

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS
DINÂMICOS COM JANELA DE TEMPO APLICADO
AO ATENDIMENTO DE ORDENS EMERGENCIAIS DE
UMA CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA ELÉTRICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Alan Mateus de Oliveira Padilha

Santa Maria, RS, Brasil

2015

**PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS DINÂMICOS
COM JANELA DE TEMPO APLICADO AO ATENDIMENTO
DE ORDENS EMERGENCIAIS DE UMA CONCESSIONÁRIA
DE ENERGIA ELÉTRICA**

POR

Alan Mateus de Oliveira Padilha

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria, como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia de Produção**.

Orientador: Prof. Dr. Vinícius Jacques Garcia

Santa Maria, RS, Brasil

2015

PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS DINÂMICOS COM JANELA DE TEMPO APLICADO AO ATENDIMENTO DE ORDENS EMERGENCIAIS DE UMA CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA ELÉTRICA

ALAN MATEUS DE OLIVEIRA PADILHA (UFSM)

alanmateus.op@gmail.com

VINÍCIUS JACQUES GARCIA (UFSM)

viniciusjg@gmail.com

O objetivo deste trabalho foi realizar a aplicação de um modelo para o roteamento de veículos, considerando janelas de tempo, e verificar seu comportamento diante variações referente ao número de clientes a serem atendidos e o número de veículos disponíveis para atender as demandas, e por fim aplicar o modelo em uma instância real envolvendo o atendimento de ordens emergências de uma concessionária de energia elétrica a fim de fazer as devidas comparações de resultados e validação do modelo. Estabelecer um modelo capaz de suportar essas variações e gerar resultados em um baixo intervalo de tempo foi o desafio apresentado nesse estudo.

*Palavras-chave: ROTEAMENTO DE VEÍCULOS; JANELAS DE TEMPO;
CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA ELÉTRICA*

The aim of this study was to apply a model for vehicle routing, considering time windows, and check their behavior on regarding changes the number of customers to be served and the number of vehicles available to meet the demands, and finally apply the model in an actual instance involving the care with emergency orders of an electric utility in order to make appropriate comparisons of results and model validation. Establish a model able to withstand these variations and generate results in a low time interval was the challenge presented in this study.

Keywords: ROUTING VEICLE; TIME WINDOWS; UTILITY OF ELECTRICITY

1 INTRODUÇÃO

É notória a importância, nos dias atuais, que os estudos cada vez mais específicos sejam feitos visando como resultado o maior aproveitamento possível dos mecanismos logísticos e envolvendo conseqüentemente o menor custo possível. O objetivo principal de um sistema logístico é fazer chegar produtos/serviços aos consumidores, partindo de estações de abastecimento (BODIN et al, 1983). Com isso é possível concluir que veículos, mão-de-obra e a própria estação de abastecimento fazem parte do sistema logístico. O grande problema dos dias atuais se encontra no momento em que passam a considerar que a frota de veículos e a mão-de-obra, por serem elementos relativamente mais flexíveis no processo, não concentram inicialmente o esforço decisório, os quais são voltados para os elementos mais estáticos, como por exemplo, as edificações (GOLDBARG; LUNA, 2005). Dessa maneira, as dimensões de custos dos problemas gerados pela desconsideração dos elementos flexíveis são percebidas tardiamente, em situações após o serviço logístico já ter sido estabelecido e estar em pleno funcionamento, fazendo com que todo o planejamento e ações previamente definidas como ótimas se torne não mais ao menos sub-ótimas. Surge, então, a necessidade de ações corretivas, as quais são acompanhadas por um custo muito mais elevado se comparado ao custo que seria se tivesse sido considerado os elementos flexíveis já na etapa de planejamento inicial.

Considerando uma determinada região que possua pontos geograficamente dispersos, seria possível assumir o fato de que uma empresa X tenha interesse em estabelecer um depósito nessa região para que possa atender esses pontos de demanda com uma maior agilidade e eficiência. Para isso, essa empresa faz o levantamento da disponibilidade e de valores de terrenos na região e por fim acaba optando pelo terreno que envolveria o menor custo inicial de investimento (compra, preparação do terreno e edificação do depósito). Após todos os preparativos terem sido feitos, o depósito começa a operar normalmente, atendendo a demanda prevista. Porém, no decorrer do tempo, os responsáveis pelo setor financeiro desta empresa X começam a notar que os gastos com transporte passam a ser mais expressivos do que o esperado, fazendo então com que haja a necessidade de minimizá-los.

É nesse cenário que surge o que chamamos de Problema de Roteamento de Veículos (PRV), que, segundo a definição de Pillac (2013), trata da concepção de um conjunto de rotas de veículos que atendem a demanda de bens ou serviços de um grupo de clientes geograficamente distribuídos, satisfazendo restrições operacionais a um custo mínimo.

Entre diversas outras situações que envolvem PRV, cenários assim são observados, por exemplo, em concessionárias de energia elétrica, mais especificamente no setor de atendimentos a ordens emergenciais. O que ocorre nessas concessionárias é que no início do dia de trabalho é fixada uma rota composta por locais de atendimentos para cada um dos veículos da frota. Nessa rota, o veículo terá que atender chamadas de diferentes clientes, que na maioria dos casos são pedidos de manutenção na rede elétrica. Essas chamadas são distribuídas entre os veículos de acordo com alguns critérios, como por exemplo a necessidade equipamentos especiais, quantidade de funcionário, entre outros. Tais condicionantes podem determinar se a chamada, ou ordem, será atendida através da utilização de uma camioneta, automóvel, ou até mesmo com uma motocicleta.

Com isso, ao iniciar a jornada de trabalho, cada funcionário já terá bem estabelecido o veículo que será utilizado, para associar a respectiva rota do dia. Porém, no decorrer da rota podem surgir novas ordens até então imprevistas, denominadas de ordens emergenciais, cabendo ao tomador de decisões levantar o grau de importância e de necessidade dessa ordem e assim estabelecer uma estratégia para encaixá-la na rota de algum veículo.

Justamente na abordagem para realizar o referido encaixe das ordens emergenciais em uma rota já existente é que este trabalho tem o seu foco. A partir dos resultados do histórico de ocorrência de ordens emergenciais, é estabelecido um padrão de tempo e localização dessas ocorrências e, com isso, prever a ocorrência dessas ordens a partir de um roteamento proativo, envolvendo janelas de tempo, onde essas ordens emergenciais pudessem se tratadas como ordens comuns.

Para tanto, visando esclarecer especificidades da oportunidade de melhoria que será abordada neste trabalho, assim como a metodologia utilizada e os resultados obtidos, o trabalho foi dividido nas seguintes seções, seguido dos resultados e conclusão:

1. Complementação Introdutória:

Definição do tema e do problema;

Questões de pesquisa;

Objetivo geral e específico;

Justificativa.

2. Referencial teórico

3. Definições:

Problema de Roteamento de Veículos;

Problema de Roteamento de Veículos com Janela de Tempo;

Problema de Roteamento Dinâmico.

4. Metodologia:

Cenário;

Método de pesquisa;

Etapas de pesquisa.

1.1 Definição do Tema e do Problema

O tema no qual será desenvolvido o presente trabalho é o Problema de Roteamento de Veículos com Janelas de Tempo (PRVJT), mais especificamente, tendo como problema prático de estudo a aplicação das técnicas de PRVJT para o atendimento de serviços emergenciais.

1.2 Questões de pesquisa

A seguinte questão de pesquisa deverá ser respondida por este trabalho:

- O PRVJT, a partir de informações sobre o histórico de ocorrência de ordens emergenciais, pode contribuir para o desenvolvimento de uma abordagem proativa de roteamento?

1.3 Objetivo geral e específico

O presente trabalho tem como objetivo geral implementar um modelo dinâmico e flexível para PRVJT. Com os objetivos específicos de descrever o problema de atendimento de ordens emergenciais na forma de um modelo matemático que contemple janelas de tempo, comparar as técnicas existentes para o roteamento de veículos e desenvolver um estudo de caso para uma instância do problema específico de atendimento de ordens emergenciais de uma concessionária de energia elétrica.

1.4 Justificativa

O problema de roteamento de veículos com janela de tempo apresenta uma razoável sofisticação principalmente devido à natureza combinatória, o que torna as soluções da literatura sofisticadas e em função das características particulares do problema e da dimensionalidade das instâncias.

A situação que será estudada no decorrer deste trabalho, que é o problema de atendimentos de ordens emergenciais, guarda potencial de aplicação em função de estar presente em qualquer empresa de distribuição de energia elétrica, assim como também em qualquer empresa que possua características de atuação similares às que serão abordadas nesse trabalho. Esse problema envolve na sua estrutura o roteamento de veículos com janela de tempo, o que sugere o estudo e o desenvolvimento de técnicas de solução que promovam alternativas para a resolução desse problema de atendimento promovendo o maior aproveitamento possível do tempo, e consequentemente da mão-de-obra.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A primeira citação de um PRV foi dada por Dantzig e Ramster (1959), que consistia no estudo da aplicação real de otimização de rota em um caso de distribuição de gasolina para estações de venda de combustíveis.

A partir deste marco, vários outros autores começaram a explorar os problemas de roteamento de veículos e por fim se tornando grandes referências. Um exemplo disto é Laporte, que entre 1973 e 1987 contribuiu para a literatura difundindo diversas técnicas para a solução de PRV, assim como Psaraftis que em 1980 passou a considerar o comportamento dinâmico relacionado aos surgimentos de demandas durante o processo de atendimento das mesmas.

Para obter uma melhor compreensão do tema e das especificidades do problema que será estudado, quatro subseções serão apresentadas afim de abordar as seguintes definições:

- Problema do Caixeiro Viajante;
- Problema de Roteamento de Veículos Genérico;
- Problema de Roteamento de Veículos com Janela de Tempo;
- Problema de roteamento de veículos na Vareta Dinâmica.

2.1 Problema do Caixeiro Viajante

Antes de dar início às definições do PRV, é importante relacioná-lo ao Problema do Caixeiro Viajante (PCV), que é um dos mais tradicionais e conhecidos problemas de programação matemática, e de onde saiu a generalização para que assim pudesse ser desenvolvida a formulação do PRV (MELAMED,1990); (MACULAN, 1994).

Em síntese, o PCV é um problema de otimização associado ao da determinação dos caminhos hamiltonianos em um grafo qualquer $G=(V,A)$, onde V representa o conjunto dos vértices e A o conjunto das arestas, com o objetivo de encontrar o caminho de menor custo possível partindo de um dado vértice.

Existem diversas formulações para o PCV, e uma das mais difundidas e clássicas é a formulação de Dantzig-Fulkerson-Johnson (DFJ), que aborda o PCV como sendo um problema de programação 0-1 sobre $G=(V,A)$ da seguinte maneira:

$$\text{Minimizar } z = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (2.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j \in V \quad (2.2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V \quad (2.3)$$

$$\sum_{i,j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1 \quad (S \subseteq V, |S| > 1) \quad (2.4)$$

$$x_{ij} \in 0, 1 \quad \forall i, j \in V \quad (2.5)$$

Onde, x_{ij} é uma variável binária (2.5) que assume valor igual a 1 caso o arco (i, j) seja escolhido para integrar a solução, e 0 caso contrário. c_{ij} é o custo agregado ao deslocamento de i para j . A restrição (2.2) garante que cada vértice do grafo tenha apenas um antecessor, e a restrição (2.3) garante que cada vértice possua apenas um sucessor. A equação (2.4) garante a eliminação dos caminhos pré-hamiltonianos ou *subtours*, os quais seriam, em síntese, rotas independentes da rota principal, o que é indesejado em uma solução ótima.

Outra alternativa para eliminar esses *subtours* é acrescentando variáveis extras $u_i (i = 1, \dots, n)$, pois elas representam uma tentativa de evitar um conjunto de restrições com cardinalidade dada a partir de uma função combinatória. Essas restrições são descritas conforme as equações a seguir (MILLER, TUCKER, ZEMLIN, apud PATAKI, 2003).

$$u_1 = 1 \quad (2.6)$$

$$2 \leq u_i \leq n \quad \forall i \neq 1 \quad (2.7)$$

$$u_i - u_j + 1 \leq (n - 1)(1 - x_{ij}) \quad \forall j \neq 1 \quad (2.8)$$

Dentre tantas variantes existentes do PCV, devemos fazer menção ao Problema do Caixeiro Viajante Múltiplo (PCVM), o qual consiste em obter r *tours*, todos iniciando e terminando em um certo vértice (x_0 , por exemplo) em G e associados a r caixeiros, cuja soma total é mínima (GOLDBARG; LUNA, 2005). A importância do PCVM no contexto em que se desenvolve o trabalho é pelo fato de ter uma certa similaridade teórica com o PRV, como poderá ser observado no decorrer da próxima definição.

2.2 Problema de Roteamento de Veículos

Segundo Goldbarg e Luna (2005), um sistema de roteamento pode ser considerado como um conjunto organizado de meios que objetiva o atendimento de demandas localizadas nos arcos ou nos vértices de alguma rede de transporte. Com isso, um PRV é identificado basicamente, quando o atendimento de demandas é feito através da utilização de m veículos, onde os vértices de uma rede de transporte são os clientes e objetiva-se visita-los de forma a obter o menor custo possível e sujeito a um conjunto de restrições. A distinção do PRV com o PCV é feita partindo do pressuposto de que o PCV tem por objetivo atender um determinado número de pontos de demanda em uma rota única, enquanto no PRV há a possibilidade de trabalhar com a existência de mais de uma rota.

A definição clássica do PRV parte do pressuposto que $G = (V, A)$ é um grafo, com $V = 0, 1, \dots, n$ sendo um conjunto de vértices representando as localidades das fontes de demandas (clientes/cidades) e o ponto de partida de cada veículo (V_0), também denominado de depósito, e A o conjunto de arestas. Cada aresta (i, j) , sendo $i \neq j$, é associada a uma matriz de distâncias $C = (c_{ij})$ cujos elementos são todos não negativos. Algumas referências evidenciam que c_{ij} pode ser relacionado ao custo ou tempo de deslocamento. O Diferencial dos métodos de

PRV para os demais métodos utilizados para escolha do "melhor caminho" é a consideração do pressuposto de que existem m veículos disponíveis para o atendimento da demanda, e a cada um deles é associado um custo fixo f referente ao seu uso. Laporte (1992), a fim de simplificar, ignorou esses custos, partindo do princípio de que todos os veículos são idênticos e possuem a mesma capacidade Q .

As condições para que um PRV seja satisfeito consiste em:

- Cada vértice V_n (com exceção do V_0) é visitado apenas uma vez e por exatamente um veículo;
- Todas as rotas iniciam e terminam no depósito;
- As seguintes restrições devem ser respeitadas:

Restrição da capacidade: a cada vértice $i > 0$ é atribuído um peso não negativo (ou demanda) q_i e a soma dos pesos de qualquer rota do veículo não pode exceder a capacidade Q do veículo m ;

O número de vértices de cada rota é limitado a Q ;

Restrição de tempo total: o tempo para percorrer qualquer rota não pode exceder um limite fixado T , sendo este limite composto pelos tempos de viagem c_{ij} e pelos tempos de parada ts_i em cada vértice i da rota.

Convém destacar que para o PRV não é conhecido um algoritmo determinístico de tempo polinomial para resolver qualquer instância (Garey e Johnson 1979), o que sugere o uso de heurísticas.

Dentre tantas, uma das formulações mais abordadas do problema geral de roteamento de veículos é a de Fisher e Jaikumas (1981), a qual é descrita a seguir.

$$Min Z = \sum_{i,j} (c_{ij} \sum_k x_{ijk}) \quad (2.9)$$

Sujeito a:

$$\sum_k y_{ik} = 1 \quad i = 2, \dots, n \quad (2.10)$$

$$\sum_k y_{ik} = m \quad i = 1 \quad (2.11)$$

$$\sum_i q_i y_{ik} \leq Q_k \quad k = 1, \dots, m \quad (2.12)$$

$$\sum_j x_{ijk} = \sum_j x_{jik} = y_{ik} \quad i = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, m \quad (2.13)$$

$$\sum_{i,j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subseteq \{2, \dots, n\}, \quad k = 1, \dots, m \quad (2.14)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\} \quad i = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, m \quad (2.15)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad i, j = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, m \quad (2.16)$$

Onde:

x_{ijk} = variável binária que assume valor 1 quando o veículo k visita o cliente j imediatamente após o cliente i , 0 em caso contrário.

y_{ik} = variável binária que assume valor 1 se o cliente i é visitado pelo veículo k , 0 em caso contrário.

q_i é a demanda do cliente i .

Q_k é a capacidade do veículo k .

c_{ij} é o custo de percorrer o trecho que vai do cliente i ou j .

A restrição (2.10) garante que o veículo não visite mais de uma vez um mesmo cliente. A restrição (2.11) assegura que o depósito receba uma visita de todos os veículos, e com isso obrigando que todos os veículos iniciem suas rotas partindo do depósito. A restrição (2.12) garante que a capacidade dos veículos não seja ultrapassada. A restrição (2.13) assegura que os veículos não parem suas rotas em um cliente, e a restrição (2.14) são as eliminações de subtours.

2.3 Problema de Roteamento de Veículos com Janela de tempo

No momento em que é explicitado a existência de janelas de tempo, esta sendo dito que o modelo matemático do PRV deve considerar tempos específicos, como por exemplo o tempo em que um veículo irá ficar parado em um dado vértice/cliente enquanto o serviço é prestado e o tempo que o mesmo veículo irá levar para se deslocar de um cliente até o próximo. Estes dois integram o tempo gasto durante o deslocamento do veículo na rota. Dessa forma, o valor acumulado do tempo de trajeto deve estar entre um certo intervalo de tempo, denominado de janela de tempo (GOLDBARG; LUNA, 2005). Esse acréscimo de restrição, por si só, já deixa o PRV muito mais complexo, tanto em sua modelagem quanto em sua aplicação, pois vale salientar que janelas de tempo podem ser atribuídas individualmente aos clientes, o que faz com que os veículos sejam obrigados a atender o cliente durante um determinado intervalo e caso o veículo chegue ao cliente antes do tempo previsto, teoricamente ele terá que esperar até

o início da janela de tempo, ocasionando assim o aumento do custo do atendimento, da mesma forma se caso o veículo chegue no cliente após o fechamento da janela.

Com isto é acrescentada a seguinte nova restrição no problema clássico de roteamento de veículos:

Janelas de tempo: o vértice i deve ser visitado dentro do intervalo de tempo $[a_i, b_i]$, com tolerância de tempo de espera ou não.

Onde a_i refere-se a limite inferior e b_i ao limite superior da janela de tempo.

Tendo como base a formulação do problema clássico de roteamento de veículos, demonstrado através das equações 2.9 até a 2.16, para a utilização do modelo com sendo um PRVJT é necessário apenas adicionar as restrições 2.17 e 2.18.

$$s_i + ts_i + t_{ij} - M(1 - x_{ijk}) \leq s_j \quad i, j = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, m \quad (2.17)$$

$$a_i \leq s_i \leq b_i \quad i = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, m \quad (2.18)$$

Onde ts_i é o tempo em que o veículo fica parado em i , t_{ij} é o tempo de deslocamento de i até j , e s_i é uma variável relacionada à chegada do veículo no vértice i e que pode assumir qualquer valor que esteja contido na janela de tempo do vértice i (2.18). Já $M(1 - x_{ijk})$ permite ativar e desativar a imposição de janela de tempo da rota, onde M é um número suficientemente grande capaz de fazer valer a relação imposta na equação (2.17).

2.4 Problema de Roteamento de Veículos Dinâmico

Segundo Pasaraftis (1995), no que diz respeito à definição da característica dinâmica do problema de roteamento, é quando a informação sobre o problema se torna conhecida para o tomador de decisão simultaneamente com a determinação do conjunto de rotas, ou seja, novos clientes são conhecidos durante o trajeto, já previamente definido do veículo, e o tomador de decisão tem a responsabilidade de rearranjar a rota e os veículos de forma a atender os novos clientes. Oposto a isso temos a característica estática do problema, onde as rotas não podem ser alteradas após os veículos iniciarem seus respectivos trajetos.

Para demonstrar visualmente como isso ocorre iremos utilizar a Figura 2.1, onde um depósito abastece 5 clientes (A, B, C, D e E) geograficamente distribuídos.

A rota inicial que deve ser percorrida pelo veículo afim de atender a demanda de todos os clientes é exibida no quadro 1. Porém, quando o veículo está se encaminhando para o cliente

C, com A e B já atendidas (quadro 2), surgem duas ordens emergenciais (X e Y). O veículo terá então que atender mais dois clientes alterando sua rota inicial, assim como está representado no quadro 2, e conseqüentemente terminar sua jornada de trabalho atendendo os 7 clientes e retornando para o depósito (quadro 3).

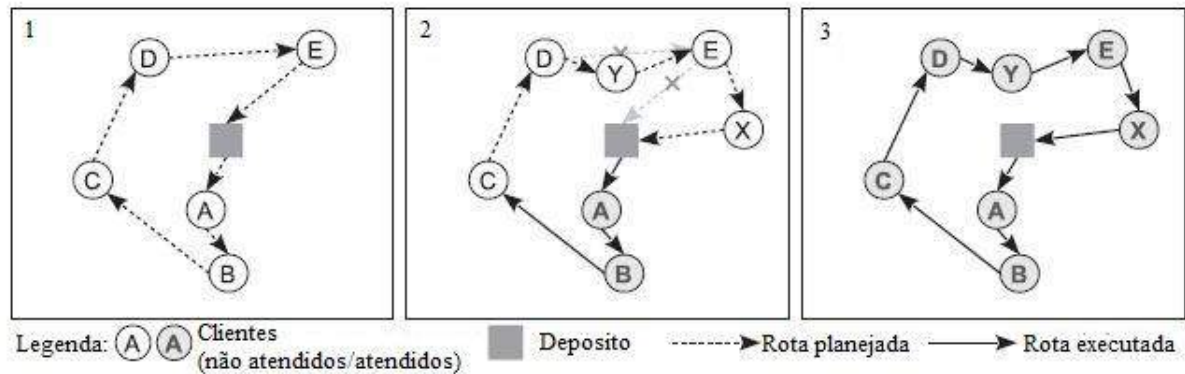


Figura 2.1 – Exemplo de roteamento de veículos dinâmico. Fonte: Pillac (2013)

Obviamente nem sempre as ordens emergenciais irão surgir em posições tão favoráveis, da maneira em que foi demonstrada na Figura 2.1. Haverá casos em que uma ordem emergencial surgirá em uma posição, que por exemplo, seja próxima a algum cliente que já foi atendido, fazendo assim com que o veículo tenha que voltar novamente até aquela região para poder efetuar o atendimento desta ordem, o levaria à um aumento significativo no custo total de deslocamento da rota.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo são definidos os procedimentos metodológicos aplicados no presente trabalho.

3.1 Cenário

O presente estudo terá como cenário de aplicação o setor de atendimento a ordens de serviço de uma concessionária de energia elétrica. A situação estudada, assim como mencionada na introdução, ocorre no momento em que uma ordem de serviço emergencial chega ao tomador de decisões e o mesmo tem que encaixá-la na rota de algum veículo, o qual, por sua vez, já está em deslocamento.

3.2 Método de pesquisa

A natureza do TCC pode ser classificada como sendo de caráter aplicado, pois é gerado conhecimento para a aplicação prática voltada para a solução de um problema específico. A abordagem que será feita no decorrer do trabalho classifica-se como sendo quantitativa, pois as variáveis que serão analisadas são de escala numérica. Já o objetivo proposto para o presente trabalho classifica-se como do tipo experimental, pois será feita uma experimentação da praticabilidade da técnica de Roteamento Dinâmico com Janelas de Tempo em uma instância de dados reais referente ao surgimento e ao atendimento de ordens emergenciais de uma concessionária de energia elétrica. Os procedimentos técnicos identificados no trabalho podem ser classificados como sendo do tipo pesquisa experimental, pelo fato de consistirem em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definindo as formas de controle e de observação dos efeitos que as variáveis produzem no objeto (GIL, 2010).

3.3 Etapas de pesquisa

A pesquisa realizada tem em sua estrutura sete etapas, que são: Estudo da bibliografia (1); Definição do problema de roteamento de atendimento de serviços emergenciais (2); Estudo das técnicas do caráter dinâmico das ocorrências (3); Definição do modelo para tratar o problema com janela de tempo, tendo um algoritmo para solução (4); Teste do algoritmo (4); Elaboração do estudo de caso (5); Conclusão (7).

As etapas da pesquisa que foi desenvolvida baseiam-se em verificar a viabilidade e as contribuições da aplicação do PRVJT em uma instância do cenário real dos atendimentos de ordens emergenciais de uma concessionárias de energia elétrica através de uma progressão gradual, ou seja, as variabilidades e peculiaridades das instâncias, assim como as do próprio PRVJT foram sendo consideradas gradualmente conforme o modelo fosse sofrendo adaptações e se mostrando eficiente para a resolução dos problemas.

O ponto de partida da pesquisa teve como objetivo a aplicação do modelo mais simples de PRVJT baseando-se no modelo clássico mencionado na seção anterior, envolvendo as equações 2.9 até 2.18. Para tanto, algumas alterações foram necessárias visando permitir que o modelo respeitasse as exigências de um sistema real. Tais alterações são demonstradas na tabela 3.1, assim como a descrição dos dados e variáveis do modelo proposto.

Tabela 3.1 – Descrição dos dados e variáveis do modelo proposto.

Conjunto	Descrição
V_s :	Conjunto dos nós de saída (depósitos)
V_c :	Conjunto dos nós que correspondem aos clientes
V_t :	Conjunto dos nós terminais de cada rota, criados apenas para estimar o tempo total de cada rota
V :	$V = V_s \cup V_c \cup V_t$
B :	Conjunto das rotas dos veículos
Parâmetro	Descrição
m :	Número total de veículos disponíveis
n :	Total de nós (clientes)
T :	Tempo máximo para cada rota
M :	um número grande, tipicamente 10.T
C_{ij} :	Distância percorrida entre i e j
TS_i :	Tempo de serviço realizado em cada nó i
VM :	Velocidade média dos veículos
TD_{ij} :	tempo de deslocamento entre i e j
JC_j :	Janela de tempo de chegada no nó j
JP_j :	Janela de tempo de partida no nó j
PR_i :	Prioridade de atendimento do nó i
Variável	Tipo / Descrição
u_i :	Variável que define a ordem que o nó i estará na rota
t_i :	Tempo de chegada no nó i
x_{ijk} :	Assume o valor 1 quando o veículo k visita o nó j após o nó i , e 0 caso contrário
y_{ik} :	Assume o valor 1 quando o nó i pertence à rota do veículo k , e 0 caso contrário

$$\text{Min } Z = \sum_{i,j} (c_{ij} \sum_k x_{ijk}) \quad (3.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k \in B} y_{ik} = 1 \quad \forall i \in V_c \cup V_t \quad (3.2)$$

$$\sum_{k \in B} y_{0k} \geq 1 \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in V, j \neq i} x_{ijk} = y_{ik} \quad \forall i \in V, \forall k \in B \quad (3.4)$$

$$\sum_{j \in V, j \neq i} x_{jik} = y_{ik} \quad \forall i \in V, \forall k \in B \quad (3.5)$$

$$x_{iik} = 0 \quad \forall i \in V, \forall k \in B \quad (3.6)$$

$$\sum_{i \in V_t} y_{ik} = y_{0k} \quad \forall k \in B \quad (3.7)$$

$$\sum_{j \in V_c \cup V_t} x_{ijk} = 0 \quad \forall i \in V_t, \forall k \in B \quad (3.8)$$

$$u_i = 1 \quad \forall i \in V_s \quad (3.9)$$

$$2 \leq u_i \leq |V_c \cup V_t| \quad \forall i \in V_c \cup V_t \quad (3.10)$$

$$u_i - u_j + 1 \leq (|V_c \cup V_t| - 1)(1 - x_{ijk}) \quad \forall i, j \in V_c \cup V_t \quad (3.11)$$

$$t_i = 0 \quad \forall i \in V_s \quad (3.12)$$

$$t_j \geq t_i + ts_i + td_{ij} - (1 - x_{ijk}) \cdot M \quad \forall i, j \in V_c \cup V_t, \forall k \in B \quad (3.13)$$

$$t_i \leq T \quad \forall i \in V_t \quad (3.14)$$

$$jc_j \leq t_j \leq jp_j \quad \forall j \in V_c \quad (3.15)$$

$$x_{ijk}, y_{jk} \in \{0, 1\} \forall i, j \in V, \forall k \in B \quad (3.16)$$

$$u_i, t_i \geq 0 \quad \forall i \in V \quad (3.17)$$

A função objetivo busca a redução do descolamento total da rota. A restrição 3.2 garante que cada cliente e terminal sejam visitados por apenas um veículo k . As restrições 3.3 impede que os veículos partam de outro lugar que não seja o depósito. As restrições 3.4 e 3.5 asseguram que os veículos não parem suas rotas em um cliente e as restrições 3.6 asseguram que os veículos não saiam de um cliente e na sequência retornem ao mesmo. As restrições 3.7 garantem que o mesmo número de veículos que partir do depósito termine a sua rota em um nó terminal. As restrições 3.8 asseguram que após visitar um nó terminal, o veículo só possa retornar ao depósito. As restrições 3.9, 3.10 e 3.11 garantem a eliminação de sub-rotas (*subtours*). E por fim as restrições de janela de tempo, onde as restrições 3.12 garantem que o tempo de saída do depósito é zero, as restrições 3.13 asseguram que o tempo de chegada em um cliente j seja a igual a soma do tempo de chegada e de serviço no cliente anterior somado ainda ao tempo de deslocamento entre os clientes (td_{ij}), e as restrições 3.14 garantem que o tempo de chegada em um nó terminal seja menor que o tempo máximo permitido em cada rota. Já as restrições 3.15 garantem que o cliente j será atendido dentro do intervalo de tempo estabelecido jc_j e jp_j . Sendo x_{ijk} e y_{jk} variáveis binárias 0,1 e as variáveis u_i e t_i sempre maiores que zero.

Algumas considerações extras foram feitas antes do início dos experimentos. Uma delas é a determinação de um tempo total máximo de rota capaz de ser flexível de acordo com as alterações nos valores de parâmetros e que pudesse ser usado como padrão para possíveis comparações. Esse tempo foi então calculado de maneira que representasse o maior tempo possível

de rota, ou seja, o cálculo partiu da consideração de que o veículo saia do depósito partindo até um cliente, efetue o serviço requerido e logo após retorne ao depósito, mantendo o mesmo procedimento para os n clientes, conforme definido na equação 3.18. No entanto, uma outra opção para atribuir esse limitante de tempo de rota seria indicar manualmente no momento de fazer a leitura do modelo juntamente e da instância, neste momento este limitante é chamado de *CAPACIDADE*. E por fim, um último parâmetro foi adicionado, esse por sua vez para determinar a capacidade final (*CAP*) que realmente seria considerada pelo modelo para poder fazer os devidos cálculos. Esse parâmetro *CAP* é em unidade de tempo, e estabelece um limite de tempo para que um veículo k efetue todos os serviços demandados (3.19).

$$TempoTotalRota = \sum_{i \in V_c} ((2 * td_{0,i}) + t_i) \quad (3.18)$$

$$CAP = \min(CAPACIDADE, (TempoTotalRota/m)) \quad (3.19)$$

Os experimentos foram feitos partindo de uma instância contendo 15 clientes seguido de uma instância maior composta de 30 clientes, onde essa por sua vez, já composta por coordenadas no mesmo formato padrão de latitude e longitude que é utilizado pelas concessionárias de energia elétrica, e por fim é utilizado uma fonte de dados reais fornecida pela própria concessionária, relacionada a uma situação onde teve a ocorrência de uma ordem emergencial e essa por sua vez ser alocada em uma rota. A intenção dos testes foi analisar a capacidade do modelo suportar alterações relacionadas a quantidade de clientes, quantidade de veículos e demais especificidades do cenário, mantendo a eficiência para a resolução do problema.

As ferramentas computacionais utilizadas para a realização do presente trabalho foram o ZIMPL, que é basicamente a linguagem utilizada para traduzir o modelo matemático em um formato que pode ser lido e resolvido por um software que resolve modelos matemáticos baseados em programação linear inteira mista (*solver*). Para fazer essa resolução foi utilizado o *solver* SCIP.

Os procedimentos efetuados no decorrer desta pesquisa foram diretamente influenciados pelos resultados obtidos em etapas anteriores, portanto os mesmos serão descritos na seção seguinte onde são apresentados os resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta pesquisa partiu do estudo utilizando uma instância simples contendo 15 clientes, assim como é mostrado na tabela 4.1, afim de verificar quais seriam as limitações do modelo e assim poder fazer as devidas adaptações.

Tabela 4.1 – Instância com 15 clientes

Número do Nó (n)	Coord. X	Coord. Y	Tempo de serviço t_{si} (minutos)
0	37	52	20
1	49	49	15
2	52	64	35
3	20	26	40
4	40	30	15
5	21	47	25
6	17	63	20
7	31	62	10
8	52	33	15
9	51	21	35
10	42	41	40
11	31	32	25
12	5	25	35
13	12	42	30
14	36	16	25

Os resultados dos testes envolvendo a modelagem padrão M1, descrita pelas equações 3.1–3.17 da seção anterior, são apresentados na tabela 4.2, usando a instância definida na tabela 4.1. Para fins de visualização, todas as soluções consideradas nesta seção são apresentadas em figuras no Apêndice deste trabalho. Os testes com o modelo M1 iniciaram com a capacidade máxima possível como sendo a capacidade limitante do tempo total de rota. Assim, a intenção foi de verificar a eficiência do modelo e com isso confirmado, efetuar graduais reduções na capacidade máxima de rota até chegar em um valor limitante onde o tempo para a resolução do problema se inviabilizasse. Foi adotado como padrão 100 segundos de Tempo de Execução para determinar se a modelagem seria viável ou não.

O que pode ser observado é que com a utilização do tempo máximo dado pela equação 3.18, o problema é resolvido com um baixo tempo computacional (menos de 1 segundo). Na medida em que a capacidade vai sofrendo graduais reduções, o tempo de execução aumenta até chegar em uma capacidade mínima a fim de possibilitar a resolução do problema. No entanto, vale salientar que a capacidade mínima não corresponde ao menor tempo de rota.

Tabela 4.2 – Resultado utilizando a instância de 15 clientes.

Veículos:	1	1	1	1	1	1	1
Capacidade:	2357	1178,5	1000	970	950	940	930
Variáveis:	304	304	304	304	304	304	304
Constantes:	519	519	519	519	519	519	519
"Non Zeros":	1856	1856	1856	1856	1856	1856	1856
Tempo de Execução (s):	0,2	0,19	0,19	0,21	0,25	0,18	200
Nós de Soluções:	1	1	1	1	1	1	86442
Soluções:	1	1	1	1	1	1	0
GAP:	0%	0%	0%	0%	0%	0%	INF
Função Objetivo:	188,8	188,8	188,8	188,8	188,8	188,8	-

Quando são comparados os tempos de execução dos resultados envolvendo a capacidade máxima (2357) com os que envolvem a capacidade mínima (940) para o modelo M1, foi verificado que não houve influência quanto ao tempo de resolução do problema, o que fez com que fosse assumida a capacidade máxima como parâmetro utilizado para obter os referentes resultados.

A seguir, o mesmo modelo M1 utilizado no caso anterior foi resolvido assumindo agora variações quanto ao número de veículos disponíveis, cujos resultados são apresentados na tabela 4.3. As conclusões que podem ser obtidas a partir desses resultados se referem ao aumento do número de variáveis em função do aumento do número de veículos, o que ocasiona um aumento no tempo computacional para a solução do modelo que chegou a 959% quando passa-se de 4 para 5 veículos.

Tabela 4.3 – Resultados utilizando a instância de 15 clientes.

Veículos:	2	3	4	5
Capacidade:	940	785,85	589,38	471,51
Variáveis:	646	1062	1558	2140
Constantes:	1091	1767	2553	3455
"Non Zeros":	4122	6864	10118	13920
Tempo de Execução (s):	2,35	10,13	13,54	129,91
Nós de Soluções:	10	73	150	13512
Soluções:	1	2	6	9
GAP:	0%	0%	0%	0%
Função Objetivo	185,88	184,23	184,23	187,58

A terceira etapa de experimentos se deu com a utilização de uma instância contendo 30 clientes (tabela 4.4). Desta vez foram utilizadas as coordenadas de cada cliente representadas por latitude e longitude. Ao aplicar o mesmo modelo M1 utilizado nas etapas anteriores

para esta instância foi verificado uma certa ineficiência do modelo para resolver o problema em tempo aceitável, onde, como pode-se observar pela tabela 4.5, em um tempo de 118,17 segundos foi obtido um GAP de 275,28% (relação de diferença entre o valor real e o valor previsto) representando uma certa dificuldade por parte do modelo, em seu estado atual, para solucionar essa instância em um baixo período de tempo.

Tabela 4.4 – Instância com 30 clientes

Número do Nó (n)	Latitude X	Longitude Y	Tempo de serviço ts (minutos)
0	29890370000	51135860000	0
1	29899710000	51140690000	0
2	29889090000	51131540000	0
3	29918720000	51190130000	55
4	29916400000	51190380000	19
5	29915690000	51192440000	19
6	29915110000	51194490000	55
7	29917000000	51196470000	55
8	29917130000	51192480000	79
9	29913770000	51192780000	79
10	29913770000	51192780000	79
11	29915330000	51192190000	19
12	29915060000	51192400000	19
13	29912910000	51145870000	19
14	29915240000	51146080000	19
15	29915670000	51144630000	19
16	29914230000	51142980000	19
17	29912890000	51142920000	19
18	29912570000	51143680000	19
19	29910210000	51141840000	19
20	29913690000	51151690000	19
21	29914533537	51153098665	19
22	29913540000	51154000000	19
23	29913490000	51154000000	19
24	29899740000	51138630000	19
25	29897890000	51133340000	19
26	29900160000	51138770000	55
27	29903200000	51140960000	55
28	29905780000	51135940000	30
29	29907428847	51142452419	55

A partir deste marco foi dado início às alterações e adaptações do modelo a fim de permitir a resolução do problema. A primeira estratégia adotada foi acrescentar uma nova restrição do tipo "SE", que atribui preferência de atendimento aos clientes que estão mais próximos do depósito. Essa restrição pode ser representada da seguinte maneira:

Tabela 4.5 – Resultados utilizando a instância com 30 clientes

MODELAGEM:	M1	M2	M2	M3	M3
-	-	-	-	-	-
VEÍCULOS:	1	1	2	2	3
CAPACIDADE:	1520,41	1520,41	760	760	506,8
VARIÁVEIS:	1054	1054	2176	2176	3432
CONSTANTES:	1929	2334	4361	4370	6602
"NON ZEROS":	7301	8111	16212	16232	25229
TEMPO DE EXECUÇÃO (s):	118,17	4	158,26	14,38	102,74
NÓS DE SOLUÇÕES:	24	1	36	54	1060
SOLUÇÕES:	2	1	0	3	11
GAP :	275,28%	0%	INF	0%	0%
FUNÇÃO OBJETIVO:	27,64	11,83	-	17,77	18,11

$$if \text{dist}(i, 0) \leq \text{dist}(j, 0) \text{ then } u_i \leq u_j \text{ end} \quad \forall i, j \in V_c \text{ with } (i \neq j) \quad (4.1)$$

O modelo M2 foi resultado da consideração do modelo M1 e da restrição adicional da equação 4.1, cujos resultados são apresentados na tabela 4.5. É possível observar que esta alteração permitiu que o GAP de otimalidade fosse conduzido a zero, mas novamente apresentou problemas quando o número de veículos é aumentado. Tal situação motivou a inclusão de nova restrição descrita na equação 4.2: todos aquelas ordens com tempo de serviço maiores ou iguais a 40 minutos são atribuídos ao primeiro veículo. Ainda que a otimalidade seja perdida, o resultado alcançado permite que o valor da função objetivo seja posteriormente utilizado como limitante para o problema original.

$$if TS_i \leq 40 \text{ then } y_{i1} = 1 \text{ end} \quad \forall i \in V_c \quad (4.2)$$

Os resultados obtidos com a utilização do modelo M3, que é o modelo M2 acrescido da restrição 4.2, estão apresentados nas colunas 4 e 5 da tabela 4.5, com a utilização de 2 e 3 veículos e com um tempo de resolução de 14,34 segundos e 102,74 segundos respectivamente.

A terceira e última instância utilizada é referente a um conjunto de dados fornecido pela própria concessionária de energia elétrica referente a rota de atendimento de um de seus veículos no momento em que houve a ocorrência de uma ordem emergencial. Com algumas simplificações, os dados de interesse se resumem no que é apresentado na Tabela 4.6. Nota-se que a cada cliente é atribuído uma prioridade (pr) que, neste caso, varia de -1 a 3. A interpretação do valor atribuído a essa prioridade é do tipo de quanto menor, mais urgente é o atendimento

do cliente. Outra informação relevante é que quando há uma ordem emergencial, esta por sua vez é alocada como sendo a última na lista de ordens, nesse caso $n=8$, e a ela atribuída uma preferência $pr=-1$, ou seja, no momento em que esta ordem surgir ela tem preferência absoluta de atendimento com relação as outras além de também ser gerado a informação referente ao instante de tempo (14h30min) em que essa ordem emergencial veio a ocorrer. Uma vez que a jornada de trabalho é de 16h, ou seja, 960 minutos, partindo de um instante zero, o momento de perturbação ocorre em 490 minutos de trabalho, e com a adição de 30 minutos de tolerância foi elaborada a janela de tempo exclusiva à ordem emergencial de acordo com o que é exibido na tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Instância real

Número do Nó (n)	Latitude	Longitude	ts	pr	jc	jp
0	29898329082	51234304836	0	0	0	960
1	29898329082	51234204836	30	2	0	960
2	29898690000	51234180000	30	2	0	960
3	29899861700	51234301327	30	2	0	960
4	29900730000	51235150000	30	3	0	960
5	29901200000	51235990000	30	3	0	960
6	29901210000	51236210000	30	3	0	960
7	29898880000	51232050000	30	3	0	960
8	29897359161	51227188110	30	-1	490	520

Os resultados da tabela 4.7 foram feitos usando essa instância com os dados de janelas de tempo definidos. A fim de complementar os resultados obtidos para este último experimento, foi elaborado uma Tabela 4.8 referente a sequência ideal de atendimentos gerada através da resolução do problema com a utilização do seu respectivo modelo. Mantendo a mesma sequência gradual de ajustes utilizada nos testes anteriores, primeiramente foi verificado o comportamento do modelo M3, e com isso o resultado obtido foi o apresentado na coluna 1 de resultados da Tabela 4.7. O modelo M3 foi desconsiderado neste caso pelo fato de que apenas um veículo seria considerado, tornando a restrição 4.2 dispensável. A eficiência do modelo para resolver esta instância na forma mais simples é confirmada neste momento. Posteriormente a restrição 4.1 é ignorada para que então fosse substituída a restrição 4.3 e, assim, a prioridade atribuída a cada cliente fosse considerada, dando origem ao modelo M4.

$$if (prioridade(j) < prioridade(i)) then u_j \leq u_i end \quad \forall i, j \in V_c \text{ with } i \neq j \quad (4.3)$$

Tabela 4.7 – Resultados utilizando a instância real

Modelo:	M2	M4	M5	M6
Capacidade:	1073	1073	1073	1073
Variáveis:	130	130	130	130
Constantes:	243	226	243	238
"Non Zeros":	750	724	750	738
Tempo de Execução (s):	0,1	0,36	0,07	0,09
Nós de Solução:	1	4	1	1
Soluções:	1	4	1	1
GAP :	0%	0%	0%	0%
Função Objetivo:	186	229,35	190,18	190,18

Tabela 4.8 – Rotas relacionadas aos resultados obtidos para a instância real

- Modelo	-	-	-	-	-	-	-	-
M2	1	2	3	7	4	5	6	8
M4	8	1	2	3	6	5	4	7
M5	1	2	3	7	8	4	5	6
M6	1	2	3	7	8	4	5	6

Novamente a alteração desenvolvida permitiu que o problema fosse resolvido e, assim, partiu-se para estabelecer uma relação entre as restrições 4.1 e 4.3, de modo que fosse possível reduzir o tempo de execução. Com este objetivo, foi desenvolvida uma nova restrição, descrita na equação 4.4, que parte do princípio de que as restrições 4.1 e 4.3 são da mesma natureza, ou seja, quanto menor for o valor de interesse atribuído ao cliente i , menor será o valor de u_i . Também é considerando o fato de que a distância entre cada cliente com o depósito não possuem grandes variações entre si, portanto causando pouca ou nenhuma influência no critério de prioridade. A representação desta nova restrição (PR1) é exibida a seguir, dando origem à definição do modelo M5, que inclui o modelo M1 juntamente com a restrição 4.4.

Definindo que: $prdist(i) = dist(o, i) * prioridade(i)$

Então:

$$if prdist(i) > prdist(j) then u_i \geq u_j end \quad \forall i, j \in V_c with i \neq j \quad (4.4)$$

O resultado obtido com a utilização do modelo M5 foi muito satisfatório, pois além de reduzir significativamente o tempo de execução do modelo, também foi possível melhorar o valor da função objetivo.

O desafio final consistiu em ajustar o modelo a fim de que ele fosse capaz de trabalhar com janelas de tempo para ajustar exclusivamente o instante de tempo em que há o surgimento da ordem emergencial com o instante de tempo em que ela é atendida. Para tanto, supôs-se que,

a partir da análise estatística do histórico das ordens emergenciais, fosse comprovado que uma determinada ordem emergencial acontece em determinado instante de tempo a ser previsto.

Dessa forma, a estratégia adotada foi declarar a existência de dois subconjuntos de V_c , um deles envolvendo apenas os clientes/ordens comuns (SV_{cc}) e outro com os clientes/ordens emergenciais (SV_{ce}). A intenção com a criação de grupos para distinguir ordens emergenciais das ordens comuns seria acionar a restrição de janela de tempo apenas para as ordens emergenciais, uma vez que se essas dependessem apenas do critério de prioridade e seriam alocadas de imediato na rota. No entanto, sabe-se que a prioridade desta ordem se torna válida apenas no momento em que a mesma é requerida, ou seja, no instante de abertura de sua janela tempo (JC_8). Para as demais ordens foi considerado os índices de prioridade assim como a janela de tempo da rota. Uma vez determinado que e é um parâmetro com seu valor atribuído manualmente e relacionado ao número de ordens emergenciais existentes, a forma com que foi declarada esses dois subconjuntos é exibida a seguir:

$$SV_{cc} = \{1 \text{ to } (n - e)\} \quad (4.5)$$

$$SV_{ce} = \{(n - e + 1) \text{ to } n\} \quad (4.6)$$

Tendo feito esta declaração, alteramos o conjunto ao qual pertencia i e j na restrição 4.4, obtendo assim a restrição 4.7, e também foi feito com que a restrição de janela de tempo 3.15 acionada exclusivamente para as ordens emergenciais, originando a restrição 4.8. A forma com que estas modificações foram feitas está representada a seguir e constroem o M6.

Restrição PR1:

$$\textit{if } prdist(i) > prdist(j) \textit{ then } u_i \geq u_j \textit{ end} \quad \forall i, j \in SV_{cc} \textit{ with } i \neq j \quad (4.7)$$

Restrição de Janela de Tempo:

$$jc_i \leq t_i \leq jp_i \quad \forall i \in SV_{ce} \quad (4.8)$$

Os resultados do teste envolvendo o modelo M6 estão exibidos nas tabelas 4.7 e 4.8, onde pode ser observado o excelente desempenho por parte do modelo ao conseguir dar suporte às alterações efetuadas de modo que as peculiaridades do cenário fossem relevantes para o desenvolvimento de uma solução para o problema e ao mesmo tempo sendo capaz de encontrar esta solução em um tempo significativamente baixo.

Com isso foi feita uma breve comparação entre o resultado da função objetivo, que é a minimização da distância total percorrida na rota, através da utilização do modelo M6, com

a distância total percorrida na rota considerando a sequência de atendimentos que foi de fato efetuada segundo o conjunto de dados que nos foi fornecido. Esta comparação é demonstrada na Tabela 4.9, e nela podemos observar a clara otimização, no valor de 22,43 unidades de distância (em km) do valor referente ao deslocamento total da rota entre as duas alternativas.

Tabela 4.9 – Comparação entre a rota que foi realizada com a que foi encontrada através do modelo desenvolvido

Alternativas	Rota de atendimento								Deslocamento Total
M6	1	2	3	7	8	4	5	6	190,18
Sequência realizada	1	2	3	4	5	6	8	7	212,61

Analisando esta diferença de valores em unidade de tempo, considerando a velocidade média do veículo como sendo de 30km/h, verifica-se que o a resolução do problema proporcionou um acréscimo de 45 minutos no tempo disponível das equipes para o atendimento.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma abordagem baseada em programação matemática para solucionar o problema de roteamento de veículos com janela de tempo, na tentativa de incorporar as características de um possível roteamento dinâmico.

Foi possível constatar que o desafio para a definição de um bom modelo matemático é a correta avaliação da dimensionalidade da instância em estudo, além do adequado levantamento dos requisitos de operação e das características pertinentes ao problema. Esses aspectos podem auxiliar na elaboração de restrições adicionais que possibilitem soluções sub-ótimas, a fim de representarem bons limitantes para soluções do modelo original.

Os estudos práticos elaborados se mostraram significativamente relevantes, uma vez que otimizações de rotas de atendimento de demanda são essenciais em qualquer tipo de organização que trabalhe com tal serviço. Neste contexto uma rota mal planejada e dimensionada pode causar um forte impacto nos custos relacionados, principalmente, no deslocamento de veículos, que podem ser entendidos como sendo, custos envolvendo combustível, desgaste do veículo e entre outros.

A principal contribuição do presente trabalho é então o estabelecimento de um modelo conceitual que inclua as características do problema de roteamento com janelas de tempo a fim de permitir que ela seja próximo de um modelo capaz de ser aplicado em instâncias práticas em

tempo real. Tal contexto enseja o desenvolvimento de abordagens proativas de roteamento de veículos, a fim de possibilitarem um tempo de resposta adequado.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa Operacional**. Campus, 2007.
- BODIN, L.; GOLDEN, B.; ASSAD, A. et al. **Routing and Scheduling of vehicles and crews: the state of the art**. England, Pergamon Press, vol. 10. n. 2, 1983.
- EKSIOGLU, Burak; VURAL, Arif V.; REISMAN, Arnold. The Vehicle Routing Problem: **A Taxonomic Review**. Computers & Industrial Engineering, Elsevier Ltd. p. 1472 1483, 2009.
- FISHER, M.; JAIKUMAR, R. A Generalized Assignment Heuristics For Vehicle Routing. **Networks**. v.11, n.2, p.109-124, 1981.
- G.B. Dantzig; J.H. Ramser. **Management Science**, v. 6,n. 1, p. 80 91, 1959.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 3.ed. São Paulo, 2010.
- G. Laporte. **The vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms**. European journal of Operational Research, vol 50, 1992.
- GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. **Otimização e Programação Linear**. Editora Campus. 2ªEd. Rio de Janeiro. 2005.
- LARSEN, A.; MADSEN, O.; SOLOMON, M.. Partially Dynamic Vehicle Routing: **Models and Algorithms**. Jornal of the Operational Research Society, v. 53, p. 637 646, 2002.
- Li, Jing-Quan; MIRCHANDANI, Pitu B.; BORENSTEIN, Denis. **Real-time Vehicle Rerouting Problems with Time Windows**. European Journal of Operational Research, v. 194, p. 711 727, 2009.
- M. R. GAREY; D. S. JOHNSON. **Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness**. W. H. Freeman, San Francisco, CA, 1979
- MELAMED, I. I.; SERGEEV, S. I.; SIGAL, I. Kh. The Traveling Salesman Problem. **Surveys**: Plenum Publishing Corporation, 1990.
- PSARAFTIS, Harilaos N. Dynamic Vehicle Routing: **Status and Prospects**. Annals of Operations Research, v. 61, p. 143 164, 1995.
- PILLAC, V.; GUERET, C.; MEDAGLIA, A. L. **An Event-driven Optimization Framework for Dynamic Vehicle Routing**. European Journal of Operational Research 225, 2013.

ZIMPL. Disponível em:<<http://zimpl.zib.de>>. Acesso em 9 abril 2015.

SCIP. Disponível em:<<http://scip.zib.de>>. Acesso em 9 abril 2015.

7 APÊNDICES

Apêndice A:

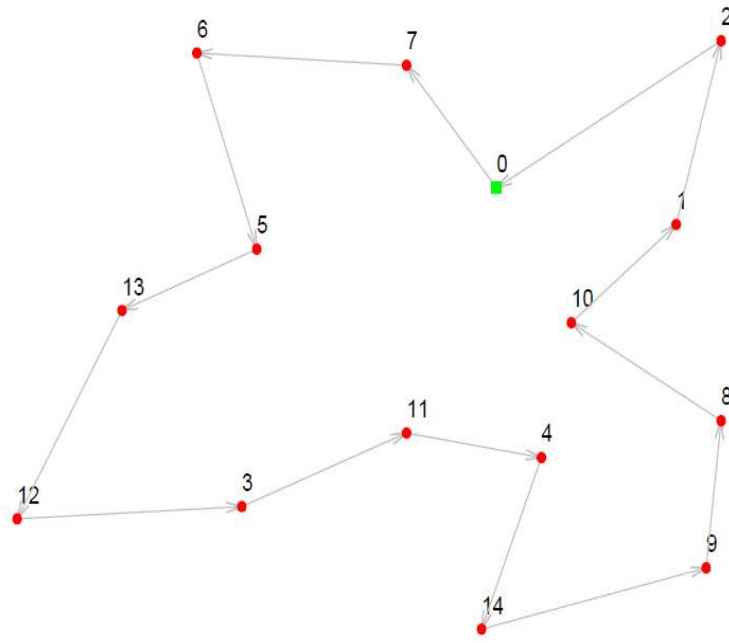


Figura 7.1 – Rota para a instância de 15 clientes envolvendo 1 veículo.

Apêndice B:

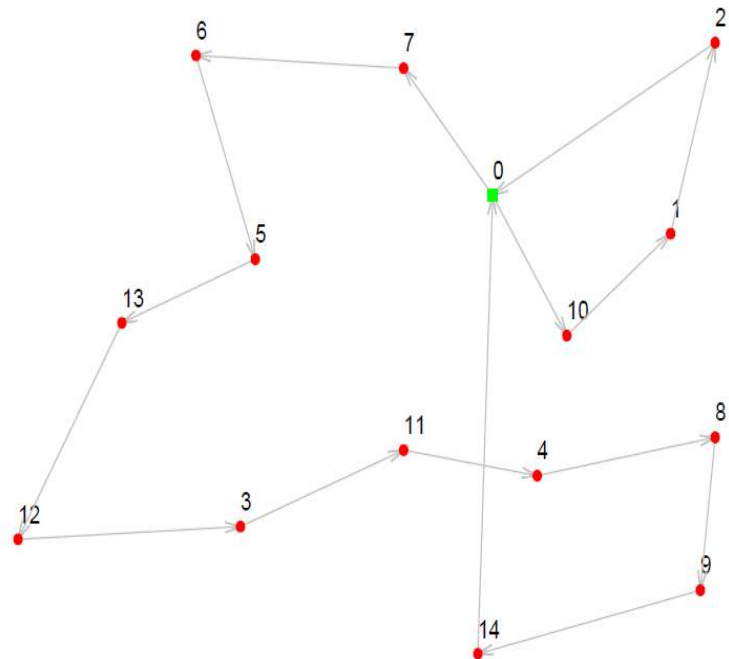


Figura 7.2 – Rota para a instância de 15 clientes envolvendo 2 veículos.

Apêndice C:

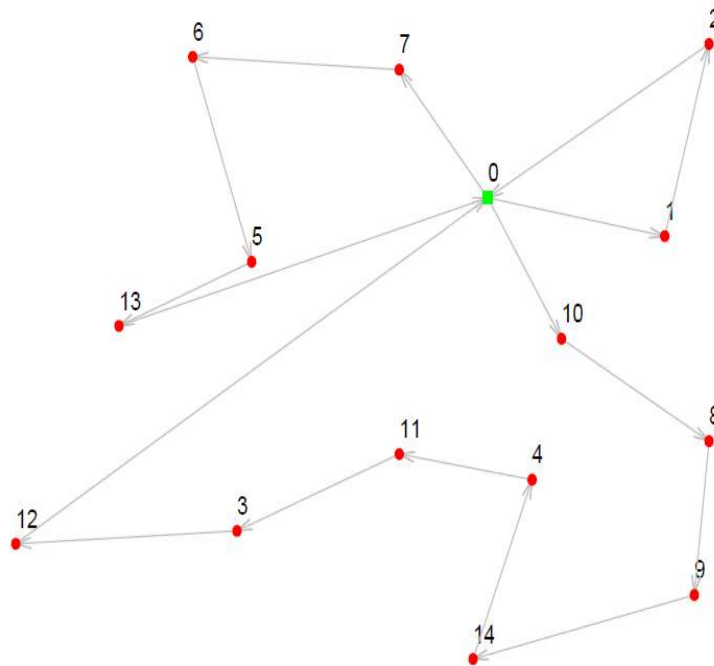


Figura 7.3 – Rota para a instância de 15 clientes envolvendo 3 veículos.

Apêndice D:

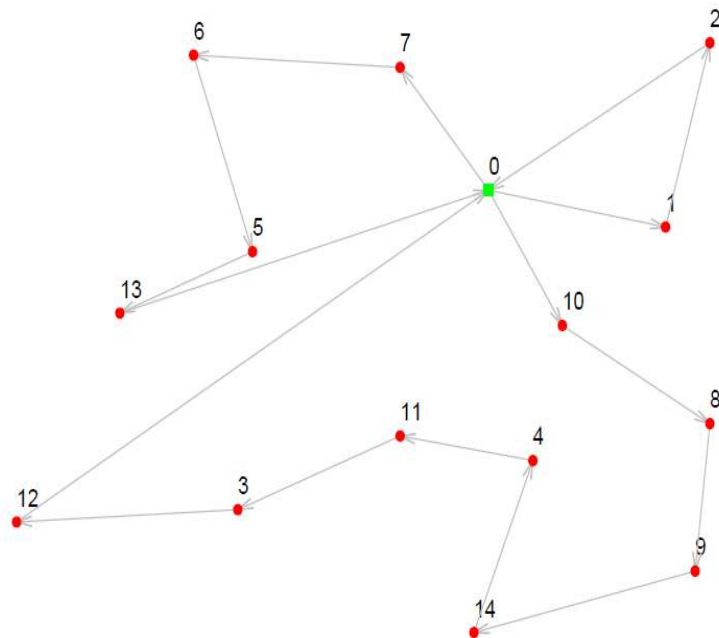


Figura 7.4 – Rota para a instância de 15 clientes envolvendo 4 veículos.

Apêndice E:

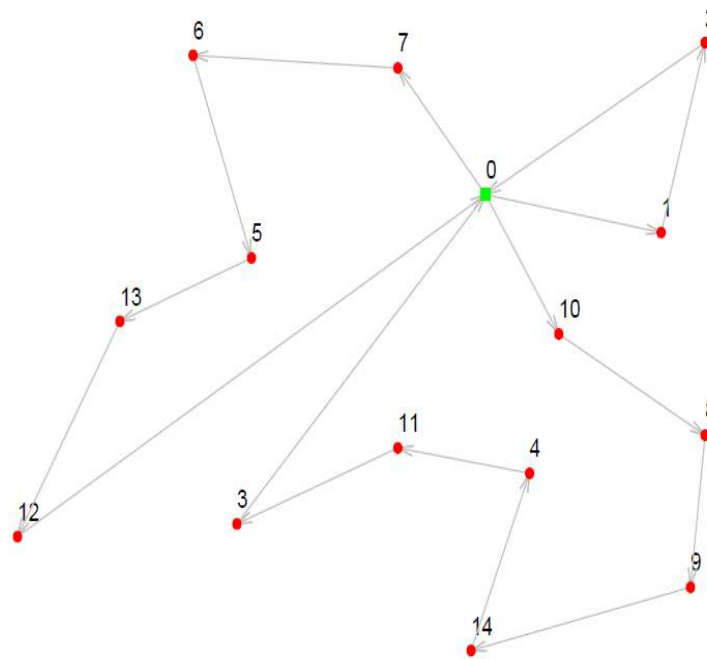


Figura 7.5 – Rota para a instância de 15 clientes envolvendo 5 veículos.

Apêndice F:

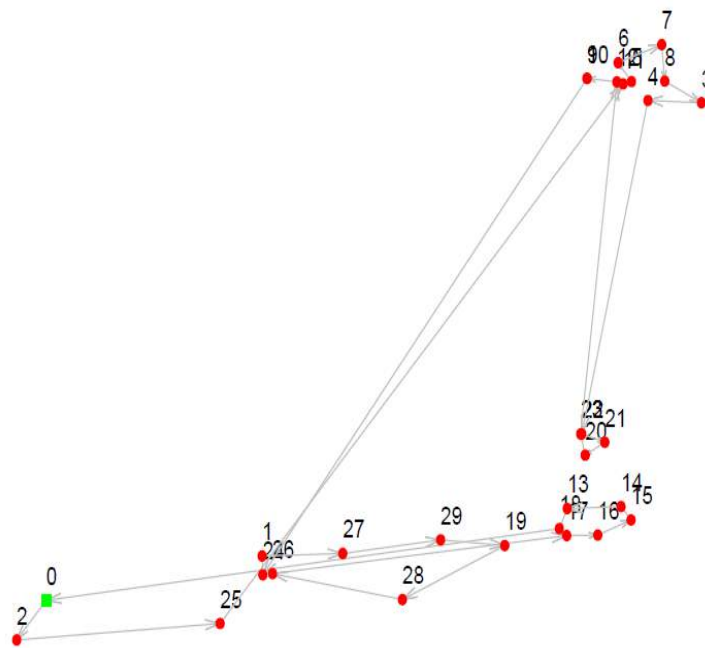


Figura 7.6 – Rota para a instância de 30 clientes envolvendo 1 veículo utilizando o modelo M1.

Apêndice G:

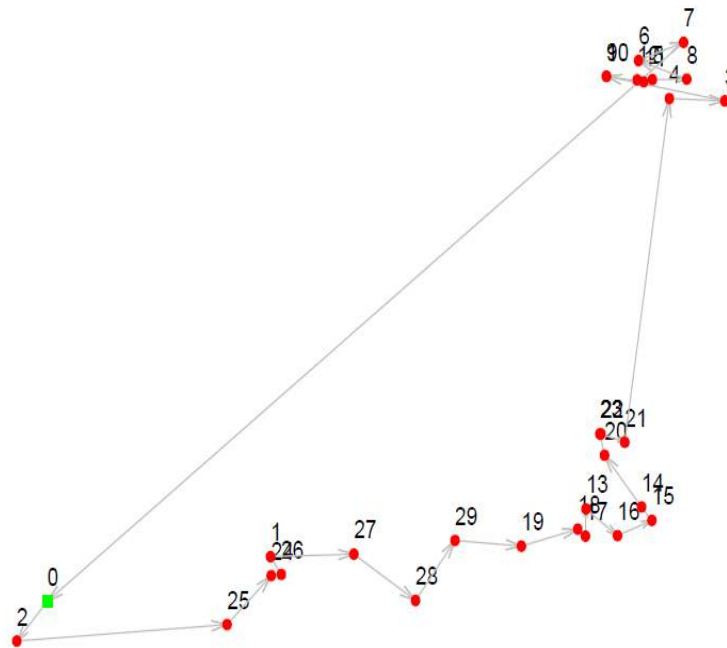


Figura 7.7 – Rota para a instância de 30 clientes envolvendo 1 veículo utilizando o modelo M2.

Apêndice H:

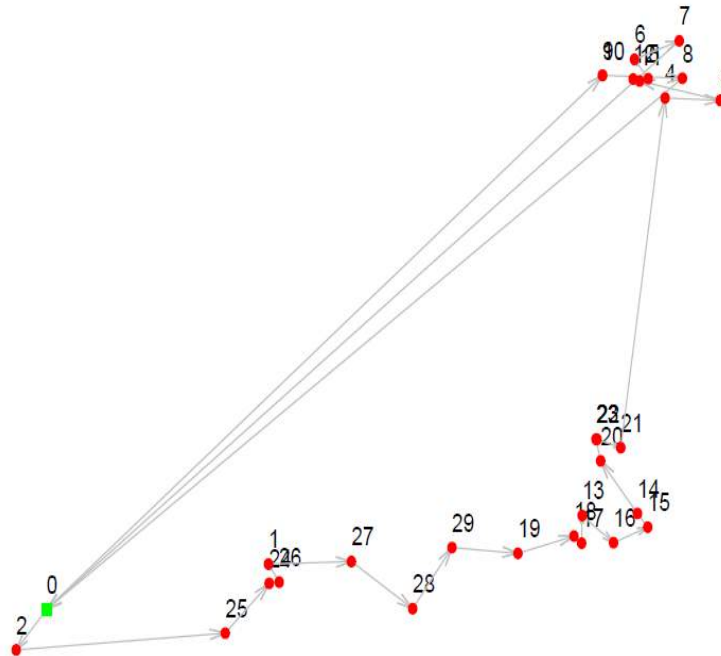


Figura 7.8 – Rota para a instância de 30 clientes envolvendo 2 veículos utilizando o modelo M3.

Apêndice I:

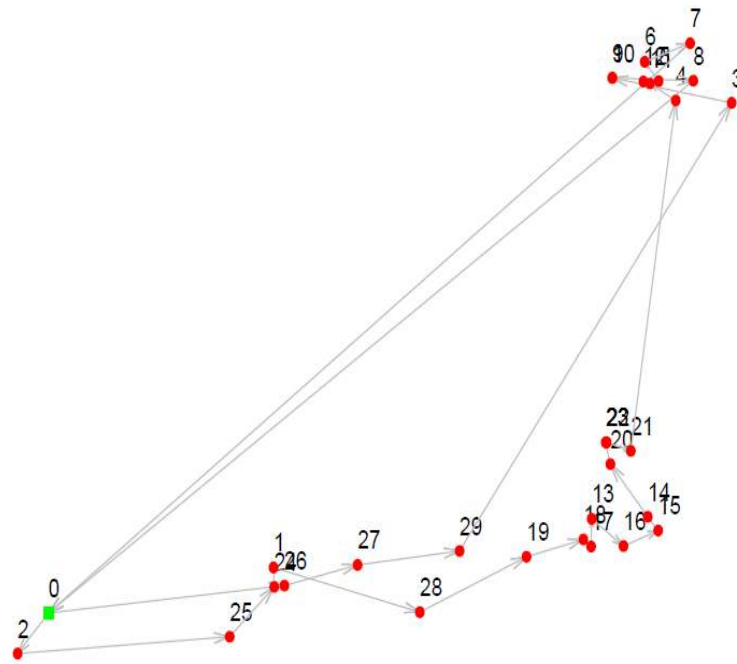


Figura 7.9 – Rota para a instância de 30 clientes envolvendo 3 veículos utilizando o modelo M3.

Apêndice J:

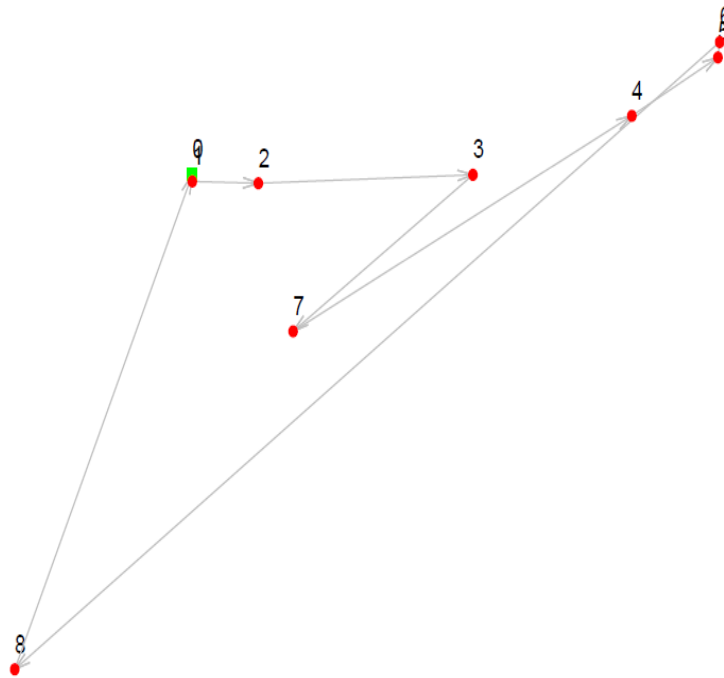


Figura 7.10 – Rota para a instância real utilizando o modelo M2.

Apêndice M:

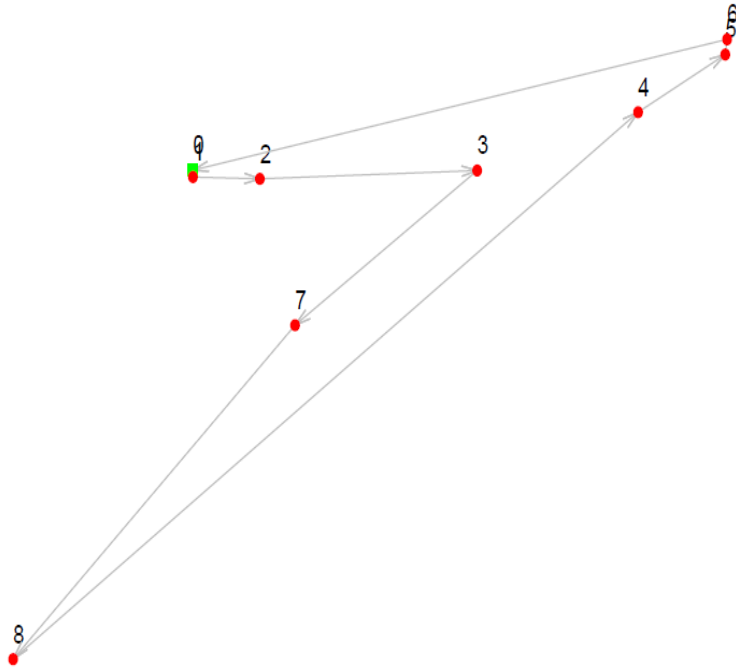


Figura 7.13 – Rota para a instância real utilizando o modelo M6.