicial de vizinhanças. O algoritmo explora o espaço de soluções enquanto houver vizinhanças que melhorem a solução s corrente.

O pseudocódigo do RVND é mostrado no Algoritmo 1. Inicialmente, o algoritmo recebe como parâmetro a solução s e o conjunto V de vizinhos, descritos na Seção 4.1.4. Na primeira linha do algoritmo, a solução s corrente é guardada. Na segunda linha, um laço de repetição é mantido enquanto o conjunto V não for vazio. Na terceira linha, escolhe-se aleatoriamente uma vizinhança pertencente a V, que é passada como parâmetro para o FI encontrar a primeira solução que apresente uma melhora em relação a solução corrente, de acordo com a vizinhança adotada. Na quinta linha, a solução retornada pelo FI é avaliada, e caso a demanda da solução encontrada for maior do que a demanda da solução corrente, ou caso a demanda seja igual, mas a distância percorrida pelas MMUs for menor do que a da solução corrente, então, a solução corrente é atualizada com a solução que obteve a primeira melhora (linha 6 e 7) e o conjunto V é reinicializado (linha 8). Por outro lado, caso a solução retornada pelo FI com a vizinhança adotada não apresente uma melhora em relação a solução corrente, a vizinhança é removida de V, como pode ser observado na linha 10 do algoritmo. Para finalizar, na última linha do pseudocódigo, o algoritmo retorna s_{best}, que corresponde a um ótimo local.

Algoritmo 4.1: RVND

Entrada: s, V
Saída: s_{best}

1 $s_{best} \leftarrow s$;
2 **enquanto** $V \neq \emptyset$ **faça**
3 $\quad v \leftarrow$ Escolha uma vizinhança $v \in V$ aleatoriamente;
4 $\quad s' \leftarrow$ Encontre o vizinho de primeira melhora de s, de acordo com a vizinhança escolhida;
5 $\quad$ **se** $f_{dem}(s') > f_{dem}(s)$ ***ou*** $(f_{dem}(s') = f_{dem}(s)$ ***e*** $f_{dist}(s') < f_{dist}(s))$ **então**
6 $\quad\quad s \leftarrow s'$;
7 $\quad\quad s_{best} \leftarrow s'$;
8 $\quad\quad$ Reinicialize V;
9 $\quad$ **senão**
10 $\quad\quad$ Remova v de V;
11 **retorne** s_{best};

Capítulo 5

Experimentos Computacionais

O algoritmo proposto foi desenvolvido na linguagem Python, versão 3.6.9. Todos os testes foram realizados em um computador com processador Intel Core i3-4005U, CPU @1.70GHz $\times$ 4, com 12 GB de memória RAM sob o sistema operacional Ubuntu, versão 18.04.

Para a execução dos testes foram utilizadas as informações relativas a 853 localidades que compõem o Estado de Minas Gerais. As demandas de cada localidade foram obtidas no site do Departamento de Informática do SUS (DATASUS), e esses dados são relativos ao censo de 2010 realizado pelo IBGE, projetado para o ano de 2020. Nessa projeção, a demanda total em MG foi de 1727487 exames de mamografia. As distâncias entre cada par de localidades foram obtidas por meio da API Google Maps, considerando-se o deslocamento por carro.

O modelo de programação matemática desenvolvido em Souza et al. (2019) foi aplicado em uma primeira etapa para simular a atual distribuição dos mamógrafos no Estado e identificar localidades desprovidas de mamógrafos fixos ou em número insuficiente para atendê-las. De acordo com as informações obtidas pelo DATASUS, em Setembro de 2019 Minas Gerais possuía 326 mamógrafos. Com essa quantidade de mamógrafos disponíveis no Estado, 274 localidades tiveram a sua demanda atendida por eles, o que equivale a uma cobertura de 1146490 exames. Um total de 579 localidades não foram atendidas pelos mamógrafos fixos. A demanda total das localidades não atendidas é de 580997 exames, o que representa 33,6% da demanda total.

Dentre as 579 localidades com uma demanda ainda a ser atendida, verifica-se que 13 delas possuem demanda superior à capacidade de um mamógrafo, que é capaz de realizar 5069 exames anuais (INCA, 2015). Sendo assim, consideramos instalar nessas localidades tantos mamógrafos fixos quantos forem necessários para que a sua demanda restante fosse menor do que a capacidade de um mamógrafo. Esse pré-processamento é feito para que as localidades candidatas a serem atendidas pelas MMUs possuam pouca demanda, pois não justifica usar uma MMU para deixá-la fixa em uma localidade. Por exemplo, uma localidade que possuir a demanda de 6069 exames e que não foi atendida

por algum mamógrafo fixo, receberia a instalação de um mamógrafo e sua demanda residual seria de 1000 exames possíveis de ser atendidos por uma MMU.

Além de possuir uma demanda capaz de ser atendida por um mamógrafo, para que uma localidade seja candidata a ser visitada por uma MMU, ela deve estar localizada a uma distância de até 500 km de algum dos depósitos considerados. Para tratar o MMURP foram definidos dois depósitos: Patrocínio e Belo Horizonte. Das localidades que restaram e que possuem a demanda inferior à capacidade de um mamógrafo, identificamos 84 localidades que distam até 500 km de Patrocínio e 360 localidades de Belo Horizonte. Portanto, foram selecionadas 444 localidades como candidatas a compor uma solução do MMURP com uma demanda total de 358131 exames.

Para testar o algoritmo proposto, foram definidos dois cenários que consideram a aquisição gradativa de MMUs, de 8 em 8, de capacidades 5069 e 10138 até que a cobertura de atendimentos fosse a máxima com o menor número de MMUs utilizadas. Em ambos os cenários, definimos o parâmetro $distMax = 180$ km. Este parâmetro impõe a distância máxima permitida para que uma MMU se desloque de uma localidade até outra, exceto no caso em que a localidade de origem é o depósito. Neste caso, é permitido que a MMU percorra a distância necessária para atender a uma localidade candidata.

A Tabela 5.1 mostra os resultados obtidos com a execução do algoritmo nesses dois cenários. Os valores retornados correspondem à média de 10 execuções realizadas. As colunas da tabela são descritas da seguinte forma: Na primeira coluna, *MMUs* é a quantidade de MMUs que iniciam suas rotas em cada um dos depósitos (como exemplo, $MMUs = 1$ representa uma MMU disponível em Patrocínio e uma disponível em Belo Horizonte); Na segunda coluna, *MMUs Usadas* é a quantidade de MMUs que de fato foram usadas para atender aos locais candidatos (como exemplo, 1 / 1 indica que 1 MMU do depósito de Patrocínio foi usada e 1 do depósito de Belo Horizonte também foi usada); Na terceira coluna, *Dem. Cob.* mostra a soma da demanda total coberta pelas MMUs de ambos os depósitos; Na quarta coluna, *% Cob.* equivale ao percentual de cobertura em relação à demanda inicial de 358131 exames; Na quinta coluna, *Dist.* (km) é a soma da distância total percorrida pelas MMUs de ambos os depósitos. Por último, temos o tempo de execução do algoritmo, em segundos.

Tabela 5.1: Resultados nos cenários em que distMax = 180 km

	cap = 5069					**cap** = 10138				
MMUs	MMUs Usadas	Dem. Cob.	Cob. (%)	Dist. (km)	Time (s)	MMUs Usadas	Dem. Cob.	Cob. (%)	Dist. (km)	Time (s)
1/1	1/1	9987	2,7	658	0,45	1/1	20232	5,6	845	0,04
8/8	8/8	78767	21,9	4811,7	0,68	8/8	153056	42,7	10087,8	5,7
16/16	**15**/16	151724	42,37	12120,4	8,4	**9**/16	234051	65,3	14578,4	21,7
24/24	**15**/24	185133	51,6	14575	15,5	**9**/24	301665	84,2	19130,2	51,3
32/32	**15**/32	216786	60,5	15836,6	16,4	**9**/32	355140	99,1	21604,5	91,9
40/40	**15**/40	250177	69,8	18897,6	27,7	**9/34**	**358131**	**100,0**	**21807,4**	**103,4**
48/48	**15**/48	287985	80,4	23431,4	42,4					
56/56	**15**/56	324343	90,5	27476,8	49,6					
64/64	**15**/64	349561	97,6	30092,4	64,8					
72/72	**15/70**	**358131**	**100,0**	**30601,4**	**85,5**					

Na Tabela 5.1 comparamos as soluções retornadas pelo algoritmo nos dois cenários analisados. Como pode ser observado no primeiro cenário com MMUs de capacidade 5069, foram necessárias 85 MMUs para atender 100% da demanda da região considerada, com um deslocamento total dessas MMUs de 30601,4 km. Por outro lado, com MMUs de capacidade 10138 foram utilizadas somente 43 MMUs para atender a todas as mulheres, e o deslocamento total foi de 21807,4 km. Também é possível observar que a partir da linha 3 da tabela, em ambos os cenários, não adianta adquirir mais MMUs partindo do depósito de Patrocínio, pois a cobertura de atendimentos dos locais candidatos deste depósito já é a máxima. Além disso, observa-se que o deslocamento no segundo cenário foi reduzido consideravelmente. Isso ocorreu pois nesse cenário menos MMUs tiveram que partir diretamente do depósito até um local candidato, comparando-se com o primeiro cenário. Como permitimos que a MMU percorresse qualquer distância até um local candidato quando o local de origem é o depósito, isso influenciou no resultado final da distância total percorrida pelas MMUs ao se comparar os dois cenários analisados.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho introduziu o Problema de Roteamento de Unidades Móveis de Mamografia (MMURP). Este problema possui dois objetivos: maximizar a cobertura de exames de mamografia e minimizar a distância total percorrida pelas Unidades Móveis de Mamografia (MMUs). Neste trabalho, esses objetivos são tratados de forma hierárquica. O objetivo de primeiro nível é maximizar a cobertura e o de segundo nível é de minimizar a distância total percorrida pelas MMUs.

Para tratar o problema, foi desenvolvido um algoritmo heurístico baseado no método de busca local *Randomized Variable Neighborhood Descent*. Esse algoritmo explora o espaço de soluções por meio de movimentos de inserção, troca e realocação. Ele foi testado utilizando uma instância relativa a uma região do Estado de Minas Gerais composta por 444 localidades candidatas.

Os resultados obtidos mostram que considerando o cenário atual da distribuição dos equipamentos de mamografia em Minas Gerais, com a solução apresentada seria possível realizar 358131 exames a mais no Estado apenas na região estudada. Esse atendimento ocorre em localidades que não são atendidas atualmente por mamógrafos fixos e que estão em um raio de até 500 km dos depósitos considerados, Patrocínio e Belo Horizonte.

Como trabalhos futuros, pretende-se dar continuidade na revisão de literatura a fim de identificar outras características que possam ser adicionadas ao MMURP, tais como, os custos da equipe que opera os aparelhos e os de manutenção das MMUs. Por fim, pretende-se desenvolver uma meta-heurística para melhorar a qualidade das soluções obtidas.

Referências Bibliográficas

Abreu, G.: 2015, Distribuição geográfica e acesso ao mamógrafo no estado da Bahia, *Revista Baiana de Saúde Pública* **39**(1), 88. Disponível em `http://rbsp.sesab.ba.gov.br/index.php/rbsp/article/view/768`. Acesso em 03/09/2019.

Amaral, P., Luz, L., Cardoso, F. e Freitas, R.: 2017, Distribuição espacial de equipamentos de mamografia no Brasil, *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais* **19**(2), 326–341.

Bittencourt, G. C. d., Rodrigues, S., Netto, P. O. B. e Jurkiewicz, S.: 2012, Problema de roteamento de veículos capacitados (prvc): Solução manual x busca dispersa, *Congreso Latino-Iberoamericano de Investigación Operativa - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional - CLAIO SBPO*, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 2114–2125.

BRASIL: 2015, Critérios e parâmetros para o planejamento e programação de ações e serviços de saúde no âmbito do sistema único de saúde: parâmetros sus, Ministério da Saúde. Disponível em `www.saude.campinas.sp.gov.br/programas/protocolos/Parametros_SUS_2015.pdf`. Acesso em 30/10/2019.

da Cunha, G. N., de Mello Vianna, C. M., Mosegui, G. B. G., da Silva, M. P. R. e Jardim, F. N.: 2019, Rastreamento do câncer de mama: modelo de melhoria do acesso pelo uso de mamógrafos móveis, *Rev Panam Salud Publica* .

Dantzig, G. B. e Ramser, J. H.: 1959, The truck dispatching problem, *Management Science* **6**(1), 80–91. Disponível em `https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80`. Acesso em 26/09/2019.

De la vega, D. S., Marquez, M. F. R., Arteaga, A. M., Silva, J. E. e Vieira, J. G. V.: 2014, Problema de roteamento de veículos com entregas fracionadas e coleta simultânea: Uma aplicação para a logística interna, *XLVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional - Pesquisa Operacional na Gestão da Segurança Pública*, Salvador, BA, Brasil, pp. 1496–1508.

Freitas, L. M. B., Arroyo, J. E. C. e Montané, F. A. T.: 2007, Heurística VNS para o problema de roteamento de veículos com coleta e entrega simultânea, *Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha - SPOLM*, Rio de Janeiro, Brasil.

Heinen, M. R. e Osório, F. S.: 2006, Algoritmos genéticos aplicados ao problema de roteamento de veículos, *Hífen* **30**(58), 90–95.

INCA: 2009, Parâmetros para o rastreamento do câncer de mama: recomendações para gestores estaduais e municipais, INCA. Disponível em `http://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/parametros_rastreamento_cancer_mama.pdf`. Acesso em 30/10/2019.

INCA: 2015, Revisão do parâmetro para cálculo da capacidade de produção do mamógrafo simples - 2015, INCA. Disponível em `https://www.inca.gov.br/sites/ufu.sti.inca.local/files//media/document/nota-revisao-capacidade-dos-mamografos-2015_0.pdf`. Acesso em 30/10/2019.

INCA: 2019, A situação do câncer de mama no brasil: síntese de dados dos sistemas de informação, INCA. Disponível em `https://www.inca.gov.br/publicacoes/livros/situacao-do-cancer-de-mama-no-brasil-sintese-de-dados-dos-sistemas-de-informacao`. Acesso em 25/09/2019.

Kramer, R. H. F. R., Subramanian, A. e Penna, P. H. V.: 2016, Problema de roteamento de veículos assimétrico com frota heterogênea limitada: um estudo de caso em uma indústria de bebidas, *Gestão & Produção* **23**(1), 165–176.

Lima, S. J. d. A., Santos, R. A. R. e de Araujo, S. A.: 2015, Otimização do problema de roteamento de veículos capacitado e as heurísticas de gillet e miller e descida de encosta, *XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção - Perspectivas Globais para a Engenharia de Produção*, Fortaleza, CE, Brasil.

Manguino, J. L. V. e Ronconi, D. P.: 2012, Problema de roteamento de veículos com frota mista, janelas de tempo e custos escalonados, *Congreso Latino-Iberoamericano de Investigación Operativa - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional - CLAIO SBPO*, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 1718–1729.

Mil, R. D., Guillaume, E., Launay, L., Guittet, L., Dejardin, O., Bouvier, V., Notari, A., Launoy, G. e Berchi, C.: 2019, Cost-effectiveness analysis of a mobile mammography unit for breast cancer screening to reduce geographic and social health inequalities, *Value in Health* **22**(10), 1111 – 1118. Disponível em `http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1098301519321977`. Acesso em 17/11/2019.

Penna, P. H. V., Subramanian, A., Ochi, L. S., Vidal, T. e Prins, C.: 2019, A hybrid heuristic for a broad class of vehicle routing problems with heterogeneous fleet, *Annals of Operations Research* **273**, 5–74.

Renck, D. V., Barros, F., Domingues, M. R., Gonzalez, M. C., Sclowitz, M. L., Caputo, E. L. e de Moraes Gomes, L.: 2014, Equidade no acesso ao rastreamento mamográfico do câncer de mama com intervenção de mamógrafo móvel no sul do rio grande do sul, brasil, *Cadernos de Saúde Pública* **30**(1), 88–96.

SES: 2019, Saúde da mulher—2019—secretaria de estado de saúde de minas gerais - ses, SES. Disponível em http://www.saude.mg.gov.br/saudedamulher. Acesso em 30/10/2019.

Souza, M. J. F., Coelho, I. M., Ribas, S., Santos, H. G. e Merschmann, L. H. C.: 2010, A hybrid heuristic algorithm for the open-pit-mining operational planning problem, *European Journal of Operations Research* **207**(2), 1041–1051.

Souza, M. J. F., Penna, P. H. V., Moreira de Sá, M. V. S. e Rosa, P. M.: 2020, A vns-based algorithm for the mammography unit location problem, *in* R. Benmansour, A. Sifaleras e N. Mladenović (eds), *Variable Neighborhood Search: 7th International Conference, ICVNS 2019, Rabat, Morocco, October 3–5, 2019, Revised Selected Papers*, 1 edn, Vol. 12010 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, Cham, Switzerland, chapter 3, pp. 37–52. DOI: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-44932-2_3. Acesso em 22/04/2020.

Souza, M. J. F., Penna, P. H. V., Stilpen, M. e Rosa, P. M.: 2019, A vns-based algorithm for solving the mammography unit location problem, *Aceito para publicação nos proceedings da 7th International Conference on Variable Neighborhood Search - ICVNS 2019*, Rabat, Marrocos, outubro de 2019.

Subramanian, A., Drummond, L., Bentes, C., Ochi, L. e Farias, R.: 2010, A parallel heuristic for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery, *Computers & Operations Research* **37**(11), 1899 – 1911. Metaheuristics for Logistics and Vehicle Routing. Disponível em http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054809002779. Acesso em 25/10/2019.

Teixeira, P.: 2016, Confira a rota do mamógrafo móvel em minas em novembro e dezembro. Blog saúdemg, Governo do Estado de Minas Gerais. Disponível em http://blog.saude.mg.gov.br/2016/10/28/saudedamulher-confira-a-rota-do-mamografo-movel-em-minas-em-novembro-e-dezembro/. Acesso em 26/10/2019.

Verter, V. e Lapierre, S.: 2002, Location of preventive health care facilities, *Annals of Operations Research* **110**, 123–132.

Xavier, D. R., de Oliveira, R. A. D., de Matos, V. P., Viacava, F. e de Campos Carvalho, C.: 2016, Cobertura de mamografias, alocação e uso de equipamentos nas regiões de saúde, *Saúde em debate* **40**(110), 20–35.