

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

TARLEY MANSUR FANTAZZINI

PROCEDIMENTOS HEURÍSTICOS NA DEFINIÇÃO DE ROTAS DE LEITURA
PARA OS FUNCIONÁRIOS DE UMA COMPANHIA DE ENERGIA ELÉTRICA: UMA
APLICAÇÃO A UM MUNICÍPIO NO ESTADO DO PARANÁ

CURITIBA

2019

TARLEY MANSUR FANTAZZINI

PROCEDIMENTOS HEURÍSTICOS NA DEFINIÇÃO DE ROTAS DE LEITURA
PARA OS FUNCIONÁRIOS DE UMA COMPANHIA DE ENERGIA ELÉTRICA: UMA
APLICAÇÃO A UM MUNICÍPIO NO ESTADO DO PARANÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Produção, na Área de Pesquisa Operacional na Linha de Inspeção de Rotas. Aplicados à Engenharia de Produção, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria Teresinha Arns Steiner.

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

F216p

Fantazzini, Tarley Mansur

Procedimentos heurísticos na definição de rotas de leitura para os funcionários de uma companhia de energia elétrica: uma aplicação a um município no estado do Paraná [recurso eletrônico] / Tarley Mansur Fantazzini. – Curitiba, 2019.

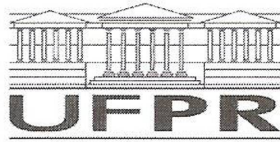
Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Produção, 2019.

Orientador: Maria Teresinha Arns Steiner .

1. Levantamento de rotas. 2. Estudo de rotas. 3. Heurística. 4. Energia elétrica - Consumo. I. Universidade Federal do Paraná. II. Steiner, Maria Teresinha Arns. III. Título.

CDD: 388.3221

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO - 40001016070P1

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **TARLEY MANSUR FANTAZZINI** intitulada: **PROCEDIMENTOS HEURÍSTICOS NA DEFINIÇÃO DE ROTAS DE LEITURA PARA OS FUNCIONÁRIOS DE UMA COMPANHIA DE ENERGIA ELÉTRICA: UMA APLICAÇÃO A UM MUNICÍPIO NO ESTADO DO PARANÁ**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 26 de Fevereiro de 2019.

MARIA TERESINHA ARNS STEINER

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

DEISE MARIA BERTHOLDI COSTA

Avaliador Externo (UFPR)

MARIANA KLEINA

Avaliador Interno (UFPR)

FABIANO OSCAR DROZDA

Avaliador Interno (UFPR)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a minha orientadora, professora Dr.^a Maria Teresinha Arns Steiner, pela orientação durante todo este trabalho. Obrigado pela atenção, paciência e por me guiar durante todo o processo.

Agradeço a minha avó Yonne Siqueira Fantazzini, que já se foi, mas continua sendo minha maior força e inspiração na vida.

Agradeço a minha mãe e avô, Marisa Mansur Botelho e Mário Botelho pelo carinho, e mesmo estando longe sempre acreditaram em mim.

Agradeço aos meus amigos Arthur Fernandes e André Santi, que me deram apoio emocional durante estes dois anos de Mestrado.

Agradeço a Rafaella Laureano Scaramella, secretária do PPGE, sempre proativa para auxiliar com meus pedidos.

Agradeço a todos os meus colegas da turma de Mestrado pela amizade, risadas e troca de conhecimentos. Vocês foram fundamentais para que este Mestrado fosse concluído.

Agradeço a todos os professores, tanto da minha graduação na UNIFEI, quanto os que tive durante o Mestrado na UFPR, pelos conhecimentos transmitidos.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo incentivo financeiro que foi fundamental para minha dedicação a este trabalho.

RESUMO

O presente estudo propõe a utilização de uma metodologia para solucionar o problema de roteamento dos leituristas de uma companhia de energia elétrica. Esta metodologia é formada pela junção do Problema de Localização de Facilidades (PLF) com o Problema do Carteiro Chinês (PCC). O primeiro busca definir *clusters* para cada leiturista e o segundo, procura encontrar a melhor rota dentro de cada um dos *clusters*. Como o PLF é classificado como *NP-hard*, a utilização de heurísticas reduz o seu tempo computacional e apresenta resultados que podem estar próximos da otimalidade. Portanto para selecionar um procedimento heurístico adequado para a resolução do problema, é preciso medir a sua eficiência e eficácia por meio da comparação com diferentes procedimentos. Neste trabalho, optou-se pela utilização da meta-heurística Algoritmo Genético (AG), a heurística de Teitz & Bart, um método híbrido, formado pela combinação do AG com o Algoritmo de Teitz & Bart, além do método exato do PLF. Esta metodologia, composta pelas técnicas mencionadas, foi aplicada a um município do Estado do Paraná, mais especificamente, São José dos Pinhás, objetivando a redução e um equilíbrio das rotas a serem percorridas pelos leituristas de uma companhia de energia elétrica. Como resultado, foi possível verificar que a utilização do método híbrido apresentou os melhores resultados, quando comparados com o método exato, ou seja, os mais próximos da otimalidade, sendo possível reduzir a rota dos leituristas na região analisada, assim como obter um melhor balanceamento de seu trabalho.

Palavras-chave: Problemas de Roteamento. Problemas de Localização de Facilidades. Procedimentos Heurísticos. Leituristas.

ABSTRACT

The present study proposes a methodology to solve the routing problem for the *readers* of an electric power company. This methodology is the result on merging the Facilities Location Problem (FLP) along with the Chinese Postman Problem (CPP). The former will provide the division of the area into clusters and the latter will provide us with an improved route inside each cluster. Since FLP is classified as NP-hard, the use of heuristics reduces computational time and is able to achieve results close to optimality. In order to select a suitable heuristic procedure to solve this problem, it is necessary to measure its effectiveness and efficiency by comparing different procedures. We chose the meta-heuristic Genetic Algorithm (GA), the Teitz & Bart Algorithm, a hybrid method, formed by the combination of GA and the Teitz & Bart Algorithm, and the FLP exact method. The methodologies were applied in a real case, in the city of São José dos Pinhais, located on the state of Paraná, aiming the reduction and a balance of the routes. As a result, it was possible to verify that the use of the hybrid method presented a result closer to the optimality, and it was possible to reduce the route in the analyzed region, as well as to balance the workload.

Key-words: Routing problem. Facility location problem. Heuristic procedures.
Readers.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1-	PASSOS DA FILTRAGEM DE ARTIGOS (BASES: SCOPUS, WEB OF SCIENCE E SCIENCE DIRECT)...	22
FIGURA 2.2-	PARÂMETROS DE BUSCA.....	22
FIGURA 2.3-	NUVEM DE PALAVRAS.....	28
FIGURA 2.4-	ESQUEMATIZAÇÃO DAS FASES DE UM ESTUDO APLICANDO A PO.....	41
FIGURA 2.5-	DIFERENÇA ENTRE ARCOS DIRECIONADOS E NÃO DIRECIONADOS.....	42
FIGURA 2.6-	DESENHO ORIGINAL DAS PONTES DE KÖNIGSBERG.....	44
FIGURA 2.7-	2-GRAFO OBTIDO A PARTIR DO ORIGINAL DAS PONTES DE KÖNIGSBERG.....	44
FIGURA 2.8-	FLUXOGRAMA DO ALGORITMO GENÉTICO.....	53
FIGURA 3.1-	ASPECTOS METODOLÓGICOS DA PESQUISA.....	55
FIGURA 3.2-	EXEMPLO DA DIVISÃO DE RUA EM TRECHOS.....	57
FIGURA 3.3-	EXEMPLO DO AGRUPAMENTO DE PONTOS DE LEITURA POR TRECHOS.....	57
FIGURA 3.4-	EXEMPLO DE <i>CROSSOVER</i> DE SOLUÇÕES.....	60
FIGURA 4.1-	MAPA DA SITUAÇÃO ATUAL DA REGIÃO.....	65
FIGURA 4.2-	PARTICIONAMENTO PELO MÉTODO EXATO.....	67
FIGURA 4.3-	PARTICIONAMENTO PELO ALGORITMO GENÉTICO	68
FIGURA 4.4-	PARTICIONAMENTO PELO ALGORITMO DE TEITZ & BART	70
FIGURA 4.5-	PARTICIONAMENTO PELO AG + ALGORITMO DE TEITZ & BART.....	71
FIGURA 4.6-	PARTICIONAMENTO PELO MÉTODO EXATO.....	73
FIGURA 4.7-	PARTICIONAMENTO PELO ALGORITMO GENÉTICO	75
FIGURA 4.8-	PARTICIONAMENTO PELO ALGORITMO DE TEITZ & BART.....	76
FIGURA 4.9-	PARTICIONAMENTO PELO AG + ALGORITMO DE TEITZ & BART.....	77

FIGURA 4.10-	PARTICIONAMENTO PELO MÉTODO EXATO.....	79
FIGURA 4.11-	PARTICIONAMENTO PELO AG.....	81
FIGURA 4.12-	PARTICIONAMENTO PELO ALGORITMO DE TEITZ & BART.....	82
FIGURA 4.13-	PARTICIONAMENTO PELO AG + ALGORITMO DE TEITZ & BART.....	84
FIGURA 4.14-	ROTA OBTIDA PARA O LEITURISTA 1.....	88
FIGURA 4.15-	ROTA OBTIDA PARA O LEITURISTA 2.....	88
FIGURA 4.16-	ROTA OBTIDA PARA O LEITURISTA 3.....	89
FIGURA 4.17-	ROTA OBTIDA PARA O LEITURISTA 4.....	90
FIGURA 4.18-	ROTA OBTIDA PARA O LEITURISTA 5.....	91
FIGURA 4.19-	ROTA OBTIDA PARA O LEITURISTA 6.....	91
FIGURA 4.20-	ROTA OBTIDA PARA O LEITURISTA 7.....	92
FIGURA 4.21-	ROTA OBTIDA PARA O LEITURISTA 8.....	93

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1-	ANÁLISE DAS CITAÇÕES (BASES: WEB OF SCIENCE E SCOPUS)	25
TABELA 2.2-	PUBLICAÇÕES COM TEMAS RELACIONADOS À PESQUISA.....	31
TABELA 2.3-	COMPONENTES DE REDES TÍPICAS.....	47
TABELA 3.1-	QUANTIDADE DE LEITURAS ASSOCIADAS A CADA UM DOS PONTOS.....	58
TABELA 4.1-	DIVISÃO ATUAL DE LEITURAS DA REGIÃO.....	66
TABELA 4.2-	DADOS DO PARTICIONAMENTO PELO MÉTODO EXATO.....	67
TABELA 4.3-	DADOS DO PARTICIONAMENTO PELO AG.....	69
TABELA 4.4-	DADOS DO PARTICIONAMENTO PELO ALGORITMO DE TEITZ & BART.....	70
TABELA 4.5-	DADOS DO PARTICIONAMENTO PELO AG + ALGORITMO DE TEITZ & BART.....	72
TABELA 4.6-	DADOS DO PARTICIONAMENTO PELO MÉTODO EXATO.....	74
TABELA 4.7-	DADOS DO PARTICIONAMENTO PELO AG.....	75
TABELA 4.8-	DADOS DO PARTICIONAMENTO PELO ALGORITMO DE TEITZ & BART.....	76
TABELA 4.9-	DADOS DO PARTICIONAMENTO PELO AG + ALGORITMO DE TEITZ & BART.....	78
TABELA 4.10-	DADOS DO PARTICIONAMENTO PELO MÉTODO EXATO.....	80
TABELA 4.11-	DADOS DO PARTICIONAMENTO PELO AG.....	81
TABELA 4.12-	DADOS DO PARTICIONAMENTO PELO ALGORITMO DE TEITZ & BART.....	83
TABELA 4.13-	DADOS DO PARTICIONAMENTO PELO AG + ALGORITMO DE TEITZ & BART.....	84
TABELA 4.14-	COMPARATIVO DOS CENÁRIOS PELO MÉTODO EXATO.....	86
TABELA 4.15-	COMPARATIVO DOS CENÁRIOS POR MÉTODOS APROXIMADOS.....	86

TABELA 4.16-	COMPARATIVO DE DISTÂNCIAS ENCONTRADAS (M).....	93
--------------	---	----

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 2.1-	ANÁLISE DAS REVISTAS CIENTÍFICAS.....	24
GRÁFICO 2.2-	NACIONALIDADE DAS PESQUISAS.....	27
GRÁFICO 2.3-	NÚMERO DE PUBLICAÇÕES POR ANO.....	27
GRÁFICO 2.4-	FREQUÊNCIA DE PALAVRAS-CHAVE.....	29
GRÁFICO 2.5-	SOFTWARES MAIS UTILIZADOS PELOS AUTORES.	29
GRÁFICO 2.6-	HEURÍSTICAS UTILIZADAS PELOS AUTORES.....	30
GRÁFICO 3.1-	RELAÇÃO ENTRE O TEMPO COMPUTACIONAL E O TAMANHO DA POPULAÇÃO.....	59
GRÁFICO 3.2-	RELAÇÃO ENTRE CONVERGÊNCIA DA SOLUÇÃO COM O NÚMERO DE ITERAÇÕES.....	61

LISTA DE SIGLAS

ACO	- <i>Ant Colony Optimization</i>
AG	- <i>Algoritmo Genético</i>
AMPL	- <i>A Mathematical Programming Language</i>
BD	- <i>Benders Decomposition</i>
BIPP	- <i>Binary Integer-Programming Problem</i>
CARP	- <i>Capacitated Arc Routing Problem</i>
C&W	- <i>Clarke & Wright</i>
CBO	- <i>Colliding Bodies Optimization</i>
CD	- <i>Centro de distribuição</i>
CRAB-ISP	- <i>Capacitated Routing and Allocation with Balancing - Integrally solved Single Product</i>
CPP	- <i>Chinese postman problem</i>
DPLRPP	- <i>Directed Profitable Location Rural Postman Problem</i>
FLP	- <i>Facility location problem</i>
GAMS	- <i>General Algebraic Modeling System</i>
GH	- <i>Greedy Heuristic</i>
GIS	- <i>Geographic Information System</i>
GPM	- <i>Gaussian Plume Model</i>
GRASP	- <i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i>
LS	- <i>Local Search</i>
MA	- <i>Memetic Algorithm</i>
MILP	- <i>Mixed-Integer Linear Programming</i>
MIP	- <i>Mixed-Integer Programming</i>
MP-ALNS	- <i>Multiperiodic Adaptive Large Neighbourhood Search</i>
NP	- <i>Nonlinear Programming</i>
OR	- <i>Otimização em Redes</i>
PCC	- <i>Problema do Carteiro Chinês</i>
PCR	- <i>Problema do Carteiro Rural</i>

PCV	- Problema do Caixeiro Viajante
PGR	- Problema Geral de Roteamento
PHR	- <i>Path-relinking</i>
PL	- Programação Linear
PLF	- Problema de Localização de Facilidades
PO	- Pesquisa Operacional
PR	- Problema de roteamento
PRA	- Problema de roteamento em arcos
PRN	- Problema de roteamento em nós
RMP	- <i>Restricted Master Problem</i>
RPP	- <i>Rural Postman Problem</i>
SA	- <i>Simulated Annealing</i>
SPP	- <i>Set Partitioning Problem</i>
TA	- <i>Threshold accepting</i>
TOD	- <i>Thermal Observation Device</i>
TS	- <i>Tabu Search</i>
VNS	- <i>Variable Neighborhood Search</i>
VNSPR	- <i>Variable neighborhood search with path-relinking</i>
VRP	- <i>Vehicle routing problem</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	18
1.1.1 Objetivo geral.....	18
1.1.2 Objetivos específicos.....	18
1.2 JUSTIFICATIVA	19
1.3 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	19
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 BIBLIOMETRIA.....	21
2.1.1 Seleção de artigos.....	21
2.1.2 Análise Bibliométrica	24
2.2 ANÁLISE SISTEMÁTICA DOS ARTIGOS	31
2.2.1 Características das publicações.....	31
2.2.2 Trabalhos correlatos.....	37
2.3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	39
2.3.1 Pesquisa operacional	39
2.3.2 Problemas de otimização em redes.....	41
2.3.3 Problema de roteamento em arcos.....	43
2.3.4 Problema de roteamento em nós.....	47
2.3.5 Problema de localização de facilidades.....	47
2.3.6 Heurística de Teitz & Bart.....	49
2.3.7 Algoritmo Genético	51
3. METODOLOGIA.....	54
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA METODOLOGIA DE PESQUISA	54
3.2 METODOLOGIA APLICADA.....	55
3.3 DIVISÃO DOS PONTOS DE LEITURA.....	56
3.4 PROGRAMAÇÃO COMPUTACIONAL.....	58
3.4.1 Algoritmo Genético	59
3.4.2 Algoritmo de Teitz & Bart.....	62
3.4.3 Método Exato.....	62
3.5 CENÁRIOS	62
3.6 PROGRAMAÇÃO DO PCC.....	64

4. OBTENÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	65
4.1 ANÁLISE DA SITUAÇÃO ATUAL	65
4.2 RESULTADOS REFERENTES AO 1º CENÁRIO.....	66
4.3 RESULTADOS REFERENTES AO 2º CENÁRIO.....	73
4.4 RESULTADOS REFERENTES AO 3º CENÁRIO.....	79
4.5 ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS PELOS TRÊS CENÁRIOS	85
4.6 APLICAÇÃO E ANÁLISE DO PCC	87
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
REFERÊNCIAS	97
APÊNDICE 1	103

1. INTRODUÇÃO

A Pesquisa Operacional (PO) surgiu na Inglaterra, no período da segunda guerra mundial e foi utilizada para tomada de decisão quanto a utilização de recursos limitados na resolução de problemas logísticos, estratégicos e táticos. (BELFIORE; FÁVERO, 2013). Hillier e Lieberman (2006) apontam que depois da segunda guerra, houve um avanço na área de PO que fez com que as suas técnicas passassem a ser utilizadas nos setores de comércio, indústria e governamental.

Com o avanço da tecnologia, hoje é possível resolver problemas de PO cada vez mais complexos. Atualmente, a PO vem sendo utilizada com o objetivo de otimização, seja de uma rota, na utilização de recursos, na localização de facilidades (instalações), dentre muitos outros.

A PO começa com a definição de um problema a ser resolvido e então construindo-se uma modelagem matemática para o mesmo que tem como objetivo abstrair a essência do problema definido, e como restrições, as limitações apresentadas pelo problema. Com esta modelagem são feitas experimentações, na qual são testadas hipóteses. A medida que o problema é conduzido, poderão ser realizadas alterações no modelo matemático, sempre visando a obtenção de melhores resultados. (HILLIER; LIEBERMAN, 2006).

Um tipo de problema que se destaca na PO é o de otimização de rotas. Seja para a alocação de facilidades, estreitar o caminho entre fornecedor e consumidor, ou com algum outro objetivo, visando a economia de tempo e a redução de custos. Alguns métodos utilizados para otimização de rotas são: Problema de Localização de Facilidades (PLF), Problema do Caixeiro Viajante (PCV) e o Problema do Carteiro Chinês (PCC).

A utilização do PLF mais popular entre os pesquisadores é para definir a localização de novas facilidades, que atendam às restrições de demanda dos consumidores e também o limite de capacidade dos fornecedores, sem que estas restrições sejam violadas, com o objetivo de redução de custos totais. (TANG *et al.*, 2013).

O PLF também abrange o problema de p -medianas, que tem como objetivo determinar p localidades para instalações de facilidades. Tem como

objetivo minimizar a soma das distâncias a serem percorridas pelos “consumidores” até a facilidade mais próxima. (ANTONIO; LORENA, 2003). Estes problemas são utilizados para determinar localização de hospitais, bancos, delegacias e agência de correios, fiscais de estacionamentos regulamentados, dentre muitas outras aplicações.

De acordo com Swain e ReVelle (1970) os PLFs são classificados como *NP-hard* e requerem um tempo computacional muito grande para encontrar uma solução ótima. Portanto uma alternativa para encontrar soluções eficazes e também eficientes para o problema é a utilização de procedimentos heurísticos para auxiliar na sua resolução.

O problema dos leituristas de consumo de energia elétrica, realizado por funcionários de diversas companhias de energia existentes no país, consiste na definição de grupos (*clusters*) de pontos de demanda a serem atendidos (cada grupo de pontos deverá ser atendido por um leiturista), com a utilização do PLF e, subsequentemente, na definição da melhor rota dentro de cada um destes grupos, com o objetivo de minimizar o deslocamento, com a utilização do PCC.

O PCC foi introduzido por Mei-Ko Kwan, em 1962, e tem como objetivo encontrar o menor custo de trajeto para atravessar cada arco do problema pelo menos uma vez (SUN *et al.*, 2015). Este problema foi originalmente desenvolvido tendo-se em vista a entrega de cartas por um carteiro. Assim como o carteiro, há muitas outras aplicações para o PCC, dentre os quais destacam-se: varredores de rua, coletas de lixo e leituristas, que é o foco deste trabalho.

O problema a ser abordado neste trabalho, trata do desenvolvimento de rotas para os leituristas de uma companhia de fornecimento de energia elétrica do município de São José dos Pinhais, no Estado do Paraná. Há uma crescente demanda de fornecimento de energia elétrica no município e os leituristas devem passar por todas as localidades registradas no sistema da companhia de energia elétrica, para registrar o consumo mensal.

A metodologia utilizada para resolver o problema constituiu-se em: uma divisão da região a ser analisada em *clusters* (grupos), utilizando o PLF, para depois implementar o PCC em cada um destes *clusters*, e determinar uma rota a ser percorrida pelos leituristas. Para a realização do PLF foram utilizados três

procedimentos heurísticos e um exato, para constatar qual o melhor método heurístico a ser considerado para o problema em pauta.

Os métodos heurísticos utilizados neste trabalho são AG, Algoritmo de Teitz & Bart e um método híbrido, combinando os dois métodos (AG + Algoritmo de Teitz & Bart). Desta forma, a originalidade deste trabalho se dá pela comparação das soluções obtidas por meio do modelo matemático (solução exata) do PLF com um dos métodos mais utilizados na literatura, o AG, além de um algoritmo praticamente não utilizado pelos pesquisadores, embora promissor, o Algoritmo de Teitz & Bart.

1.1 OBJETIVOS

Nesta seção serão apresentados os objetivos oriundos do presente estudo. Estes estão divididos em objetivo geral e específicos.

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é comparar a eficiência e eficácia de diferentes métodos para otimizar as rotas dos leituristas de uma companhia de energia elétrica, minimizando os percursos a serem percorridos, assim como equilibrando a carga de serviços dos mesmos.

1.1.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, foram definidos objetivos específicos descritos a seguir:

- a) Definir os procedimentos heurísticos a serem utilizados para realizar a clusterização da região do município de São José dos Pinhais;
- b) Realizar a análise da situação atual da divisão de trabalho dos leituristas;
- c) Subdividir/particionar a região analisada em *clusters* para definir os pontos de demanda a serem atendidos por cada um dos leituristas, utilizando o método exato e diferentes procedimentos heurísticos;

- d) Comparar os resultados obtidos com os diferentes procedimentos heurísticos, em cada um dos cenários apresentados;
- e) Definir as rotas/percursos a serem desenvolvidos por cada leiturista em cada um dos *clusters* definidos previamente, em cada um dos cenários apresentados.

1.2 JUSTIFICATIVA

Determinar rotas a serem percorridas por funcionários de uma empresa, seja para a entrega de mercadorias ou cartas, prestar serviços, realizar a leitura do relógio medidor de energia elétrica ou alguma outra tarefa que requeira percorrer uma rota pré-determinada, é uma tarefa que exige um estudo aprofundado. Otimizar uma rota pode significar a redução de custo com funcionários, clientes satisfeitos com a mercadoria em dia, rotas menores a serem percorridas. Além da redução do caminho a ser percorrido, também é importante que a carga de trabalho seja dividida de forma homogênea entre seus funcionários.

O modelo proposto neste trabalho almeja a padronização no percurso das rotas de leitura, para que os leituristas tenham distâncias semelhantes a serem percorridas, havendo uma melhor distribuição (equilíbrio) do trabalho.

Atualmente a divisão de rotas no município de São José dos Pinhás é feita de forma empírica e a utilização de um procedimento sistemático, como o aqui proposto, poderá ajudar a aprimorar as rotas a serem percorridas, reduzindo o tempo gasto no trajeto e balanceando o tempo de serviço para os diferentes leituristas.

1.3 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

O estudo será realizado com a utilização dos dados de uma companhia de energia elétrica do município de São José dos Pinhás, Paraná, e sua análise ficará delimitada apenas para este caso. Entretanto, o procedimento/metodologia utilizado pode ser replicado para outros municípios, desde que considerando os respectivos dados para a sua aplicação.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Com a finalidade de alcançar os objetivos delineados anteriormente, o presente trabalho foi segmentado em cinco capítulos.

Neste primeiro capítulo foram apresentadas uma introdução sobre o tema abordado, os objetivos a serem alcançados com a pesquisa, assim como a justificativa e delimitações do estudo.

No capítulo 2 foi realizada uma revisão bibliográfica a cerca do tema abordado, a qual foi particionada em três subcapítulos: Bibliometria, análise sistêmica dos artigos selecionados na análise bibliométrica, e uma fundamentação teórica.

No capítulo 3 são investigados os aspectos metodológicos da pesquisa, tais como a natureza e enquadramento da mesma. Ademais, é retratado uma descrição da aplicação metodológica para a obtenção dos resultados.

No capítulo 4 são apresentados os resultados finais obtidos, assim como uma análise dos mesmos. E, por fim, o capítulo 5 apresenta as considerações finais obtidas ao longo da pesquisa realizada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo está dividido em 3 seções. Na seção 1 é realizada uma análise bibliométrica, selecionando uma amostra de artigos atuais para ser alvo de um estudo aprofundado. Na seção 2 é exposta uma revisão sistemática sobre a amostra selecionada na revisão bibliométrica mostrando o estado da arte da pesquisa. Por fim, na seção 3 é apresentada uma fundamentação teórica deste trabalho, mostrando evolução e conceitos da pesquisa operacional (PO), incluindo otimização em redes (OR).

2.1 BIBLIOMETRIA

Nesta seção será apresentada a revisão bibliométrica dos principais assuntos relacionados a esta pesquisa. Esta análise demonstra os principais trabalhos, aplicações e tendências observados nos últimos nove anos (2010-2018) sobre o tema abordado. A análise desses trabalhos foi utilizada para a identificação do estado da arte e, conseqüentemente, a obtenção de um direcionamento para os eixos da presente pesquisa.

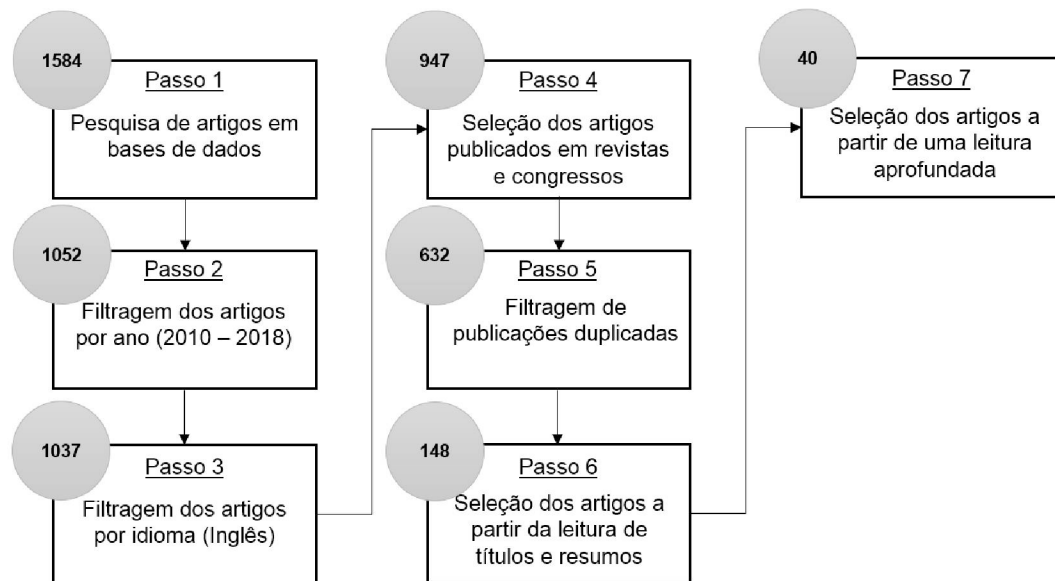
2.1.1 Seleção de artigos

Com o objetivo de definir os termos da pesquisa realizada, foi considerada a seguinte questão: Como se encontra o cenário atual em relação as técnicas utilizadas para resolução de PLF e problemas de roteamento (PR)?

Deparando-se com este questionamento, foi realizada uma pesquisa com a utilização dos termos: “*facility location problem*” e “*routing problem*”. Um estudo preliminar mostrou que havia variações destes termos, como: *location routing problem*, portanto as aspas não foram utilizadas nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*, mas se deu por necessária na base do *Science Direct*, devido ao grande número de artigos encontrados (acima de 20.000).

Um processo de filtragem de dados com alguns passos, apresentados na Figura 2.1, foi adotado para selecionar publicações relevantes ao tema, visando selecionar os artigos condizentes com a pesquisa.

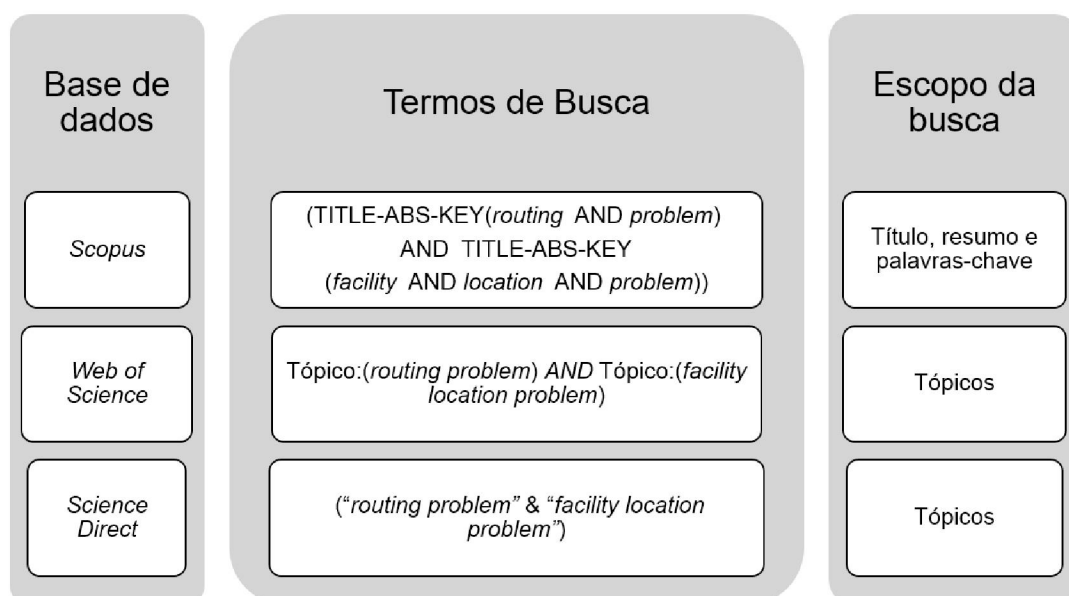
FIGURA 2.1 – PASSOS DA FILTRAGEM DE ARTIGOS (BASES: SCOPUS, WEB OF SCIENCE E SCIENCE DIRECT)



FONTE: O autor (2019).

No passo 1 foi realizada uma pesquisa nas bases de dados. As palavras-chave citadas previamente (*Routing problem* e *Facility location problem*) foram utilizadas na busca de acordo com os parâmetros definidos na Figura 2.2. Foram encontrados um total de 1.584 artigos.

FIGURA 2.2 – PARÂMETROS DE BUSCA



FONTE: O autor (2019).

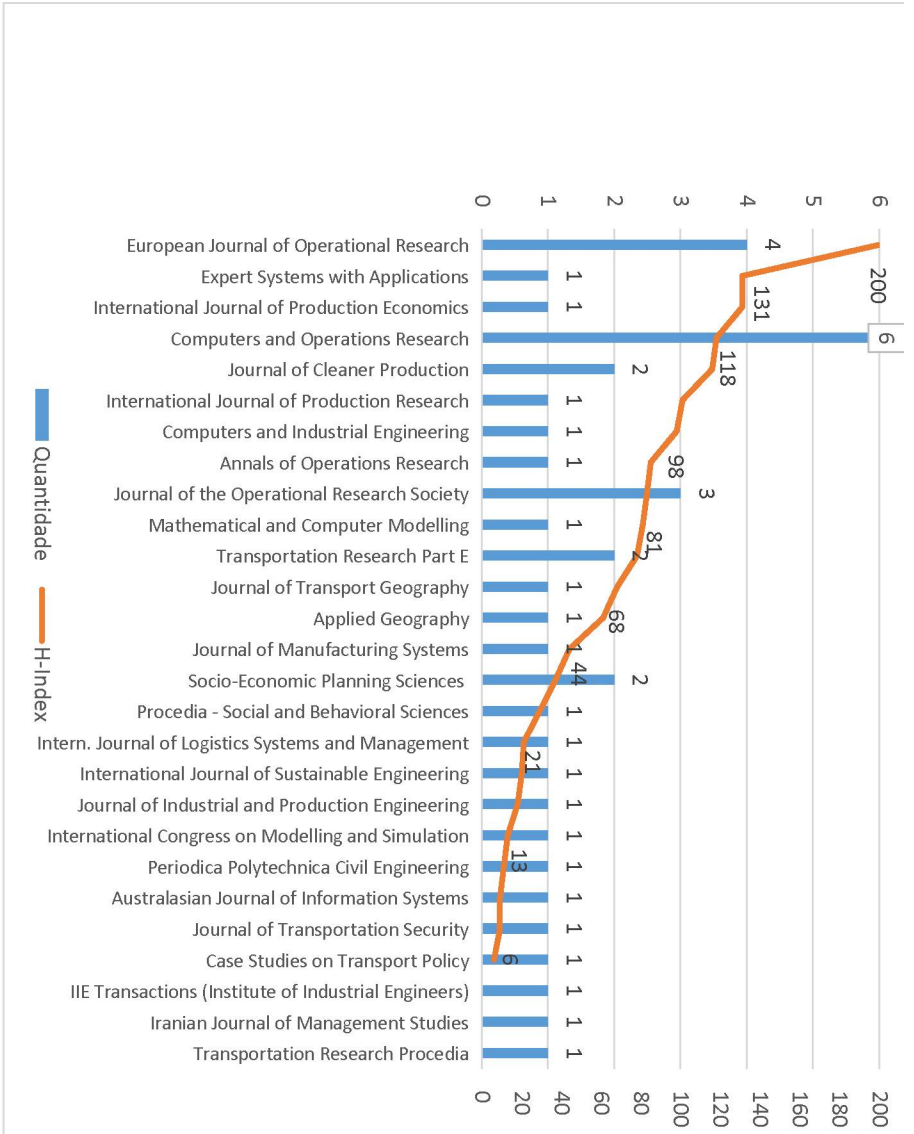
No passo 2, para manter as bases de dados atualizadas, foram filtrados os artigos publicados entre os últimos anos (2010 - 2018), restando assim 1.052 publicações. No passo 3, foi realizada a exclusão dos artigos que não foram publicados em inglês, restando 1.037 publicações.

Em seguida, no passo 4, foram retirados capítulos de livros e resumos publicados das bases de dados, restando 947 artigos publicados em revistas e eventos. Dando continuidade ao processo de triagem, os artigos foram exportados para o *software EndNote*, para trabalhar com todas as publicações selecionadas nas três bases de dados escolhidas. No passo 5, este *software* auxiliou a exclusão dos artigos duplicados, restando 632 publicações.

No passo 6 foi realizada a leitura dos títulos e resumos dos 632 artigos pré-selecionados, com uma visão focada para o presente trabalho. Portanto foram buscados trabalhos que trazem aplicações do PLF, envolvendo diferentes heurísticas para o auxílio da resolução deste problema, trabalhos que relacionavam o PLF com roteamento de veículos e com problema de roteamento em arcos (PRA). Portanto, com essa análise de títulos e resumos, foram selecionados 148 artigos.

Por fim, no passo 7, foi realizada uma leitura mais aprofundada destes artigos, para verificar se, de fato, estas publicações estavam relacionadas com o tema da pesquisa. Foram excluídos os artigos que não traziam aplicações ou validações numéricas de modelos para a resolução dos problemas propostos e, também, artigos cujo foco principal não era a resolução de problemas de roteamento e/ou de localização de facilidades, resultando em uma base de dados contendo 40 artigos.

Após a seleção da base de dados, foi possível realizar uma análise bibliométrica sobre a mesma, que ficou dividida em sete etapas: 1) foi realizada uma análise das revistas científicas dos artigos que compõem a base de dados; 2) foi realizada uma análise do número de citações das publicações; 3) foi realizado um levantamento das localizações onde as pesquisas foram desenvolvidas; 4) foi feita uma análise da quantidade de artigos publicados em cada ano; 5) foi verificada a tendência de palavras utilizadas nos artigos e, para isso, foi feita uma nuvem de palavras e um gráfico de tendências de palavras-chave; 6) foi feita uma análise dos *softwares* e linguagens de programação



FONTE: O autor (2019).

mais utilizados pelos autores; 7) por fim, foi realizada uma análise das heurísticas e meta-heurísticas mais utilizadas para a resolução dos problemas propostos.

2.1.2 Análise Bibliométrica

No Gráfico 2.1 é possível verificar os periódicos que apresentam a maior quantidade de publicações sobre o tema da pesquisa, assim como seu *h-index*. Este é um índice proposto por Hirsch (2005), que aponta o número de artigos (*h*) que contêm uma quantidade de citações maior ou igual a *h*. Os índices *h-index* apresentados no Gráfico 2.1 foram consultados no site da *Scimago Journal & Country Rank*.

GRÁFICO 2.1 – ANÁLISE DAS REVISTAS CIENTÍFICAS

As revistas científicas que foram mais utilizadas pelos autores são a *Computers and Operations Research* com 6 artigos publicados, representando 15% das publicações, seguida pela *European Journal of Operations Research*, com 4 artigos (10% das publicações). Quanto ao *h-index*, foi possível verificar que os maiores valores pertencem às revistas *European Journal of Operations Research* (200) e *Expert Systems with Applications* (131).

Dentre os artigos da base de dados, foi possível identificar os mais relevantes, considerando o número de citações. Na Tabela 2.1 encontram-se os 10 artigos mais citados nas bases *Web of Science* e *Scopus*.

TABELA 2.1 – ANÁLISE DAS CITAÇÕES (BASES: WEB OF SCIENCE E SCOPUS)

Autores/ano	Título	Journal	Web of Science	Scopus
Belenguer <i>et al.</i> (2011)	A Branch-and-Cut method for the Capacitated Location-Routing Problem	Computers and Operations Research	79	100
Coutinho-Rodrigues <i>et al.</i> (2012)	Solving a location-routing problem with a multiobjective approach: The design of urban evacuation plans	Journal of Transport Geography	30	36
Ghaderi; Jabalameli (2013)	Modeling the budget-constrained dynamic uncapacitated facility location • network design problem and solving it via two efficient heuristics: A case study of health care	Mathematical and Computer Modelling	27	32
• • • • •	Locating temporary shelter areas after an earthquake: A case for Turkey	European Journal of Operational Research	25	30
Ahmadi <i>et al.</i> (2015)	A humanitarian logistics model for disaster relief operation considering network failure and standard relief time: A case study on San Francisco district	Transportation Research Part E	17	19
Dantrakul <i>et al.</i> (2014)	Applied p-median and p-center algorithms for facility location problems	Expert systems with applications	13	18
Ardjmand <i>et al.</i> (2015)	Applying genetic algorithm to a new location and routing model of hazardous materials	International Journal of Production Research	13	16

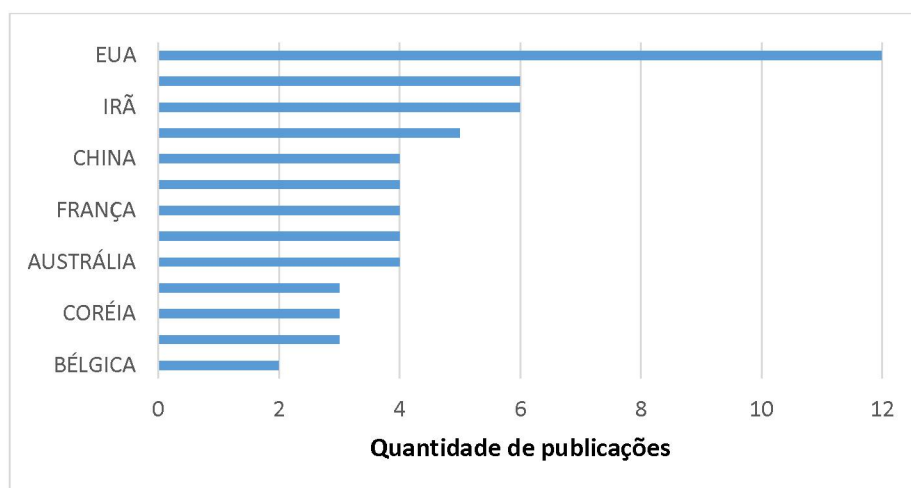
Mar-Ortiz et al. (2011)	Design of a recovery network for WEEE collection: the case of Galicia, Spain	Journal of the Operational Research Society	12	11
Zhao; Verter (2015)	A bi-objective model for the used oil location-routing problem	Computers and Operations Research	10	16
Hiassat et al. (2017)	A genetic algorithm approach for location-inventory-routing problem with perishable products	Journal of Manufacturing Systems	7	9

FONTE: O autor (2019).

É possível verificar a partir da Tabela 2.1 que os trabalhos de Belenguer et al. (2011) e Coutinho-Rodrigues *et al.* (2012) foram os mais citados em ambas as bases de dados. O primeiro trata de uma proposta de criação de um método exato, baseado no algoritmo *branch-and-cut*, para a resolução de PLF, sendo que foram considerados dados fictícios para a validação do modelo desenvolvido e, além disso, restrições de capacidade para depósitos e veículos. Este trabalho teve 79 menções no *Web of Science* e 100 no *Scopus*. Já o segundo artigo é voltado para solucionar um PLF de abrigos em situações de emergência, determinando também, as devidas rotas de evacuação; neste trabalho foi realizado um estudo de caso com aplicação na cidade de Coimbra, em Portugal. Este trabalho, por sua vez, teve 30 menções no *Web of Science* e 36 no *Scopus*. Da mesma forma tem-se a interpretação dos demais dados da Tabela 2.1.

A distribuição geográfica das pesquisas que compõem a base de dados pode ser vista no Gráfico 2.2. Nesta análise foram consideradas as localizações dos devidos centros de pesquisas de cada trabalho, e no caso de produções de caráter internacional, todas as nacionalidades foram incluídas.

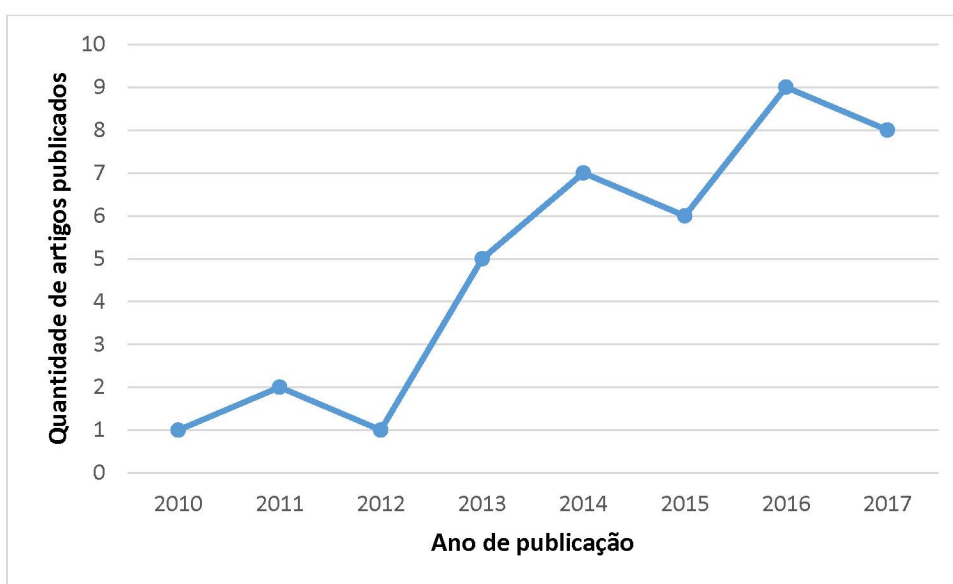
GRÁFICO 2.2 – NACIONALIDADE DAS PESQUISAS



Fonte: O autor (2019).

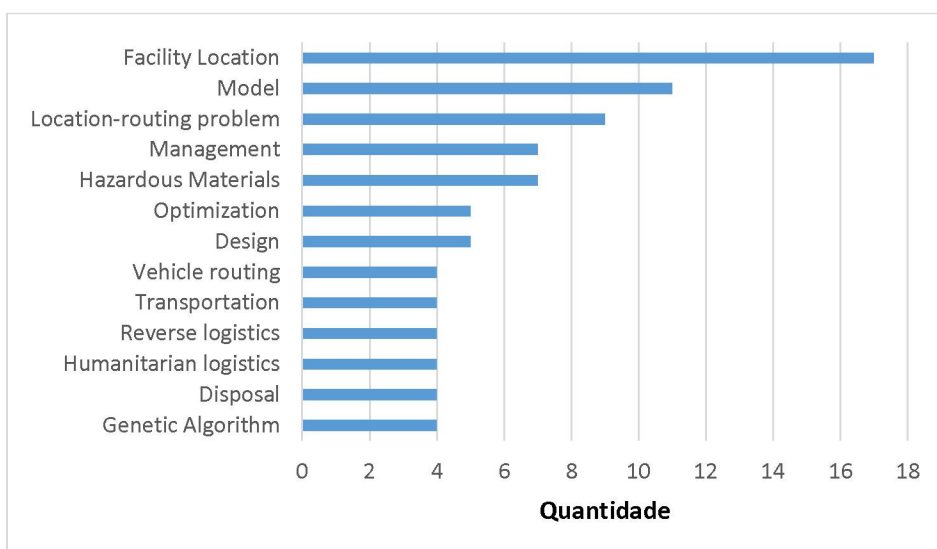
A liderança, com 12 pesquisas oriundas de sua nação, é dos EUA, seguido pela Inglaterra e pelo Irã, com seis pesquisas cada. É interessante mencionar que os dois trabalhos com o maior número de citações registradas nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*, constantes da Tabela 2.1, são de trabalhos realizados pela Espanha, França e Portugal, que apresentam uma quantidade menor de pesquisas na área.

GRÁFICO 2.3 – NÚMERO DE PUBLICAÇÕES POR ANO



Fonte: O autor (2019).

GRÁFICO 2.4 – FREQUÊNCIA DE PALAVRAS-CHAVE

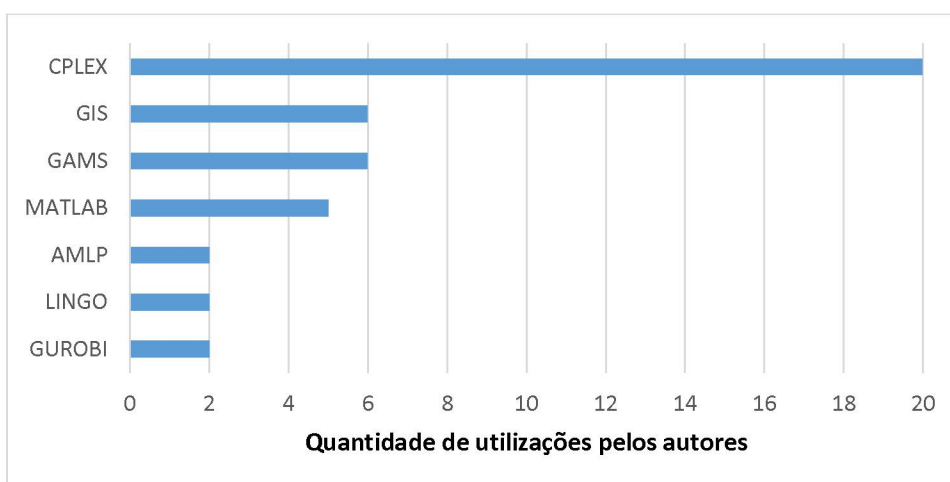


Fonte: O autor (2019).

Percebe-se que há uma conexão nos padrões utilizados pelos autores mediante a comparação das palavras resultantes da nuvem de palavras com o gráfico de palavras-chave. As palavras *location*, *facility/facilities*, *model*, *problem* e *route/routing* se destacam em ambas as análises.

As publicações resultantes desta pesquisa apresentam uma aplicação prática ou validação de uma modelagem matemática em dados fictícios. Portanto todos estes autores utilizaram *softwares* para alcançar resultados. O Gráfico 2.5 traz o levantamento destes *softwares* mais utilizados.

GRÁFICO 2.5 – SOFTWARES MAIS UTILIZADOS PELOS AUTORES

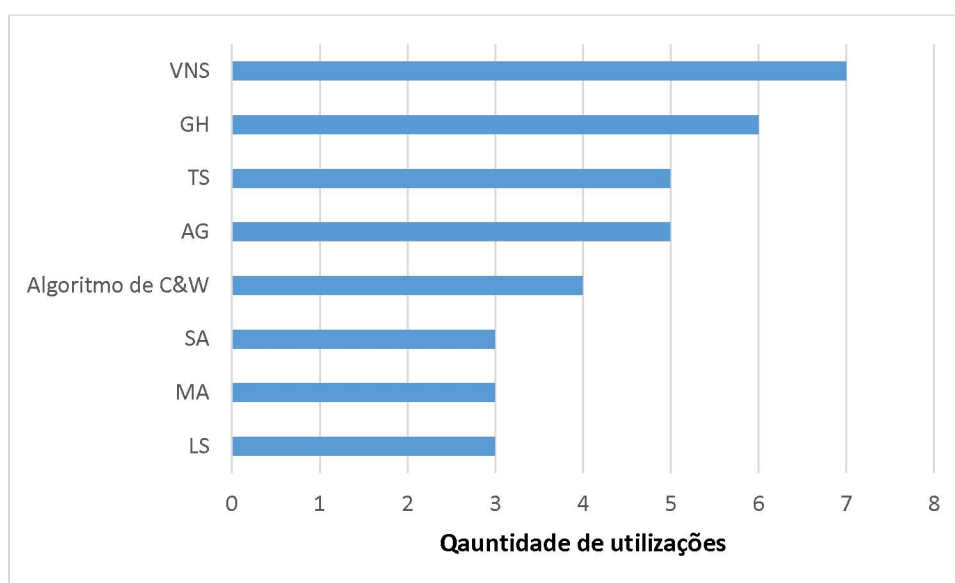


Fonte: O autor (2019).

O CPLEX foi o *software* mais utilizado pelos autores, 50% dos trabalhos mencionam a sua utilização. Apesar de ser um *software* pago, o CPLEX permite ser utilizado em diferentes linguagens de programação. O GIS e o GAMS empataram em segundo lugar, com seis utilizações cada. Alguns outros *softwares*, não mencionados no Gráfico 2.5, também foram utilizados, porém com uma frequência abaixo de 2 utilizações.

Muitos dos autores mencionam a utilização de uma ou mais heurísticas para a resolução do PLF e PR. Portanto foi construído um gráfico (Gráfico 2.6) apontando as heurísticas mais utilizadas pelos autores.

GRÁFICO 2.6 – HEURÍSTICAS UTILIZADAS PELOS AUTORES



Fonte: O autor (2019).

Como pode ser observado no Gráfico 2.6, as heurísticas mais populares entre os autores para a resolução de PLF e PR são a *Variable Neighborhood Search* (VNS) e *Greedy Heuristics* (GH). Em muitos dos trabalhos são utilizadas combinações de diferentes heurísticas e também algumas modificações para melhor adaptar-se à resolução do problema em questão.

2.2 ANÁLISE SISTEMÁTICA DOS ARTIGOS

Durante o processo de triagem dos artigos, o número de publicações analisadas reduziu de 1.584 para 40. A partir deste momento, foi iniciado o procedimento da análise sistêmica das 40 publicações selecionadas, com o intuito de uma melhor compreensão da abordagem dos artigos.

Nesta seção, aplicações envolvendo PLF e PR são avaliadas com base na amostra de artigos obtida nesta pesquisa.

2.2.1 Características das publicações

Uma leitura aprofundada dos trabalhos permitiu que se extraíssem as principais informações das publicações. Uma tabela (Tabela 2.2) foi então elaborada, com dados oriundos dos artigos publicados. Por meio de tal tabela, foi possível realizar uma análise inicial e obter as primeiras conclusões a respeito das publicações, além de reconhecer as oportunidades, técnicas e *softwares* utilizados pelos autores.

TABELA 2.2 – PUBLICAÇÕES COM TEMAS RELACIONADOS À PESQUISA

Publicações	Objetivo da Pesquisa	Local/ base de dados	Técnicas utilizadas	Software/ Linguagem de programação
Zhao; Verter (2015)	Determinar a localização de depósitos e roteirização para descarte de óleo usado.	Chongqing (China)	Técnica de <i>Goal programming</i> modificada / GPM	IBM ILOG CPLEX 12.5
Bahrami <i>et al.</i> (2016)	Determinar a localização de CD e definir rotas para entregas de encomendas interestaduais	Irã	SA modificado; LS	GAMS; CPLEX; MATLAB
Castillo-López; López-Ospina (2015)	Determinar a localização e modificar a capacidade de escolas para aumentar nível de escolaridade em zonas rurais	Chile	Busca Tabu	MATLAB 7.6.0; GAMS; MINOS 3.5
Ardjmand <i>et al.</i> (2015)	Determinar a localização de depósitos e definir rotas para descarte de resíduos perigosos	Dados fictícios	AG	—

Yildiz <i>et al.</i> (2013)	Determinar a localização de facilidades e planejar as rotas para entrega de refeições, sem fins lucrativos, para idosos	Allegheny (E.U.A)	AG; MA; LS	C
Coutinho-Rodrigues <i>et al.</i> (2012)	Determinar quantidade e localizações de abrigos e suas devidas rotas para evacuações em situações de emergência	Coimbra (Portugal)	<i>Multiobjective modeling Approach</i> ; MILP	GIS; Python
Kim; Lee (2014)	Implementar pontos de coletas de lixos, determinando suas quantidades e localizações, assim como definir as rotas dos caminhões para realizar coletas	Seongdong-gu (Coreia)	Busca Tabu; 2-opt/3-opt	C
Serrano-hernandez <i>et al.</i> (2017)	Definição da localização de uma biorrefinaria considerando critérios econômicos e ambientais	Navarra (Espanha)	MILP	GAMS; CPLEX
Jang <i>et al.</i> (2010)	Determinar a localização de depósitos, rotas e jornadas para realizar a retirada de neve de estradas	Missouri (E.U.A)	<i>Greedy-type Heuristic</i> ; one arc-position movement heuristic; one arc-position exchange heuristic	—
Mar-Ortiz <i>et al.</i> (2011)	Determinar a localização de depósitos e rotas de veículos para realizar o descarte de equipamentos elétricos e eletrônicos	Galiza (Espanha)	MILP; Adaptação da heurística de C&W	CPLEX v11.1
Lopes <i>et al.</i> (2014)	Comparar utilização de diferentes heurísticas para solucionar problemas de localização combinados com problemas de roteamento em arcos	Dados de referência retirados da literatura	TS; GRASP; VNS; LS	C#; CPLEX 12
Ares <i>et al.</i> (2016)	Determinar localizações de clínicas médicas em estradas para atender motoristas de caminhões, considerando rotas, e capacidade de pacientes	Sul e leste da África	MIP; PL Relaxation; RMP; Algoritmo de Bellman–Ford	Java; ILOG CPLEX v12.61

Colombi; Mansini (2014)	Integrar problemas de roteamento em arcos com lucro com problemas de localização de facilidades, aplicando em um exemplo fictício	Bremen (Alemanha)	Algoritmo Branch-and-cut; DPLRPP	C; CPLEX
Tran <i>et al.</i> (2017)	Combinar algoritmos distintos para a resolução do problema de localização de postos de abastecimento de combustíveis alternativos	Dados retirados da literatura (4 bancos de dados foram utilizados)	MILP; k-exchange neighborhood; Kernel Search algorithm modificado; Parallel computing strategy	C++; CPLEX
Kılıç <i>et al.</i> (2015)	Determinar localização de abrigos para alojamentos pós terremoto	Kartal (Turquia)	MILP	Gurobi 4.5.2
Cao <i>et al.</i> (2016)	Aumentar o número de pontos de coleta de doações de leite materno, implementando pontos de coletas móveis nas ruas.	Sul da África	MIPL; heurística de C&W; clusterização; <i>integer rounding-based heuristic</i> (proposta pelos autores)	ILOG CPLEX Solver versão 12.2
Kim <i>et al.</i> (2016)	Estimar a localização da base dos inimigos, em uma situação de guerra e encontrar a melhor rota para infiltrar na base dos adversários.	DaeJeon (Coreia do Sul)	p-maxian model; Algoritmo de Dijkstra	TOD; GIS
Reddy <i>et al.</i> (2013)	Determinar localização de depósitos e rotas para entregas de contas de uma empresa de telecomunicações para atender todos os conjuntos habitacionais	Hong Kong	ACO modificada; Algoritmo de C&W; TA; SA	MATLAB 7.8
Dantrakul <i>et al.</i> (2014)	Realizar a comparação de resultados obtidos por diferentes algoritmos aplicados em um problema de localização de facilidades e roteirização	Tailândia	GA; Algoritmo p-mediana modificado; Algoritmo p-centro modificado; BIPP; teste t de <i>Student</i>	CPLEX

Asefi <i>et al.</i> (2015)	Otimizar as localizações de estações de tratamento e transferência de lixo, identificando rotas otimizadas	Austrália	MILP	GAMS; CPLEX solver version 12.4.0.1
Beitollahi <i>et al.</i> (2018)	Determinar localização de facilidades, baseado em rotas otimizadas, para definir instalações para emergências como terremotos	Mazandaran (Irã)	Algoritmo de p-medianas com pesos; Algoritmo CBO	MATLAB
Belenguer <i>et al.</i> (2011)	Propor um método exato para a resolução de um problema de localização de facilidades e roteirização	Dados Fictícios	Algoritmo Branch-and-Cut; GA	C++; CPLEX 9
Boujelben <i>et al.</i> (2014)	Determinar localização de centro de distribuição de carros e clusterizá-los com as devidas concessionárias, para reduzir distanciamento	França	MILP; Heurística baseada no SPP	C++; CPLEX versão 12.1; GIS
Ceyhan; Özpeynirci (2016)	Alocar pessoas às farmácias de acordo com um <i>schedule</i> para que sempre tenham farmácias abertas em todos os horários e à disposição de toda a população	Turquia	MILP; Algoritmo Branch-and-Price modificado	C; CPLEX
Garcia-Flores; Juliano (2013)	Determinar a localização de uma empresa de processamento de <i>Whey</i> , baseado em um cluster composto por produtores de queijos, para reduzir o custo de transporte	Victoria (Austrália)	MILP	CPLEX 12.5
Ghaderi; Jabalameli (2013)	Determinar localização de centros de saúde considerando rotas e restrições de custo	Ilam (Irã)	MILP; GH; SA; branch-and-bound; VNS	Python; CPLEX
Hammad <i>et al.</i> (2017)	Determinar a localização de escolas e áreas comerciais, considerando o nível de barulho para minimizar a poluição sonora, e roteirização	Sydney (Austrália)	MILP; Algoritmo BD	AMPL; CPLEX 12.6.1

Hiassat <i>et al.</i> (2017)	Integrar a modelagem de localização de facilidades e roteirização para inventário de produtos perecíveis	Dados fictícios	MILP; AG	GAMS; CPLEX
Jarboui <i>et al.</i> (2013)	Propor heurísticas VSN modificadas para aplicação em localização de armazéns e roteirização de veículos	Dados fictícios	Heurísticas VNS modificadas;	C
Yu; Maghfiroh (2014)	Propor combinação de heurísticas para solução de problemas de localização e roteirização	Instâncias de referência, retiradas da literatura	VNS; GH; 2-opt; PHR; VSNPR	C++
Simoni <i>et al.</i> (2017)	Determinar pontos de transbordo, para evitar trânsito de veículos de grande porte dentro das cidades	Austin (E.U.A)	MILP; AG; MA; Algoritmo de C&W; Análise de sensibilidade	—
Swamy <i>et al.</i> (2017)	Determinar pontos de partidas de ônibus e suas devidas rotas para evacuação, em caso de furacão (abrigos e zonas de evacuação pré-determinados)	Nova Iorque (E.U.A)	Sweep Heuristic; VNS	Python 2.7; Gurobi 6.5
Pramudita <i>et al.</i> (2014)	Determinar localizações para descarte de detritos gerados após desastres, que geram destruição, assim como determinação de rotas para o descarte	Tóquio (Japão)	TS	—
Tunalioglu <i>et al.</i> (2016)	Determinar o número e local de instalações destinadas ao tratamento dos resíduos gerados na fabricação de azeite de oliva e determinar a rota dos veículos destas instalações às fábricas	Aydin (Turquia)	Meta-heurística MP-ALNS; Análise de sensibilidade	C++
Sheriff <i>et al.</i> (2016)	Determinar localização e quantidade de pontos de coletas de plásticos recicláveis, baseados em rotas e nível de quantidade	Índia	CRAB-ISP	LINGO 8.0

Zhao; Ke (2017)	Determinar localização de centros de coleta de detritos gerados por explosivos em mineradoras e suas devidas rotas	Nanchuan (China)	MILP	CPLEX 12.6
Yadav <i>et al.</i> (2016)	Determinar pontos de transferência entre o processo de coleta de lixo e o seu descarte, assim como a rotas a serem percorridas	Nashik (Índia)	NP; Análise de sensibilidade	GIS; AMPL; KNITRO 5.2
Asgari <i>et al.</i> (2016)	Propor um modelo para a resolução de um problema de descarte de resíduos perigosos, definindo localização e rotas para o descarte	Singapura	MA; AG; TS	LINGO 14.00
Kotavaara <i>et al.</i> (2017)	Determinar a localização de armazéns para redução de rotas a serem percorridas para otimizar a logística do sistema de público saúde	Finlândia	MILP; GH	GIS; Python 3.0; ArcGIS VRP
Ahmadi <i>et al.</i> (2015)	Determinar locais para centros de distribuição de suprimentos e suas devidas rotas para situações pós terremotos	São Francisco (E.U.A)	MILP; VNS	ArcGIS; CPLEX; GAMS; MATLAB

FONTE: O autor (2019).

Legendas: ACO (Ant Colony Optimization); AG (Algoritmo Genético); AMPL (A Mathematical Programming Language); BD (Benders Decomposition); BIPP (Binary Integer-Programming Problem); C&W (Clarke & Wright); CBO (Colliding Bodies Optimization); CD (Centro de distribuição); CRAB-ISP (Capacitated Routing and Allocation with Balancing - Integrally solved Single Product); DPLRPP (Directed Profitable Location Rural Postman Problem); GAMS (General Algebraic Modeling System); GH (Greedy Heuristic); GIS (Geographic Information System); GPM (Gaussian Plume Model); GRASP (Greedy Randomized Adaptative Search Procedure); LS (Local Search); MA (Memetic Algorithm); MILP (Mixed-Integer Linear Programming); MIP (Mixed-Integer Programming); MP-ALNS (Multiperiodic Adaptive Large Neighbourhood Search); NP (Nonlinear Programming); PHR (Path-relinking); RMP (Restricted Master Problem); SA (Simulated Annealing); SPP (Set Partitioning Problem); TA (threshold accepting); TOD (Thermal Observation Device); TS (Tabu Search); VNS (Variable Neighborhood Search); VNSPR (Variable neighborhood search with path-relinking); VRP (Vehicle routing problem).

A Tabela 2.2 mostra informações sobre as publicações selecionadas, que apresentam características relevantes em relação ao PLF e PR. Estas publicações foram consideradas relevantes por apresentarem soluções de

problemas reais em diferentes contextos e também aprimoramento de métodos para resolução de problemas.

Foi possível verificar também que a maioria dos autores recorrem a métodos heurísticos para a resolução dos problemas. Há uma grande diversidade de heurísticas utilizadas, portanto não há um consenso da melhor maneira para solucionar os PLF e PR.

Ao final desta análise, alcançou-se uma visão mais crítica do conteúdo, bem como obteve-se conhecimento mais amplo das aplicações, fundamentos e descobertas envolvendo a junção de PLF com PR.

2.2.2 Trabalhos correlatos

Vários trabalhos correlatos já ficaram definidos na Tabela 2.2, apresentada anteriormente. Nesta seção faz-se o desenvolvimento descritivo de alguns deles, mais intimamente relacionados com o trabalho que se pretende desenvolver.

Dentre as aplicações analisadas, pode-se citar o trabalho de Bahrami *et al.* (2016) que trata de um problema de entrega de mercadorias interestadual no Irã. Os autores propõem a utilização da heurística *Simulated annealing* (SA) em três fases. Primeiramente para definir as localizações dos armazéns para depósito, em seguida para definir os *clusters* e alocar cada região para um dos armazéns e por último para definir a rota a ser percorrida. Por fim, para otimizar o resultado, é utilizada a heurística busca local.

Para realização do estudo de caso foram considerados os possíveis nós para a instalação dos armazéns nas 31 capitais dos estados e um estudo prévio das rotas possíveis. Os autores codificaram o modelo em GAMS e MATLAB e utilizaram o CPLEX *solver* para solucionar o problema. Como resultado foi possível definir três armazéns para estoque de mercadorias, assim como as suas rotas.

Yildiz *et al.* (2013) apresentam outro estudo de caso em Allegheny, EUA, que tem como objetivo encontrar uma solução, de baixo custo, para um problema de entrega de refeições, sem fins lucrativos, para abrigos de idosos. Neste problema é abordada a definição da localização das cozinhas onde

deverão ser preparadas as refeições, a alocação destes abrigos às cozinhas e a definição da rota a ser percorrida.

Os autores propõem a utilização de um algoritmo memético, que é constituído da combinação do AG com o algoritmo de busca local, sendo que o segundo é aplicado no resultado obtido pelo primeiro. Os algoritmos foram codificados e solucionados com a utilização do *software* C e foi possível atingir o resultado e reduzir os custos envolvidos na preparação e entregas das refeições.

Jang *et al.* (2010) tiveram como objetivo solucionar um problema de retirada de neve das ruas, minimizando a rota percorrida. A aplicação do estudo foi em Missouri, EUA, e primeiramente foi proposta a alteração das localizações dos depósitos de veículos destinados a operarem neste serviço, para depois definir as rotas a serem percorridas.

Os autores desenvolveram uma *greedy-type heuristic* para encontrar os locais a serem instalados os depósitos. Já para a definição das rotas foram utilizados os algoritmos *one arc-position movement heuristic* e *one arc-position exchange heuristic* que têm como objetivo a troca de arcos na rota para otimizar o tempo gasto em percorrê-las. Como resultado, foi possível otimizar as rotas e reduzir a frota de veículos para retirada de neve.

Swamy *et al.* (2017) apresentam um estudo sobre a localização de abrigos e rotas realizadas pelo transporte público até estes locais em situações emergenciais, como furacões. Foi realizada uma aplicação do estudo em uma situação real na região de Brooklyn, Nova Iorque, com dados obtidos na evacuação do furacão Sandy.

Foram utilizadas duas heurísticas, VNS e *sweep heuristic*, para solucionar o problema. A VNS foi utilizada para a determinar os locais dos abrigos e a *sweep heuristic* para determinar os clusters baseando-se nas posições geográficas e construir as rotas. Os autores codificaram o modelo em Python e utilizaram o Gurobi solver para solucioná-lo. Como resultado foi possível determinar a localização dos abrigos e as rotas para atender a população.

2.3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção é apresentado um embasamento teórico sobre temas relacionados com o presente estudo. Estes conteúdos servem como fundamentação teórica e mostram-se imprescindíveis para o entendimento da pesquisa.

2.3.1 Pesquisa operacional

O termo PO surgiu durante a segunda guerra mundial, onde houve uma necessidade de resolução de problemas para melhor tratamento dos recursos militares. Foi primeiramente utilizada na Inglaterra, e seu sucesso levou a disseminação do conhecimento para os Estados Unidos, onde um grupo, liderado pelo pesquisador George Bernard Dantzig, desenvolveu o método simplex, que até hoje é muito utilizado para resolução de problemas de Programação Linear. (BELFIORE; FÁVERO, 2013).

Após o fim da segunda guerra mundial, a PO passou a ser utilizada em diversos setores, públicos e privados, trazendo otimizações para logística e produção, reduzindo custos, otimizando rotas e melhorando planejamento da produção. Muitas organizações enxergaram os benefícios na PO e criaram um departamento destinado a este estudo para aperfeiçoar seus processos e melhor alocar seus recursos. (ARENALES *et al.*, 2007).

A palavra “pesquisa”, em PO, significa uma abordagem que se assemelha ao formato da condução de uma pesquisa científica, e “operacional” está relacionada a operações. A PO é utilizada em atividades relacionadas às operações com uma abordagem científica, por isso do nome PO. (HILLIER; LIEBERMAN, 2006).

Hillier e Lieberman (2006) também apontam duas principais características da PO, que são:

1. Pensamento na organização como um todo, com um ponto de vista abrangente, a PO busca uma solução que beneficie toda a organização;
2. A PO busca chegar em um resultado ótimo; nem sempre é possível que uma solução ótima seja possível, mas com a PO é possível traçar o caminho para chegar a uma solução melhorada.

De acordo com Marins (2011), há 5 passos para a resolução de um problema de PO:

1) Formulação do problema:

Os problemas de PO são, normalmente, vagos e imprecisos, e para que os mesmos sejam formulados, é necessário um especialista para sintetizar as informações e assim sistematizá-las.

2) Construção do modelo matemático:

O modelo matemático é a tradução da essência de um problema real para uma formulação matemática. O objetivo almejado é colocado como função objetivo, com variáveis de decisão.

3) Obtenção da solução:

Com o modelo matemático concretizado, a próxima etapa é obter a solução do problema. Atualmente há uma gama de *softwares* que auxiliam a encontrar a Solução dos problemas de PO.

4) Teste do modelo e da solução obtida:

Há muitos problemas complexos na PO, com isso é importante que o modelo seja testado, e se necessário, reformular o problema para que a solução obtida seja compatível com a realidade.

5) Implementação do modelo:

A implementação é a fase mais crítica, e deve contar com o apoio dos especialistas que trabalharam na obtenção da solução, para que a implementação ocorra sem transtornos.

Um fluxograma das etapas encontra-se na Figura 2.4 a seguir.

FIGURA 2.4 – ESQUEMATIZAÇÃO DAS FASES DE UM ESTUDO APLICANDO A PO

FONTE: Marins (2011).

A criação de um modelo matemático para um problema de PO origina-se de um sistema real, já existente, ou de um planejamento. Este sistema é composto de variáveis que influenciam em seu processo, função objetivo que determina um valor almejado (podendo ser uma função de maximizar ou minimizar) e restrições, que são limitações do problema a ser resolvido, compostas de equações e/ou inequações que devem ser consideradas e, se possível, satisfeitas. (BELFIORE; FÁVERO, 2013).

Este modelo matemático traduzido de um problema real pode ser escrito de várias formas. Segundo Taha (2007), a Programação Linear (PL) é a técnica mais notável da PO, que conta com função objetivo e restrições lineares. Dependendo do tipo e da complexidade do problema, não é possível utilizar esta técnica, então outras poderão ser utilizadas, dentre as quais, têm-se: Programação Não-Linear, Programação Inteira, Programação Dinâmica.

2.3.2 Problemas de otimização em redes

Os problemas de Otimização em Redes (OR) são muito abrangentes, podendo se referir a problemas de transporte, designação de tarefas, localização de facilidades, redes elétricas, entre outros diversos problemas. (HILLIER; LIEBERMAN, 2006).

Os modelos de OR são formados por uma quantidade de nós (vértices) que se interligam por meio de arcos (arestas). Dependendo da complexidade do problema, as redes podem ser traduzidas em problemas de PL para serem solucionados. (BELFIORE; FÁVERO, 2013).

Arenales *et al.* (2007) definem grafo como: “Seja N um conjunto finito, cujos elementos são chamados nós (ou vértices) e E um conjunto de pares de nós, cujos elementos (i, j) são chamados de arestas. O par $G(N, E)$ é chamado de Grafo. Uma rede é um grafo cujos nós e/ou arestas têm valores associados”.

Em um grafo, os arcos podem apresentar sentido único ou não apresentar sentidos. Tome-se como exemplo, uma pista de veículos em que no caso dos carros só poderem percorrer em um único sentido, este tipo de arco é denominado arco direcionado. Caso este não apresente sentido único, é um arco não direcionado. (BELFIORE; FÁVERO, 2013). Na Figura 2.5 pode-se observar exemplos destes tipos de arcos.

FIGURA 2.5 – DIFERENÇA ENTRE ARCOS DIRECIONADOS E NÃO DIRECIONADOS

FONTE: Belfiore e Fávero (2013)

Um grafo que contenha apenas arcos direcionados é chamado de rede direcionada, e um grafo com apenas arcos não direcionados é denominado de rede não direcionada. Já um grafo que contenha os dois tipos pode ser transformado em uma rede direcionada, atribuindo dois sentidos aos arcos não direcionados. (HILLIER; LIEBERMAN, 2006).

Taha (2007) fornece algumas definições em relação às redes de fluxo:

- a) Caminho: arco que interliga 2 nós;

- b) Rede conectada: junção de nós distintos por meio dos arcos;
- c) Ciclo: uma rede conectada que liga um nó a ele mesmo, passando por outros nós;
- d) Árvore: rede conectada, sem a formação de ciclo;
- e) Árvore geradora: árvore que contém todos os nós da rede interligados.

Segundo Bodin *et al.* (1983), a maioria dos PR podem ser traduzidos em problemas de redes, e o tamanho do problema é medido em relação aos seus arcos e nós. Já a sua complexidade é dividida em duas classes, polinomiais e não polinomiais difíceis.

Os problemas polinomiais, pertencentes da classe P , são problemas mais fáceis de serem solucionados, sendo que geralmente é possível resolvê-los utilizando métodos exatos e encontrar uma solução ótima. Computacionalmente, o número de iterações necessária para a resolução dos problemas polinomiais é medido, por exemplo, por n^2 , sendo n o número de nós contidos no problema. Já os problemas não polinomiais difíceis, pertencentes a classe NP -Hard, são mais complexos de serem solucionados, e a utilização de um método exato é muitas vezes inviável, devido a sua alta complexidade computacional. Estes problemas não polinomiais difíceis podem ser medidos computacionalmente, por exemplo, por 2^n . (BODIN *et al.*, 1983).

Um PR pode ser classificado como um PR em nós ou em arcos, sendo que essa classificação depende do propósito do estudo. Se o foco deste estiver nos nós a serem transpassados, então tem-se um PR em nós; caso esteja nos arcos, então será um PR em arcos. Vale destacar que um PR em arcos pode ser transformado em um PR em nós e vice-versa. (PEARN *et al.*, 1987).

2.3.3 Problema de roteamento em arcos

O PR em arcos teve origem em 1736, com a publicação do matemático Euler sobre seu estudo em relação às sete pontes de Königsberg. O objetivo do estudo era encontrar um caminho possível para atravessar as sete pontes, localizadas sobre o rio, iniciando o trajeto em um determinado ponto, passando uma vez em cada uma das pontes e retornando à origem. Neste problema, as

áreas cobertas de terra representam os nós, e as pontes representam os arcos. (ASSAD; GOLDEN, 1995).

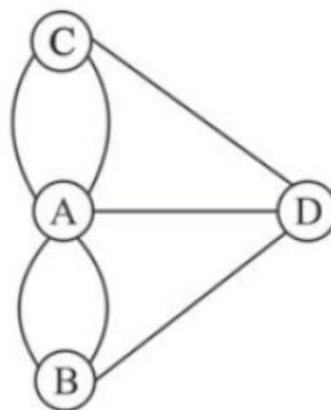
A Figura 2.6 é o desenho original de Euler sobre este referido problema (pontes de Königsberg).

FIGURA 2.6 – DESENHO ORIGINAL DAS PONTES DE KÖNIGSBERG

FONTE: Velminski (2008).

O desenho da Figura 2.6 pode ser transformado em um 2-grafo, conforme apresentado na Figura 2.7.

FIGURA 2.7 – 2-GRAFO OBTIDO A PARTIR DO ORIGINAL DAS PONTES DE KÖNIGSBERG



FONTE: Arenales *et al.* (2007).

Euler chegou à conclusão de que para que seja possível atravessar todos os arcos de um grafo apenas uma vez e retornar ao ponto inicial, é necessário que a cardinalidade de todos os nós do grafo sejam de grau par. Quando isso ocorre, o referido ciclo é chamado de circuito Euleriano. Portanto, Euler constatou que não seria possível encontrar um ciclo Euleriano no problema das pontes de Königsberg, pois todos os quatro nós apresentam cardinalidades ímpares. (GRÖTSCHEL; YUAN, 2012).

Segundo Mourão e Pinto (2017), os estudos sobre PR em arcos vêm crescendo nos últimos anos. Esta classe de problemas abrange diversas aplicações práticas, como entrega de cartas, limpeza de ruas, retirada de neve das ruas e estradas, leituristas dos órgãos de saneamento e de eletricidade, entre muitas outras aplicações.

Segundo Smiderle *et al.* (2004), o Problema do Carteiro Chinês (PCC) se enquadra na classe de problema de roteamento em arcos (PRA), em que se tem como objetivo definir um circuito Euleriano.

Mei-Ko Kwan é conhecido por ter desenvolvido o PCC, ou seja, a ideia levantada por Euler, em 1736. Kwan, em 1.962, publicou pela primeira vez relatando um problema em que um carteiro, com o objetivo de entregar suas correspondências, deveria passar por todas as ruas com entregas um número mínimo de vezes antes de retornar ao correio. (ASSAD; GOLDEN, 1995).

Com a análise do problema, Kwan verificou que se todos os nós apresentassem grau par de arestas, então seria possível formar um ciclo Euleriano. Mas, caso existissem nós com grau ímpar, seria necessário replicar certas arestas para transformá-los em graus pares, a fim de se obter um ciclo Euleriano. (ARENALES *et al.*, 2007).

A seguir, de (1) a (4), encontra-se o modelo matemático apresentado por Arenales *et al.* (2007) para o PCC.

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n x_{ji} - \sum_{j=1}^n x_{ij} = 0, i = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$x_{ij} + x_{ji} \geq 1 \quad \forall (i, j) \in A \quad (3)$$

$$x_{ij} \geq 0 \text{ inteiros} \quad (4)$$

onde:

n = número de nós contidos na rede;

A = arcos pertencentes à rede;

x_{ij} = número de vezes que o arco (i, j) é "atravessado" de i para j ;

c_{ij} = distância (ou custo) do arco (i, j) .

A função objetivo (1) minimiza o custo do percurso (distância total) realizada pelo carteiro chinês. As restrições apresentadas em (2) asseguram que o número de arcos que saem de um nó é equivalente ao número de arcos que chegam ao mesmo nó. As restrições em (3) garantem que todos os arcos do problema sejam percorridos ao menos uma vez. Por fim, as restrições em (4) indicam que as variáveis não devem assumir valores negativos e devem ser inteiras.

O PCC é um problema polinomial, sendo ele integralmente direcionado ou não direcionado. Porém existem algumas variações do problema tradicional, que pertencem a classe *NP-hard*, que é o PCC na versão mista, onde um grafo apresenta arcos direcionados e não direcionados, e na versão íngreme, onde há dois custos associados a travessia dos arcos, um para cada sentido. (MOURÃO; PINTO, 2017)

2.3.4 Problema de roteamento em nós

O problema de roteamento em nós (PRN), quando comparado ao PRA, é mais utilizado para a resolução de problemas, podendo ser verificado com a comparação do número de publicações entre as duas metodologias. (CORBERÁN; PRINS, 2010).

Hillier e Lieberman (2006) apontam que em um PRN tem-se como foco a visitação dos nós da rede conectada. Estes nós podem representar diferentes facilidades, dependendo do problema a ser solucionado. Na Tabela 2.3 é possível verificar componentes de redes típicas.

TABELA 2.3 - COMPONENTES DE REDES TÍPICAS

Nós	Arcos	Fluxo
Interseções	Vias	Veículos
Aeroportos	Rotas aéreas	Aeronave
Pontos de comutação	Fios, canais	Mensagens
Estações de bombeamento	Tubulação	Fluidos
Centros de trabalho	Rotas de tratamentos de materiais	Tarefa

FONTE: Hillier e Lieberman (2006).

O PRN é muito utilizado para solucionar problemas de localização e distribuição. A importância destes problemas é visível pelo alto custo associado ao transporte no mercado em geral. (BODIN *et al.*, 1983).

Há diversos métodos para solucionar problemas, que se encaixam dentro de um PRN. Um destes métodos, direcionado a problemas de distribuição, é o problema do caixeiro viajante (PCV), que segundo Laporte (1992), consiste em determinar uma distância total mínima que seja possível percorrer cada um dos nós apresentados no problema apenas uma vez, e por fim retorna-se ao nó inicial. Este ciclo é conhecido como ciclo hamiltoniano.

2.3.5 Problema de localização de facilidades

Os problemas de localização de facilidades (PLF) têm como objetivo a determinação do número de estabelecimentos e serem instalados e como melhor distribuí-los dentre as diversas alternativas disponíveis, tendo em vista

que com uma melhor localização destas facilidades, haverá redução nos custos para a distribuição dos bens e serviços. (BELFIORE; FÁVERO, 2013).

Estes PLFs envolvem tanto o setor privado quanto o público, com a determinação da localização de fábricas, centro de distribuições, postos de saúde, escolas, delegacias, entre outros. (ARENALES *et al.*, 2007).

Integrado ao PLF está o problema das p -medianas, que envolve a determinação da localização de p facilidades e designação dos clientes às facilidades, com o objetivo de redução no tempo de deslocamento e no custo. É possível que estas instalações estejam localizadas em qualquer local dos arcos que faça conexão com seus clientes. (ARENALES *et al.*, 2007).

A formulação deste problema matemático consiste em um modelo de programação linear binário. A seguir, de (5) a (10), encontra-se o modelo matemático apresentado por Senne e Lorena (2003) para o problema de p -medianas.

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i \cdot d_{ij} \cdot x_{ij} \quad (5)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \text{para } j \in N \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ii} = p \quad (7)$$

$$x_{ij} \leq x_{ii} \quad \text{para } i, j \in N \quad (8)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \text{para } i, j \in N \quad (9)$$

onde:

x_{ij} = matriz de alocações, em que:

$x_{ij} = 1$, se o vértice x_j é alocado ao vértice x_i ;

$x_{ij} = 0$, caso contrário;

$x_{ij} = 1$, se o vértice x_i é um vértice-mediana;

$x_{ij} = 0$, caso contrário.

n = número de nós na rede;

d_{ij} = distância entre o cliente j a facilidade i ;

a_i = peso atribuído a facilidade i ;

p = número de facilidades a serem abertas.

A função objetivo (5) minimiza a soma das distâncias entre clientes às facilidades. As restrições apresentadas em (6) e (8) garantem que cada cliente localizado em j seja atendido por uma única facilidade, e esta deve ser uma mediana. As restrições em (7) indicam o número de instalações (p) que deverão ser abertas. Por fim, as restrições em (9) indicam que as variáveis x_{ij} deverão ser binárias.

ReVelle *et al.* (2008) apontam que o PLF é classificado como um problema de nível NP-hard, o que dificulta a sua resolução por métodos exatos. Portanto a utilização de heurísticas para solucionar estes problemas é um recurso muito utilizado, sendo possível obter resultados próximo do ótimo em um menor período de tempo.

2.3.6 Heurística de Teitz & Bart

Uma das heurísticas utilizadas para a resolução de um PLF é apresentada por Teitz & Bart (1968) que, apesar de antiga, é ainda muito utilizada. Os autores apontam que o número de iterações necessárias para encontrar a solução final, utilizando esta heurística é dado por $\binom{n}{p}$, onde n representa os possíveis locais (locais-candidatos) onde poderão ser instaladas as p facilidades.

A heurística de Teitz & Bart busca encontrar o somatório entre as menores distâncias entre os p vértices (v_i) em relação aos n vértices dispostos no conjunto (V), considerando os pesos atribuídos a cada um dos vértices (w_j), com a utilização da equação (10). Com os resultados dos somatórios de todas as combinações $\binom{n}{p}$ é possível definir as p -medianas, que minimizam a soma

contrário, apresente o conjunto V_p como uma solução aproximada da solução ótima, para o problema das p -medianas.

2.3.7 Algoritmo Genético

O algoritmo genético (AG) foi fundamentado por John Holland e sua equipe de pesquisadores da universidade de Michigan, em 1975. Este algoritmo foi desenvolvido com base nos mecanismos da teoria da evolução de Darwin, sob o conceito da sobrevivência do mais adaptado. Uma das principais características desta heurística é a sua robustez, com o balanceamento entre eficácia e eficiência atingidas a um tempo computacional reduzido. (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003).

O AG é utilizado para auxiliar na resolução de uma grande gama de problemas, dentre os quais o PLF. Muitos autores têm realizado a aplicação do AG em PLF, dentre os quais pode-se citar Ardjmand *et al.* (2015) para determinar a localização de depósitos para descarte de resíduos perigosos; Hiassat *et al.* (2017) com o objetivo de determinar locais para armazenar produtos perecíveis; Simoni *et al.* (2017) para determinar pontos de transbordo, entre outras aplicações.

O primeiro passo da implementação de qualquer AG é a geração de uma população inicial, na qual cada indivíduo pertencente a esta população representa uma possível solução. Estes indivíduos podem ser referidos por genótipo, ou, também, por cromossomos. Na maioria dos casos, a população inicial é gerada de forma aleatória. (SOUZA SOBRINHO, 2014)

Após a geração da população inicial, cada cromossomo é avaliado e então é gerado um valor *fitness* para classificá-lo. Em seguida, os cromossomos são ranqueados do melhor para o pior de acordo com os valores de seus *fitness*. (WHITLEY, 1994).

Com o *ranking* da população definido, é dado início a etapa de seleção dos indivíduos, onde são selecionados indivíduos da população para realizarem o cruzamento. (STEINER *et al.*, 2015).

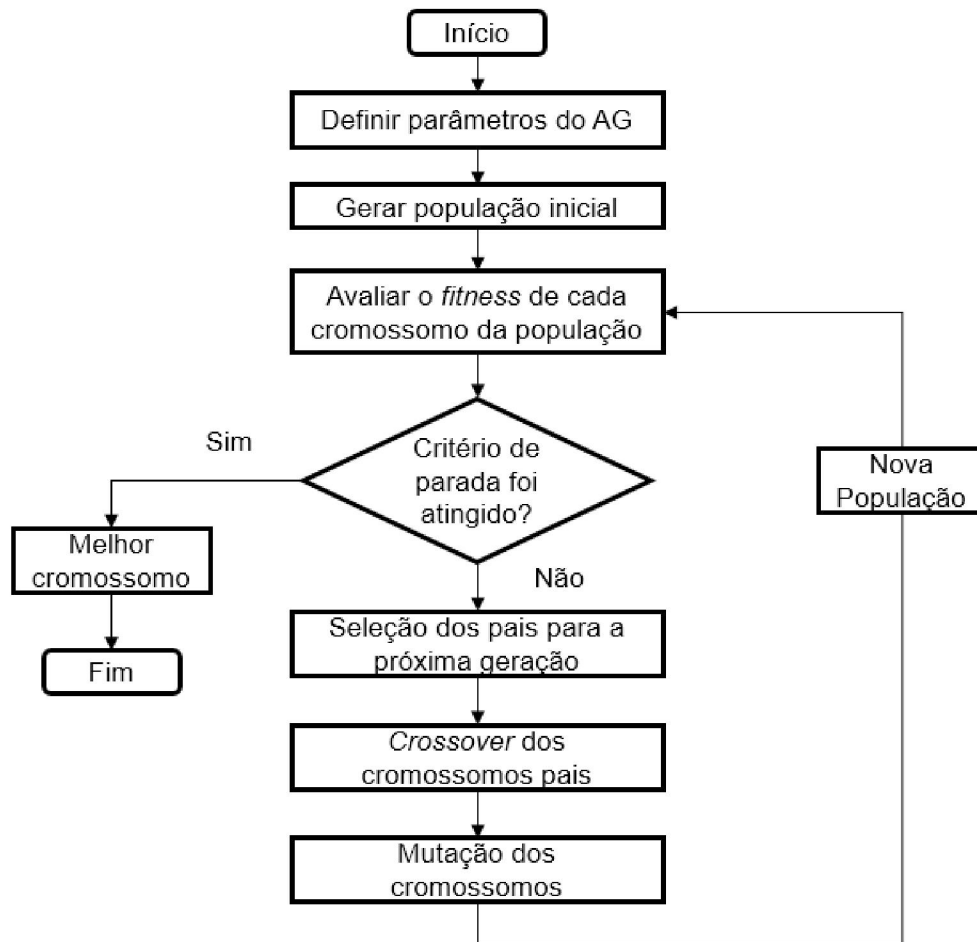
Nesta etapa de seleção, podem ser utilizados diversos métodos para selecionar indivíduos, como a seleção por torneio, que realiza uma escolha

aleatória dos indivíduos, e, dentre os escolhidos, são mantidos os de maior valor *fitness*. Este método apresenta oportunidade para todos os indivíduos serem selecionados, preservando assim a diversidade, e impedindo que haja uma conversão dos resultados rapidamente. Também há o método da seleção por roleta, que seleciona indivíduos de forma proporcional ao *ranking* dos valores dos *fitness* dos cromossomos, sendo que, os indivíduos mais aptos a serem escolhidos são os que pertencem ao topo da lista (possuem maior probabilidade de serem selecionados). Neste método há uma conversão mais rápida dos resultados, porém as características ‘fortes’ dos indivíduos são replicadas para as novas populações (RAZALI; GERAGHTY, 2011).

Na etapa de recombinação, são realizadas combinações entre soluções da etapa anterior (pais), gerando novas soluções (filhos). Por fim, na etapa de mutação é realizada uma busca na vizinhança destas “soluções filhos” com o objetivo de melhorar a solução. Em seguida, calcula-se os *fitness* dos filhos. Desta forma, de acordo com os valores dos *fitness* dos filhos, os dois, um ou nenhum dos filhos será inserido na população. Caso sejam inseridos um ou dois filhos, o último ou os dois últimos cromossomos deverão ser descartados. E, com isso, finaliza-se uma iteração verificando se o critério de convergência já foi atendido. Caso ainda não o tenha sido, volta-se a selecionar dois cromossomos para o cruzamento e prossegue-se da mesma forma. (STEINER *et al.*, 2015)

Na Figura 2.8 é possível verificar os passos do algoritmo genético, por meio de um fluxograma.

FIGURA 2.8 – FLUXOGRAMA DO ALGORITMO GENÉTICO



FONTE: adaptado de Razali e Geraghty (2011).

3. METODOLOGIA

Nesta seção serão apresentados os aspectos metodológicos aplicados na pesquisa. Estes foram divididos em 6 partes: caracterização da pesquisa, metodologia aplicada, divisão dos pontos de leitura da região analisada, descrição da programação computacional utilizada, uma representação dos diferentes cenários utilizados na pesquisa e por fim, uma descrição da programação do PCC.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA METODOLOGIA DE PESQUISA

Para alcançar um conhecimento científico é necessário que haja a possibilidade de verificação do mesmo, por meio de técnicas e métodos que resultaram no conhecimento em questão. (GIL, 2008).

As motivações para condução de uma pesquisa são oriundas da identificação de uma lacuna na teoria ou na existência de uma demanda na prática. Portanto uma pesquisa de natureza mais teórica, conhecida como pesquisa básica, tem como principal objetivo expandir o conhecimento sobre um determinado tema. Por outro lado, uma pesquisa aplicada tem como objetivo encontrar resultados para serem utilizados na solução de problemas. (SAUNDERS *et al.*, 2007). O presente estudo possui características de pesquisa de natureza aplicada e buscará encontrar soluções para otimizar rotas percorridas por leituristas de uma companhia de energia elétrica.

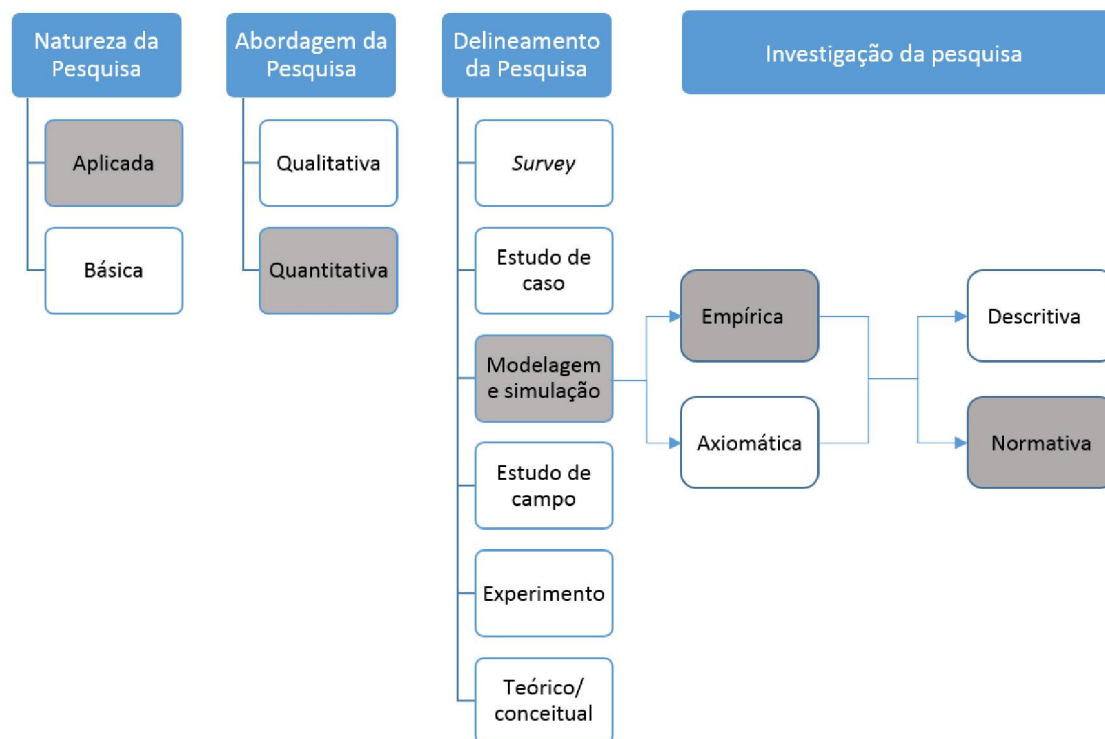
Quanto a abordagem da pesquisa, a mesma é caracterizada como uma pesquisa quantitativa, que de acordo com Fonseca (2002), é centrada na objetividade do assunto tratado e utiliza dados brutos para a compreensão da realidade do estudo, recorrendo à linguagem matemática na descrição de seus resultados.

Quanto ao delineamento da pesquisa, a mesma pode ser classificada como modelagem e simulação, que faz a utilização de técnicas matemáticas e computacionais para aprimorar o funcionamento de sistemas reais ou desenvolver representações de situações, com o objetivo de sistematizar o processo de tomada de decisões. (MIGUEL *et al.*, 2012).

Em relação a investigação da pesquisa, esta é classificada como uma pesquisa empírica normativa, que segundo Miguel *et al.* (2012), tem como objetivo conceber conhecimento, mediante o desenvolvimento de soluções para problemas, por meio de modelos de otimização matemática.

Estes aspectos metodológicos estão sintetizados na Figura 3.1 a seguir.

FIGURA 3.1 – ASPECTOS METODOLÓGICOS DA PESQUISA



FONTE: adaptado de Miguel *et al.* (2012).

3.2 METODOLOGIA APLICADA

O problema de definição de rotas aqui abordado tem como objetivo a aplicação de dois métodos integrados para solucionar o problema de roteirização de leituristas de uma companhia de energia elétrica. Primeiramente, para subdividir a região analisada foi utilizado o PLF, em que se particionou a região analisada em oito sub-regiões, sendo cada uma delas designada a um leiturista. Após o particionamento das regiões, foi aplicado o PCC a cada uma delas visando definir a rota dentro de cada uma das oito sub-regiões.

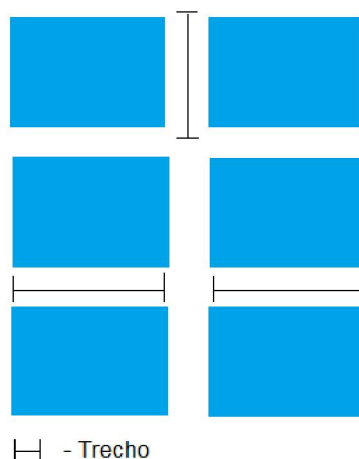
Segundo ReVelle *et al.* (2008), o PLF é classificado com o NP-hard e, portanto, a utilização de métodos heurísticos e meta-heurísticos facilitam a resolução do problema, apresentando resultados próximos da otimalidade com tempo computacional reduzido. Para o estabelecimento das heurísticas e meta-heurísticas que foram utilizadas neste trabalho, foi realizado um levantamento de trabalhos recentes com aplicações do PLF em problemas de roteirização. Dentre os trabalhos pesquisados, observou-se que as quatro heurísticas/meta-heurísticas mais utilizadas foram a *variable neighborhood search*, *greedy heuristics*, Algoritmo Genético e Busca Tabu, porém não foi encontrado nenhum trabalho com a aplicação do Algoritmo de Teitz & Bart. A pesquisa em questão visa preencher esta lacuna, aplicando este algoritmo para resolver um PLF, comparando-o com um dos métodos mais utilizados pelos autores dos trabalhos pesquisados, o AG.

Portanto foram utilizados estes dois métodos para realizar um comparativo entre os resultados obtidos. Além destes dois métodos, também foi aplicado o método exato. Portanto foi possível verificar o quão próximo da otimalidade cada um dos métodos conseguiu alcançar.

3.3 DIVISÃO DOS PONTOS DE LEITURA

O número de leituras a serem realizadas mensalmente na região analisada são 2.689, portanto, para o desenvolvimento do problema apresentado, foi realizado um agrupamento de pontos de leitura por trechos das ruas (arcos do grafo), com o objetivo de reduzir a complexidade do problema. Na Figura 3.2 encontra-se um exemplo de como as ruas foram divididas em trechos.

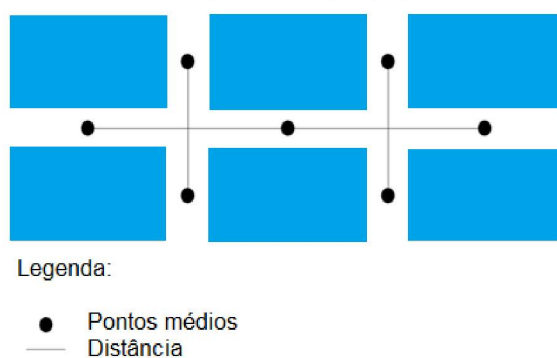
FIGURA 3.2 – EXEMPLO DA DIVISÃO DE RUA EM TRECHOS



FONTE: O autor (2019).

Foram agrupados todos os pontos de leituras pertencentes a cada trecho das ruas da região, e foi definido o ponto médio de cada um destes trechos para representá-los. Então, foram utilizadas as distâncias reais, obtidas por meio da ferramenta *My Maps* do *Google Maps*, entre os pontos médios para desenvolver a matriz de distâncias. Na Figura 3.3 é possível verificar um exemplo de como foi realizado o agrupamento e definição das distâncias utilizadas.

FIGURA 3.3 – EXEMPLO DO AGRUPAMENTO DE PONTOS DE LEITURA POR TRECHOS



FONTE: O autor (2019).

Com a realização deste agrupamento, foi possível reduzir o número de 2.689 pontos de leitura para 132 a serem analisados, representando todas as leituras a serem realizadas pelos leituristas. Os trechos contidos na região que

não apresentam pontos de leitura foram desconsiderados na plotagem dos pontos.

Na Tabela apresentada no Apêndice 1, e parcialmente replicada na Tabela 3.1 a seguir, é possível verificar a quantidade de leituras associadas a cada um dos pontos, sendo que na coluna ‘número de residências’ está a quantidade de leituras individuais e as demais colunas representam cada local que possui duas ou mais leituras a serem realizadas, que estão expostas na Tabela 3.1 como condomínios. Por exemplo, no ponto 1 são 35 locais com apenas uma leitura a ser realizada, cinco locais com duas leituras e três locais com três leituras, totalizando 43 locais a serem visitados e 54 leituras a serem realizadas.

TABELA 3.1 - QUANTIDADE DE LEITURAS ASSOCIADAS A CADA UM DOS PONTOS

Ponto	Número de Residências	Cond. 1	Cond. 2	Cond. 3	Cond. 4	Cond. 5	Cond. 6	Cond. 7	Cond. 8
1	35	2	2	3	3	2	3	2	2
2	10								
3	3	3	2	2	2	2	2		
4	7	2	2	2	2	6	2		
...

FONTE: O autor (2019).

Foi utilizada a ferramenta *My Maps* do *Google Maps* para plotar os pontos médios dos trechos e construir a matriz de distâncias, por meio das distâncias fornecidas também por esta ferramenta.

3.4 PROGRAMAÇÃO COMPUTACIONAL

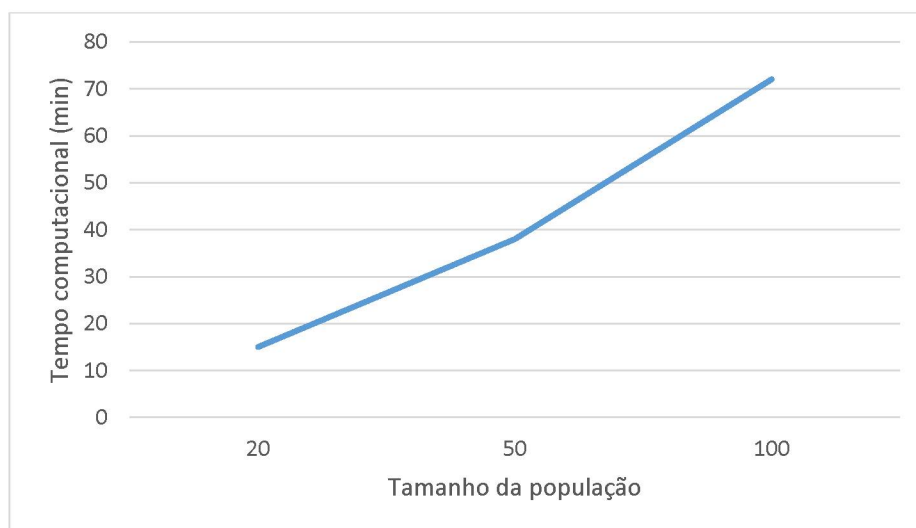
A programação dos métodos heurísticos/meta-heurísticos presentes nesse trabalho foi realizada por meio da utilização *software* R. Este possui um ambiente para a programação estatística e gráfica com manipulação e armazenagem de dados eficientes, além de ser um *software* gratuito (THE R PROJECT FOUNDATION, 2002).

Na resolução do método exato foi utilizado o *software* LINGO 17.0 (*Language for Interactive Optimizer Systems*), que apresenta uma linguagem de fácil compreensão, permite acesso a diversas bases de dados e possui um *solver* eficiente. Este é um *software* pago, porém é possível obter licença temporária para estudantes (LINDO SYSTEMS, INC., 2019).

3.4.1 Algoritmo Genético

Para solucionar o PLF pelo AG, foram desenvolvidas diversas funções dentro do *software* R, para a obtenção do resultado parcial. Primeiramente foi desenvolvida uma função para gerar aleatoriamente uma população inicial de oito medianas dentre os 132 pontos possíveis. Após uma gama de testes para verificar a quantidade ideal da população, comparando resultados finais e tempo computacional necessário para gerar todos os indivíduos, foi definido que uma população composta por 20 indivíduos seria suficiente. Foi escolhida essa quantidade, pois não houve uma melhora no resultado final, quando comparado com uma população de 50 ou 100 indivíduos, porém houve uma redução significativa do tempo computacional. O Gráfico 3.1 mostra a relação entre o número de indivíduos pertencentes a população e o tempo computacional necessário pra solucionar o problema.

GRÁFICO 3.1 – RELAÇÃO ENTRE O TEMPO COMPUTACIONAL E O TAMANHO DA POPULAÇÃO



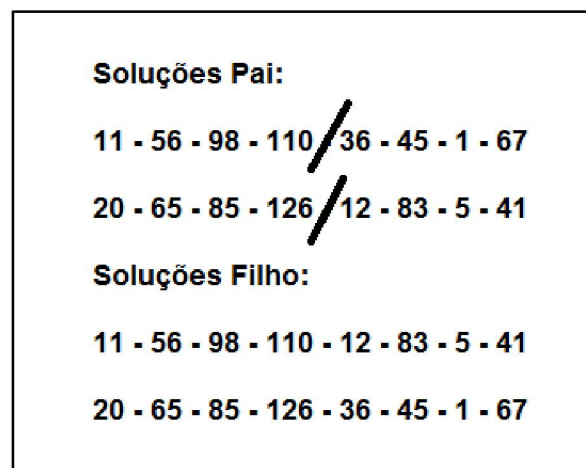
FONTE: O autor (2019).

Em seguida foi desenvolvida uma função de avaliação dos indivíduos, verificando o valor *fitness* de cada indivíduo, e se a solução é factível ou não. Caso a solução seja factível, ela entra para compor a população inicial. Na sequência todos os indivíduos deverão ser ranqueados do melhor (deverá ficar em 1º. lugar) para o pior *fitness*.

Outra função utilizada na programação do AG foi a de seleção, onde são selecionados os indivíduos que serão submetidos ao *crossover* para gerarem as soluções-filho. Há diversos métodos que podem ser utilizados para selecionar os indivíduos, sendo que neste trabalho optou-se por utilizar o método de seleção por roleta, onde os indivíduos são selecionados com a probabilidade diretamente proporcional ao valor de seu *fitness*, ou seja, quanto melhor o valor da função objetivo apresentado pelo indivíduo, mais chances ele terá de ser escolhido para fazer o cruzamento, lembrando que a soma de todos os *fitness* da população deverá ser de 100% (igual ao tamanho da circunferência da roleta) (RAZALI; GERAGHTY, 2011).

Após a etapa de seleção, é realizado o processo de *crossover* entre os indivíduos selecionados. Primeiramente é realizado um sorteio para verificar onde será o ponto de *crossover*, ou seja, qual será o ponto de corte para o cruzamento dos indivíduos. Como são 8 medianas, é realizado o sorteio entre 1 e 7. A Figura 3.4 mostra um exemplo, supondo que seja sorteado o número 4.

FIGURA 3.4 – EXEMPLO DE *CROSSOVER* DE SOLUÇÕES



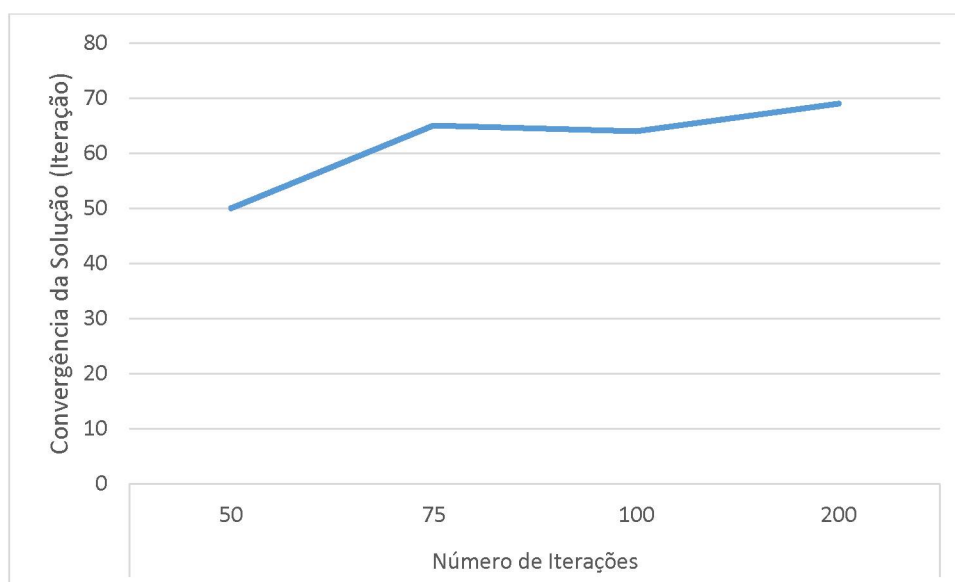
FONTE: O autor (2019).

Depois de gerar as soluções-filho é realizada a etapa de mutação, em que as soluções inviáveis (por exemplo, soluções com medianas duplicadas) deverão sofrer ajustes (por exemplo, substituir a mediana duplicada por alguma outra, mediante um sorteio), para preservar a factibilidade da solução encontrada.

Após o processo de mutação, as soluções são novamente ranqueadas de modo a inserir as soluções geradas na população. Como a cada iteração são geradas duas novas soluções, caso elas sejam de melhor qualidade (menor valor para a função objetivo), elas entrarão na população e duas piores serão excluídas da população, para que esta permaneça com apenas 20 indivíduos. Caso as soluções geradas apresentem um valor *fitness* pior ao dos outros 20 indivíduos, estas não serão incluídas na população.

Este processo, após a geração da população inicial, foi realizado 100 vezes, ou seja, por 100 iterações para a resolução do problema. Este número de iterações foi escolhido, pois em todos os casos analisados houve uma tendência de resultados em que não se alterava no final das 100 iterações em nenhum dos casos. No Gráfico 3.2 é possível verificar a tendência de convergência dos resultados.

GRÁFICO 3.2 – RELAÇÃO ENTRE CONVERGÊNCIA DA SOLUÇÃO COM O NÚMERO DE ITERAÇÕES



FONTE: O autor (2019).

Para a construção do Gráfico 3.2 foram geradas 10 soluções, com cada um dos números de iterações expostos no gráfico, utilizando uma população de 20 indivíduos, e foi calculada uma média da convergência das 10 soluções. É possível notar que a utilização de um número de iterações acima de 100 não é necessário, pois a solução converge para uma única antes de 70 iterações. Também não foi definido um número menor que 100 pois o tempo computacional entre a geração de cada iteração é mínimo.

3.4.2 Algoritmo de Teitz & Bart

Na programação do algoritmo de Teitz & Bart para a resolução do problema proposto, primeiramente é gerada uma solução factível com 8 medianas, dentre os 132 possíveis pontos. Depois, os pontos que não foram selecionados, são designados às medianas mais próximas, sendo possível calcular o número de transmissão da solução inicial. Estes pontos não selecionados são classificados como 'não analisados'.

Após a obtenção da solução inicial, é iniciado o processo de troca dos pontos que foram classificados como medianas pelos pontos 'não analisados', seguindo os passos expostos na seção 2.3.6.

3.4.3 Método Exato

Para a programação do método exato do problema das p -medianas em questão, foi utilizado o modelo matemático de Programação Linear Binário apresentado na seção 2.3.5. Neste caso o p recebeu o valor de 8, pois estão disponíveis 8 leituristas para a região analisada.

3.5 CENÁRIOS

Foram desenvolvidos 3 diferentes cenários para realizar as comparações entre os métodos utilizados. Em cada um deste cenários, os leituristas possuem diferentes capacidades máximas e demandas mínimas de

leituras a serem atendidas, para manter um equilíbrio na carga de trabalho designada a cada um deles.

Além disso, foram atribuídos diferentes pesos para as leituras únicas em comparação com locais que possuem mais de uma leitura, como prédios e condomínios. Esta diferenciação na atribuição de pesos visa simular o tempo necessário para realizar as leituras, pois o leitorista gasta mais tempo ao executar duas leituras em locais diferentes a realizar duas leituras no mesmo local.

No 1º cenário não foi utilizada nenhuma delimitação de capacidade ou demanda necessária. Assim, cada leitorista ficará responsável pela quantidade designada de leituras que apresente a menor rota. Também não foram atribuídos pesos diferenciados para as leituras neste 1º cenário.

No 2º cenário foi atribuído peso de 1 para as leituras únicas e de 0,2 para as leituras extras em cada local. Por exemplo: um prédio que possui 10 leituras a serem realizadas receberia um peso de $1 + 9 \times (0,2)$, ou seja, teria um peso de 2,8. Após a atribuição de pesos, o total foi dividido pelo número de leitoristas, que são 8, e foi acrescentado 25% do valor obtido na divisão para calcular a capacidade máxima, e também foi reduzido em 25% para calcular demanda mínima a ser atendida.

Este intervalo foi definido para aumentar a possibilidade de resultados factíveis, pois foi testado também com os valores de 10%, 15% e 20%, porém o tempo para gerar soluções iniciais nos métodos do AG e do Teitz & Bart foram muito longos. O peso total no 2º cenário foi de 1.731,4 sendo a capacidade máxima de cada leitorista de 270,5 e a demanda mínima a ser atendida de 162,3.

No 3º cenário foi atribuído peso de 1 para leituras únicas e de 0,3 para as leituras extras nas localizações. Também foi realizado o mesmo cálculo do 2º cenário, onde o peso total foi dividido por 8, e foi acrescentado 25% deste valor para calcular a capacidade máxima e reduzido em 25% para calcular a demanda mínima de cada leitorista. O peso total no 3º cenário foi de 1.882,6, sendo a capacidade máxima de cada leitorista de 294,2, e a demanda mínima a ser atendida de 176,5.

3.6 PROGRAMAÇÃO DO PCC

Assim como o método exato do PLF, a programação do PCC foi realizada no *software* LINGO. Como o PCC é classificado como um problema polinomial, não há necessidade da utilização de heurísticas para solucioná-lo.

Após a escolha da melhor solução encontrada para subdividir a região, foi dado início a programação para definir as rotas dentro de cada sub-região. Foram realizadas oito programações computacionais, com o modelo matemático do PCC alterado, sendo estas, uma para cada região obtida pelo particionamento.

O modelo matemático do PCC, que está exposto na subseção 2.3.3, sofreu uma alteração, pois neste caso o leitorista percorre cada trecho duas vezes, para atender os dois lados da rua, portanto a restrição $x_{ij} + x_{ji} \geq 1$ precisou ser modificada para $x_{ij} + x_{ji} \geq 2$. Todos os trechos com leituras a serem realizadas foram considerados como sendo necessário percorrer os dois lados, pois, com os dados, não foi possível verificar em qual lado do trecho cada leitura estava localizada.

Nos casos em que é opcional passar por um trecho, pois não há leituras a serem realizadas, esta restrição foi alterada para $x_{ij} + x_{ji} \geq 0$, retirando a obrigatoriedade de percorrer o caminho.

Para realizar a programação, foi necessário calcular as distâncias de todas as arestas contidas em cada região, que o leitorista irá precisar percorrer a fim de realizar o seu trabalho. As distâncias entre as intersecções foram obtidas por meio da ferramenta *My Maps* e os modelos desenvolvidos foram executados utilizando o *software* LINGO.

As plotagens feitas em vermelho e verde se referem a mais de um leiturista, por isso além da descrição da cor há também a posição indicada. Portanto os leituristas estão divididos em: Azul, Amarelo, Lilás, Marrom, Vermelho (superior), Vermelho (inferior), Verde (superior), Verde (inferior).

Na Tabela 4.1 é possível verificar a divisão entre os leituristas, com a quantificação de leituras destinadas a cada um deles.

TABELA 4.1 – DIVISÃO ATUAL DE LEITURAS DA REGIÃO

Leituristas	Quantidade de leituras	Cor correspondente
1	369	Vermelho (inferior)
2	652	Verde (inferior)
3	403	Azul
4	301	Amarelo
5	235	Lilás
6	189	Marrom
7	262	Vermelho (superior)
8	278	Verde (superior)

FONTE: O autor (2019).

Esta região não possui uma sequência lógica no particionamento da região, o que em alguns casos gera cruzamentos de rota que prejudicam o processo de leitura. Também, não há um balanceamento na quantidade de leituras destinadas aos leituristas. Portanto é possível notar que uma reestruturação desta subdivisão traria benefícios para a empresa.

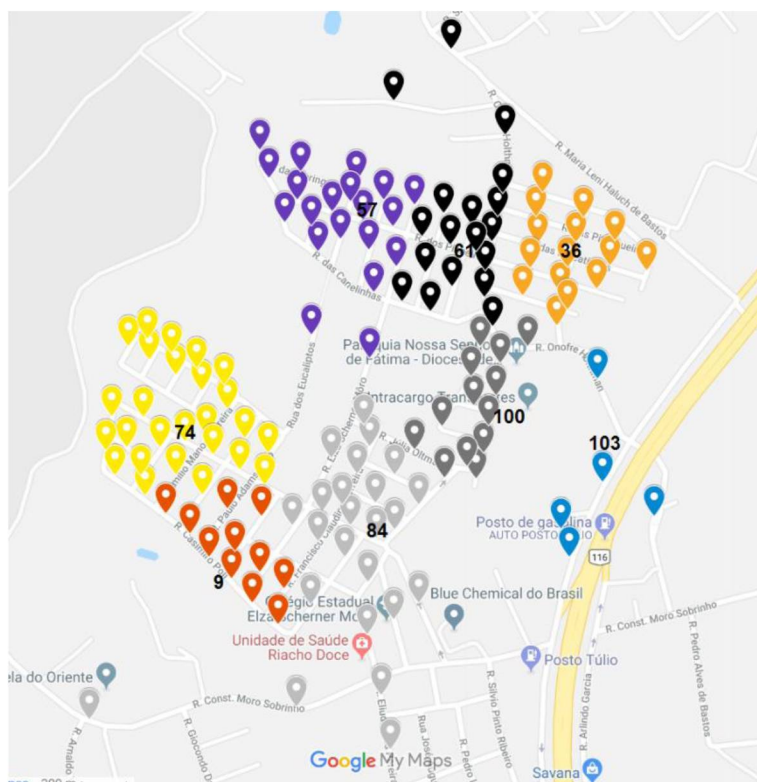
4.2 RESULTADOS REFERENTES AO 1º CENÁRIO

No 1º. Cenário, conforme já comentado, não foi realizada nenhuma atribuição de pesos para as leituras, e também não foi estabelecida uma capacidade máxima ou demanda mínima necessária.

Foram executadas quatro diferentes simulações com este cenário. Primeiramente foi utilizado o método exato para resolver o problema, na sequência o AG, algoritmo de Teitz & Bart e, além disso, o resultado obtido pelo AG foi aplicado no algoritmo de Teitz & Bart para aprimorar a solução obtida, gerando um método híbrido.

Foram realizadas 10 simulações de programação com cada um dos métodos e foi utilizado o melhor resultado obtido dentre os encontrados.

FIGURA 4.2 – PARTICIONAMENTO PELO MÉTODO EXATO



FONTE: O autor (2019).

TABELA 4.2 – DADOS DO PARTICIONAMENTO PELO MÉTODO EXATO

<i>Leituristas</i>	<i>Distância estimada(m)</i>	<i>Quantidade de pontos</i>	<i>Medianas</i>	<i>Leituras</i>
1	5.607	24	Ponto 84	369
2	4.821	26	Ponto 74	317
3	3.179	18	Ponto 61	217
4	3.147	20	Ponto 57	1.248
5	1.775	15	Ponto 36	252
6	1.664	13	Ponto 100	118
7	1.294	11	Ponto 9	127
8	869	5	Ponto 103	41
Total	22.356	132		2.689

FONTE: O autor (2019).

A Tabela 4.2 mostra os dados obtidos com a programação na qual é possível verificar a distância total percorrida (distância entre cada ponto contido no *cluster* até a sua mediana). Vale destacar que esta não é a distância exata que o leiturista irá percorrer, mas sim de cada um dos pontos até a mediana mais próxima, porém é possível ter uma percepção do tamanho da rota que

TABELA 4.3 – DADOS DO PARTICIONAMENTO PELO AG

<i>Leituristas</i>	<i>Distância estimada(m)</i>	<i>Quantidade de pontos</i>	<i>Medianas</i>	<i>Leituras</i>
1	1.230	11	Ponto 99	109
2	4.218	21	Ponto 77	214
3	4.254	17	Ponto 5	282
4	2.661	14	Ponto 71	483
5	2.187	12	Ponto 122	173
6	4.249	19	Ponto 35	237
7	1.506	11	Ponto 79	781
8	5.394	27	Ponto 61	410
<i>Total</i>	25.699	132		2.689

FONTE: O autor (2019).

Na Figura 4.3 é possível verificar a divisão da região obtida pelo AG. A utilização do AG para particionar a região neste 1º Cenário também não apresentou um resultado satisfatório. Na Tabela 4.3 é possível verificar que não há um equilíbrio na divisão da carga de trabalho entre os leituristas. O resultado obtido nesta simulação foi de 25.699 metros a serem percorridos pelos 8 leituristas, ou seja, o AG trouxe uma solução aproximada da solução ótima obtida pelo método exato, com uma diferença de 3.343 metros. O tempo de gasto para rodar esta simulação foi de 25 segundos.

FIGURA 4.4 – PARTICIONAMENTO PELO ALGORITMO DE TEITZ & BART



FONTE: O autor (2019).

TABELA 4.4 – DADOS DO PARTICIONAMENTO PELO ALGORITMO DE TEITZ & BART

<i>Leituristas</i>	<i>Distância estimada(m)</i>	<i>Quantidade de pontos</i>	<i>Medianas</i>	<i>Leituras</i>
1	3.346	19	Ponto 24	290
2	3.543	22	Ponto 57	1.271
3	1.924	7	Ponto 67	109
4	3.814	22	Ponto 74	252
5	3.445	17	Ponto 35	200
6	2.861	19	Ponto 83	288
7	1.440	12	Ponto 100	110
8	2.065	14	Ponto 10	169
<i>Total</i>	22.438	132		2.689

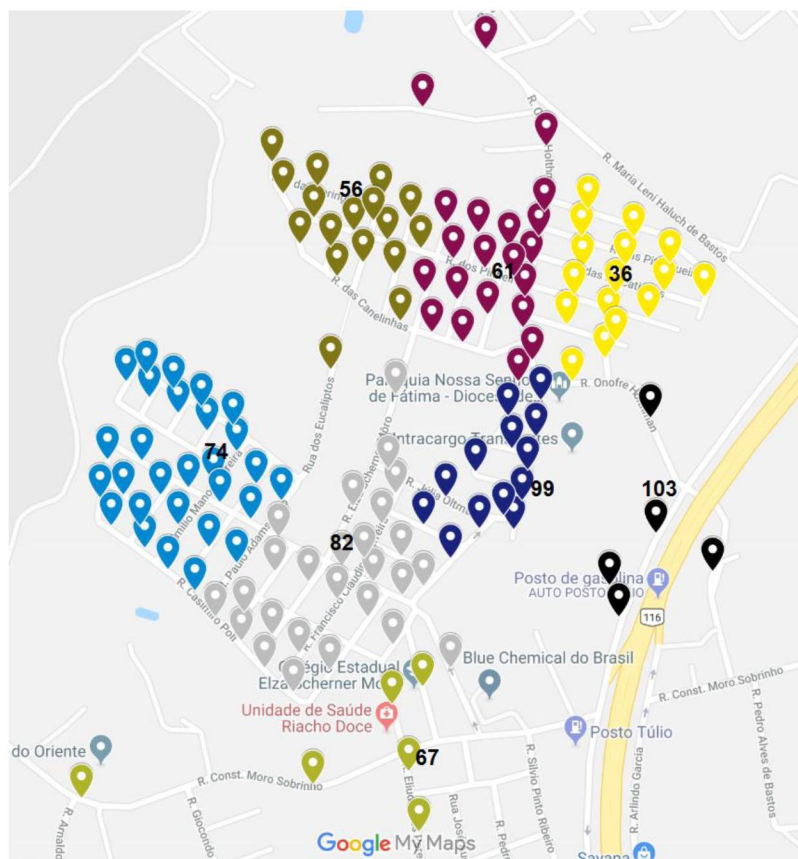
FONTE: O autor (2019).

O resultado obtido pelo Algoritmo de Teitz & Bart (Figura 4.4 e Tabela 4.4) também não trouxe um resultado que apresente uma boa divisão da carga

de trabalho, porém isso se dá pela falta de delimitações e pesos na programação, coerentes com o proposto pelo 1º. cenário.

Em relação ao resultado, o Algoritmo de Teitz & Bart apresentou uma solução mais próxima da solução ótima, quando comparado ao AG. O resultado final foi de 22.438 metros, com uma diferença de 82 metros da solução ótima, e com o tempo computacional de 8 segundos.

FIGURA 4.5 – PARTICIONAMENTO PELO AG + ALGORITMO DE TEITZ & BART



FONTE: O autor (2019).

TABELA 4.5 – DADOS DO PARTICIONAMENTO PELO AG + ALGORITMO DE TEITZ & BART

<i>Leituristas</i>	<i>Distância estimada(m)</i>	<i>Quantidade de pontos</i>	<i>Medianas</i>	<i>Leituras</i>
1	3.868	21	Ponto 61	274
2	2.007	16	Ponto 36	260
3	5.352	28	Ponto 74	348
4	4.998	26	Ponto 82	632
5	869	5	Ponto 103	41
6	2.319	17	Ponto 56	860
7	1.339	6	Ponto 67	104
8	1.647	13	Ponto 99	170
<i>Total</i>	22.399	132		2.689

FONTE: O autor (2019).

Assim como os outros resultados obtidos, este cenário, expostos por meio da Figura 4.5 e Tabela 4.5, não apresenta um equilíbrio na divisão do trabalho, já que há leituristas com muitas leituras a serem realizadas, percorrendo uma maior distância em relação a outros.

Em relação a solução obtida com o modelo matemático, houve uma melhora no resultado do AG, com a aplicação do Algoritmo de Teitz & Bart em cima do resultado gerado. Nesta simulação, a solução final foi de 22.399 metros, que possui uma diferença de apenas 43 metros da solução ótima. O tempo computacional foi de 32 segundos.

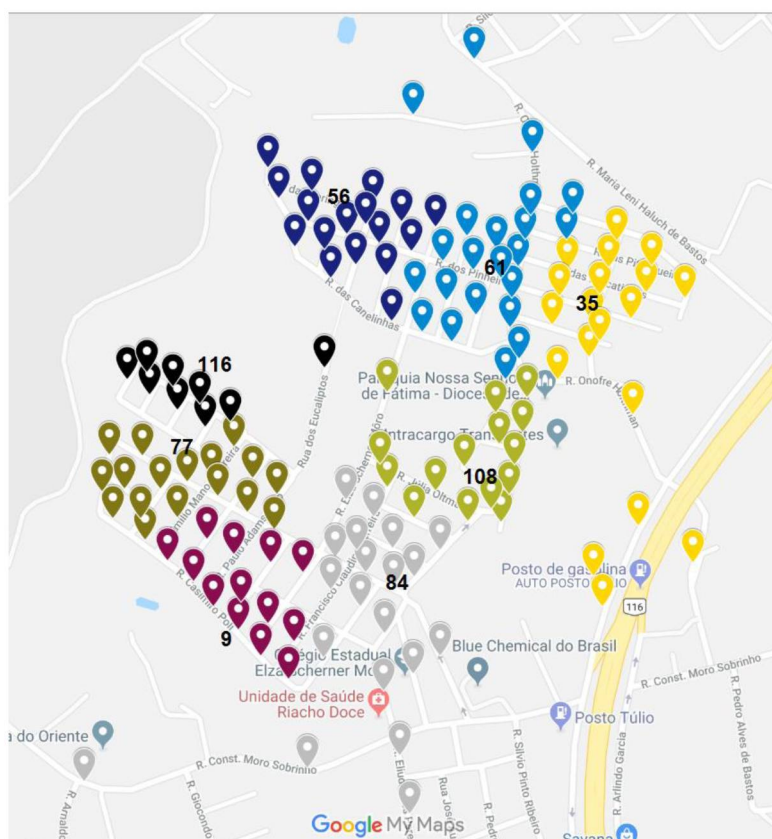
Neste 1º. cenário pode-se verificar que os resultados não foram muito satisfatórios em relação a divisão da carga de trabalho. Porém, em relação às metodologias utilizadas, foi possível perceber que o Algoritmo de Teitz & Bart apresentou um resultado mais próximo da otimalidade, em relação ao AG. Entretanto, quando os dois métodos são utilizados em conjunto, há uma grande melhora na resposta, trazendo uma melhor solução em comparação a utilização de apenas um dos métodos.

4.3 RESULTADOS REFERENTES AO 2º CENÁRIO

No 2º. cenário foram atribuídos pesos para as leituras, além de uma delimitação de demanda e capacidade para os leituristas. O peso de cada leitura única recebeu valor de 1, e as leituras extras em cada localização recebeu o valor de 0,2. As capacidades e demandas de cada leiturista foram delimitadas em, respectivamente, 270,5 e 162,3. O cálculo destas delimitações estão na seção 3.5.

Neste cenário também foram aplicados os mesmos quatro métodos utilizados no 1º. cenário. São eles: Método exato; AG; Algoritmo de Teitz & Bart; Método híbrido com o AG + Algoritmo de Teitz & Bart. Também foram utilizadas 10 simulações para cada um dos casos e foi selecionada a melhor solução apresentada.

FIGURA 4.6 – PARTICIONAMENTO PELO MÉTODO EXATO



FONTE: O autor (2019).

TABELA 4.6 – DADOS DO PARTICIONAMENTO PELO MÉTODO EXATO

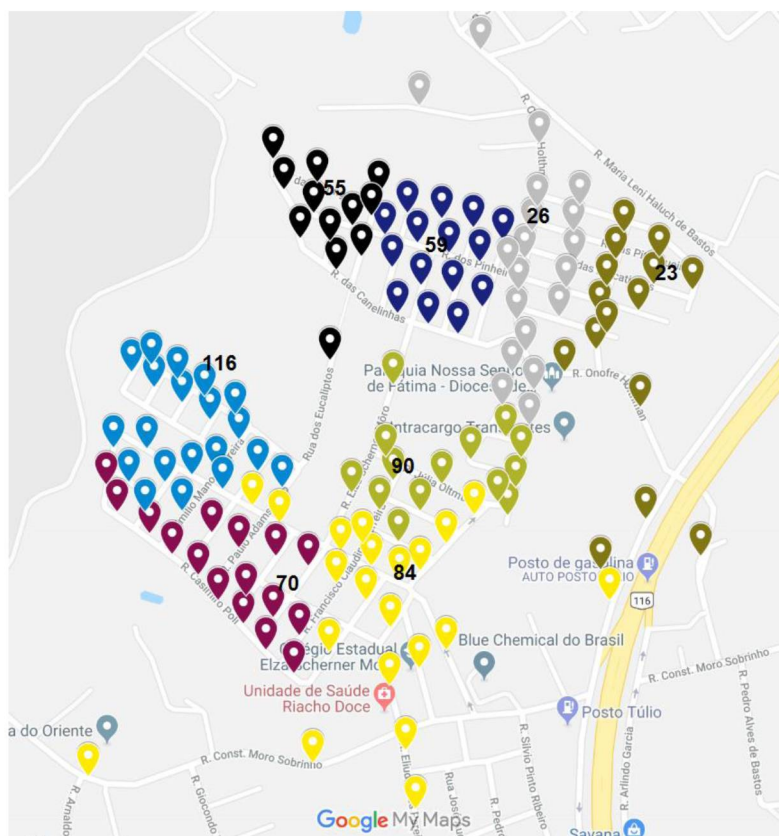
<i>Leituristas</i>	<i>Distância estimada(m)</i>	<i>Quantidade de pontos</i>	<i>Medianas</i>	<i>Leituras</i>	<i>Peso</i>
1	1.746	13	Ponto 9	193	170
2	4.249	19	Ponto 35	237	193,4
3	2.249	17	Ponto 56	274	245,4
4	4.143	22	Ponto 61	309	261,4
5	2.425	17	Ponto 77	197	180,4
6	4.568	20	Ponto 84	302	262,2
7	2.478	15	Ponto 108	496	227,6
8	1.118	9	Ponto 116	681	191
<i>Total</i>	22.976	132		2.689	1.731,4

FONTE: O autor (2019).

Pode-se verificar na Figura 4.6 que a subdivisão da região apresenta uma sequência lógica, em que um leiturista, não necessariamente, precisa atravessar a rota de outro para percorrer a sua própria.

Também é possível ver na Tabela 4.6 que a utilização de pesos e delimitações auxilia na melhor distribuição da carga de trabalho. Em comparação com o 1º. cenário, não houve um aumento muito grande na rota total a ser percorrida, porém houve um equilíbrio na designação de tarefas. A rota total a ser percorrida pelos oito leituristas em conjunto é de 22.976 metros, e o tempo computacional foi de 40 minutos e 55 segundos.

FIGURA 4.7 – PARTICIONAMENTO PELO ALGORITMO GENÉTICO



FONTE: O autor (2019).

TABELA 4.7 – DADOS DO PARTICIONAMENTO PELO AG

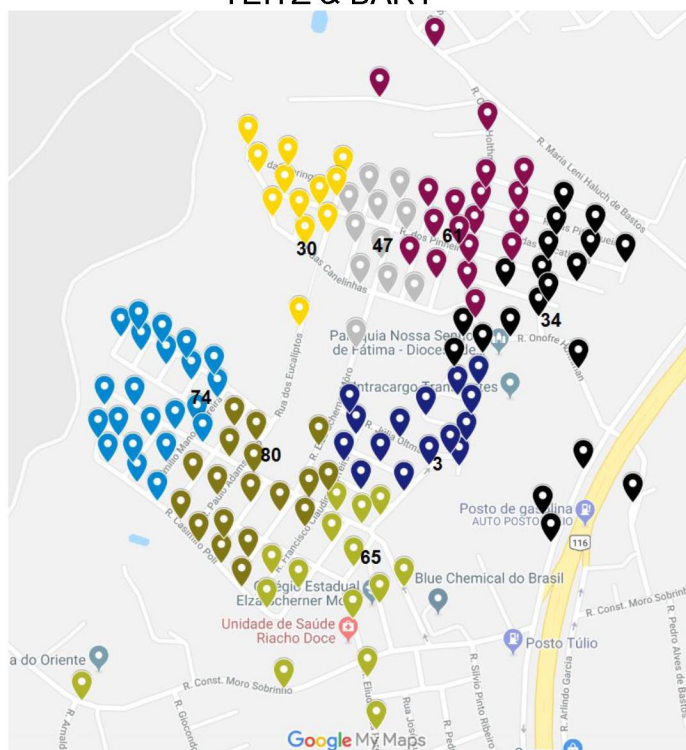
<i>Leituristas</i>	<i>Distância estimada(m)</i>	<i>Quantidade de pontos</i>	<i>Medianas</i>	<i>Leituras</i>	<i>Peso</i>
1	3.509	16	Ponto 70	204	180,4
2	3.957	19	Ponto 26	243	202,6
3	5.414	21	Ponto 84	275	224,4
4	1.683	12	Ponto 55	768	261
5	2.920	14	Ponto 90	509	241,8
6	4.362	15	Ponto 23	155	162,4
7	4.364	20	Ponto 116	246	220
8	1.872	15	Ponto 59	289	238,8
<i>Total</i>	28.081	132		2.689	1.731,4

FONTE: O autor (2019).

Pela Tabela 4.7 é possível perceber que houve um equilíbrio na distribuição da carga de trabalho para a maioria dos leituristas, os que percorrem um caminho menor, ficam responsáveis por mais leituras. O

resultado desta programação foi de 28.081 metros a serem percorridos pelos leituristas, que em comparação com o método exato, houve um aumento considerável no percurso. A diferença entre os dois métodos foi de 5.105 metros, e o tempo computacional foi de 14 minutos e 38 segundos.

FIGURA 4.8 – PARTICIONAMENTO PELO ALGORITMO DE TEITZ & BART



FONTE: O autor (2019).

TABELA 4.8 – DADOS DO PARTICIONAMENTO PELO ALGORITMO DE TEITZ & BART

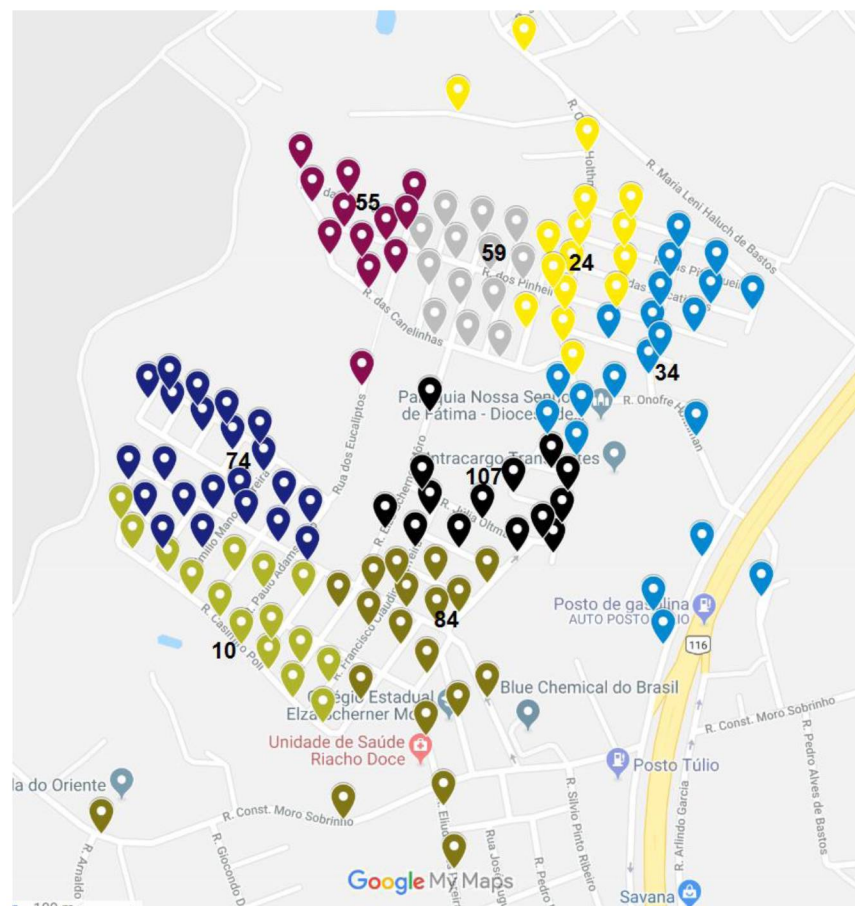
<i>Leituristas</i>	<i>Distância estimada(m)</i>	<i>Quantidade de pontos</i>	<i>Medianas</i>	<i>Leituras</i>	<i>Peso</i>
1	3.367	19	61	299	252,6
2	4.165	22	74	218	204,4
3	2.358	15	3	209	177
4	4.775	20	34	208	169,8
5	1.453	11	47	511	245,2
6	3.135	18	80	262	234,2
7	1.916	12	30	768	261
8	3.545	15	65	214	187,2
Total	24.714	132		2.689	1.731,4

FONTE: O autor (2019).

A Tabela 4.8 mostra o resultado obtido com a programação do algoritmo de Teitz & Bart para solucionar o problema, e pode-se perceber que há uma boa distribuição da carga de trabalho e pela Figura 4.8 também é possível notar que, visualmente, a divisão está bem distribuída.

O resultado obtido com esta programação foi de 24.714 metros a serem percorridos pelos oito leitores em conjunto. O resultado obtido foi superior em comparação ao AG, e próximo da otimalidade, com uma diferença de 1.738 metros. O tempo computacional para gerar o resultado foi de 52 segundos.

FIGURA 4.9 – PARTICIONAMENTO PELO AG + ALGORITMO DE TEITZ & BART



FONTE: O autor (2019).

TABELA 4.9 – DADOS DO PARTICIONAMENTO PELO AG + ALGORITMO DE TEITZ & BART

<i>Leituristas</i>	<i>Distância estimada(m)</i>	<i>Quantidade de pontos</i>	<i>Medianas</i>	<i>Leituras</i>	<i>Peso</i>
1	1.683	12	Ponto 55	768	261
2	1.556	13	Ponto 59	242	213
3	5.044	21	Ponto 34	214	175,8
4	2.565	14	Ponto 107	500	230,8
5	2.658	16	Ponto 24	236	198,6
6	4.309	19	Ponto 84	285	246,6
7	2.305	15	Ponto 10	192	169,6
8	3.814	22	Ponto 74	252	236
<i>Total</i>	23.934	132		2.689	1.731,4

FONTE: O autor (2019).

A utilização da combinação do AG com o Algoritmo de Teitz & Bart, como se pode ver na Figura 4.9, apresenta um particionamento com uma sequência lógica para os leituristas percorrerem. Com a Tabela 4.9 é possível verificar que houve uma boa distribuição da carga de trabalho, balanceando a quantidade de leituras a serem realizadas com a distância a ser percorrida.

O resultado obtido neste caso foi de 23.934 metros a serem percorridos pelos leituristas, como um grupo. O resultado se diferencia da otimalidade por apenas 958 metros, e o tempo computacional foi de 14 minutos e 45 segundos.

A utilização de pesos e restrições de demanda e capacidade foi fundamental na divisão da carga de trabalho entre os leituristas. Pode-se observar que em todos os resultados obtidos neste cenário, houve um equilíbrio maior na distribuição de tarefas, em relação ao 1º. cenário.

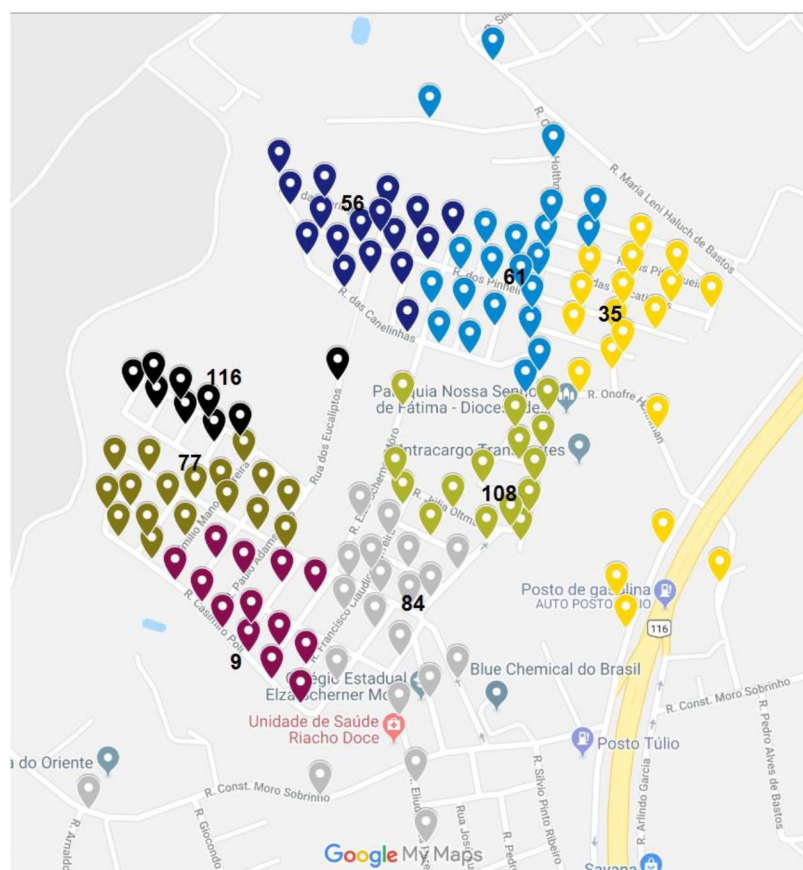
O AG, neste cenário, não apresentou um resultado muito satisfatório, porém o Algoritmo de Teitz & Bart e a junção dos dois métodos apresentaram resultados próximos da otimalidade. A combinação dos métodos, novamente, trouxe uma melhor solução, quando comparado com a utilização de apenas um deles.

4.4 RESULTADOS REFERENTES AO 3º CENÁRIO

No 3º. cenário também foram atribuídos pesos para as leituras, e delimitação de demanda e capacidade para os leituristas. O peso de cada leitura única recebeu valor de 1, e as leituras extras em cada localização recebeu o valor de 0,3. As capacidades e demandas de cada leiturista foram delimitadas em, respectivamente, 294,2 e 176,5. O cálculo destas delimitações estão na seção 3.5.

Neste cenário também foram aplicados os mesmos quatro métodos utilizados no primeiro e no 2º. cenário. São eles: Método exato; AG; Algoritmo de Teitz & Bart; Método híbrido com o AG + Algoritmo de Teitz & Bart. Também foram utilizadas 10 simulações para cada um dos casos e foi selecionada a melhor solução apresentada.

FIGURA 4.10 – PARTICIONAMENTO PELO MÉTODO EXATO



FONTE: O autor (2019).

TABELA 4.10 – DADOS DO PARTICIONAMENTO PELO MÉTODO EXATO

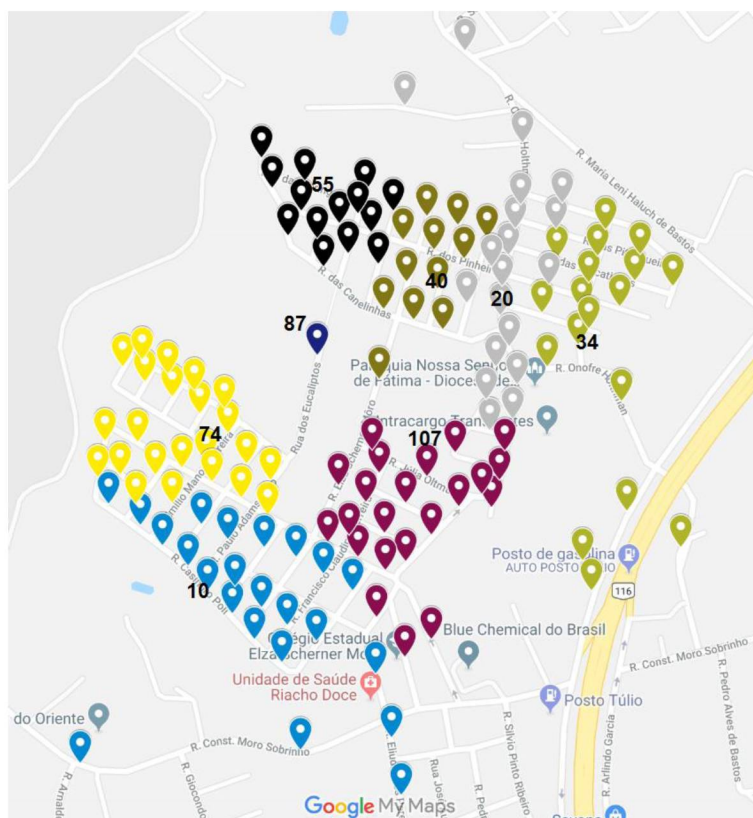
<i>Leituristas</i>	<i>Distância estimada(m)</i>	<i>Quantidade de pontos</i>	<i>Medianas</i>	<i>Leituras</i>	<i>Peso</i>
1	1.770	13	9	202	184,7
2	4.249	19	35	237	203,6
3	2.264	17	56	272	250,7
4	4.128	22	61	311	276,5
5	2.425	17	77	197	185,1
6	4.824	21	84	307	276,5
7	2.200	14	99	482	253
8	1.118	9	116	681	252,5
<i>Total</i>	22.978	132		2.689	1.882,6

FONTE: O autor (2019).

A Figura 4.10 mostra o resultado final do particionamento da região por meio da aplicação do método exato. A Tabela 4.10 apresenta os dados obtidos com a programação, na qual é possível verificar que há uma boa distribuição na quantidade de pontos, sendo que os leituristas que ficaram responsáveis por uma área menor a ser percorrida, receberam mais leituras a serem realizadas, que é o caso dos leituristas 7 e 8. Apenas os leituristas 1 e 5 receberam uma carga de trabalho um pouco menor em relação aos outros, porém não há uma discrepância exacerbada.

O resultado obtido com esta programação foi de 22.978 metros a serem percorridos para a realização de todas as leituras da região, esta é a solução ótima para este cenário. O tempo computacional foi de 39 minutos e 52 segundos.

FIGURA 4.11 – PARTICIONAMENTO PELO AG



FONTE: O autor (2019).

TABELA 4.11 – DADOS DO PARTICIONAMENTO PELO AG

<i>Leituristas</i>	<i>Distância estimada(m)</i>	<i>Quantidade de pontos</i>	<i>Medianas</i>	<i>Leituras</i>	<i>Peso</i>
1	5.336	22	107	307	280,5
2	1.910	14	55	226	209,6
3	3.814	22	74	252	240,5
4	7.243	24	10	325	291,8
5	0	1	87	615	186,5
6	1.705	12	40	523	291,8
7	4.292	18	34	220	187,4
8	4.241	19	20	221	194,5
Total	28.541	132		2.689	1.882,6

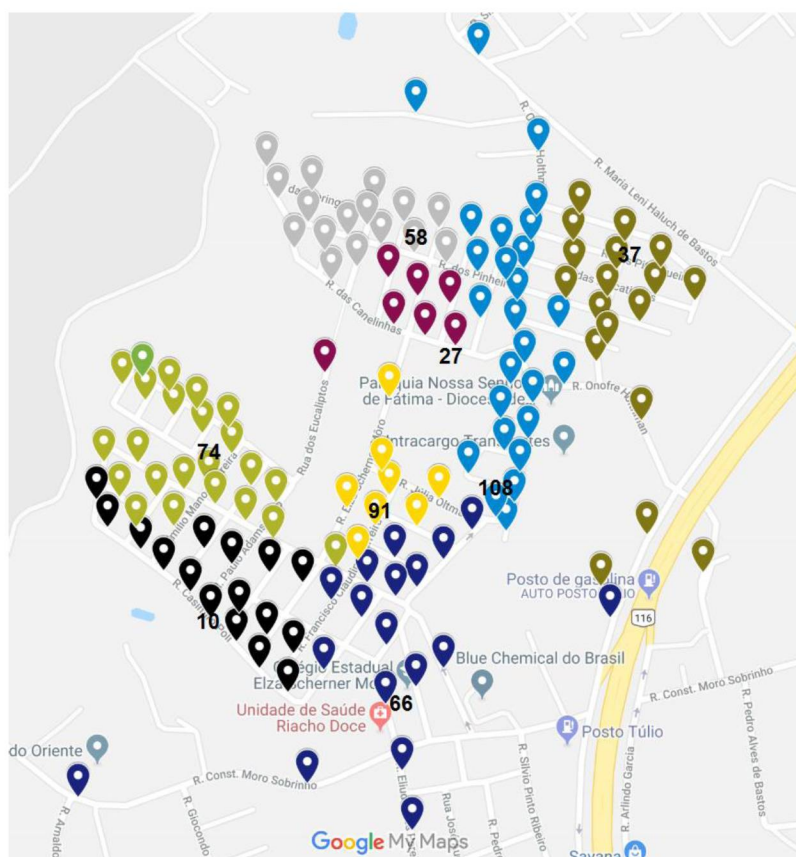
FONTE: O autor (2019).

A Figura 4.11 mostra o resultado obtido com a aplicação do AG para subdividir a região, e pode-se notar que um leiturista ficou responsável por apenas um ponto, que é um condomínio com 615 leituras.

A Tabela 4.11 apresenta os dados obtidos com mais detalhes, e é possível notar que a distribuição da carga de trabalho não está equilibrada. Pode-se verificar que alguns leitores estão com uma sobrecarga em relação a outros. Tem-se um funcionário percorrendo 7km, enquanto outro foi designado a realizar leitura em apenas um local, e, portanto, não terá uma rota a ser percorrida.

O resultado obtido com essa programação foi de 28.541 metros a serem percorridos para atender os pontos de leitura. Este resultado obtido se diferencia do ótimo em 5.563 metros. O tempo computacional foi de 15 minutos e 18 segundos.

FIGURA 4.12 – PARTICIONAMENTO PELO ALGORITMO DE TEITZ & BART



FONTE: O autor (2019).

TABELA 4.12 – DADOS DO PARTICIONAMENTO PELO ALGORITMO DE TEITZ & BART

<i>Leituristas</i>	<i>Distância estimada(m)</i>	<i>Quantidade de pontos</i>	<i>Medianas</i>	<i>Leituras</i>	<i>Peso</i>
1	1.084	8	91	709	274,3
2	4.132	23	74	257	245,1
3	6.424	25	37	341	292,7
4	1.747	15	58	278	254,1
5	4.277	15	66	211	190,4
6	2.588	16	10	204	187,1
7	1.874	12	27	440	215,6
8	3.066	18	108	249	223,3
<i>Total</i>	25.192	132		2.689	1.882,6

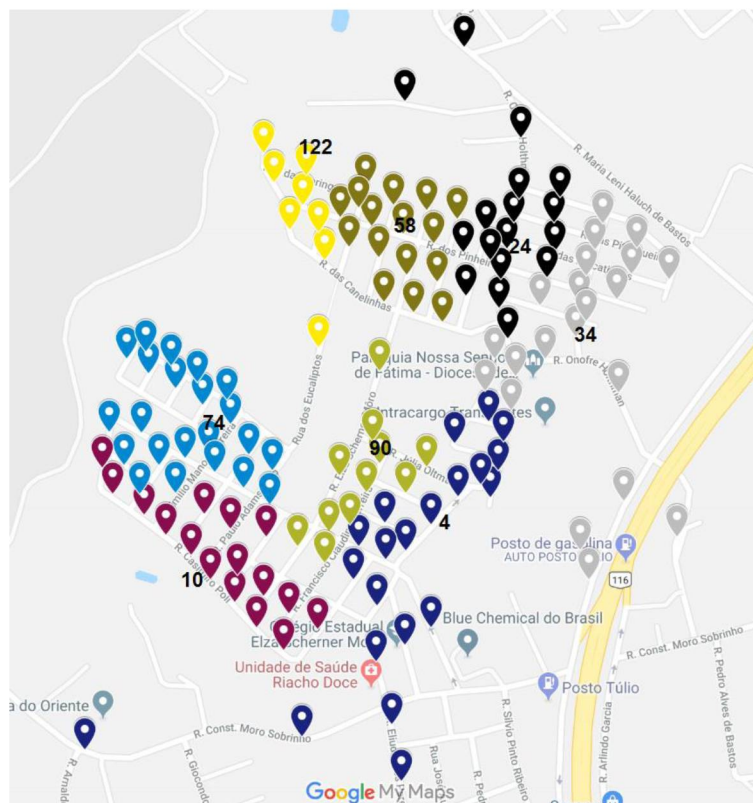
FONTE: O autor (2019).

O resultado visual da subdivisão está exposto na Figura 4.12, onde é possível verificar que há uma sequência lógica para todos os leituristas.

O Tabela 4.12 mostra os dados obtidos com a aplicação do Algoritmo de Teitz & Bart, onde é possível verificar que alguns leituristas ficaram sobrecarregados em relação a outros, porém apenas o terceiro apresenta uma diferença considerável de excesso na carga de trabalho, devido ao seu percurso longo e número de leituras a serem realizadas.

O resultado obtido com este programa computacional foi de 25.192 metros a serem percorridos para a realização das leituras. Este resultado apresenta uma diferença de 2.214 metros em relação ao resultado ótimo, obtido pelo método exato. O tempo computacional para gerar o resultado foi de 55 segundos.

FIGURA 4.13 – PARTICIONAMENTO PELO AG + ALGORITMO DE TEITZ & BART



FONTE: O autor (2019).

TABELA 4.13 – DADOS DO PARTICIONAMENTO PELO AG + ALGORITMO DE TEITZ & BART

<i>Leituristas</i>	<i>Distância estimada(m)</i>	<i>Quantidade de pontos</i>	<i>Medianas</i>	<i>Leituras</i>	<i>Peso</i>
1	3.814	22	74	252	240,5
2	2.612	16	10	213	195,3
3	5.044	21	34	214	184,7
4	2.776	17	24	246	215,2
5	5.829	21	4	263	233,7
6	2.066	16	58	291	266,9
7	1.602	11	90	501	272
8	1.084	8	122	709	274,3
<i>Total</i>	24.827	132		2.689	1.882,6

FONTE: O autor (2019).

O resultado obtido pelo conjunto dos dois métodos heurísticos está exposto na Figura 4.13. A Tabela 4.13 expõe os dados obtidos pela programação, onde pode-se verificar que há um equilíbrio na divisão de cargas

de trabalho, na qual os dois leituristas que percorrem o menor caminho, são responsáveis pela realização de um maior número de leituras, já os que foram designados a percorrer um trajeto maior, ficaram responsáveis por um menor número de leituras.

O resultado obtido pela programação foi de 24.827 metros a serem percorridos para atender todas as localidades e realizar as leituras. Este resultado apresenta uma diferença de 1.849 metros do resultado ótimo para este cenário. O tempo computacional foi de 15 minutos e 25 segundos.

É possível verificar que, novamente, a junção do AG com o Algoritmo de Teitz & Bart apresenta um melhor resultado, quando comparado com a utilização de apenas um destes métodos heurísticos/meta-heurísticos. E o Algoritmo de Teitz & Bart apresenta um resultado superior ao do AG, com um tempo computacional muito inferior.

4.5 ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS PELOS TRÊS CENÁRIOS

Tendo em vista os dados obtidos nos três cenários expostos nas seções anteriores, pode-se perceber uma tendência em relação aos métodos utilizados. Em todos os três cenários o método exato apresenta a solução ótima para o problema, a combinação do AG com o Algoritmo de Teitz & Bart apresenta o resultado mais próximo da otimalidade, seguido pela utilização de, apenas, o Algoritmo de Teitz & Bart. Já o AG apresentou, em todos os cenários, o pior resultado.

A Tabela 4.14 apresenta um comparativo entre os cenários, em relação ao método exato. Nela é possível verificar os resultados obtidos, e o tempo computacional levado para solucioná-los.

TABELA 4.14 – COMPARATIVO DOS CENÁRIOS PELO MÉTODO EXATO

	1º Cenário	2º Cenário	3º Cenário
	Método Exato	Método Exato	Método Exato
Resultado Computacional (m)	22.356	22.976	22.978
Tempo Computacional (h)	00:38:50	00:40:55	00:39:52

FONTE: O autor (2019).

Pode-se observar, a partir da Tabela 4.14, que os resultados obtidos nos 2º. e 3º. cenários são semelhantes, e quando comparado com o 1º. cenário, há uma diferença de um pouco mais de 600 metros. Mesmo apresentando uma rota maior a ser percorrida, o 2º. e 3º. cenários ainda são preferíveis, pois levam em consideração uma divisão na carga de trabalho mais uniforme. Em relação ao tempo computacional, houve uma diferença pequena entre os três cenários.

TABELA 4.15 – COMPARATIVO DOS CENÁRIOS POR MÉTODOS APROXIMADOS

	1º Cenário			2º Cenário			3º Cenário		
	AG	Alg. de T&B	AG + Alg. de T&B	AG	Alg. de T&B	AG + Alg. de T&B	AG	Alg. de T&B	AG + Alg. de T&B
Resultado Computacional(m)	25.699	22.438	22.399	28.081	24.714	23.934	28.541	25.192	24.827
Tempo Computacional (h)	00:00:25	00:00:08	00:00:32	00:14:38	00:00:52	00:14:52	00:15:18	00:00:55	00:15:25
Diferença do resultado ótimo(m)	3.343	82	43	5.105	1.738	958	5.563	2.214	1.849
Porcentagem da diferença	15,0%	0,4%	0,2%	22,2%	7,6%	4,2%	24,2%	9,6%	8,0%

FONTE: O autor (2019).

Em relação aos métodos aproximados, a Tabela 4.15 mostra um comparativo nos três cenários utilizados. Em todos os cenários o AG apresentou uma diferença muito maior, comparado aos outros métodos. A

porcentagem de diferença, em relação à solução ótima, do AG foi superior a pelo menos 15%, enquanto os outros métodos foram inferiores a 10% em todos os casos.

Por outro lado, comparando a utilização do Algoritmo de Teitz & Bart com a união dos dois métodos, não há uma discrepância muito grande. No 1º. cenário houve uma oscilação de 0,2% entre eles, e a maior diferença chegou a ser de apenas 3,2% no 2º. cenário.

Em relação ao tempo computacional, é possível notar que no 1º. cenário todos foram muito rápidos, sendo o Algoritmo de Teitz & Bart o mais rápido entre eles, já nos outros dois cenários houve uma diferença temporal superior entre os métodos.

Para gerar a população inicial, de 20 indivíduos, do AG com restrições de demanda e capacidade é necessário um tempo computacional maior, por outro lado, no Algoritmo de Teitz & Bart é necessário gerar apenas uma solução inicial para dar continuidade ao Algoritmo. Então o AG e a combinação do AG com o Algoritmo de Teitz & Bart apresentaram um tempo computacional muito superior ao Algoritmo de Teitz & Bart por si só, mas todos os métodos apresentaram um tempo computacional inferiores, quando comparados ao método exato.

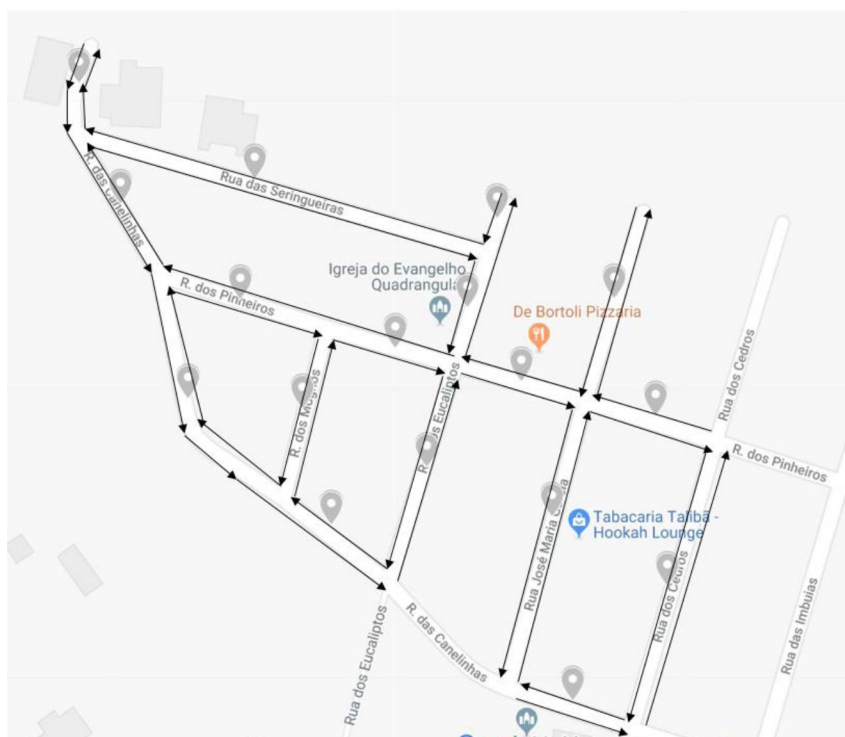
4.6 APLICAÇÃO E ANÁLISE DO PCC

Com o particionamento da região definido, o próximo passo foi a aplicação do PCC para a definição das rotas dentro de cada sub-região. Foi definido que a aplicação do PCC seria realizada em cima do resultado obtido pelo método exato do 3º. cenário, pois apresenta a melhor subdivisão dentre os três cenários, em relação a distância e equilíbrio da carga de trabalho.

O modelo matemático foi adequado de forma individual para cada um dos 8 *clusters* encontrados. Nas Figuras 4.14 a 4.21 estão expostas as rotas obtidas para cada uma das sub-regiões.

O leitorista responsável por percorrer esta rota, exposta na Figura 4.15, irá percorrer uma distância de 5.486 metros e realizar 237 leituras.

FIGURA 4.16 – ROTA OBTIDA PARA O LEITURISTA 3

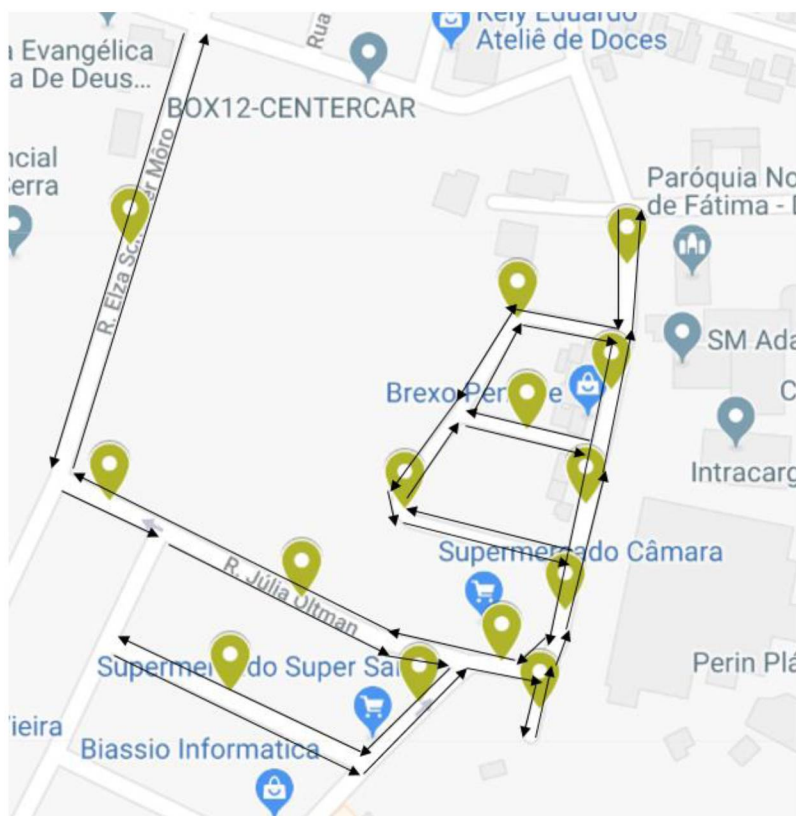


FONTE: O autor (2019).

O leitorista responsável por percorrer esta rota, exposta na Figura 4.16, irá percorrer uma distância de 3.040 metros e realizar 272 leituras.

O leiturista responsável por percorrer esta rota, exposta na Figura 4.19, irá percorrer uma distância de 5.796 metros e realizar 307 leituras.

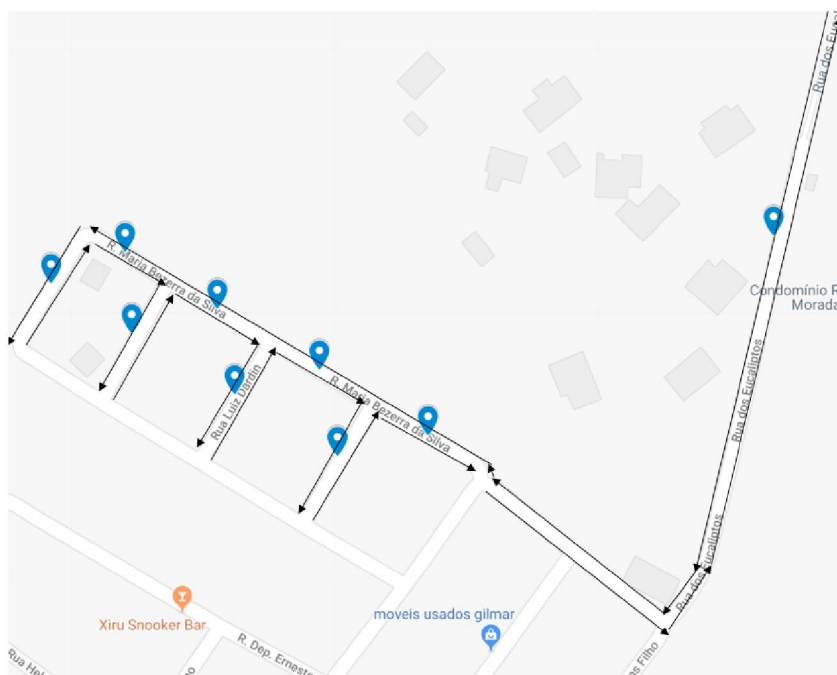
FIGURA 4.20 – ROTA OBTIDA PARA O LEITURISTA 7



FONTE: O autor (2019).

O leiturista responsável por percorrer esta rota, exposta na Figura 4.20, irá percorrer uma distância de 2.856 metros e realizar 482 leituras.

FIGURA 4.21 – ROTA OBTIDA PARA O LEITURISTA 8



FONTE: O autor (2019).

O leiturista responsável por percorrer esta rota, exposta na Figura 4.21, irá percorrer uma distância de 2.008 metros e realizar 681 leituras.

Com as rotas definidas, foi realizado um comparativo entre as distâncias previstas com o PLF, pelo método exato, com as distâncias reais a serem percorridas, calculadas pelo PCC. Este comparativo pode ser visto na Tabela 4.16.

TABELA 4.16 – COMPARATIVO DE DISTÂNCIAS ENCONTRADAS (M)

<i>Leituristas</i>	<i>Distância estimada (PLF)</i>	<i>Distância real (PCC)</i>	<i>Diferença</i>
1	1.770	2.584	814
2	4.249	5.486	1.237
3	2.264	3.040	776
4	4.128	5.040	912
5	2.425	2.834	409
6	4.824	5.796	972
7	2.200	2.856	656
8	1.118	2.008	890
Total	22.978	29.644	6.666

FONTE: O autor (2019).

É possível verificar que há uma diferença considerável entre as distâncias, primeiramente pois o PLF fornece a distância dos pontos contidos no *cluster* até a sua mediana, e também pois está sendo utilizada uma programação do PCC modificada, em que é considerado que a rota deve ser percorrida nos dois sentidos. Por isso houve essa diferença de 6.666 metros entre o previsto e o real.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Aplicações de técnicas da PO podem trazer muitos benefícios para a resolução de problemas de empresas e organizações. Neste trabalho é proposta a utilização de métodos oriundos da PO para aprimorar a logística que envolve o percurso dos leituristas de uma companhia de energia elétrica de um município do Estado do Paraná, São José dos Pinhais.

A partir da revisão da literatura foi possível verificar que a utilização de heurísticas para a resolução do PLF tem apresentado resultados satisfatórios. Porém há uma gama extensa de heurísticas que podem ser utilizadas para obter soluções para problema do gênero. Neste trabalho optou-se pela utilização de duas heurísticas/meta-heurísticas, o AG e o Algoritmo de Teitz & Bart, além da união destes dois algoritmos. Em contrapartida o método do PCC não requer a utilização de heurísticas para encontrar uma solução para um PR, por ser classificado como um problema polinomial.

Este estudo utilizou o método do PLF, por meio da aplicação dos algoritmos citados anteriormente e, também, por meio do modelo matemático de programação linear inteira binária (solução exata), para a determinação dos *clusters*, gerando três cenários diferentes, dentre os quais foi verificado o que melhor se adequava à necessidade da empresa.

Em relação aos métodos heurísticos utilizados, os melhores resultados apresentados foram obtidos pela combinação entre o AG e o Algoritmo de Teitz & Bart. Os resultados encontrados nos três cenários apresentaram uma diferença de, no máximo, 8% em um dos cenários, em relação à solução exata.

Adicionalmente, pode-se observar que o Algoritmo de Teitz & Bart apresentou resultados muito satisfatórios em todos os três cenários, além de apresentar um tempo computacional muito inferior em relação aos outros métodos utilizados. Já o AG apresentou um resultado bom apenas no 1º. cenário, onde não foram utilizadas delimitações de demanda e capacidade, porém nos outros dois cenários, os resultados não alcançaram as expectativas.

Por fim, com a determinação do melhor cenário, com a solução obtida pelo método exato, foi aplicado o PCC para determinar as rotas a serem percorridas pelos leituristas. O resultado final das rotas apresentou uma

pequena sobrecarga para alguns dos leituristas, porém esta diferença não foi exacerbada.

Para a realização de trabalhos futuros, sugere-se que sejam utilizados outros métodos heurísticos e meta-heurísticos para comparação, como o *simulated annealing*, Busca Tabu, *Variable Neighborhood Search*, dentre outros. A comparação das soluções, neste caso, torna-se relevante, visto que o aumento no tempo computacional gasto para resolução por métodos exatos faz com que utilização de técnicas mais eficientes, computacionalmente, sejam vantajosas.

Também seria interessante a realização de uma cronometragem do tempo gasto pelos leituristas para realizar o percurso, para melhor determinar os pesos atribuídos, criando um cenário mais próximo à realidade.

REFERÊNCIAS

- AHMADI, M.; SEIFI, A.; TOOTOONI, B. A humanitarian logistics model for disaster relief operation considering network failure and standard relief time: A case study on San Francisco district. **Transportation Research Part E**, v. 75, p. 145–163, 2015. Elsevier Ltd.
- ARDJMAND, E.; WECKMAN, G.; PARK, N.; TAHERKHANI, P.; SINGH, M. Applying genetic algorithm to a new location and routing model of hazardous materials. **International Journal of Production Research**, v. 53, n. 3, p. 916–928, 2015.
- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa Operacional para Cursos de Engenharia**. 2007.
- ARES, J. N.; VRIES, H. DE; HUISMAN, D. A column generation approach for locating roadside clinics in Africa based on effectiveness and equity. **European Journal of Operational Research**, p. 1–15, 2016.
- ASEFI, H.; LIM, S.; MAGHREBI, M. A mathematical model for the municipal solid waste location-routing problem with intermediate transfer stations. **Australasian Journal of Information Systems**, v. 19, p. 21–35, 2015.
- ASGARI, N.; RAJABI, M.; JAMSHIDI, M.; KHATAMI, M.; ZANJIRANI, R. A memetic algorithm for a multi-objective obnoxious waste location-routing problem: a case study. **Annals of Operations Research**, v. 250, n. 2, p. 279–308, 2016. Springer US.
- ASSAD, A. A.; GOLDEN, B. L. Arc Routing Methods and Applications Arjang. **Handbooks in Operations Research and Management Science**, v. 8, p. 375–483, 1995. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927050705801094>>.
- BAHRAMI, F.; SAFARI, H.; TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R.; YAZDI, M. M. On modeling door-to-door parcel delivery services in Iran. **Iranian Journal of Management Studies**, v. 9, n. 4, p. 883–906, 2016. Disponível em: <<http://offcampus.lib.washington.edu/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=bth&AN=120806836&site=ehost-live>>.
- BEITOLLAHI, A.; KAVEH, A.; MAHDAVI, V. R. Locating emergency facilities using the weighted k-median problem: A graph-metaheuristic approach. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, v. 62, n. 1, p. 200–205, 2018.
- BELONGUER, J. M.; BENAVENT, E.; PRINS, C.; PRODHON, C.; CALVO, R. W. A Branch-and-Cut method for the Capacitated Location-Routing Problem. **Computers and Operations Research**, v. 38, n. 6, p. 931–941, 2011.
- BELFIORE, P.; FÁVERO, L. P. **Pesquisa Operacional: para Cursos de Engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier Ltd, 2013.
- BODIN, L.; ASSAD, B. L.; BALL, A. Routing and scheduling of vehicles and crews. The state of the art. **Computers and Operations Research**, v. 10, n. 2, p. 211, 1983.

- BOUJELBEN, K. M.; GICQUEL, C.; MINOUX, M. A distribution network design problem in the automotive industry: MIP formulation and heuristics. **Computers and Operation Research**, v. 52, p. 16–28, 2014. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2014.07.007>>. .
- CAO, W.; ÇELIK, M.; SWANN, J.; VILJOEN, N. Socio-Economic Planning Sciences Challenges in service network expansion: An application in donated breastmilk banking in South Africa. **Socio-Economic Planning Sciences journal**, v. 53, p. 33–48, 2016.
- CASTILLO-LÓPEZ, I.; LÓPEZ-OSPINA, H. A. School location and capacity modification considering the existence of externalities in students school choice. **Computers and Industrial Engineering**, v. 80, p. 284–294, 2015.
- CEYHAN, G.; ÖZPEYNIRCI, Ö. A branch and price algorithm for the pharmacy duty scheduling problem. **Computers and Operation Research**, v. 72, p. 175–182, 2016. Elsevier.
- COLOMBI, M.; MANSINI, R. New results for the directed profitable rural postman problem. **European Journal of Operational Research**, v. 238, n. 3, p. 760–773, 2014. Elsevier B.V.
- CORBERÁN, Á.; PRINS, C. Recent Results on Arc Routing Problems: An Annotated Bibliography. **Networks**, v. 56, n. 1, p. 50–69, 2010.
- COUTINHO-RODRIGUES, J.; TRALHÃO, L.; ALÇADA-ALMEIDA, L. Solving a location-routing problem with a multiobjective approach: The design of urban evacuation plans. **Journal of Transport Geography**, v. 22, p. 206–218, 2012.
- DANTRAKUL, S.; LIKASIRI, C.; PONGVUTHITHUM, R. Applied p-median and p-center algorithms for facility location problems. **EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS**, v. 41, n. 8, p. 3596–3604, 2014. Elsevier Ltd.
- FONSECA, J. J. S. Metodologia da pesquisa científica. **São Carlos: Serviço de Biblioteca e Informação ...**, p. 1–127, 2002.
- GARCIA-FLORES, R.; JULIANO, P. Optimal Selection of Whey Processing Facilities and Technology. International Congress on Modelling and Simulation. **Anais...** p.573–579, 2013.
- GASPARIN, E.; TEIXEIRA, L. L. Heurística De Teitz E Bart Na Resolução De Um Problema Logístico. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**, v. 1, n. 13, p. 21–27, 2016.
- GHADERI, A.; JABALAMELI, M. S. Modeling the budget-constrained dynamic uncapacitated facility location – network design problem and solving it via two efficient heuristics: A case study of health care. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 57, n. 3–4, p. 382–400, 2013. Elsevier Ltd..
- GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6º ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. A. **Handbook Of Metaheuristics**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- GRÖTSCHEL, M.; YUAN, Y. Euler, Mei-Ko Kwan, Königsberg, and a Chinese

Postman. **Documenta Mathematica**, v. I, n. Extra Volume: Optimization Stories, p. 43–50, 2012. Disponível em: <http://math.uiuc.edu/documenta/vol-ism/16_groetschel-martin-yuan-ya-xiang.pdf>. .

HAMMAD, A. W. A.; AKBARNEZHAD, A.; REY, D. Sustainable urban facility location: Minimising noise pollution and network congestion. **Transportation Research Part E**, v. 107, p. 38–59, 2017.

HIASSAT, A.; DIABAT, A.; RAHWAN, I. A genetic algorithm approach for location-inventory-routing problem with perishable products. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 42, p. 93–103, 2017. The Society of Manufacturing Engineers.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução a pesquisa operacional**. 8º ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

HIRSCH, J. E. An index to quantify an individual's scientific research output. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 102, n. 46, p. 16569–16572, 2005.

JANG, W.; NOBLE, J. S.; HUTSEL, T. An integrated model to solve the winter asset and road maintenance problem. **IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)**, v. 42, n. 9, p. 675–689, 2010.

JARBOUI, B.; DERBEL, H.; HANAFI, S.; MLADENOVIC, N. Variable neighborhood search for location routing problem with multiple routes. **Computers & Operations Research**, v. 40, p. 47–57, 2013.

KILCI, F.; KARA, B. Y.; BOZKAYA, B. Locating temporary shelter areas after an earthquake: A case for Turkey. **European Journal of Operational Research**, v. 243, p. 323–332, 2015.

KIM, J.; LEE, D. A case study on collection network design, capacity planning and vehicle routing in reverse logistics. **International Journal of Sustainable Engineering**, , n. September, 2014.

KIM, M.; BATTÀ, R.; HE, Q. Optimal routing of infiltration operations. **Journal of Transportation Security**, v. 9, n. 1–2, p. 87–104, 2016. Journal of Transportation Security.

KOTAVAARA, O.; POHJOSENPERÄ, T.; JUGA, J.; RUSANEN, J. Accessibility in designing centralised warehousing: Case of health care logistics in Northern Finland. **Applied Geography**, v. 84, p. 83–92, 2017.

LAPORTE, G. The traveling salesman problem: an overview of exact and approximate algorithms. **European Journal of Operational Research**, v. 59, p. 231–247, 1992.

LINDO Systems, Inc. Disponível em: <<https://www.lindo.com/index.php/products/lingo-and-optimization-modeling>>. .

LOPES, R. B.; PLASTRIA, F.; FERREIRA, C.; SANTOS, B. S. Location-arc routing problem: Heuristic approaches and test instances. **Computers and Operations Research**, v. 43, p. 309–317, 2014. Elsevier.

LUNARDI, S.; CASTRO, J. M. F.; MONAT, S. Visualização dos resultados do

Yahoo em nuvens de texto : uma aplicação construída a partir de web services. **Revista Brasileira de Design da Informação**, v. 1, n. 5, p. 21–35, 2008.

MAR-ORTIZ, J.; ADENSO-DIAZ, B.; GONZÁLEZ-VELARDE, J. Design of a recovery network for WEEE collection: the case of Galicia , Spain. **Journal of the Operational Research Society**, v. 62, p. 1471–1484, 2011.

MARINS, F. A. S. **Introdução à pesquisa operacional**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2011.

MIGUEL, P. A. C.; FLEURY, A.; MELLO, C. H. P.; et al. **METODOLOGIA DE PESQUISA EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E GESTÃO DE OPERAÇÕES**. 2º ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

MOURÃO, M. C.; PINTO, L. S. An Updated Annotated Bibliography on Arc Routing Problems. **Networks**, v. 70, n. 3, p. 144–194, 2017.

NEGOSEK, J. **OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE LEITURA ATRAVÉS DE MÉTODOS DE PESQUISA OPERACIONAL**, 2016. PUCPR.

PEARN, W. L.; ASSAD, A.; GOLDEN, B. L. Transforming arc routing into node routing problems. **Computers and Operations Research**, v. 14, n. 4, p. 285–288, 1987.

PRAMUDITA, A.; TANIGUCHI, E.; QURESHI, G. A. Location and Routing Problems of Debris Collection Operation After Disasters with Realistic Case Study. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 125, p. 445–458, 2014. Elsevier B.V.

RAZALI, N. M.; GERAGHTY, J. Genetic Algorithm Performance with Different Selection Strategies in Solving TSP. Proceedings of the World Congress on Engineering. **Anais...** . v. II, p.4–9, 2011.

REDDY, M. V.; PANICKER, V. V.; SRIDHARAN, R. Ant colony optimisation for location routing problem and its application to bill delivery services. **International Journal of Logistics Systems and Management**, v. 14, n. 1, p. 1–37, 2013.

REVELLE, C. S.; EISELT, H. A.; DASKIN, M. S. A bibliography for some fundamental problem categories in discrete location science. **European Journal of Operational Research**, v. 184, n. 3, p. 817–848, 2008.

SAUNDERS, M.; LEWIS, P.; TORNHILL, A. **Research Methods for Business Students**. 4º ed. England: Pearson Education, 2007.

SENNE, E. L. F.; LORENA, L. A. N. Abordagens complementares para problemas de p-medianas. **Revista Produção**, v. 13, p. 78–87, 2003.

SERRANO-HERNANDEZ, A.; FAULIN, J.; PINTOR, J. M.; BELLOSO, J. Determining an Optimal Area to Locate a Criteria Biorefinery under Economic and Environmental Criteria. **Transportation Research Procedia**, v. 22, p. 95–104, 2017. Elsevier B.V.

SHERIFF, K. M. M.; SUBRAMANIAN, N.; RAHMAN, S.; JAYARAM, J.

Integrated optimization model and methodology for plastics recycling: Indian empirical evidence. **Journal of Cleaner Production**, v. 153, p. 707–717, 2016. Elsevier Ltd.

SIMONI, M. D.; BUJANOVIC, P.; BOYLES, S. D.; KUTANOGLU, E. Urban consolidation solutions for parcel delivery considering location, fleet and route choice. **Case Studies on Transport Policy**, 2017. Elsevier.

SMIDERLE, A.; STEINER, M. T. A.; WILHELM, V. E. Técnicas da Pesquisa Operacional aplicadas a um Problema de Cobertura de Arcos. **TEMA Tend. Mat. Apl. Comput.**, v. 2, n. 5, p. 347–356, 2004.

SOUZA SOBRINHO, P. **Algoritmos Genéticos Canônico e Elitista: uma abordagem comparativa**, 2014. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

STEINER, M. T. A.; DATTA, D.; STEINER NETO, P. J.; SCARPIN, C. T.; FIGUEIRA, J. R. Multi-objective optimization in partitioning the healthcare system of Parana State in Brazil. **Omega**, v. 52, p. 53–64, 2015. Elsevier.

SUN, J.; MENG, Y.; TAN, G. An integer programming approach for the Chinese postman problem with time-dependent travel time. **Journal of Combinatorial Optimization**, v. 29, n. 3, p. 565–588, 2015.

SWAIN, C. S.; REVELLE, R. W. Central facilities location. **Geographical Analysis**, v. 2, n. 1, p. 30–42, 1970.

SWAMY, R.; KANG, E. J.; BATA, R.; CHUNG, Y. Hurricane evacuation planning using public transportation. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 59, p. 43–55, 2017. Elsevier Ltd.

TAHA, H. A. *Operations Research An Introduction Eighth Edition.*, 2007.

TANG, L.; JIANG, W.; SAHARIDIS, G. K. D. An improved Benders decomposition algorithm for the logistics facility location problem with capacity expansions. **Annals of Operations Research**, v. 210, n. 1, p. 165–190, 2013.

TEITZ, M. B.; BART, P. Heuristic Methods for Estimating the Generalized Vertex Median of a Weighted Graph. **Operations Research**, v. 16, n. 5, p. 955–961, 1968.

The R Project Foundation. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>. .

TRAN, H. T.; NAGY, G.; NGUYEN, T.; WASSAN, N. A. An efficient heuristic algorithm for the alternative-fuel station location problem. **European Journal of Operational Research**, v. 0, p. 1–12, 2017. Elsevier B.V.

TUNALIOĞLU, R.; KOÇ, Ç.; BEKTAŞ, T. A multiperiod location-routing problem arising in the collection of Olive Oil Mill Wastewater. **Journal of the Operational Research Society**, v. 67, n. 7, p. 1012–1024, 2016.

WHITLEY, D. A genetic algorithm tutorial. **Statistics and Computing**, 1994.

YADAV, V.; KARMAKAR, S.; DIKSHIT, A. K.; VANJARI, S. A feasibility study for the locations of waste transfer stations in urban centers: a case study on the

city of Nashik , India. **Journal of Cleaner Production**, v. 126, p. 191–205, 2016. Elsevier Ltd.

YILDIZ, H.; JOHNSON, M. P.; ROEHRIG, S. Planning for meals-on-wheels: Algorithms and application. **Journal of the Operational Research Society**, v. 64, n. 10, p. 1540–1550, 2013. Nature Publishing Group.

YU, V. F.; MAGHFIROH, M. F. N. A variable neighborhood search with path-relinking for the capacitated location routing problem. **Journal of Industrial and Production Engineering**, v. 31, n. November, p. 163–176, 2014.

ZHAO, J.; KE, G. Y. Incorporating inventory risks in location-routing models for explosive waste management. **International Journal of Production Economics**, v. 193, p. 123–136, 2017. Elsevier B.V.

ZHAO, J.; VERTER, V. A bi-objective model for the used oil location-routing problem. **Computers and Operations Research**, v. 62, p. 157–168, 2015. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2014.10.016>>. .

APÊNDICE 1 – ALOCAÇÃO DAS LEITURAS AO PONTOS MÉDIOS

Ponto	Número de Residências	Cond. 1	Cond. 2	Cond. 3	Cond. 4	Cond. 5	Cond. 6	Cond. 7	Cond. 8
X1	35	2	2	3	3	2	3	2	2
X2	10								
X3	3	3	2	2	2	2	2		
X4	7	2	2	2	2	6	2		
X5	11	3							
X6	24	2	2	2	2	2	2	2	
X7	4								
X8	2	2							
X9	1	2							
X10	3	2							
X11	1	2							
X12	2								
X13	2								
X14	1								
X15	9	2							
X16	13	2	2	2	2				
X17	3	6	2	4					
X18	5	5	4	4	2				
X19	2	3							
X20	2	5							
X21	1	3							
X22	17	2	3	3	3	2	2		
X23	18	2	2	2	2	2	4		
X24	7	2							
X25	9	2	2	2	2				
X26	3	3	2						
X27	6	2							
X28	7	2	2						
X29	5	2							
X30	2								
X31	6	2	2						
X32	3	2							
X33	4								
X34	4								
X35	1								
X36	1	2	2	3	2				
X37	3								
X38	4	2							
X39	16	2	2	3	2	2	2		
X40	18	2	2	2					
X41	24	2	2	3	2				
X42	14	2	2						

Ponto	Número de Residências	Cond. 1	Cond. 2	Cond. 3	Cond. 4	Cond. 5	Cond. 6	Cond. 7	Cond. 8
X43	0	7							
X44	18	2	2	2	3	2	2		
X45	11	2	2						
X46	18	2	2	2	3	2			
X47	14	2	3	2	4	2			
X48	21	306	2	3					
X49	2								
X50	20	2							
X51	23	2							
X52	5	2							
X53	20	2	2	2	2				
X54	9	2							
X55	11	2	4	2	2				
X56	15	2	2	3					
X57	16	2	2						
X58	10	2							
X59	8	2	2						
X60	4	4	2						
X61	5								
X62	13	2	2						
X63	15	2	2	2	2	5			
X64	2	4	2						
X65	4								
X66	19	2	2	2					
X67	6								
X68	5								
X69	6								
X70	15	2	2						
X71	8	2	2						
X72	11	2							
X73	12	2							
X74	9								
X75	25	2	2	2					
X76	14	2	2	3					
X77	5								
X78	4								
X79	4								
X80	2								
X81	5	2	5						
X82	3	2							
X83	10	2							
X84	4	2							

Ponto	Número de Residências	Cond. 1	Cond. 2	Cond. 3	Cond. 4	Cond. 5	Cond. 6	Cond. 7	Cond. 8
X127	5	2	2	2					
X128	15	2	2	2	2	2			
X129	3	11	5						
X130	3	3							
X131	4	4							
X132	4	3							