



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA
COMPUTAÇÃO



VIRGÍNIA MAIA DE BRITO FERNANDES

MODELAGEM MATEMÁTICA E APLICAÇÃO DA
METAHEURÍSTICA VNS PARA UM PROJETO DE
CICLOVIAS

Mossoró-RN

2021

VIRGÍNIA MAIA DE BRITO FERNANDES

**MODELAGEM MATEMÁTICA E APLICAÇÃO DA
METAHEURÍSTICA VNS PARA UM PROJETO DE
CICLOVIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação - associação ampla entre a Universidade do Estado do Rio Grande do Norte e a Universidade Federal Rural do Semi-Árido, para a obtenção do título de Mestra em Ciência da Computação.

Linha de Pesquisa: Otimização e Inteligência Computacional

Orientador: Prof^o Dr. Carlos Heitor Pereira Liberalino,
Coorientador: Prof^o Dr. Francisco Chagas de Lima Júnior.

Mossoró-RN

2021

© Todos os direitos estão reservados a Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do(a) autor(a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu(a) respectivo(a) autor(a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

Catálogo da Publicação na Fonte.
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.

F363m Fernandes, Virgínia Maia de Brito
Modelagem Matemática e Aplicação da Metaheurística
VNS para um Projeto de Ciclovias. / Virgínia Maia de Brito
Fernandes. - Mossoró, RN, 2021.
51p.

Orientador(a): Prof. Dr. Carlos Heitor Pereira
Liberalino.

Dissertação (Mestrado em Programa de Pós-
Graduação em Ciência da Computação). Universidade do
Estado do Rio Grande do Norte.

1. Projeto de Ciclovias. 2. Otimização Combinatória. 3.
Metaheurística. I. Liberalino, Carlos Heitor Pereira. II.
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. III.
Título.

VIRGÍNIA MAIA DE BRITO FERNANDES

**MODELAGEM MATEMÁTICA E APLICAÇÃO DA
METAHEURÍSTICA VNS PARA UM PROJETO DE
CICLOVIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação para a obtenção do título de Mestra em Ciência da Computação.

APROVADA EM: ____ / ____ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Carlos Heitor Pereira Liberalino, Dr.
Orientador e Presidente

Francisco Chagas de Lima Júnior, Dr.
Coorientador - Universidade do Estado do
Rio Grande do Norte

Dario José Aloise, Dr.
Membro Interno - Universidade do Estado
do Rio Grande do Norte

Alexandre Xavier Martins, PhD.
Membro Externo - Universidade Federal de
Ouro Preto

Dedico este trabalho a Deus. Aos meus pais, Antonildo Fernandes e Benúbia Maia.

Agradecimentos

Primeiramente, a Deus que me fez tomar este caminho, por sempre ter me dado força e saúde para enfrentar as dificuldades.

A minha mãe, Benúbia Maia, que sempre esteve ao meu lado. Ao meu pai, Antonildo Fernandes, que sempre me apoiou e a minha irmã, Yasmin Fernandes.

Aos meus colegas, a todos que ficavam produzindo ciência no corredor da UFERSA, meu muito obrigada pelos dias tensos e felizes ao mesmo tempo. Vocês foram minha família em Mossoró/RN. Agradeço também a Isaiana Santos, que se fez como meu núcleo familiar, me amparando quando precisei.

Aos meus orientadores, Carlos Heitor e Francisco Chagas, pela oportunidade de me orientar no desenvolvimento deste trabalho, e pelos ensinamentos e conhecimentos externados durante a pesquisa. A Fábio Francisco, por ter me ajudado muito durante todo o mestrado, desde as disciplinas até a dissertação, muito obrigada por tudo. A Dario Aloise, por toda a paciência em me auxiliar no desenvolvimento do meu trabalho de dissertação, muito obrigada.

Agradeço a todos os professores por proporcionar valiosos conhecimentos, e por ajudarem a me tornar uma mestra.

Resumo

A implantação de ciclovias é uma alternativa que se faz necessária para atenuar as situações de mobilidade urbana atuais e futura das cidades, ocasionadas pelo aumento no número de carros circulando, o qual provoca congestionamento, emissão de gases poluentes e vários outros transtornos. Assim sendo, este trabalho apresenta um Projeto de Ciclovias para a cidade de Mossoró/RN, que consiste em determinar uma menor rota de ciclovias, que passa por todos os pontos ou locais, considerados de interesse, sendo alguns deles pontos de apoio (local base para descanso, hidratação, higienização da bicicleta, calibragem dos pneus, recarga de celular e receber orientações, por exemplo). Para isso, a pesquisa se espelhou no Problema do Caixeiro Viajante (PCV) para minimizar a rota da ciclovias e, no Problema das p-medianas, para se determinar os pontos de apoio. Neste contexto, o projeto propõe resolver os problemas PCV e o problema das p-medianas, conjuntamente, com o intuito de encontrar uma melhor configuração das rotas ciclovias e seus pontos de apoio, com a finalidade de se obter uma formulação matemática onde se resolva ambos os problemas. Além disso, faz parte deste trabalho fazer uso da aplicação da metaheurística VNS (*Variable Neighborhood Search*) ao projeto de ciclovias em questão.

Palavras-chave: Projeto de Ciclovias, Otimização Combinatória, Metaheurística.

Abstract

The implementation of bicycle lanes is an alternative that is necessary to alleviate current and future urban mobility situations in cities, caused by the increase in the number of cars circulating, which causes congestion, emission of polluting gases and various other inconveniences. Therefore, this work presents a Cycle Path Project for the city of Mossoró/RN, which consists of determining a shorter cycle path route, which passes through all points or places considered of interest, some of which are support points (base location for rest, hydration, bicycle hygiene, tire calibration, cell phone recharge and receiving guidance, for example). For this, the research was mirrored in the Traveling Salesman Problem (PCV) to minimize the bike path route and, in the p-median problem, to determine the support points. In this context, the project proposes to solve the PCV problems and the p-median problem, together, in order to find a better configuration of the cycle routes and their support points, in order to obtain a mathematical formulation where both can be solved. the problems. In addition, it is part of this work to make use of the application of the VNS (Variable Neighborhood Search) metaheuristic to the cycle path project in question.

Keywords: Bike Paths Project, Combinatorial Optimization, Metaheuristic.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Fluxograma dos métodos abordados.	30
Figura 2 – Todos os pontos de ônibus da cidade de Mossoró/RN.	31
Figura 3 – A área de pontos de ônibus escolhidos da cidade de Mossoró/RN. . . .	32
Figura 4 – Os trinta pontos de ônibus escolhidos da cidade de Mossoró/RN. . . .	32
Figura 5 – Resultados do CPLEX para as instâncias com a linha de tendência. . .	39
Figura 6 – Grafo da melhor solução encontrada para a instância PQ_05_10_14 com 5 pontos de apoio escolhidos.	48
Figura 7 – Ilustração da melhor solução encontrada para a instância PQ_05_10_14 com 5 pontos de apoio escolhidos.	49
Figura 8 – Grafo da melhor solução encontrada para a instância PQ_05_10_14 com 10 pontos de apoio escolhidos.	49
Figura 9 – Ilustração da melhor solução encontrada para a instância PQ_05_10_14 com 10 pontos de apoio escolhidos.	50
Figura 10 – Grafo da melhor solução encontrada para a instância PQ_05_10_14 com 14 pontos de apoio escolhidos.	50
Figura 11 – Ilustração da melhor solução encontrada para a instância PQ_05_10_14 com 14 pontos de apoio escolhidos.	51

Lista de tabelas

Tabela 1 – Metaheurísticas baseadas em trajetória mais conhecidas.	21
Tabela 2 – Metaheurísticas baseadas em população mais conhecidas.	21
Tabela 3 – Descrição das instâncias da classe C1.	38
Tabela 4 – Comparação dos resultados da melhor solução obtida pelo VNS com os do método exato e os tempos médios de 10 execuções.	41

Lista de quadros

Quadro 1 – Resultados gerais do VNS para as instâncias.	40
---	----

Lista de algoritmos

1	<i>Variable Neighborhood Search</i> - VNS	23
2	<i>Variable Neighborhood Descent</i> - VND	24
3	PERTURBAÇÃO	34
4	DESCIDA 1	35
5	DESCIDA 2	36
6	VNS-VND	37

Lista de abreviaturas e siglas

AG	Algoritmo Genético
BSS	Sistemas de Compartilhamento de Bicicletas
GAMS	<i>General Algebraic Modeling System</i>
GRASP	<i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i>
ILS	<i>Iterated Local Search</i>
Max.	Maximizar
Min.	Minimizar
MILP	Programação Linear Inteira Mista
OC	Otimização Combinatória
OM	Otimização Multiobjetivo
PO	Pesquisa Operacional
PCMC	Problema do Caminho Mais Curto
PCV	Problema do Caixeiro Viajante
PRV	Problema de Roteamento de Veículos
PRVCS	Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega Simultâneas
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
SA	<i>Simulated Annealing</i>
TIC	Tecnologias de Informação e Comunicação
VND	<i>Variable Neighborhood Descent</i>
VNS	<i>Variable Neighbourhood Search</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Motivação da Pesquisa	16
1.2	Objetivos	17
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.3	Organização da Dissertação	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Otimização Combinatória	18
2.2	Metaheurísticas	19
2.2.1	<i>Variable Neighborhood Search</i> - VNS	21
3	PROJETO DE CICLOVIAS	25
3.1	Introdução	25
3.2	Definição do Problema	26
3.3	Formulação Matemática	26
3.4	Trabalhos Relacionados	28
4	ABORDAGEM PROPOSTA	30
4.1	Visão Geral	30
4.2	Representação da Instância	33
4.3	Metaheurística VNS Desenvolvida	33
4.3.1	Representação de uma Solução	33
4.3.2	Perturbação	33
4.3.3	Busca Local	34
4.3.4	Detalhamento da Implementação	36
5	EXPERIMENTOS E RESULTADOS	38
5.1	Instância do Problema	38
5.1.1	Instância	38
5.2	Modelo Matemático	38
5.3	VNS	39
5.4	Análises dos Resultados	40
5.4.1	Comparação do VNS com o Método Exato	40
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	42
6.1	Conclusões	42

6.2	Trabalhos Futuros	42
	REFERÊNCIAS	44
	APÊNDICES	47
	APÊNDICE A – GRAFOS QUE REPRESENTAM A INSTÂNCIA .	48

1 Introdução

Na atual tendência de crescimento das metrópoles, estima-se que em meados de 2050, mais de 80% da população mundial estará concentrada em centros urbanos (ZHENG *et al.*, 2014). Por sua vez, sabe-se que muitas vezes esse crescimento acontece descontrolado, o que pode acarretar problemas em vários aspectos (seja em consumo de energia, tráfego, segurança, etc). Tais problemas podem vir a trazer novas oportunidades para as tecnologias inovadoras em prol das Cidades Inteligentes, um conceito focado na integração de infraestruturas e serviços urbanos às Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) (RANDHAWA; KUMAR, 2017).

As informações coletadas por esses cenários, tem sido um avanço que tem permitido o surgimento de diversas aplicações que podem fazer a integração de serviços para auxiliar na tomada de decisão baseado nessas informações. Neste contexto, a mobilidade urbana tem sido destacada como um tema desafiador para a gestão pública, bem como uma das áreas de estudo mais relevantes no âmbito das Cidades Inteligentes (GEORGESCU *et al.*, 2015).

Por conseguinte, o ciclismo tem se destacado como uma ótima alternativa para o problema da mobilidade urbana, uma vez que a adoção da bicicleta reduz o congestionamento do trânsito, além de impactar positivamente na saúde da população e do meio ambiente (SOUZA; GOMES, 2014). Como resultado, o número de bicicletas nas cidades cresceu numerosamente (FISHMAN; WASHINGTON; HAWORTH, 2013).

Além disso, o uso das bicicletas foi aprimorado com o surgimento dos Sistemas de Compartilhamento de Bicicletas (*Bike Sharing Systems* - BSS), que revolucionou os sistemas tradicionais de aluguel de bicicletas, fazendo com que todo o processo de registro, empréstimo e devolução seja feito automaticamente. Os BSS são indicados como um complemento aos serviços tradicionais de transporte público, como ônibus e metrô (JÄPPINEN; TOIVONEN; SALONEN, 2013), e por essa razão, a quantidade de cidades que estão implementando este projeto está crescendo ainda mais (CORREA; CUNHA; BOARETO, 2010).

Contudo, como explorar as informações acerca desses sistemas para entender a atividade dos hábitos dos cidadãos a fim de melhorar a mobilidade urbana? E como relacionar tais informações para que seja feito o mapeamento das possíveis rotas cicloviárias para a cidade de Mossoró? A análise dos dados, juntamente com a modelagem das ciclovias serão mostrados nesta pesquisa, podendo auxiliar nas possíveis soluções do problema.

Todavia, para ser obtida a solução para esta contextualização, o presente trabalho tem como contribuição: modelar o mapa da cidade de Mossoró, localizada no interior do

Rio Grande do Norte, em forma de grafos, para que seja possível estudar as rotas nas quais serão implantadas ciclovias e pontos de empréstimos/devolução das bicicletas. Além disso, se utilizar das distâncias encontradas para fazer a análise dos dados fazendo uso de uma formulação matemática e de uma metaheurística.

1.1 Motivação da Pesquisa

Com o avanço das tecnologias, muitos sistemas, modelos e métodos/técnicas tem sido desenvolvidos para a resolução de problemas do mundo real. Muitos desses problemas, estão relacionados as áreas da Otimização Combinatória (OC), Pesquisa Operacional (PO), Ciência da Computação, Engenharias e outras, e cada vez mais, pesquisadores tem avançado nas pesquisas, acarretando em resultados interessantes a problemas do mundo real, melhorando a qualidade de vida das pessoas de forma social, econômica e científica, tudo isso através do crescimento tecnológico e computacional ocorrido nos últimos anos.

Os problemas relacionados a PO e OC, estão sempre se reformulando devido as suas derivações e variações. Isso é uma característica interessante, visto que é possível criar novas formulações matemáticas de acordo com os novos problemas, implementar métodos/técnicas aplicado ao problema, realizar experimentos e compará-los com sua abordagem exata se possível, pois a maioria destes problemas são pertencentes a classe de problemas NP-Difícil que tem uma alta complexidade computacional.

Para tal, como objeto maior de motivação deste trabalho, está a cidade de Mossoró. Assim como descrito anteriormente, a cidade está localizada no interior do Rio Grande do Norte (RN), na região Nordeste do Brasil. Pertence à mesorregião do Oeste Potiguar e à microrregião homônima. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Mossoró tem uma população estimada em 303.792 pessoas, com uma área territorial de $2.099.334 \text{ Km}^2$, sendo a segunda cidade com maior população no estado do RN, ficando somente atrás da capital, Natal.

Contudo, mesmo sendo a segunda cidade do RN com a maior população, Mossoró não possui rotas ciclovárias.

Em suma, os seguintes fatos relevantes motivam o desenvolvimento do presente trabalho:

- Propor um modelo das potenciais vias para a implantação de ciclovias e seus pontos de apoio na cidade de Mossoró;
- Propor uma formulação matemática;
- Implementar a metaheurística proposta para o problema;
- Propor instâncias reais para validar o método proposto;

- Analisar os resultados computacionais obtidos para verificar o desempenho da metaheurística proposta aplicado ao problema.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral conceber um possível mapeamento para a implementação de rotas ciclovárias, afim de determinar uma configuração ótima da rota ciclovária com vias de mão única e mão dupla, uma formulação matemática e também, a implementação de uma metaheurística para a resolução do problema relacionado à pesquisa.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, este trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

1. Realizar o levantamento bibliográfico sobre os estudos das ciclovias e sobre a metaheurística VNS;
2. Propor uma formulação matemática;
3. Implementar a metaheurística proposta para o problema;
4. Propor instâncias para validar o método proposto;
5. Realizar experimentos computacionais;
6. Analisar os resultados computacionais obtidos para verificar o desempenho da metaheurística proposta aplicado ao problema.

1.3 Organização da Dissertação

Além deste capítulo, o presente trabalho é composto por mais cinco capítulos. O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, que contém assuntos sobre otimização combinatória e metaheurísticas. No Capítulo 3 é discutido o projeto de ciclovias, bem como uma formulação matemática proposta neste trabalho. No Capítulo 4 é mostrado o método proposto elaborado. Os experimentos computacionais realizados e as análises dos resultados obtidos são discutidos no Capítulo 5. Por último, o Capítulo 6 aponta as conclusões e trabalhos futuros acerca deste trabalho.

2 Fundamentação Teórica

Este capítulo aborda uma fundamentação teórica sobre alguns conceitos essenciais para o desenvolvimento da proposta deste trabalho. Na Seção 2.1 é apresentada uma introdução sobre a otimização combinatória. E na Seção 2.2 são discutidos conceitos relacionados a metaheurística, assim como, o método de pesquisa em vizinhança variável (*Variable Neighborhood Search* - VNS).

2.1 Otimização Combinatória

Nos dias atuais, com o crescente aparecimento de problemas difíceis de serem solucionados, foram sendo criados e aperfeiçoados novas maneiras de se resolver tais problemas. De acordo com isso, o ramo da Otimização Combinatória (OC) surgiu. Ausiello *et al.* (2003) descreve que na realidade, os problemas que queremos resolver por computador podem ter variações bastante características, no qual problemas desse tipo são chamados de problemas de otimização e tem ocorrido com frequência na maioria das atividades humanas, desde o início da história da matemática.

Com aplicações em diversas áreas, tais como transportes, saúde, telecomunicações, finanças e entre outras (ARENALES *et al.*, 2007), os problemas de otimização combinatória se manifestam em grande escala. Em Ausiello *et al.* (2003) são mostrados diversos exemplos destes problemas, que podem ser descritos como: de roteamento, de corte e empacotamento, entre outros.

De acordo com Resende e Silva (2013), um problema de otimização combinatória pode ser definido por um conjunto finito $E = \{1, \dots, n\}$, um conjunto de soluções viáveis $S \subseteq 2^E$ e uma função objetivo $f : 2^E \rightarrow \mathbb{R}$, sendo todos definidos para cada problema específico. Estes problemas podem ter duas formas de objetivos diferentes, onde a primeira é a de maximização, na qual o objetivo consiste em encontrar uma solução ótima $s^* \in S$ tal que $f(s^*) \geq f(s), \forall s \in S$, ou a segunda que é de minimização, na qual o objetivo é encontrar a solução ótima $s^* \in S$ tal que $f(s^*) \leq f(s), \forall s \in S$.

Embora tenha acontecido um numeroso avanço em relação ao armazenamento e processamento computacional dos dados, existem muitos problemas difíceis de serem resolvidos que podem ser solucionados de forma mais sucinta e rápida, utilizando não só de meios exatos, mas sim de métodos heurísticos, capazes de produzirem soluções de boa qualidade (RESENDE; SILVA, 2013). Assim, no que se diz respeito aos muitos procedimentos de soluções aos vários tipos de problemas, alguns deles se baseiam nas metaheurísticas que será descrito na Seção 2.2.

2.2 Metaheurísticas

As metaheurísticas fornecem soluções “aceitáveis” em um tempo polinomial para resolver problemas difíceis e complexos em ciências e engenharia. Isso explica o crescimento significativo do interesse no domínio metaheurístico. Diferentemente dos algoritmos de otimização exata, as metaheurísticas não garantem que a otimalidade seja obtida, mas eventualmente encontram a solução ótima. Em vez de algoritmos de aproximação, as metaheurísticas não definem quão próximas estão as soluções obtidas das melhores (TALBI, 2009).

Brownlee (2011) fala que, assim como as heurísticas, as metaheurísticas podem ser consideradas um algoritmo geral que pode ser aplicado a diferentes problemas de otimização com poucas modificações para adaptá-lo a um problema específico. A diferença é que as metaheurísticas pretendem estender os recursos da heurística combinando um ou mais métodos heurísticos usando uma estratégia melhor que permite escapar de ótimos locais. Alguns exemplos de metaheurísticas são: busca local iterada, busca tabu, algoritmo genético, otimização de colônias de formigas e recozimento simulado.

No trabalho elaborado por Blum e Roli (2003a), eles apresentam nove propriedades que caracterizam as metaheurísticas, que podem ser listadas como:

- Metaheurísticas são estratégias que guiam um processo de busca;
- O objetivo é explorar o espaço de busca, a fim de encontrar soluções próximas do ótimo;
- As técnicas na qual constituem uma metaheurística variam de procedimentos simples de busca local a processos complexos de aprendizagem;
- Metaheurísticas são métodos aproximativos e correntemente não determinísticos;
- Podem incorporar mecanismos para evitar ficar preso em áreas confinadas (em ótimos locais) do espaço de busca;
- Os conceitos básicos das metaheurísticas permitem uma descrição abstrata de nível;
- Metaheurísticas não são específicas dos problemas;
- Metaheurísticas podem fazer uso do conhecimento específico de domínio na forma de heurísticas que são controladas por uma estratégia de alto nível;
- Atualmente, as metaheurísticas mais avançadas usam a experiência de busca (incorporada em alguma forma de memória) para guiar a busca.

Para Blum e Roli (2003a), há dois fatores em uma metaheurística que são de grande importância que é a diversificação e intensificação. O termo diversificação, refere-se a exploração do espaço de busca. A intensificação refere-se a exploração na experiência da busca acumulada. Sucintamente, a diversificação visa investigar soluções em diversas regiões diferentes do espaço de busca em um problema, e a intensificação utiliza informações de buscas anteriores para aprofundar em regiões promissoras do espaço de busca.

Em suma, Lozano e Blum (2010) relatam que existem algumas características de metaheurísticas, que podem ser divididas em dois grupos: métodos baseados em trajetória e métodos baseados em população.

O grupo de metaheurísticas baseadas em trajetória busca encontrar uma solução ótima através da manipulação de uma única solução ao longo da execução do algoritmo. Eles partem de uma solução inicial e evolui ao longo do algoritmo seguindo um certo trajeto até que o critério de parada seja alcançado (HÉLIODORE *et al.*, 2017). Na Tabela 1 são listadas as metaheurísticas mais conhecidas baseadas em trajetória.

Tabela 1 – Metaheurísticas baseadas em trajetória mais conhecidas.

Metaheurística	Referência
<i>Simulated Annealing</i> - SA	Kirkpatrick, Gelatt e Vecchi (1983)
Busca Tabu	Glover (1986)
Greedy Randomized Adaptive Search Procedure - GRASP	Feo e Resende (1995)
Busca Local Guiada	Voudouris e Tsang (1996)
<i>Variable neighborhood search</i> - VNS	Mladenović e Hansen (1997)
<i>Iterated Local Search</i> - ILS	Stützle (1998) e Lourenço, Martin e Stützle (2001)

Fonte – Elaborado pela autora.

Já as metaheurísticas baseadas em população, são caracterizadas pela manipulação de um conjunto de soluções pré-definidas, chamada de população. Para alcançar uma solução de boa qualidade, estes algoritmos manipulam várias soluções que exploram o espaço de busca de acordo com suas próprias informações, bem como as informações que outras soluções transmitem (HÉLIODORE *et al.*, 2017). As metaheurísticas baseadas em população mais conhecidas são ilustradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Metaheurísticas baseadas em população mais conhecidas.

Metaheurística	Referência
Algoritmo Genético - AG	Holland (1975) e Goldberg (1989)
Algoritmo Memético	Moscato (1989)
Colônia de Formigas	Dorigo (1992)
<i>Particle Swarm Optimization</i> – PSO	Kennedy e Eberhart (1995)
Evolução Diferencial	Storn e Price (1995)

Fonte – Elaborado pela autora.

No que se diz respeito a este assunto, é exposta uma metaheurística baseada em trajetória na próxima seção, visto que, a mesma faz parte do artefato do estudo proposto.

2.2.1 *Variable Neighborhood Search* - VNS

A *Variable Neighborhood Search* (VNS), também conhecida como busca em vizinhança variável, é uma metaheurística proposta por Mladenović e Hansen (1997), que se baseia na aplicação da estratégia que utiliza a mudança nas estruturas de vizinhança de forma sistemática, alterando as estruturas das vizinhanças durante a busca, tendo como objetivo final a solução ótima ou quase ótima. (HANSEN *et al.*, 2017). Ao que se é tratado, a estratégia do VNS é motivada pelas seguintes observações:

1. Um ótimo local de uma certa vizinhança não é necessariamente um ótimo local para outra vizinhança;

2. Um ótimo global é um ótimo local em relação a todas as estruturas de vizinhança;
3. Para muitos problemas, a grande maioria dos ótimos locais são relativamente próximas umas das outras.

O VNS foi aplicado com sucesso para resolver diversos problemas, como o da p-mediana (GARCÍA-LÓPEZ *et al.*, 2002), o problema de roteamento com várias estações (POLACEK *et al.*, 2004) e muitos outros problemas clássicos (MLADENOVIC; HANSEN, 1999; HANSEN; MLADENOVIC, 2002; HANSEN; MLADENOVIC, 2003).

Em seu real funcionamento, a busca em vizinhança possui três etapas:

- *Shaking* ou perturbação que visa mudar a solução corrente com algum tipo de mecanismo, geralmente, essa etapa escolhe uma solução vizinha da solução corrente de forma aleatória;
- *Descend* é um procedimento de busca local aplicado na solução após realização da perturbação;
- *Move* está ligado a condição de mudança da vizinhança após a busca local (BLUM; ROLI, 2003a).

Hansen *et al.* (2017) explica que a primeira etapa é explorada usando variados movimentos complexos para encontrar os ótimos locais dentre todas as vizinhanças. Na segunda etapa são utilizadas quase todas as vizinhanças, caso elas tiverem um baixo percentual de ótimos locais. Já a terceira etapa sugere uma maior exploração da vizinhança atual. O Algoritmo 1 apresenta o pseudocódigo do VNS tradicional com as etapas mencionadas.

Algoritmo 1: *Variable Neighborhood Search - VNS*

```

1 inicio
2    $r \leftarrow \text{numeroVizinhanca}()$ 
3    $s \leftarrow \text{solucaoInicial}()$ 
4   enquanto Critério de parada não satisfeito faça
5      $k \leftarrow 1$  // Tipo de estrutura de vizinhança
6     enquanto  $k \leq r$  faça
7       //  $N(k)$  refere-se a estrutura de vizinhança  $k$ 
7        $s' \leftarrow \text{escolherVizinho}(N(k), s)$  // Perturbação
8        $s'' \leftarrow \text{buscaLocal}(s')$ 
9       se  $f(s'') < f(s)$  então
10         $s \leftarrow s''$ 
11         $k \leftarrow 1$ 
12      fim
13      senão
14         $k \leftarrow k + 1$ 
15      fim
16    fim
17  fim
18 fim
   retorna:  $s$  // Melhor solução encontrada

```

O Algoritmo 1, de forma resumida, parte de uma solução inicial qualquer, selecionando aleatoriamente a cada iteração um vizinho dentro da vizinhança da solução corrente, e passa por um procedimento de busca local. Se a solução ótima local, s'' , for melhor que a solução corrente s , a busca continua de s'' começando da primeira estrutura de vizinhança. Caso contrario, a busca continua a partir do próximo vizinho. Quando a condição de parada for atingida o processo é encerrado.

No trabalho de Mladenović e Hansen (1999), é proposto um método de descida em vizinhança variável (*Variable Neighborhood Descent - VND*) que é um método de busca local e pode ser utilizado no VNS. O VND tem a ideia de utilizar uma estrutura de vizinhança enquanto for possível melhorar a solução atual, caso contrário, troca a vizinhança e realiza novamente o procedimento, o Algoritmo 2 ilustra o pseudocódigo deste método.

Algoritmo 2: *Variable Neighborhood Descent* - VND

Entrada: s

```
1 inicio
2    $r \leftarrow \text{numeroVizinhanca}()$ 
3    $s \leftarrow \text{solucaoInicial}()$ 
4   enquanto  $k \leq r$  faça
5     //  $N(k)$  refere-se a estrutura de vizinhança  $k$ 
6      $s' \leftarrow \text{encontrarMelhorVizinho}(N(k), s)$ 
7     se  $f(s') < f(s)$  então
8        $s \leftarrow s'$ 
9        $k \leftarrow 1$ 
10    fim
11  senão
12     $k \leftarrow k + 1$ 
13  fim
14 fim
retorna:  $s$  {Melhor solução encontrada}
```

3 Projeto de Ciclovias

Este capítulo discute sobre o objeto de estudo proposto neste trabalho. Na Seção 3.1 é mostrado uma breve introdução sobre o Problema do Caixeiro Viajante (PCV) e o Problema das p -medianas, no qual se foi trabalhado na modelagem matemática deste trabalho. A Seção 3.2, define formalmente o problema de estudo do presente trabalho. Uma formulação matemática para o projeto de ciclovias é apresentado na Seção 3.3. Por fim, alguns trabalhos relacionados são descritos resumidamente na Seção 3.4.

3.1 Introdução

O Problema do Caixeiro Viajante (PCV) é muito utilizado no experimento de alguns métodos de otimização, por ser um problema de fácil entendimento e com uma grande dificuldade de solução, uma vez que ele é descrito como um problema NP-Árduo (KARP, 1975).

O PCV pode ser descrito como segue: Dado um grafo $G = (N, E)$, onde $N = \{1, \dots, n\}$ é o conjunto de nós e $E = \{1, \dots, m\}$ é o conjunto de arestas de G , e custos, $c_{i,j}$, associados com cada aresta ligando os vértices i e j . O problema consiste em identificar o menor ciclo Hamiltoniano do grafo G , no qual o tamanho do ciclo é calculado pelo somatório dos custos das arestas que formam o ciclo. Os nós do grafo são referenciados como “cidades” e, sendo assim, tendo como objetivo visitar todas as cidades passando apenas uma vez por cada uma delas e retornando ao seu ponto de origem. Todo este percurso é feito com o propósito de minimizar a distância total percorrida. (GOUVÊA *et al.*, 2006).

Além do PCV, também se faz necessária a descrição do Problema das p -medianas. De acordo com Pereira (2005), o problema das p -medianas é um problema de localização-alocação, ou seja, visa determinar a configuração de custo mínimo de instalação de facilidades e de atendimento da demanda de cada cliente em uma rede conectada por um número finito de caminho.

Ainda segundo Pereira (2005), os dados relevantes do problema das p -medianas são:

- o número finito de pontos de demanda;
- o número finito de candidatos a instalação de facilidades;
- a distância entre pontos de demanda;

- o número p de facilidades a serem instaladas.

A proposta do projeto de ciclovias deste trabalho é modelada, principalmente, como um problema do caixeiro viajante, sendo utilizado o planejamento para o transporte de bicicletas aos clientes, bem como o retorno das mesmas aos seus pontos de apoio, no qual é atrelado ao problema das p -medianas.

3.2 Definição do Problema

A definição do problema de projeto de ciclovias a ser abordada neste trabalho pode ser explorado a partir da definição de uma ciclovia. De acordo com DAER (1991), uma ciclovia é um espaço destinado para a circulação de pessoas utilizando bicicletas. Para isso, há vários tipos de ciclovias, que são:

- Tráfego compartilhado: não possui nenhuma delimitação entre as faixas para automóveis e bicicletas. A faixa somente é alargada para os dois;
- Ciclofaixa: é uma faixa das vias de tráfego, geralmente no mesmo sentido e direção dos automóveis e na maioria das vezes ao lado direito em mão única;
- Ciclovia: é segregada fisicamente do tráfego automóvel. Podem ser unidirecionais (um só sentido) ou bidirecionais (dois sentidos).

Com isso, o tipo de pista ciclável utilizado para a abordagem de estudo deste trabalho, é a ciclovia unidirecional, pois para se trabalhar neste contexto, foi utilizado o problema do caixeiro viajante.

3.3 Formulação Matemática

Com a definição do problema, a modelagem também foi definida, sendo avaliado todas as abordagens referentes a localização dos pontos de ônibus na cidade de Mossoró/RN, levando em consideração vias com maior volume de circulação de pessoas em regiões escolares, principalmente. Assim, as notações utilizadas pela formulação do problema, serão detalhadas previamente para um melhor entendimento:

- n : número de vértices;
- d_{ij} : custo de ir do ponto i ao ponto j (distância);
- x_{ij} : 1, se arco $(i, j) \in A$, ou seja, for escolhido o caminho do ponto i até ao ponto j para integrar a solução do PCV. Caso contrário, 0;

- x_{ji} : 1, se arco $(j, i) \in A$, ou seja, for escolhido o caminho do ponto j até ao ponto i para integrar a solução do PCV. Caso contrário, 0;
- S : é um subgrafo de G ;
- y_{ij} : o ponto i está alocado ao ponto de apoio (mediana) j das p-medianas. Caso contrário, 0;
- $|S|$: números de vértices do subgrafo S ;
- p : quantidade de pontos de apoio das bicicletas;

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij}(x_{ij} + y_{ij}) \quad (3.1)$$

$$\text{Sujeito à:} \quad \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \in \mathcal{V} \quad (3.2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ji} = 1 \quad \forall i \in \mathcal{V} \quad (3.3)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1 \quad S \subset V, \quad 2 \leq |S| \leq |V| - 2 \quad (3.4)$$

$$\sum_j y_{jj} = p \quad (3.5)$$

$$y_{ij} \leq y_{jj} \quad \forall i, j \in \mathcal{V} \quad (3.6)$$

$$\sum_j y_{ij} = 1 \quad \forall i \in \mathcal{V} \quad (3.7)$$

$$y_{ii} + y_{jj} + x_{ij} \leq 2 \quad \forall i, j, i \neq j \quad (3.8)$$

Onde, a Equação 3.1 refere-se a função objetivo do problema, em que é percorrida a distância da rotas e p-mediana. A Equação 3.2 diz respeito ao vértice que recebe o link (aresta). Na Equação 3.3 em cada rota o vértice sai para outro vértice. A Equação 3.4 é responsável pela eliminação das subrotas. A Equação 3.5 remete-se ao cálculo da p-mediana, em que é calculado o número de pontos de apoio. A Equação 3.6 corresponde também a p-mediana, com a diferença de que um nó só vai estar alocado ao nó j se j for ponto de apoio. A Equação 3.7 continua realizando a p-mediana, quando cada nó só vai estar designado para um único ponto de apoio. E a Equação 3.8 avalia se os vértices i e j são adjacentes, onde apenas um pode ser ponto de apoio, evitando que pontos de apoio sejam vizinhos.

3.4 Trabalhos Relacionados

Min (1989) apresenta em seu trabalho o problema de roteamento de veículos pensado como um problema de entrega ou retirada. Em muitas situações práticas, no entanto, muitas vezes o veículo é obrigado a deixar e pegar bens simultaneamente na mesma parada. Para a resolução do problema, ele reconhece primeiro a possibilidade de entregas simultâneas e captadores no mesmo nó, descrevendo e conduzindo um estudo de caso que lida com um sistema de distribuição de bibliotecas públicas no condado de Franklin, Ohio. O resultado final do estudo de caso indica que uma economia substancial de tempo/distância pode ser alcançada usando o procedimento seqüencial trifásico, que era análogo ao método “cluster-first route-second”. A eficácia da abordagem proposta foi avaliada comparando-a com o processo de decisão manual atualmente empregado pelo sistema de bibliotecas de Columbus e Franklin County. Os resultados demonstraram que a abordagem proposta era superior à regra de decisão da biblioteca em termos de economia nas distâncias de viagem e no tempo de condução.

O trabalho de Mine *et al.* (2010) desenvolve o algoritmo GENILS para resolver o problema de roteamento de veículos com coleta e entrega simultânea. O algoritmo proposto por eles foi testado em três conjuntos consagrados de problemas-teste da literatura, mostrando sua superioridade aos demais algoritmos da literatura com relação a capacidade de encontrar as melhores soluções conhecidas.

Pereira (2010) trata do problema de roteamento de veículos com coleta e entrega simultâneas, para o qual devem ser desenvolvidas rotas para atender as demandas de coleta e entrega de um conjunto de consumidores. A ideia deste trabalho é fazer com que cada consumidor seja atendido por uma única rota e a carga recebida é trazida de um depósito central, para onde também é levada toda a carga coletada, sendo que, a capacidade dos veículos utilizados não deve ser violada em nenhum ponto das rotas. Para resolver o problema, o autor desenvolveu um método exato *Branch-and-price* que reduz significamente o tempo computacional da resolução da geração de colunas, apresentando também uma estratégia em que limites inferiores obtidos a partir da geração de colunas são utilizados no processo de decisão do *branching*.

Leite e Júnior (2017) retrata um estudo de caso em uma indústria de produtos alimentícios, em que a empresa conta com caminhões para distribuir seus produtos e também realizar a operação de logística reversa, coletando produtos com prazos de validade expirados ou em condições inadequadas para consumo. Tal planejamento é feito por meio de um software baseado na heurística do vizinho mais próximo. Eis que o problema do trabalho é avaliar se tal método garante as rotas de menor custo. Para solucionar, os autores utilizam um modelo de programação linear inteira que descreve o PRVCES. Os resultados mostram que o modelo traz reduções, proporcionando outros benefícios que poderiam ser melhor mensurados futuramente.

Oliveira (2020) desenvolveu em sua tese, um modelo matemático que contribui para o projeto de redes cicloviárias conexas e integradas ao sistemas de transporte público por ônibus em áreas urbanas, fazendo uso da Otimização Multiobjetivo (OM) por meio da Programação Linear Inteira Mista (MILP ou MIP). Utiliza-se da linguagem de modelagem *General Algebraic Modeling System* (GAMS) e o solver *CPLEX* para se obter as soluções exatas, fazendo uso de cinco critérios identificados, referentes ao: Conforto, Segurança, Objetividade, Intermodalidade e Continuidade. Cada critério é composto por uma série de critérios, tendo por fim, sua modelagem matemática. Os resultados possibilitaram a priorização dos caminhos ciclísticos mais baratos e de maior preferência relatada.

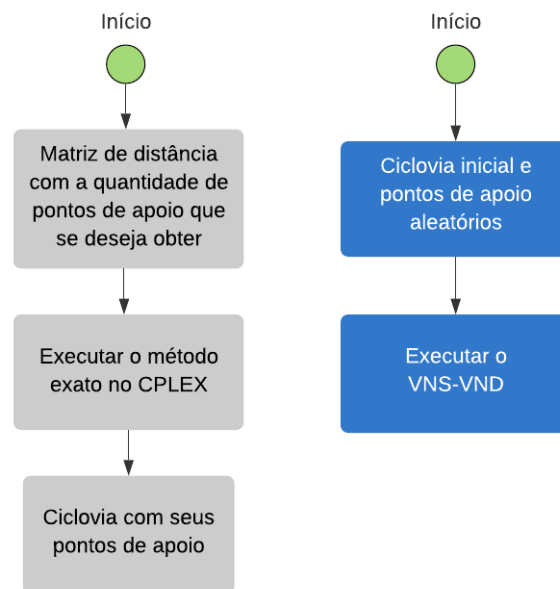
4 Abordagem Proposta

Este capítulo trata sobre a proposta abordada e desenvolvida neste trabalho. Na Seção 4.1 é descrito de modo geral os métodos de solução proposto para um problema de ciclovias. A Seção 4.2 mostra qual forma foi utilizada para representar uma instância do problema, no caso do modelo matemático, deste trabalho. Por último, na Seção 4.3 é apresentado com detalhes o desenvolvimento da metaheurística VNS, descrevendo e mostrando as partes necessárias deste método.

4.1 Visão Geral

Para a solução do Projeto de Ciclovias, foi proposto métodos que utilizam dados reais, gerados a partir da localização das potenciais vias ciclovárias e dos seus pontos de apoio. De acordo com tais informações, se faz necessária a execução de um fluxograma, na Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma dos métodos abordados.



Fonte – Elaborado pela autora.

O fluxograma ilustrado na Figura 1 retrata a execução dos métodos abordados, no qual a fase inicial do primeiro método (método exato) é a de se atribuir uma matriz de distância com a quantidade de pontos de apoio que se deseja obter, após isso se dá a execução do método exato no CPLEX para que assim se obtenha a ciclovias com seus

pontos de apoio. No segundo método (metaheurística), são atribuídas uma ciclovia e seus pontos de apoio de forma aleatória. Após isso, é executado o VNS-VND para se obter o resultado computacional a respeito do tempo de execução do método exato *versus* a metaheurística.

Para que seja possível dar início ao fluxograma 1, foram abordados alguns pontos de interesse para que se atribuisse pontos específicos para a inclusão das ciclovias e seus pontos de apoio, que foram:

- Buscar pontos em que se situem nas proximidades das universidades;
- Buscar pontos em que se situem nas proximidades dos hospitais/supermercados/-bancos.

Para isso, foi utilizado o aplicativo *Simunto*, no qual ilustra todos os pontos de ônibus de Mossoró/RN. Foram utilizados os pontos de ônibus para que seja possível fazer a distribuição de forma que a soma das distâncias entre um ponto de ônibus e seu ponto de apoio mais próximo seja minimizado.

Figura 2 – Todos os pontos de ônibus da cidade de Mossoró/RN.



Fonte – Elaborado pela autora.

Figura 3 – A área de pontos de ônibus escolhidos da cidade de Mossoró/RN.



Fonte – Elaborado pela autora.

Figura 4 – Os trinta pontos de ônibus escolhidos da cidade de Mossoró/RN.



Fonte – Elaborado pela autora.

A Figura 2 ilustra todos os pontos de ônibus da cidade de Mossoró/RN. A Figura 3 ilustra a área dos pontos escolhidos. E a Figura 4 ilustra os trinta pontos de ônibus escolhidos (na área também escolhida anteriormente) para se compor a instância a ser utilizada no trabalho. No Apêndice A, se encontram as rotas e seus pontos de apoio referentes a quantidade de pontos de apoio, de acordo com o aplicativo *Simunto*.

4.2 Representação da Instância

Foi utilizado um arquivo de texto para representar a instância do problema. Tal instância possui as informações a respeito da localização de cada ponto de ônibus da cidade de Mossoró/RN, no qual serviu de base para trilhar os melhores caminhos para os pontos de apoio das bicicletas juntamente com suas ciclovias.

A respeito disso, para servir de exemplificação, a instância possui a seguinte estrutura:

- O arquivo possui informações sobre as distâncias de cada ponto de interesse, sendo utilizado um simples formato para descrever o mesmo, onde em toda sua composição é formalizada uma matriz de distância com um tamanho $N \times N$, onde N é o número de pontos de ônibus, para os quais serão atribuídos os pontos de apoio de bicicletas, assim como o trajeto da ciclovia. Ao final da matriz, é associado a quantidade de pontos de apoio das bicicletas que se deseja obter. Abaixo, é possível ver um exemplo em que se tem 6 pontos de ônibus, em que é obtido através das distâncias entre cada ponto de interesse, e logo após, a indicação de dois pontos de apoio das bicicletas.

```

1  [[0.0, 0.1, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6],
2  [0.7, 0.0, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2],
3  [1.3, 1.4, 0.0, 1.6, 1.7, 1.8],
4  [1.9, 2.0, 2.1, 0.0, 2.3, 2.4],
5  [2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 0.0, 3.0],
6  [3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 0.0]]2

```

4.3 Metaheurística VNS Desenvolvida

4.3.1 Representação de uma Solução

Uma solução para o problema de ciclovias em questão, é representado por uma matriz C de implantação de ciclovias e pontos de apoio. Conforme já foi descrito, se uma posição c_{ij} da matriz C é igual a 1 (um), se o caminho do ponto i até o j for escolhido. Caso contrário, a posição da matriz será igual a 0 (zero).

4.3.2 Perturbação

Na subseção 2.2.1 foi descrito como ocorre a etapa de perturbação, no qual aponta uma solução corrente para tentar explorar novas vizinhanças, fugindo sempre de ótimos locais. Dessa forma, foi implementada uma perturbação para realizar as modificações nos pontos escolhidos representados por um vetor de solução de forma totalmente aleatória.

Algoritmo 3: PERTURBAÇÃO

Entrada: s, num_apoio, qtd

```

1 inicio
2    $cont \leftarrow 1$ 
3   enquanto  $cont \leq qtd$  faça
4      $sort \leftarrow rand(num\_apoio)$  // sortear um número de 1 a  $num\_apoio$ 
5      $s[sort] \leftarrow modificar\_apoio(s[sort])$  // sortear uma opção de apoio diferente
6      $cont \leftarrow cont + 1$ 
7   fim
8 fim
retorna :  $s$ 

```

O algoritmo 3 mostra o pseudocódigo da implementação do método da perturbação, no qual tem como entrada uma solução (s), (num_apoios) sendo a quantidade de pontos de apoio da instância e (qtd) como sendo uma quantidade de modificações a ser realizada pelo método. No laço de repetição do algoritmo, é realizado um sorteio utilizando um número aleatório que representa uma das posições do vetor solução (linha 4), modificando a opção do ponto de apoio das bicicletas também de forma aleatória da posição sorteada do vetor solução (linha 5), permanecendo assim até o laço ser encerrado, após atingir o seu critério de parada.

4.3.3 Busca Local

Como também foi descrito na subseção 2.2.1, também ocorre o procedimento de *descent*. Este procedimento é utilizado para a descida em vizinhança variável. Para tal, foi desenvolvido dois métodos de descida, com o objetivo de explorar a vizinhança s' (solução após o procedimento de perturbação) e encontrar um vizinho com o valor da função objetivo melhor que s' .

O método 1 (descida 1) percorre todas as posições do vetor solução sendo realizada uma modificação em cada posição, fazendo com que seja feita uma avaliação da solução encontrada, verificando se houve melhoria na função objetivo, para que só assim a solução s' possa passar a ser o novo vizinho modificado e continuar o procedimento. Para que aconteça essa modificação, temos que:

- a posição do vetor solução está identificando um ponto de apoio com menor distância entre os pontos de ônibus, ou seja, se o valor da posição é igual a 1, mudará o valor para 2, e se tem o valor 2, receberá o valor 1.
- a posição do vetor solução está identificando um ponto de apoio com maior distância entre os pontos de ônibus escolhidos, ou seja, se o valor da posição do vetor é igual a 3, receberá o valor 1 ou 2 aleatoriamente.

Algoritmo 4: DESCIDA 1

Entrada: s' , num_apoio

```

1  inicio
2     $s'' \leftarrow s'$ 
3    para  $i = 1$  até  $num\_apoio$  faça
4      se  $s'[i] = 1$  então
5         $s''[i] \leftarrow 2$ 
6      fim
7      se  $s'[i] = 2$  então
8         $s''[i] \leftarrow 1$ 
9      fim
10     senão
11        $s''[i] \leftarrow rand(1, 2)$  // sortear aleatoriamente o valor 1 ou 2
12     fim
13     // Verificar se houve melhoria
14     se  $f(s'') < f(s')$  então
15        $s' \leftarrow s''$ 
16     fim
17     senão
18        $s'' \leftarrow s'$ 
19     fim
20 fim
retorna :  $s'$ 

```

O método 2 (descida 2) percorre dois laços de repetição executando um e depois o outro, tendo apenas uma diferença da descida 1: como é realizada a modificação de cada posição do vetor solução. No primeiro laço, temos que:

- caso a posição do vetor solução tiver o valor de 1 ou 3, a posição receberá o valor 2;
- caso a posição do vetor solução tiver o valor 2, ela mudará para o valor 3.

No segundo laço da descida 2, caso a posição do vetor solução tenha o valor 2 ou 3, a posição receberá o valor 1, e vice-versa.

Algoritmo 5: DESCIDA 2

Entrada: s' , num_apoio

```

1  inicio
2  |  $s'' \leftarrow s'$ 
   | // Primeiro laço de repetição
3  | para  $i = 1$  até  $num\_apoio$  faça
4  | | se  $s'[i] = 1$  ou  $s'[i] = 3$  então
5  | | |  $s''[i] \leftarrow 2$ 
6  | | fim
7  | | se  $s'[i] = 2$  então
8  | | |  $s''[i] \leftarrow 3$ 
9  | | fim
   | | // Verificar se houve melhoria
10 | | se  $f(s'') < f(s')$  então
11 | | |  $s' \leftarrow s''$ 
12 | | fim
13 | | senão
14 | | |  $s'' \leftarrow s'$ 
15 | | fim
16 | fim
   | // Segundo laço de repetição
17 | para  $i = 1$  até  $num\_apoio$  faça
18 | | se  $s'[i] = 2$  ou  $s'[i] = 3$  então
19 | | |  $s''[i] \leftarrow 1$ 
20 | | fim
21 | | se  $s'[i] = 1$  então
22 | | |  $s''[i] \leftarrow 3$ 
23 | | fim
   | | // Verificar se houve melhoria
24 | | se  $f(s'') < f(s')$  então
25 | | |  $s' \leftarrow s''$ 
26 | | fim
27 | | senão
28 | | |  $s'' \leftarrow s'$ 
29 | | fim
30 | fim
31 fim
   retorna :  $s'$ 

```

4.3.4 Detalhamento da Implementação

Para que este trabalho fosse desenvolvido, foi utilizada a metaheurística VNS (MLADENović; HANSEN, 1997) aplicado ao problema de projeto de ciclovias, especificamente na cidade de Mossoró/RN. A implementação do VNS baseou-se na sua estrutura tradicional, contendo os procedimentos fundamentais exposto na subseção 2.2.1.

O Algoritmo 6 ilustra o pseudocódigo de como ficou a implementação da metaheurística proposta, onde temos o VNS utilizando o VND como procedimento de busca local. O diferencial desta implementação, é a questão da quantidade de modificações do método de perturbação que pode ser incrementado até uma quantidade máxima (linha 4 do algoritmo) quando não há melhoria na solução.

Depois de alguns testes durante o desenvolvimento, ficou definido que a quantidade máxima permitida de modificações da solução na perturbação seria menor ou igual a quantidade de pontos de apoio da instância, e também, que a quantidade de modificações começa em 1 (linha 3), podendo ser incrementada depois de 10 iterações sem melhoria da solução atual (linha 16 a 22). Percebe-se que no momento em que é encontrado uma

solução melhor depois da busca local (linha 9), é atualizada a solução atual (linha 10), a quantidade de modificações do método de perturbação recebe o valor 1 (linha 11), e também, o contador de iterações sem melhoria da solução recebe o valor 1 (linha 12).

Algoritmo 6: VNS-VND

```

Entrada: num_apoio
1 inicio
2    $s \leftarrow solucaoInicial()$ 
3    $qtd \leftarrow 1$ 
4    $qtd\_max \leftarrow num\_apoio$ 
5    $cont \leftarrow 1$ 
6   enquanto Critério de parada não satisfeito faça
7      $s' \leftarrow perturbacao(s, num\_apoio, qtd)$  // (Algoritmo 3)
8      $s'' \leftarrow buscaLocal(s', num\_apoio)$  // VND com os métodos de descida (Algoritmo 4 e 5)
9     se  $f(s'') < f(s)$  então
10       $s \leftarrow s''$ 
11       $qtd \leftarrow 1$ 
12       $cont \leftarrow 1$ 
13    fim
14    senão
15       $cont \leftarrow cont + 1$ 
16      se  $cont = 10$  então
17         $qtd \leftarrow qtd + 1$ 
18        se  $qtd \geq qtd\_max$  então
19           $qtd \leftarrow 1$ 
20        fim
21       $cont \leftarrow 1$ 
22    fim
23  fim
24 fim
25 retorna :s // Melhor solução encontrada

```

Na avaliação de uma solução ($f(s)$), foi implementada a abordagem descrita na Seção 4.1, que a partir de uma solução inicial, tem-se ao final uma melhor solução encontrada para ser realizada a comparação em tempo de execução.

5 Experimentos e Resultados

Este capítulo tem como objetivo mostrar os experimentos computacionais realizados e seus respectivos resultados. Os experimentos computacionais foram feitos baseados no modelo matemático proposto implementado no CPLEX e na abordagem proposta mencionada no Capítulo 4. Além disso, são exibidas comparações entre os resultados da metaheurística proposta com os do modelo exato.

5.1 Instância do Problema

Os experimentos computacionais foram executados em uma instância, onde foi elaborada de acordo com a matriz de distância entre 30 (trinta) pontos de ônibus distribuídos na cidade de Mossoró/RN.

5.1.1 Instância

A instância possui o seguinte detalhamento:

- Possui a abordagem de 30 (trinta) pontos, no qual foram escolhidos devido a um conjunto de pontos de interesses, que foram descritos na seção 4.1.
- Dos 30 (trinta) pontos, até 14 (quatorze) serão analisados para se obter a menor distância entre eles, entregando ao final um resultado de pontos de apoio.

Tabela 3 – Descrição das instâncias da classe C1.

Instância	Descrição
PQ_05_10_14	Rede pequena com 5, 10 e 14 pontos de apoio escolhidos

Fonte – Elaborado pela autora.

5.2 Modelo Matemático

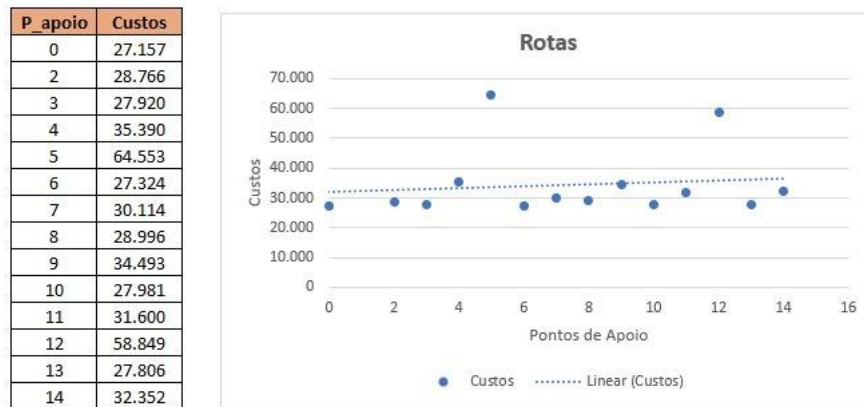
Para fazer a validação da formulação matemática para um problema de ciclovias proposta neste trabalho, foi implementado o modelo matemático no *software* CPLEX versão 20.1.0 na linguagem de programação C++ por meio da tecnologia *Concert Technology*¹. O CPLEX foi executado em um computador com o sistema operacional *Windows 10 PRO*

¹ *Concert Technology*: a tecnologia é um conjunto de bibliotecas que permite que um programador incorpore otimizadores CPLEX em aplicativos C++, Java ou .NET.

64 bits, com 8 GB de memória RAM e processador Intel Core i7-7500U de 2.70 GHz. Notebook fabricado pela LENOVO de modelo: IdeaPad 320 80YH0001BR.

Os experimentos no CPLEX foram realizados na instância, no qual se obtém valores reais em Km.

Figura 5 – Resultados do CPLEX para as instâncias com a linha de tendência.



Fonte – Elaborado pela autora.

Na imagem 4 são mostrados os resultados para a primeira configuração do experimento, com valores para os pontos de apoio do 0 ao 14. Os valores obtidos dos custos para se encontrar as quantidades de pontos de apoio são as soluções viáveis encontradas pelo CPLEX. Para tal, os resultados da instância PQ_5_10_14 exibem o que foi mostrado no quadro anterior.

5.3 VNS

A abordagem de solução proposta neste trabalho com a metaheurística VNS, foi implementado na linguagem de programação C, utilizando o programa Dev-C++, versão 5.11. O VNS foi executado no mesmo computador utilizado na implementação do CPLEX.

Os experimentos ocorreram utilizando a mesma instância, utilizada na modelagem matemática, porém, sendo executado 10 (dez) vezes na mesma instância, no qual o seu critério de parada foi executar uma quantidade máxima de iterações menor ou igual a quantidade de pontos de apoio das ciclovias atribuídos pela instância.

No quadro 1 são mostrados os resultados da instância, onde é mostrado o custo do resultado da rota, encontrada das 10 (dez) execuções e o tempo médio ($\overline{\tau(s)}$) das execuções em segundos.

Quadro 1 – Resultados gerais do VNS para as instâncias.

Instância	Pontos = 5		Pontos = 10		Pontos = 14	
	#Custos	$\overline{\tau(s)}$	#Custos	$\overline{\tau(s)}$	#Custos	$\overline{\tau(s)}$
PQ_05_10_14	64,553	0,3	27,981	3,14	32,352	0,97

Fonte – Elaborado pela autora.

A partir destes resultados gerais, pode-se notar que para a instância PQ_05_10_14, a metaheurística VNS obteve o valor ótimo ao longo das 10 execuções, para todas as quantidades de pontos de apoio.

5.4 Análises dos Resultados

Nesta seção, é feita a comparação dos resultados do método de solução proposta desenvolvida. Na Subseção 5.4.1, é avaliado o desempenho do VNS para a instância da classe C1 em relação aos resultados obtidos pelo modelo matemático proposto implementado no CPLEX.

5.4.1 Comparação do VNS com o Método Exato

Nesta subseção, realiza-se as comparações e análises dos resultados da metaheurística VNS com os do método exato para a instância. A comparação é efetuada em relação ao valor dos custos das rotas encontradas (**#Custos**) e o tempo computacional ($\tau(s)$) gasto para as três configurações dos experimentos do método exato, e para o VNS é levado em consideração o melhor resultado e o tempo médio de dez execuções. ($\overline{\chi}$) e do tempo ($\overline{\tau(s)}$) gasto para as dez execuções do experimento do mesmo.

A Tabela 4 mostra uma comparação dos resultados computacionais em tempo de execução obtidos pelo VNS para as instâncias da classe C1, com os resultados do método exato para as três configurações do experimento que são: 5, 10 e 14 pontos de apoio.

Tabela 4 – Comparação dos resultados da melhor solução obtida pelo VNS com os do método exato e os tempos médios de 10 execuções.

Pontos	CPLEX		VNS	
	#Custos	$\tau(s)$	χ	$\tau(s)$
Rede Pequena com 5, 10 e 14 pontos (PQ_05_10_14)				
05	64,553	0,3	64,553	0,3
10	27,981	4,77	27,981	3,14
14	32,352	1,61	32,352	0,97

Fonte – Elaborado pela autora.

Em comparação, nota-se que, para a instância PQ_05_10_14, tanto o VNS como o método exato, obtiveram como média das soluções os valores ótimos para todas as quantidades de pontos, porém, o método exato gastou um tempo computacional maior que o VNS em duas quantidades de ponto de apoio.

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste capítulo é exibido as conclusões e os trabalhos futuros da presente pesquisa. A Seção 6.1 mostra as considerações acerca do trabalho desenvolvido. A ampliação desta pesquisa como trabalhos futuros são discutidos na Seção 6.2.

6.1 Conclusões

Neste trabalho foram expostos dois objetos de estudo: (i) o desenvolvimento de uma formulação matemática para um problema de ciclovias com decisões discretas para determinar uma configuração ótima de uma rota; e (ii) a implementação da metaheurística VNS para a resolução do problema.

O segundo objeto de estudo foi a implementação da metaheurística VNS como mecanismo para o problema de ciclovias relatado durante o trabalho. O VNS, basicamente ficou responsável por fazer a escolha das rotas, fazendo uso do procedimento de busca local ou VND, proposto por Blum e Roli (2003b).

Em relação ao novo modelo matemático proposto e a metaheurística VNS, foram realizados experimentos computacionais para a instância real. Os resultados obtidos pelo VNS foram avaliados de acordo com a qualidade da solução, a média de tempo e o valor médio durante 10 (dez) execuções da instância.

A comparação dos resultados entre o modelo matemático e o VNS para a mesma instância, comprovou que a metaheurística VNS tem um desempenho superior em relação ao modelo exato, sendo encontrados tempos computacionais melhores, apesar da instância ser pequena.

Diante de todas essas informações, podemos concluir que a metaheurística VNS demonstrou ser um algoritmo promissor, conseguindo alcançar soluções ótimas ou mínimas com pouco tempo de execução.

Como contribuições, este trabalho apresenta um modelo matemático para um projeto de ciclovias e o desenvolvimento de uma metaheurística, que ainda não tinha sido aplicado a algum problema a respeito disso.

6.2 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, temos algumas possibilidades: (i) prosseguir com o estudo de caso na cidade de Mossoró/RN, aumentando a quantidade de instâncias reais, fazendo uso de todas as rotas possíveis, para que assim se utilize instâncias grandes; e (ii) realizar a

análise levando em consideração a todos os pontos de ônibus, a fim de se obter as melhores distâncias para todos os pontos de apoio das ciclovias.

Além disso, pelo motivo deste trabalho ter utilizado o Problema do Caixeiro Viajante, no caso de se ter maiores instâncias, o PCV poderá não encontrar uma solução. Por este motivo, pode-se vir a utilizar o método de *Branch and Bound*.

Para finalizar, também seria interessante se utilizar uma nova metaheurística para o problema.

Referências

- ARENALES, M. *et al. Pesquisa Operacional*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007. ISBN 978-85-352-5193-7. Citado na página 18.
- AUSIELLO, G. *et al. Complexity and Approximation: Combinatorial Optimization Problems and Their Approximability Properties*. Berlin: Springer, 2003. ISBN 3-540-65431-3. Citado na página 18.
- BLUM, C.; ROLI, A. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, v. 35, n. 3, p. 268–308, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 22.
- BLUM, C.; ROLI, A. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM computing surveys (CSUR)*, Acm New York, NY, USA, v. 35, n. 3, p. 268–308, 2003. Citado na página 42.
- BROWNLEE, J. *Clever Algorithms. Nature-Inspired Programming Recipes*. 1st. ed. [S.l.]: LuLu, 2011. ISBN 978-1-4467-8506-5. Citado na página 19.
- CORREA, R.; CUNHA, K.; BOARETO, R. A bicicleta e as cidades: como inserir a bicicleta na política de mobilidade urbana. *Instituto de energia e meio ambiente*, 2010. Citado na página 15.
- DORIGO, M. *Optimization, Learning and Natural Algorithms*. Tese (Doutorado) — Politecnico di Milano, Italy, 1992. Citado na página 21.
- FEO, T. A.; RESENDE, M. G. C. Greedy randomized adaptive search procedures. *Journal of Global Optimization*, v. 6, n. 2, p. 109–133, 1995. Citado na página 21.
- FISHMAN, E.; WASHINGTON, S.; HAWORTH, N. Corrigendum: Bike share: A synthesis of the literature, transport reviews. *Transport Reviews*, Routledge, v. 33, n. 2, p. e1, 2013. Citado na página 15.
- GARCÍA-LÓPEZ, F. *et al.* The parallel variable neighborhood search for the p-median problem. *Journal of Heuristics*, v. 8, n. 3, p. 375–388, 2002. Citado na página 22.
- GEORGESCU, M. *et al.* The race for making up the list of emergent smart cities. an eastern european country’s approach. *Transformations in Business & Economics*, v. 14, n. 2A, p. 529–549, 2015. Citado na página 15.
- GLOVER, F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers and Operations Research*, v. 13, n. 5, p. 533–549, 1986. Citado na página 21.
- GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Boston, MA: Addison-Wesley, 1989. (1). ISBN 0201157675. Citado na página 21.
- GOUVÊA, E. F. *et al. Uma análise experimental de abordagens heurísticas aplicadas ao problema do caixeiro viajante*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2006. Citado na página 25.

- HANSEN, P.; MLADENović, N. Variable neighborhood search. In: PARDALOS, P. M.; RESENDE, M. G. C. (Ed.). *Handbook of Applied Optimization*. New York: Oxford University Press, 2002. Citado na página 22.
- HANSEN, P.; MLADENović, N. A tutorial on variable neighborhood search. *Le cahiers du GERARD*, n. 46, 2003. Citado na página 22.
- HANSEN, P. *et al.* Variable neighborhood search: basics and variants. *EURO Journal on Computational Optimization*, Springer, v. 5, n. 3, p. 423–454, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- HÉLIODORE, F. *et al.* *Metaheuristics for Intelligent Electrical Networks*. 1. ed. [S.l.]: ISTE, 2017. v. 10. ISBN 978-1-84821-809-3. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.
- HOLLAND, J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975. Citado na página 21.
- JÄPPINEN, S.; TOIVONEN, T.; SALONEN, M. Modelling the potential effect of shared bicycles on public transport travel times in greater helsinki: An open data approach. *Applied Geography*, Elsevier, v. 43, p. 13–24, 2013. Citado na página 15.
- KARP, R. M. On the computational complexity of combinatorial problems. *Networks*, Wiley Online Library, v. 5, n. 1, p. 45–68, 1975. Citado na página 25.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. C. Particle swarm optimization. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*. [S.l.: s.n.], 1995. p. 1942–1948. Citado na página 21.
- KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by simulated annealing. *Science*, v. 220, n. 4598, p. 671–680, 1983. Citado na página 21.
- LEITE, L. de O.; JÚNIOR, A. d. C. G. Problema de roteamento de veículos com coleta e entrega simultânea: Um estudo de caso em uma indústria de alimentos localizada na região do vale do aço. *Revista Latino-Americana de Inovação e Engenharia de Produção*, v. 5, n. 7, p. 101–115, 2017. Citado na página 28.
- LOURENÇO, H.; MARTIN, O.; STÜTZLE, T. A beginner’s introduction to iterated local search. In: *Proceeding of the 4th Metaheuristics International Conference*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 1–11. Citado na página 21.
- LOZANO, M.; BLUM, C. A hybrid metaheuristic for the longest common subsequence problem. In: BLESÁ, M. J. *et al.* (Org.). *Hybrid Metaheuristics*. [S.l.]: Springer, 2010. p. 1–15. Citado na página 20.
- MIN, H. The multiple vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up points. *Transportation Research Part A: General*, Elsevier, v. 23, n. 5, p. 377–386, 1989. Citado na página 28.
- MINE, M. T. *et al.* O problema de roteamento de veículos com coleta e entrega simultânea: uma abordagem via iterated local search e genius. *TRANSPORTES*, v. 18, n. 3, 2010. Citado na página 28.
- MLADENović, N.; HANSEN, P. Variable neighborhood search. *Computers & operations research*, Elsevier, v. 24, n. 11, p. 1097–1100, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 36.

- MLADENović, N.; HANSEN, P. Variable neighborhood search: Methods and recent applications. *Third Metaheuristics International Conference*, p. 275–280, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- MOSCATO, P. On evolution, search, optimization, genetic algorithms and martial arts: Towards memetic algorithms. *Technical Report Caltech Concurrent Computation Program, C3P Report 826*, Pasadena, California, USA, 1989. Citado na página 21.
- OLIVEIRA, S. P. Modelo matemático para o projeto de redes ciclovárias integradas ao sistema de transporte público por ônibus em áreas urbanas. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2020. Citado na página 29.
- PEREIRA, D. L. Heurísticas e algoritmo exato para o problema de roteamento de veículos com coleta e entrega simultâneas. Universidade Federal de Minas Gerais, 2010. Citado na página 28.
- PEREIRA, M. A. Um método branch-and-price para problemas de localização de p-medianas. *São José dos Campos*, 2005. Citado na página 25.
- POLACEK, M. *et al.* A variable neighborhood search for the multi depot vehicle routing problem with time windows. *Journal of Heuristics*, v. 10, n. 6, p. 613–627, 2004. Citado na página 22.
- RANDHAWA, A.; KUMAR, A. Exploring sustainability of smart development initiatives in india. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2017. Citado na página 15.
- RESENDE, M. G. de C.; SILVA, R. M. de A. Grasp: Procedimentos de busca gulosa, aleatórios e adaptativos. In: LOPES, H. S.; RODRIGUES, L. C. de A.; STEINER, M. T. A. (Org.). *Meta-heurísticas em pesquisa operacional*. Curitiba, PR: Omnipax, 2013. p. 1–20. Citado na página 18.
- SOUZA, L. d.; GOMES, E. O uso da bicicleta como meio de transporte: Mobilidade urbana na cidade do Recife. In: *Anais do I Congresso Brasileiro de Geografia Política, Geopolítica e Gestão do Território*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 384–395. Citado na página 15.
- STORN, R.; PRICE, K. *Differential Evolution - a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces*. Berkeley, CA, 1995. Citado na página 21.
- STÜTZLE, T. G. *Local Search Algorithms for Combinatorial Problems: Analysis, Improvements, and New Applications*. Tese (Doutorado) — Darmstadt University of Technology, Italy, 1998. Citado na página 21.
- TALBI, E.-G. *Metaheuristics: from design to implementation*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009. v. 74. Citado na página 19.
- VOUDOURIS, C.; TSANG, E. P. K. Partial constraint satisfaction problems and guided local search. In: *Proceedings of Second International Conference on Practical Application of Constraint Technology (PACT'96)*. [S.l.: s.n.], 1996. p. 337–356. Citado na página 21.
- ZHENG, Y. *et al.* Urban computing: Concepts, methodologies, and applications. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2014. Citado na página 15.

Apêndices

APÊNDICE A – Grafos que Representam a Instância

Neste apêndice são mostrados os grafos e as ilustrações (feitas no aplicativo *Simunto*) que representam as instâncias, com os resultados de como ficou a configuração dos pontos de apoio com melhores soluções encontradas pelo CPLEX para cada experimento. Na representação de um grafo, todos os arcos são direcionados.

Figura 6 – Grafo da melhor solução encontrada para a instância PQ_05_10_14 com 5 pontos de apoio escolhidos.

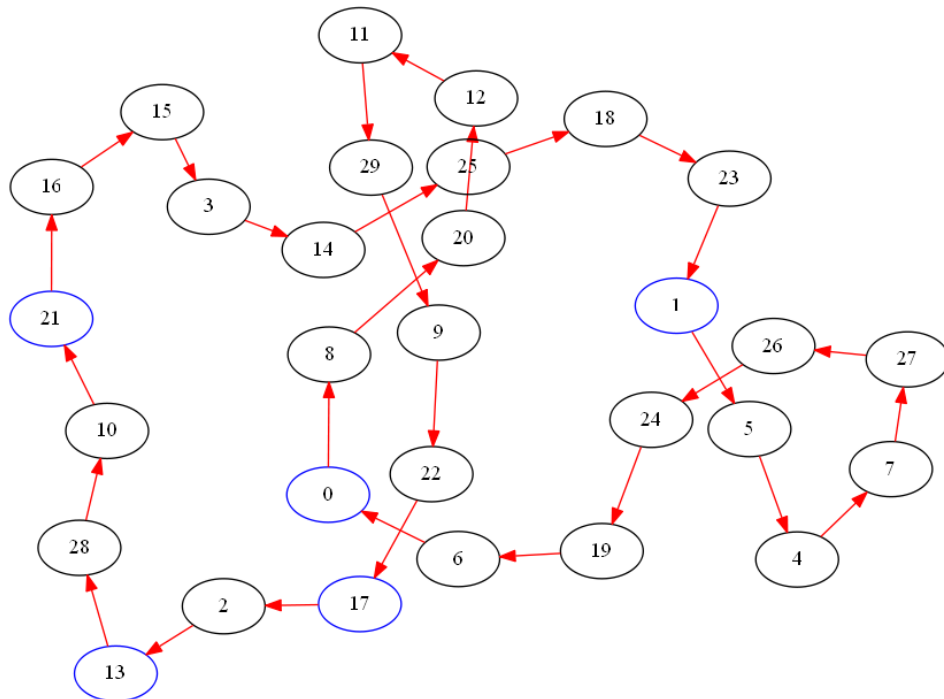


Figura 9 – Ilustração da melhor solução encontrada para a instância PQ_05_10_14 com 10 pontos de apoio escolhidos.



Figura 10 – Grafo da melhor solução encontrada para a instância PQ_05_10_14 com 14 pontos de apoio escolhidos.

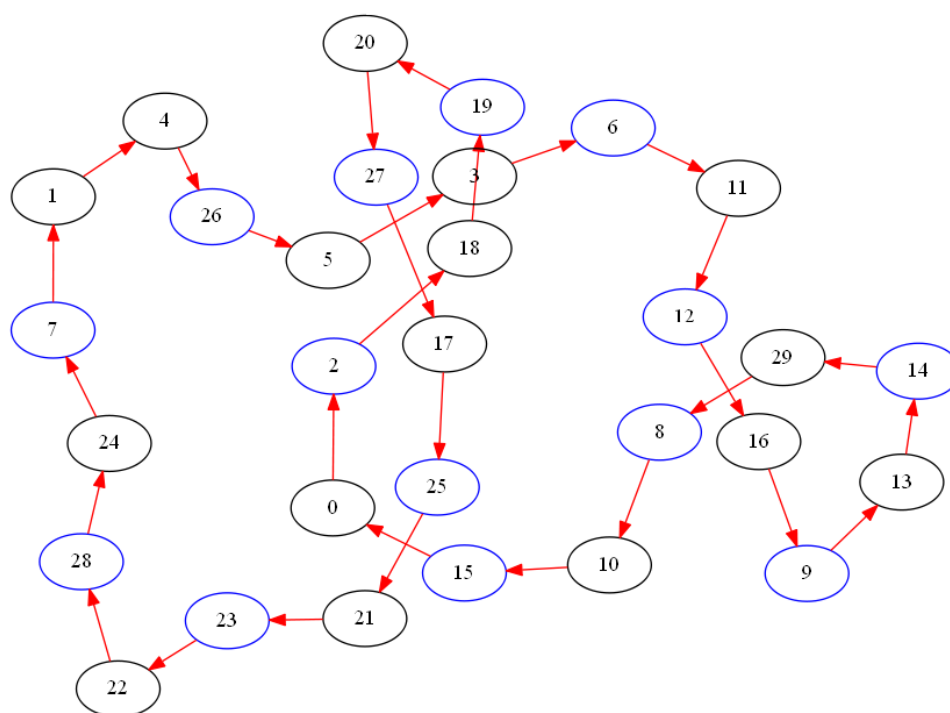


Figura 11 – Ilustração da melhor solução encontrada para a instância PQ_05_10_14 com 14 pontos de apoio escolhidos.

