



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**ANÁLISE E MODELAGEM DO ATENDIMENTO DE
ORDENS DE SERVIÇO EMERGENCIAIS EM
CONCESSIONÁRIAS DE ENERGIA ELÉTRICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Bianca Jupiara Fortes

Santa Maria, RS, Brasil

2015

**ANÁLISE E MODELAGEM DO ATENDIMENTO DE ORDENS
DE SERVIÇO EMERGENCIAIS EM CONCESSIONÁRIAS DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Bianca Jupiara Fortes

Projeto de Dissertação apresentado ao curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, na área de concentração Métodos Quantitativo para a Tomada de Decisão da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia de Produção**

Orientador: Prof. Dr. Felipe Martins Müller

Santa Maria, RS, Brasil

2015

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Fortes, Bianca Jupiara

Análise e modelagem do atendimento de ordens de serviço emergenciais em concessionárias de energia elétrica / Bianca Jupiara Fortes.-2015.

92f.; 30cm

Orientador: Felipe Martins Müller

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, RS, 2015

1. Ordens de emergência 2. Roteamento de veículos 3. Concessionárias de energia elétrica 4. Análise hierárquica de processos 5. Critérios de decisão I. Müller, Felipe Martins II. Título.

© 2015

Todos os direitos autorais reservados a Bianca Jupiara Fortes. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: bifortes22@gmail.com

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

A comissão examinadora, abaixo assinada, aprova o Projeto de
Dissertação de Mestrado

**ANÁLISE E MODELAGEM DO ATENDIMENTO DE ORDENS DE
SERVIÇO EMERGENCIAIS EM CONCESSIONÁRIAS DE ENERGIA
ELÉTRICA**

Elaborado por
Bianca Jupiara Fortes

como requisito para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia de Produção

COMISSÃO EXAMINADORA:



Felipe Martins Müller, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Daniel Pinheiro Bernardon, Dr. (UFSM)

Eugênio de Oliveira Simonetto, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 26 de março de 2015.

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo, a Deus, por mais essa etapa vencida. Por me amparar nos momentos difíceis, me dar força interior para superar as dificuldades, mostrar o caminho nas horas incertas e me suprir em todas as minhas necessidades.

À minha família, a qual amo muito, primeiramente a minha Mãe Nássera, minha maior incentivadora. Não há palavras no mundo que expressem o quanto sou grata por todo o esforço e dedicação de uma vida que doaste à nossa família. Sempre será meu maior exemplo e um dia espero ser a profissional e professora brilhante que tu és! E o meu Pai Aristóteles, pois se hoje estou aqui, devo muitas coisas a ele, seus ensinamentos, princípios e valores passados, me mostrando o caminho da honestidade, o amor e a fé em Deus.

Agradeço aos meus amados irmãos Carlito e Natiane por sua ajuda nos momentos mais difíceis, por acreditarem na realização desta etapa e contribuírem para o meu crescimento pessoal e profissional, por sempre estarem ao meu lado me aconselhando nos momentos bons ou ruins, para sempre farão parte da minha vida e estarão em meu coração.

Aos meus orientadores e amigos Prof. Dr. Felipe Martins Müller e Prof. Dr. Vinícius Jacques Garcia, meus grandes mestres que me orientaram incansavelmente nestes anos. E ao meu orientador desde a graduação que me incentivou a entrar no mestrado Prof. Msc. Roberto Portes Ribeiro. Agradeço a todos vocês por acreditarem em mim, me mostrarem o caminho da ciência, por acreditarem no futuro deste projeto e contribuírem para o meu crescimento profissional, são também exemplos a serem seguidos. Sua participação foi fundamental para a concretização desta jornada.

Aos meus eternos colegas e grandes amigos, os quais fizeram parte desses momentos sempre me ajudando e incentivando, em especial: Camila Ribeiro Camargo, Lucas Charão Brito, Fabiana Milesi, Estéfane Stertez, Fabiane Silver e Iochane Guimarães. Sou grata a vocês que sempre estiveram do meu lado dando força e apoio, mais que amigos vocês são irmãos! Ter cada um de vocês ao meu lado foi fundamental para chegar até aqui.

Por fim, a todos os colegas, professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da UFSM, ao coordenador Professor Dr. Júlio Siluk e a nossa secretária Márcia Meneghini dos Santos, os quais sempre serão um exemplo de exímios profissionais.

A estes dedico meu trabalho, sem a ajuda, confiança e compreensão de todos, este sonho não teria se realizado. Fica o meu muito obrigada!

É muito melhor arriscar coisas grandiosas, alcançar triunfos e glórias, mesmo expondo-se a derrota, do que formar fila com os pobres de espírito que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem nessa penumbra cinzenta que não conhece vitória nem derrota.

(Theodore Roosevelt)

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa Pós Graduação em Engenharia de Produção
Universidade Federal de Santa Maria

ANÁLISE E MODELAGEM DO ATENDIMENTO DE ORDENS DE SERVIÇO EMERGENCIAIS EM CONCESSIONÁRIAS DE ENERGIA ELÉTRICA

AUTOR: BIANCA JUPIARA FORTES

ORIENTADOR: FELIPE MARTINS MÜLLER

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 26 de março de 2015.

O cenário do setor de energia elétrica têm demandado das concessionárias o emprego de diversas estratégias para o alcance da eficiência dos serviços prestados aos seus clientes e no cumprimento de importantes requisitos exigidos pelos órgãos reguladores. Nesse contexto, destaca-se o setor mais específico relacionado com o atendimento de ordens de serviço, particularmente as ordens de serviço emergenciais, justamente porque essa demanda relaciona um alto custo e uma criticidade considerável quanto à natureza dos serviços e às consequências da sua efetividade. Este trabalho busca desenvolver o diagnóstico dos fatores críticos determinantes para o alcance da eficiência na execução de tais serviços, a partir do uso de técnicas de modelagem matemática do problema de otimização relacionado: o Problema de Roteamento de Veículos (PRV). O objetivo foi elaborar uma representação que reproduzisse as características essenciais do processo de despacho, trabalhando com critérios de decisão no momento em que surgem chamadas de caráter emergencial para atendimento das equipes das concessionárias quando já existe uma rota pré-estabelecida com ordens comerciais programadas. O principal escopo do estudo se refere a consideração de dois critérios para análise na tomada de decisão, o Tempo de espera emergencial ($T.E$) e o Tempo de espera comercial ($T.C$), e a aplicação da metodologia multicritério da Análise Hierárquica de Processos – AHP para a classificação das alternativas. A modelagem desenvolvida, aliada à técnica de classificação das soluções alternativas encontradas, evidenciou a relevância de considerar o tempo de espera dos atendimentos e os resultados práticos obtidos apontam para a conveniência da aplicação da metodologia AHP junto ao PRV no setor de distribuição de energia elétrica.

Palavras-chave: Ordens de emergência. Roteamento de veículos. Concessionárias de energia elétrica. Análise hierárquica de processos. Critérios de decisão.

ABSTRACT

Master Degree Dissertation
Post-Graduation In Production Engineering
Universidade Federal de Santa Maria

MODELING AND ANALYSIS OF EMERGENCY ORDERS IN ELECTRIC POWER UTILITIES

AUTHOR: BIANCA JUPIARA FORTES

ADVISOR: PROF. DR. FELIPE MARTINS MÜLLER

Place and date of defense: Santa Maria, march 26, 2015.

Much effort has been made by electric power distribution utilities in order to attend the Brazilian regulating policies, especially those ones related to manage customer and technical requests. In this context, one issue must be carefully observed: the emergency work orders. This importance is due to the economic impact of interrupting power supply or even to the dangerous of eventual damages caused non-specified operation of certain equipment, typically energized conductors. This work attempts to develop a diagnostic of the most critical aspects related to the efficiency when executing these emergency services, from the use of mathematical modeling techniques to solve the optimization problem related: the vehicle routing problem (VRP). The goal was to develop a representation that reproduce the essential characteristics of the order process, working with decision criteria when they arise emergency nature calls for service teams of dealers when there is already a preset with scheduled commercial route orders. The main scope of this study refers to the consideration of two criteria for multi-criteria analysis in decision making, the emergency waiting time has ($T.E$) and the non-emergency waiting time ($T.C$) using the multi-criteria methodology Analytic Hierarchy Process (AHP) to the classification of these criteria, in order to find a classification among the alternative solutions. The proposed mathematical modeling, together with the classification of alternative solutions, allow one to conclude the convenience of considering the waiting time as criteria to optimize service solutions and practical results has pointed out how suitable is to apply the proposed decision making methodology to the VRP related the management of services in power distribution utilities.

Keywords: Emergency work orders. Vehicle routing. Electric power utilities. Analytic hierarchy process. Multi-criteria Decision making.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Processo de atendimentos dos serviços em uma rede elétrica	36
Figura 2 –	Formação das rotas considerando as demandas já conhecidas	43
Figura 3 –	Definição de rotas considerando as demandas já conhecidas	44
Figura 4 –	Definição de rotas sem atender a ordem de emergência	47
Figura 5 –	Definição de rotas sem atender a ordem de emergência	47
Figura 6 –	Definição de rotas sem atender a ordem de emergência	47
Figura 7 –	Definição de rotas atendendo a ordem de emergência	48
Figura 8 –	Definição de rotas atendendo a ordem de emergência	49
Figura 9 –	Definição de rotas considerando a ordem de emergência para o Caso 2	49
Figura 10 –	Definição de rotas com o atendimento da ordem de emergência	50
Figura 11 –	Definição de rotas com o atendimento da ordem de emergência	50
Figura 12 –	Definição de rotas considerando a ordem de emergência para o Caso 3	51
Figura 13 –	Definição de rotas com o atendimento da ordem de emergência	52
Figura 14 –	Definição de rotas com o atendimento da ordem de emergência	52
Figura 15 –	Definição de rotas considerando a ordem de emergência para o Caso 4	52
Figura 16 –	Definição de rotas com o atendimento da ordem de emergência	53
Figura 17 –	Definição de rotas com o atendimento da ordem de emergência	53
Figura 18 –	Definição de rotas considerando a ordem de emergência para o Caso 5	54
Figura 19 –	Definição de rotas com o atendimento da ordem de emergência	54
Figura 20 –	Definição de rotas com o atendimento da ordem de emergência	55
Figura 21 –	Definição de rotas considerando a ordem de emergência para o Caso 6	55
Figura 22 –	Definição de rotas com o atendimento da ordem de emergência	56
Figura 23 –	Definição de rotas com o atendimento da ordem de emergência	56
Figura 24 –	Definição de rotas considerando a ordem de emergência para o Caso 7	57
Figura 25 –	Definição de rotas com o atendimento da ordem de emergência	58
Figura 26 –	Definição de rotas com o atendimento da ordem de emergência	58
Figura 27 –	Definição de rotas considerando a ordem de emergência para o Caso 8	58
Figura 28 –	Definição de rotas com o atendimento da ordem de emergência	59
Figura 29 –	Definição de rotas com o atendimento da ordem de emergência	59
Figura 30 –	Definição de rotas considerando a ordem de emergência para o caso 9	60
Figura 31 –	Conjunto de Soluções para os 9 Casos	63
Figura 32 –	Conjunto de Soluções para os 9 Casos elaborados no capítulo 5	67
Figura 33 –	Resumo dos cálculos do AHP de priorização do critério $T.E$ (Caso 1 ao 3)	72
Figura 34 –	Resumo dos cálculos do AHP de priorização do critério $T.E$ (Caso 4 ao 5)	73
Figura 35 –	Resumo dos cálculos do AHP de priorização do critério $T.E$ (Caso 7 ao 9)	73
Figura 36 –	Classificação dos Casos com a Metodologia AHP	74
Figura 37 –	Conjunto de Soluções para o Estudo de Caso 1	77
Figura 38 –	Classificação do Caso 1 com a Metodologia AHP	78
Figura 39 –	Rotas das equipes com o atendimento das emergências para o Caso 1	79
Figura 40 –	Conjunto de Soluções para o Estudo de Caso 2	81
Figura 41 –	Classificação do Caso 2 com a Metodologia AHP	83
Figura 42 –	Rotas das equipes com o atendimento das emergências para o Caso 2	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição da instância considerada.....	42
Tabela 2 – Matriz de distâncias em minutos.....	43
Tabela 3 – Descrição da instância considerando a ordem de emergência	45
Tabela 4 – Matriz de distâncias em minutos considerando a ordem de emergência	45
Tabela 5 – Resultados dos tempos totais de todas as rotas	62
Tabela 6 – Comparação dos Tempos totais de espera das ordens comerciais e emergenciais.....	62
Tabela 7 – Tempos totais de espera das ordens comerciais e emergenciais	67
Tabela 8 – Classificação dos Pesos priorizando o critério $T.E$	71
Tabela 9 – Classificação dos Pesos priorizando o critério $T.C$	71
Tabela 10 – Classificação dos Pesos com importância equivalentes dos critérios	72
Tabela 11 – Custos para os tempos de espera das ordens emergenciais e comerciais de cada solução alternativa para o estudo de caso 1	76
Tabela 12 – Classificação dos Pesos priorizando o critério CT_E para o estudo de caso 1	78
Tabela 13 – Custos para os tempos de espera das ordens emergenciais e comerciais de cada solução alternativa para o estudo de caso 1	80
Tabela 14 – Classificação dos Pesos priorizando o critério $T.E$ para o estudo de caso 2	82

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Descrição dos dados e variáveis do modelo proposto.....	38
Quadro 2 – Resultados para a rota programada a <i>priori</i>	44
Quadro 3 – Tempos de rota e espera quando não atende-se a ordem de emergência	48
Quadro 4 – Resultados com o atendimento da emergência para o Caso 2.....	49
Quadro 5 – Resultados com o atendimento da emergência para o Caso 3.....	51
Quadro 6 – Resultados com o atendimento da emergência para o Caso 4.....	53
Quadro 7 – Resultados com o atendimento da emergência para o Caso 5.....	54
Quadro 8 – Resultados com o atendimento da emergência para o Caso 6.....	55
Quadro 9 – Resultados com o atendimento da emergência para o Caso 7.....	57
Quadro 10 – Resultados com o atendimento da emergência para o Caso 8.....	59
Quadro 11 – Resultados para com o atendimento da emergência para o Caso 9.....	60
Quadro 12 – Escala Fundamental de Saaty	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	– Agência Nacional de Energia Elétrica
AHP	– Analytic Hierarchy Process
DEC	– Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
OE	– Ordem Emergencial
OSE	– Ordem de Serviço Emergencial
CHI	– Cliente Hora Interrompido
DTRP	– Problema Dinâmico do Reparador Viajante
PCV	– Problema do Caixeiro Viajante
PRODIST	– Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PRV	– Problema de Roteamento de Veículos
PRVD	– Problema de Roteamento de Veículos Dinâmico
PRVDE	– Problema do Roteamento de Veículos com Demanda Estocástica
TE	– Tempo de espera emergencial
TC	– Tempo de espera comercial
TMAE	– Tempo Médio de Atendimento a Ocorrências de Emergência
TMD	– Tempo Médio de Deslocamento
TME	– Tempo Médio de Execução
TMP	– Tempo Médio de Preparação das Equipes de Atendimento de Emergência

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
1.1 Justificativa	14
1.2 Objetivos.....	15
1.2.1 Objetivo geral	16
1.2.2 Objetivos específicos	16
1.3 Estrutura do trabalho	16
2 REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1 Elementos relevantes do Setor elétrico brasileiro.....	18
2.2 Soluções de pesquisa operacional para atendimentos de emergência	21
2.3 Método Multicritério e a Análise Hierárquica de Processos (Analytic - AHP)	26
3 METODOLOGIA.....	29
3.1 Definição do problema	29
4 O MODELO MATEMÁTICO PARA O PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS (PRV)	33
5 ESTUDO DE CASO: UM EXEMPLO DIDÁTICO DO PRV PARA ORDENS DE SERVIÇO EMERGENCIAIS	41
5.1 Discussão dos resultados	61
6 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA AHP PARA A TOMADA DE DECISÃO NO ROTEAMENTO DE ORDENS EMERGENCIAIS.....	65
6.1 Processo Analítico Hierárquico – (Analytic Hierarchy Process - AHP).....	65
7 RESULTADOS: ESTUDO DE CASOS COM DADOS REAIS	75
7.1 Estudo de caso 1.....	75
7.2 Estudo de caso 2.....	79
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	85
REFERÊNCIAS	87

INTRODUÇÃO

Há mais de 50 anos, os Problemas de Roteamento de Veículos (PRV) têm sido objeto de pesquisa e estudo intensivo em razão da sua natureza combinatória (TOTH e VIGO, 2002) e também devido as suas possíveis aplicações em diversas áreas, incluindo os mais diversos problemas de transporte (VIDAL et al., 2012).

Ao mesmo tempo, a presença cada vez mais representativa do setor de serviços na economia têm feito o relacionamento das empresas com seus clientes se tornar mais significativa. O setor de distribuição de energia elétrica corresponde a um exemplo típico, porque relaciona um serviço essencial à população e contempla o atendimento às solicitações de serviços de clientes ou mesmo de reparos na rede elétrica. Neste trabalho serão contemplados apenas os serviços com caráter emergencial, associados com inconformidades no funcionamento da rede, como por exemplo a interrupção no fornecimento (ANEEL, 2012).

O gerenciamento das ordens emergenciais é realizado tipicamente nos centros de operação das companhias de distribuição e visa minimizar o tempo de atendimento, além de ponderar sobre eventuais fatores críticos que podem levar a uma priorização no atendimento. Tal descrição sugere um escopo muito promissor para o emprego de uma metodologia para decisão que inclua características próprias da natureza dos atendimentos e também questões impositivas determinadas pelo regular (ANEEL). Uma das dificuldades adicionais se refere à consideração de equipes de atendimento multitarefa, que geralmente estão incumbidas de serviços programados *a priori* quando as solicitações de atendimento emergencial ocorrem, evidenciando o aspecto dinâmico.

Deste modo, para tratar este problema, necessita-se de uma análise voltada às características deste cenário, das decisões práticas tomadas cotidianamente nos centros de operação e da importância relativa aos critérios que estão envolvidos nesta decisão. Aliado a isso, é pertinente também um estudo sobre o método de roteamento de veículos, referente aos vários tipos de trabalhos já existentes como o emprego de heurísticas que contemplem diversos critérios de decisão.

O foco deste trabalho é exatamente a combinação de heurísticas e métodos de tomada de decisão para tratamento de um problema matematicamente definido que envolve vários critérios. Corroborando com a relevância deste foco de estudo, Eksioglu et al. (2009) afirma que o PRV já gerou uma vasta literatura suficiente para permitir que ele seja considerado

como um campo separado e distinto de conhecimento. E justamente deste contexto de despacho de ordens emergenciais com a aplicação do PRV, é que advém o escopo deste trabalho, que relaciona a gestão de serviços emergenciais buscando maior eficiência com a minimização do tempo de atendimento das concessionárias de energia elétrica.

Neste sentido, objetivou-se a demonstração da relevância de se considerar tempos de espera, e não somente os tempos de distâncias para o problema de atendimento de serviço, em específico considerando os critérios de Tempo de espera de ordens emergenciais ($T.E$) e o Tempo de espera de ordens comerciais ($T.C$). Desta forma, visando alcançar uma melhor resolução do problema e maior confiabilidade na decisão, aplicou-se a metodologia multicritério denominada Análise Hierárquica de Processos – AHP, evidenciando o suporte que ela oferece na tomada de decisão para a seguinte questão: a qual a melhor alocação das ordens emergenciais nas rotas já programadas para as ordens comerciais.

Para tanto, a partir de alternativas geradas pelo uso do PRV, executa-se a classificação obtida pela metodologia AHP na medida que atribui peso a cada alternativa e, com isso, torna mais facilitada a tarefa do decisor.

1.1 Justificativa

A principal justificativa para o estudo do gerenciamento do atendimento de ordens de serviço se refere à relevância do setor de distribuição de energia elétrica na economia e também ao custo que estes serviços podem representar para as empresas anualmente. Tal relevância demanda muita responsabilidade e monitoramento de todos os tipos de detalhes, visando evitar que a qualidade do serviço seja prejudicada (FAGUNDES, 2005). Além disso, o atendimento a serviços de campo representa um processo complexo por envolver diversas atividades como: o recebimento da solicitação; a programação e designação das equipes de atendimento; a priorização no atendimento dos pedidos; o processamento do reparo; o gerenciamento do custo e do prazo do atendimento (LIN E AMBLER, 2005).

Neste contexto, destaca-se a relevância da busca pelo equilíbrio entre o atendimento dos parâmetros de regulação com o menor custo, que justamente se alcança buscando aprimorar processos e incorporar tecnologias que possibilitem o melhor aproveitamento dos recursos disponíveis, o qual inclui a análise de alternativas e características do problema de

despacho de ordens emergenciais. Além de fatores econômicos, também deve ser considerada a eficiência das equipes de atendimento das emergências a fim de manter os níveis de qualidade desejados. A ANEEL estabelece indicadores para o acompanhamento e controle do desempenho das distribuidoras, em relação à qualidade dos serviços prestados e da energia fornecida.

As técnicas de programação e modelagem matemática representam uma boa alternativa na representação dos processos de negócio que guardem pertinência com alguma oportunidade de otimização. Um dos problemas relacionados é roteamento de veículos (PRV), um problema clássico de otimização combinatória (TOTH E VIGO, 2002). Conforme Vidal et al. (2012), a gama extremamente ampla de aplicações reais, onde se encontram problemas de roteamento, conduz à definição de muitas variantes de PRV com as características e as limitações adicionais de modo a captar um maior nível de detalhe do sistema ou opções de decisão. Dada a vasta literatura do PRV, a identificação de elementos fundamentais para as heurísticas é de interesse primordial, devendo-se pesquisá-los e analisá-los visando o progresso em direção ao desenvolvimento de algoritmos para o PRV que sejam generalistas e eficientes.

O desenvolvimento desta dissertação está fundamentado no levantamento dos aspectos inerentes ao cenário de despacho das ordens emergenciais, fazendo uso de algoritmos já desenvolvidos em trabalhos anteriores que proporcionem soluções alternativas em relação ao critério definido: o tempo de espera. A partir destas soluções alternativas, a classificação e escolha de uma delas representa o processo de tomada de decisão para o qual empregou-se o processo analítico hierárquico de análise (AHP).

Finalmente, a realização deste trabalho apresenta relevância acadêmica porque configura uma boa oportunidade de agregar os resultados científicos relacionados ao roteamento de veículos, com destaque para aqueles oriundos da sua aplicação em despacho de ordens de serviço.

1.2 Objetivos

A definição de objetivos é fundamental para responder ao problema de pesquisa. Portanto, tem-se neste estudo:

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo do trabalho consiste em descrever, modelar e comparar as características e os critérios de Tempo de espera Emergencial e Comercial para o cenário do problema de despacho quando já existem ordens comerciais programadas e surgem as ordens emergências, refletindo a interligação entre esses dois períodos das ordens de despachos das concessionárias, visando assim aplicar a metodologia AHP para escolha de uma dentre as várias soluções alternativas de rotas enumeradas com a resolução do PRV.

1.2.2 Objetivos específicos

- Descrever e modelar as características do problema de despacho emergencial;
- Identificar os critérios de otimização relacionados a variável tempo no problema de atendimento de serviços emergenciais;
- Desenvolver experimentos práticos para avaliar o impacto dos critérios de Tempo de espera emergencial ($T.E$) e o Tempo de espera de comercial ($T.C$) no despacho de ordens de serviço;
- Comparar a melhoria na eficiência de tempos de serviços e de despachos a partir dos resultados obtidos por meio da aplicação da metodologia AHP.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em oito capítulos. Inicialmente é apresentada a introdução, a justificativa e os objetivos, realizando um apanhado dos principais pontos tratados no estudo. No segundo capítulo contempla-se a fundamentação teórica, que alicerçou a elaboração deste trabalho.

O terceiro capítulo apresenta a classificação da metodologia empregada para o desenvolvimento do estudo e evidencia a descrição do problema, apresentando de forma

precisa suas características. No quarto capítulo aborda-se o modelo matemático adaptado para gerar o conjunto de soluções do PRV que se busca no trabalho. No quinto capítulo há a demonstração de um exemplo didático com a resolução do modelo matemático elaborado apresentado no capítulo anterior, mostrando os aspectos que devem ser considerados para a tomada de decisão da alocação de ordens emergenciais.

No sexto capítulo demonstra-se o desenvolvimento da metodologia AHP para obter a classificação dos resultados obtidos no capítulo 5, evidenciando sua eficácia no processo da tomada de decisão.

No sétimo capítulo, por sua vez, apresentam-se os resultados práticos obtidos a partir das análises e comparações apresentadas, com a aplicação de um algoritmo que considere variação de parâmetros e restrições do problema.

Por fim, no capítulo oito são expostas as conclusões do estudo, onde é feito um resumo do mesmo, uma reflexão sobre as principais constatações e contribuições do trabalho, sendo apontadas as oportunidades de trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Para nortear o desenvolvimento do estudo são necessários subsídios teóricos que proporcionem as direções de investigações já realizadas e os critérios relacionados ao despacho de ordens de serviço que já foram contemplados. A fundamentação teórica do presente estudo se destina ao esclarecimento dos fatores, características e critérios de decisão inseridos no cenário do setor elétrico na elaboração de modelos já propostos referente ao problema do roteamento dinâmico de veículos, com destaque para aqueles aspectos relacionados aos atendimentos emergenciais. Aliado a esses temas, foram explorados também os conceitos da metodologia utilizada AHP utilizada para a tomada de decisão multicritério.

2.1 Elementos relevantes do Setor elétrico brasileiro

A partir dos anos de 1980, houve profundas transformações na economia em escala mundial, principalmente no setor elétrico. No Brasil, o regime de concessões públicas de bens e serviços vinculados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica teve significativo incremento nos anos 90. De acordo com Di Pietro (2006, p. 73-74), o processo de desestatização ocorreu no período de 1995 a 2000, onde “a maior parte foi realizada por meio do regime de concessão, baseada principalmente na Lei 8.987/95(lei das concessões), que dispunha sobre a exploração dos serviços públicos por intermédio deste instituto”.

Mediante este contexto histórico, não é possível mencionar “concessionárias de distribuição de energia elétrica” sem caracterizar alguns aspectos do seu órgão regulador, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Ela foi instituída pela Lei 9.427/96, “com a finalidade de regular e fiscalizar a produção, transmissão e distribuição de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do governo federal, conforme disposto no seu artigo 2º”. Vale salientar ainda que além das incumbências prescritas na lei das concessões (8.987/95), a Lei 9.427/96 atribui competência à ANEEL para promover as licitações destinadas à contratação de concessionárias de serviços públicos de energia elétrica, seja de produção, transmissão ou distribuição, conforme disposição do artigo 3º (PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA - CASA CIVIL, 2009).

Dentro do escopo regulatório atinente à distribuição de energia elétrica, dando seguimento à conceituação dos órgãos reguladores do setor elétrico, faz-se relevante falar dos Procedimentos da Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, setor que se encontra dentro âmbito da ANEEL. Importando-se assim, relatar suas especificações, pois está diretamente relacionado ao setor que se pretende tratar no projeto, isto é, o de atendimento de distribuição de energia, este órgão é conceituado como:

Os Procedimentos de Distribuição são documentos elaborados pela ANEEL, com a participação dos agentes de distribuição e de outras entidades e associações do setor elétrico nacional, que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica (PRODIST, 2008, p. 3).

No que se refere a este setor, é fundamental descrever a definição das distribuidoras de energia elétrica de acordo com a Resolução Normativa da ANEEL do Artigo 2º-XVI (2010):

“Concessionária: agente titular de concessão federal para prestar o serviço público de distribuição de energia elétrica, doravante denominada distribuidora”. É importante destacar ainda que as concessionárias também possuem obrigações regulamentadas no PRODIST, sendo as principais responsabilidades de caráter geral:

- a) manter nas agências de atendimento, em local de fácil visualização e acesso, exemplares do PRODIST para conhecimento e consulta dos interessados;
- b) observar o princípio da isonomia para todas as decisões que lhe forem facultados no PRODIST, adotando procedimento único para toda a área de concessão outorgada (PRODIST, 2008, p. 5).

Tendo em vista que o foco deste estudo é sobre o atendimento das ordens de serviço, em destaque as emergenciais, vamos tratar especificamente dos aspectos que permeiam o atendimento e citar alguns indicadores de desempenho desses serviços prestados pelas concessionárias a título de conhecimento, pois estão inseridos no âmbito real dos problemas que estamos tratando.

Em primeiro momento faz-se importante falar dos despachos das ocorrências emergenciais para as equipes de campo, estes consistem em uma tarefa crucial das empresas de distribuição de energia elétrica, em razão de ter influência direta na receita da empresa, no atendimento das exigências regulatórias e na satisfação dos clientes. Desse modo, aprimorar a

execução dessas atividades, por meio da automação dos processos, pode proporcionar ganhos significativos para as empresas (FERNANDES, 2011).

Há uma sazonalidade no número de ocorrências, que se deve principalmente às condições climáticas. Muitas vezes o atendimento é baseado no fluxo diário ocorrências na população da cidade citada, sendo que se deve levar em consideração variáveis como o tempo de duração dos atendimentos, a quantidade de quilômetros percorridos, o número de viagens necessárias para que toda a região seja atendida, o número de veículos que se faz necessário para atender a demanda e quantos funcionários que serão designados para atender às funções.

A ANEEL, como órgão regulador, determina em suas “Normas e Indicadores de tempo de atendimento às ocorrências emergenciais”, que o atendimento às ocorrências emergenciais deverá ser supervisionado, avaliado e controlado por meio de indicadores que expressem os valores vinculados ao conjunto de unidades consumidoras. Onde:

- Será avaliado o tempo médio de preparação, indicador que mede a eficiência dos meios de comunicação, dimensionamento das equipes e dos fluxos de informação dos Centros de Operação.
- Será avaliado o tempo médio de deslocamento, indicador que mede a eficácia da localização geográfica das equipes de manutenção e operação.
- Será avaliado o tempo médio de execução, indicador que mede a eficácia do restabelecimento do sistema de distribuição pelas equipes de manutenção e operação (ANEEL, 2011).

Determina-se ainda que a distribuidora tem o dever de atender as ordens emergenciais de forma acessível para os consumidores, a fim de que estes exponham suas reclamações referente aos problemas relacionados ao serviço de distribuição de energia elétrica, sem prejuízo do emprego de outros modos de sensoriamento automático da rede (ANEEL, 2011).

Além disso, para que se tenha o despacho ou distribuição adequada das ocorrências, é necessário que os profissionais que atuam no despacho tenham um prévio conhecimento da região geográfica onde estão atuando, ou seja, além do treinamento sobre os procedimentos operacionais, há a necessidade de um longo tempo de adaptação à área geográfica de atuação.

Neste contexto, para medir sua eficiência a ANEEL estabelece indicadores para o acompanhamento e controle do desempenho das distribuidoras, em relação à qualidade dos serviços e atendimentos prestados de energia, tais como:

- TMAE (Tempo Médio de Atendimento a Ocorrências Emergenciais), o qual abaixo tem sua fórmula explicada, indica o tempo médio para atendimento de uma ocorrência emergencial (AMORIM, 2012, p. 14).

Vale destacar aqui que a proposição de uma metodologia e a consequente adoção de uma ferramenta computacional que otimize as rotas das equipes de emergência indicando a sequência de atendimento pode influenciar diretamente o TMAE. De uma maneira geral, as ocorrências de unidades transformadoras deverão ser atendidas primeiro, em virtude de envolverem maior número de clientes interrompidos. Entretanto, há de se considerar o tempo de interrupção do cliente isolado, pois este tipo de ocorrência contribui de forma igual a uma ocorrência de unidade transformadora para a composição do TMAE, ou seja, não importa o número de clientes envolvidos na ocorrência.

Além dos índices citados anteriormente, a Resolução nº 520/2002 estabelece que atendimento às ocorrências emergenciais deva ser supervisionado, avaliado e controlado por meio de indicadores que expressem os valores vinculados a conjuntos de unidades consumidoras, podendo-se citar: Tempo Médio de Preparação das Equipes de Atendimento de Emergência (TMP), que indica a eficiência dos meios de comunicação, dimensionamento das equipes e clientes (PRODIST, 2010).

Vale ressaltar que o tema dessa pesquisa refere-se à parte do atendimento dessas ordens emergências que envolvem a distribuição de energia, e com a aplicação de modelo de roteamento e uma metodologia de suporte para melhorar a tomada de decisão, coma priorização de atendimento, pretendendo-se melhorar a qualidade dos mesmos.

2.2 Soluções de pesquisa operacional para atendimentos de emergência

O contexto de atendimento em tempo real envolve vários critérios, como rotas de atendimento, níveis de prioridade para atendimento, prazos de atendimento, localização e disponibilidade de equipes, indicadores, entre outros. No âmbito de serviços emergenciais deve se destacar que há um tratamento específico para aqueles casos que demandam atendimento com um atributo associado ao apoio à vida, conforme Raduan (2009) comenta, o tempo de preparação e de chegada de uma ambulância, por exemplo, consiste em um fator crítico, o qual representa o espaço de tempo de correspondência à demanda, ou evento. Por outro lado, em casos que não se refiram a vidas humanas, uma ocorrência de uma interrupção

no provimento de um serviço ou bem pode ter seu custo equiparado ao custo do atendimento. Este custo, por sua vez, consiste na soma dos custos de preparação, de deslocamento até o local da demanda e do serviço de restauração ou de reparo da estabilidade.

Considerando este segundo cenário descrito sobre a comparação de fatores de decisão para execução de serviços, são encontrados diversos trabalhos na literatura que tratam da questão do atendimento em tempo real. Neles são considerados diferentes critérios para a tomada de decisão na resolução do problema dada as características de cada cenário, levando-os assim a diferentes resultados. Conforme Raduan (2009), podem ser encontrados no mundo real problemas que se referem ao serviço de vistoria e manutenção de equipamentos e instalações como estações de rádio base para telefonia celular, caixa eletrônicos bancários, elevadores, redes elétricas, torres de distribuição e transmissão de energia elétrica, telefonia, sinalização de trânsito, entre outros. A seguir serão apresentados alguns desses trabalhos, destacando-se as características que cada autor tratou na abordagem do atendimento para serviços emergenciais.

Kostas et al. (1998) considerou a redução da duração das interrupções de energia elétrica por meio da utilização otimizada dos veículos de emergência (conhecidos na indústria como caminhões de reparação de emergência) para a utilização das informações disponíveis em tempo hábil. Em seu estudo, a análise preliminar da operação de restabelecimento do serviço existente da empresa em análise mostra que existem diferenças no nível de serviço oferecido aos clientes de cada área. Concluiu-se que toda a área deveria ser dividida em áreas de serviços homogêneos de acordo com os seguintes critérios: 1) carga horária de trabalho dos veículos de reparação de emergência; 2) área coberta por cada unidade. O pressuposto básico por trás da consideração dos critérios acima é que as áreas de serviços com características "semelhantes" devem ter um desempenho similar.

Weintraub et al. (1999) desenvolveu um estudo onde o sistema tem como objetivo otimizar a qualidade do serviço medido em termos de tempo de resposta, quando são considerados níveis de prioridade. Esta qualidade, segundo os autores, pode ser medida por meio da distância que os veículos têm a partir de uma zona determinada e do número de falhas previstas nessa zona. Esquemáticamente, tentou-se minimizar a função de custo desses fatores para cada atribuição de veículo. A otimização do processo de despacho viabiliza ainda o aumento da produtividade das equipes de emergência, possibilitando o atendimento das exigências regulatórias. Onde duas ferramentas foram desenvolvidas para determinar o envio dos veículos: um algoritmo de despacho de veículos e um desenho que representa a rede de

viagens e tempos de viagem. O método desenvolve rotas de serviço de cada veículo, de modo que o tempo total ponderado (custo) das viagens é minimizado (WEINTRAUB et al., 1999).

No que se refere aos aspectos específicos de atendimentos dinâmicos de serviços, Larsen (2000) definiu níveis de dinamismo e associou-os com o desempenho de diversas políticas para um sistema dinâmico. Segundo ele, quando o nível de dinamismo se intensifica (maior número de solicitações imediatas), o desempenho do sistema na regra do Vizinho Mais Próximo é semelhante a do “Primeiro que Chega é o Primeiro a ser Atendido” (*First Come, First Served - FCFS*). Entretanto, as estratégias de despacho mais empregadas são as de atendimento da ocorrência mais antiga, onde é possível interligar com a do “Primeiro que Entra é o Primeiro a ser Atendido” (FCFS), ou a mais próxima do Veículo que estiver disponível, Vizinho Mais Próximo (*Nearest Neighbor - NN*), sempre considerando também as ocorrências de maior prioridade. Nas situações em que o processo é automatizado, a decisão do veículo mais próximo se dá pela localização deste em um campo dentro ou próximo do setor do pedido ou ocorrência, onde os setores são considerados como subdivisões da região de atendimento.

Com foco particular no sistema elétrico, Lambert et al. (2004) propôs a elaboração de rotinas inteligentes que definam qual viatura deve atender à solicitação, considerando critérios como vias disponíveis na cidade, engarrafamentos, tráfego, horários de pico, entre outros.

Neste estudo, buscou-se minimizar o tempo de atendimento ao defeito que é formado pelo tempo de deslocamento da viatura acrescido do tempo de reparo. Salienta-se algumas questões apontadas por Lambert et al. (2004) que são pertinentes ao elencarem-se os critérios de decisão de despacho vistas como um contraponto:

- Não é regra que a viatura que se encontra mais próxima da área atingida do atendimento tenha sempre todos os equipamentos necessários para o atendimento (LAMBERT et al., 2004);
- A viatura que está mais próxima, mesmo possuindo todos os equipamentos necessários para o atendimento, nem sempre é a melhor em razão do número de horas já trabalhadas e da ocorrência de atendimentos prioritários.

Telles et al. (2005), por sua vez, abordam a gestão de manutenção da rede de distribuição com criação do software SGM (Sistema Integrado de Gerenciamento da Manutenção de Redes de Distribuição), o qual tem como maior foco determinar as normas para a programação da manutenção preventiva que apontem para um custo de manutenção

global mais baixo no longo prazo. As informações disponibilizadas na plataforma apresentada se referem às tarefas de inspeção, de modo que seja possível elaborar planos de planejamento da manutenção simplificando em quatro níveis: Estratégico, Tático, Gerencial e Operacional.

Já Steiner et al. (2006), apresenta uma metodologia utilizando um modelo matemático de programação inteira, que permite determinar o dimensionamento de equipes de atendimento para uma agência regional e o despacho otimizado destas aos locais das ocorrências emergenciais e comerciais na rede elétrica.

Há penalizações aplicadas às equipes ao traçar as rotas (referentes ao despreparo da equipe para efetuar o atendimento, como exemplo, a falta de equipamento adequado), além de o roteamento ser efetuado a partir de rotas de leituras pré-definidas (agrupamentos de clientes). Incluiu-se ainda como uma variável o despreparo das equipes em planejar a própria rota, e passa-se a ter um sistema mais eficiente com a inserção de um sistema dinâmico na modelagem, acompanhando as ordens emergências e estabelecendo as coordenadas das equipes.

Também no âmbito do problema de roteirização, Mauri (2006) desenvolveu um modelo matemático geral e multiobjetivo, na programação de veículos de forma estática onde todas as solicitações são conhecidas *a priori*, entre outras considerações como múltiplos veículos, frota heterogênea e múltiplas garagens, onde cada veículo começa e termina a rota em garagens específicas. O modelo apresentado, objetiva gerar roteiros que sejam econômicos do ponto de vista operacional e que satisfaçam à demanda dos clientes.

Posteriormente, Prata et al. (2008) valeu-se dos conceitos de Redes de Petri Coloridas para elaborar um modelo que visa avaliar o comportamento dos sistemas de atendimento emergencial em redes de distribuição elétrica, empregando esta e método de modelagem em um cenário de teste com base em dados do sistema real e realizando diagnóstico a partir de indicadores de Eficiência.

Volpi et al. (2008) elaborou uma ferramenta computacional a fim de atender os defeitos em redes de distribuição de energia elétrica, a qual emprega informações de banco de dados que gerenciam as solicitações como tipo de serviço solicitado, a localização geográfica do mesmo e também dados das equipes disponíveis. Os critérios considerados foram a quantidade de consumidores que estão envolvidos em cada serviço, a distância de cada equipe aos serviços em espera e as metas de atendimento.

Raduan (2009) descreveu um modelo de roteamento de veículos para atender dois tipos de demandas: as ordens programadas e aquelas que surgem no decorrer da jornada de trabalho. Como critério de decisão dos pares pedido-imediato/servidor o estudo de Raduan

(2009) se baseia naqueles que demonstram o menor tempo de espera resultante desta combinação, onde calcula-se a distância euclidiana entre eles e a finalização prevista do serviço, despachando a ordem quando o servidor correspondente estiver disponível. Assim, a estratégia de despacho adotada foi a do vizinho mais próximo e empregou-se o Método Húngaro para resolver o problema de designação associado.

Com outro viés, abordando técnicas de mineração de dados e o emprego de metaheurísticas, Amorim (2010) apresenta o desenvolvimento de uma metodologia para a alocação de equipes de emergência. Foi criada uma ferramenta computacional que visa otimizar as rotas das equipes indicando a sequência de atendimento das ocorrências num sistema de distribuição elétrica, sendo possível isto em três etapas. Os parâmetros das ocorrências para dados de entrada são obtidos a partir de um “gerador de ocorrências”.

Os dados que caracterizam as ocorrências são as coordenadas geográficas e o tipo. As coordenadas geográficas indicam a localização dos clientes em um plano X-Y, já o tipo consiste na caracterização da ocorrência como sendo um caso coletivo (zona, geralmente associados a uma mesma unidade transformadora), ou individual (cliente isolado). O número de ocorrências de cliente isolado é normalmente muito maior que o número de ocorrências de zona. Para que o TMAE seja minimizado, as rotas foram determinadas considerando a menor distância percorrida e também o tempo de execução dos serviços. Já para a minimização do Cliente Hora Interrompido - CHI, priorizou-se as ocorrências de caso coletivo em função de abrangerem um número maior de clientes, o que resulta em um peso maior para o CHI.

No trabalho de Ñahuis (2013), também buscou-se uma metodologia para a automação dos despachos dinâmicos com deslocamento de viaturas e suas equipes para o atendimento das ordens de serviços, no entanto, considerando *a priori* o atendimento das ordens comerciais. O objetivo foi de hierarquizar o conjunto de ordens de serviços e atribuí-las a todas as viaturas disponíveis, segundo os critérios considerados pela concessionária no período de trabalho diário e horas extras. Buscou-se avaliar o valor de DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) tomando em conta os valores de tempo de demora em ser atendida cada ocorrência por parte da respectiva viatura e do número de consumidores atingidos por cada tipo de ocorrência, tanto emergencial como não emergencial. No que se refere à priorização das ordens emergenciais, foram definidos os tipos fundamentais: corte Indevido, roubo de ramal de ligação, fogo na rede, cabos caídos ou rompidos.

O despachante gera uma lista hierarquizada das ocorrências segundo o tipo de atendimento, a prioridade e o prazo limite de reparo de cada ocorrência, posição das viaturas e

posição das ocorrências, entre outros, designando assim a viatura com a capacidade de atendimento e despachando cada viatura, com a respectiva sequência de atendimentos no dia, para um retorno final à garagem dentro do horário de trabalho estabelecido. Salienta-se que há uma penalização no custo pela realização de atendimentos que ultrapassem o tempo máximo, na mesma ordem de grandeza que a multa pelo não atendimento da ordem emergencial.

2.3 Método Multicritério e a Análise Hierárquica de Processos (Analytic - AHP)

Frequentemente um gestor está diante da necessidade da tomada de decisão, a qual encontra-se entre várias opções concorrentes e contraditórias, sugerindo duas alternativas principais: 1) Basear-se em seu conhecimento de gestor e 2) fazer um procedimento de modelagem do problema, simulando diversas situações, buscando com isso analisar de um modo mais detalhado o problema (LACHTERMACHER, 2009).

A tomada de decisão baseada na segunda opção pode envolver várias metodologias já desenvolvidas, inclusive envolvendo mais de um critério na tomada de decisão. Corroborando com esta ideia, Ticona (2003) afirma que a maioria dos problemas reais encontrados na área de otimização se referem ao alcance de vários objetivos que devem ser otimizados simultaneamente. Esse processo de otimização envolve a minimização (ou maximização) simultânea de um conjunto de objetivos, atendendo a um conjunto de restrições. Nesta situação, o decisor disporá deste conjunto de soluções eficientes e deverá compará-las com as metas globais do problema para a escolha de uma em específico (ARROYO, 2002).

Segundo Fonseca e Fleming (1995), a otimização multiobjetivo se refere à busca de soluções Pareto-ótimas (soluções eficientes), a partir das contribuições de Pareto (1896). Ao conjunto formado por estas soluções denomina-se de Conjunto de Pareto, composto por soluções denominadas de não-dominadas. Elas são assim caracterizadas porque, considerando as soluções deste conjunto, não há como assumir uma delas que corresponda a melhor escolha para todos os critérios assumidos. Com isso, a diferença fundamental da otimização multiobjetivo em relação à otimização mono-objetivo se refere ao tratamento de um conjunto de soluções, e não apenas uma como neste último caso.

Há métodos para apoio à tomada de decisão multicritério, e eles se dividem em duas grandes linhas: Métodos da Escola Francesa e Métodos da Escola Americana. Os primeiros

são fundamentados na teoria da dominância e nela se destacamos métodos ELECTRE e PROMETHEE (LOOTSMA, 1980). Já os Métodos da Escola Americana procuram reduzir os vários critérios a apenas um, frequentemente por meio de uma soma ponderada que emprega pesos atribuídos anteriormente. Nessa linha, são considerados como principais métodos AHP, MACBETH e UTA (LOOTSMA, 1980).

Dentre esses métodos citados acima, um dos primeiros e mais utilizados para ambientes decisórios multicritério é o método da Análise Hierárquica de Processos (Analytic Hierarchy Process - AHP), que será utilizado neste trabalho. Sua importância é maior porque permite que fatores subjetivos de julgamento sejam incorporados na tomada de decisão (SHIMIZU, 2001). O conceito fundamental se refere à subdivisão do problema em níveis hierárquicos, alcançando mais praticidade e simplicidade para sua compreensão e análise. De acordo com Murakami (2003), o decisor é levado à reflexão sobre a decisão de uma forma lógica e estruturada, permitindo ainda que eventuais inconformidades em seus julgamentos sejam identificadas.

A metodologia determina os pesos relativos tal como as prioridades dos elementos de um nível da hierarquia em relação a cada um dos elementos do nível superior. Essa estrutura hierárquica da AHP emprega a estrutura de Árvore de Decisão (AD), na qual os critérios de julgamento encontram-se agrupados em variados níveis hierárquicos e as linhas de ação, ou alternativas, estão no nível mais baixo.

Mas especificamente, a aplicação da AHP é dividida em três momentos (CHAKRABORTY e DEY, 2006):

- 1º) simular um problema por meio de uma estrutura hierárquica, em que o primeiro nível da hierarquia representa o objetivo, seguindo de critérios, subcritérios nos níveis intermediários e, finalmente, as alternativas disponíveis;
- 2º) realizar a comparação par a par;
- 3º) derivar a prioridade ou valor de preferência para as alternativas.

Um trabalho de grande relevância que empregou AHP para a tomada de decisão é o de Durbach, Lahdelma e Salminen (2014), com a proposição de uma metodologia AHP associada com o método de Análise Multicritério Estocástica de Aceitabilidade (SMAA), para permitir que as comparações de pares possam ser incertas. A experiência de simulação é utilizada para avaliar a forma como a coerência dos julgamentos e a capacidade do modelo SMAA trabalha para discernir se a melhor alternativa se deteriora quando a incerteza

aumenta. Através de uma série de problemas simulados, os resultados indicam que os julgamentos são susceptíveis a manter a coerência, a menos que a incerteza seja grave, mas que a presença de incerteza em quase qualquer grau é suficiente para fazer a escolha da melhor alternativa. Uma vantagem apontada do método é que ele permite uma modelagem flexível de diferentes tipos de imprecisão, da incerteza, ou mesmo com informações de preferência incompletas. Isto pode ser útil em muitos problemas de decisão em que a informação é refinada gradualmente durante o processo.

Outra contribuição quanto ao uso de AHP foi proposta por Alkahtani, Woodward e Al-begain (2005), que utilizaram o escopo das redes de comunicação como aplicação prática da metodologia para tomada de decisão com Várias Métricas Priorizadas. Os resultados apresentados se concentraram na demonstração dos efeitos da priorização métrica nas decisões de roteamento, apontando que o Método AHP permite a melhoria em uma métrica para ser quantificado em termos de sua priorização, trazendo como consideração que alterar a prioridade de uma métrica de 0 (a prioridade mais baixa) a 1 (a mais alta prioridade) na aplicação do algoritmo proposto melhora o valor da métrica que, em média, (20-60) % para 90% da gama de utilização.

3 METODOLOGIA

Primeiramente é preciso destacar que a metodologia deste estudo caracteriza-se como abordagem experimental e quantitativa. Sampieri, Collado e Lucio (2006, p. 157) mencionam que o método experimental remete diretamente a uma abordagem quantitativa. Para os autores, uma pesquisa experimental refere-se a “[...] um estudo em que se manipulam intencionalmente uma ou mais variáveis independentes, para analisar as consequências da manipulação sobre uma ou mais variáveis dependentes, dentro de uma situação de controle do pesquisador”.

Aliando a isso, no capítulo 6, é demonstrado o desenvolvimento da metodologia aplicada, a Análise hierárquica de processos (AHP), e os passos seguidos para exemplificar os ensaios práticos feitos no respectivo capítulo foram baseados na explicação dessa metodologia encontrada na literatura do autor Saaty (1980).

Salienta-se que os cálculos feitos nos capítulos 5 e 6 foram executados em planilha eletrônica. Para os cálculos do capítulo 7, foi desenvolvida a modelagem algébrica com o uso do software Zimpl (2015), com a posterior obtenção da solução ótima do modelo a partir do pacote computacional Scip (2015).

3.1 Definição do problema

Nesta seção serão abordados alguns conceitos relativos ao atendimento de serviços emergenciais e aspectos relacionados à definição do problema de atendimento de ordens emergenciais no setor elétrico.

O escopo deste trabalho está na resolução do problema de tomada de decisão para definir a melhor designação entre as ordens emergenciais pendentes e as equipes disponíveis. Considera-se que essas equipes estarão ocupadas no atendimento de ordens programadas e terão o seu percurso alterado para completarem a execução dos serviços emergenciais pendentes.

Definir a melhor designação corresponde a resolver o problema de despacho de ordens emergenciais. De acordo com a literatura já existente, os serviços de atendimentos e

manutenção em campo podem ser relacionados com as cidades do Problema do Caixeiro Viajante (PCV), no que se refere a sua forma estática e também dinâmica (Psarafti, 1988) e do Problema Dinâmico do Reparador Viajante (DTRP), introduzido por Bertsimas e Van Ryzin (1991).

Dentre as principais atividades de uma área de distribuição de energia elétrica encontra-se o atendimento às solicitações dos clientes, por serviços comerciais e emergenciais. A demanda por estes serviços emergenciais pode ser significativamente maiores quando ocorrem intempéries climáticas.

Conforme Steiner et al. (2006), o atendimento de serviços comerciais refere-se às ligações de unidades consumidoras monofásica, bifásica e trifásica temporárias sem medição, confirmação de leitura, padronização de entrada de serviço e religação de consumidores desligados. Ainda inclui o corte de energia de clientes inadimplentes, aumento de carga, substituição de medidores, vistorias em geral e desligamentos a pedido dos consumidores, dentre outros.

Os serviços emergenciais, por sua vez, consistem em atendimentos a clientes com alta relevância. Volpi et al. (2008) comenta que são aqueles serviços como cabos caídos, falta geral de luz, ramal com superaquecimento dos condutores, corte impróprio, roubo de ramal de ligação, dentre outros. Os autores ressaltam ainda que as chamadas emergenciais, de caráter estocástico, podem ser típicas (emergências) ou atípicas (urgências ou "superemergências") e por outro lado as chamadas comerciais podem ser classificadas de acordo com suas metas, possuindo um caráter determinístico. A ANEEL (2011) determina que é necessário informar o consumidor sobre o número de protocolo do respectivo atendimento.

A partir da compreensão da definição de atendimento de ordens emergenciais, é importante compreender o que ocorre no cenário que envolvem essas ocorrências. Esses eventos ocorrem aleatoriamente no tempo e no espaço, possuindo graus de severidade diferentes. Para a incidência com alto nível de urgência é atribuído maior grau de prioridade, e por isso devem anteceder as demais ocorrências na fila de atendimento. O número de ocorrências é variável de acordo com o horário do dia, dia da semana e a estação do ano (GOMES et al., 2008).

Steiner et al. (2006) relatam que dias atípicos são aqueles onde ocorrem tempestades ou vendavais, em que o número de incidências é muito maior que a média, resultando em problemas em diversas regiões da rede elétrica concomitantemente.

Também deve-se considerar que o volume de solicitações dos usuários dos serviços das concessionárias de energia elétrica é bastante significativo. Normalmente, a região de

cobertura é dividida em sub-regiões para facilitar o gerenciamento das ordens emergenciais, as equipes são distribuídas pelas áreas de cobertura de acordo com a quantidade de ocorrências a serem atendidas. Quando existe mais de uma ordem emergencial em uma zona é preciso usar uma regra de designação para escolher qual das equipes atenderá a nova ocorrência. Alguns casos consideram a regra de designação da equipe que tiver o menor horário de atendimento da última chamada mais o tempo de deslocamento para a nova incidência. Depois da designação da equipe, o horário de reposta é calculado a partir do horário de normalização da penúltima chamada designada, mais o tempo de deslocamento para a nova incidência (BOTELHO, 2010).

O objetivo é definir um subconjunto de tarefas que deva ser atribuído a cada uma das equipes disponíveis. Cada tarefa tem atributos próprios como localização, tempo de serviço e grau de prioridade. Cada equipe, por sua vez, tem atributos que se referem à localização, disponibilidade de horas na sua respectiva jornada de trabalho e velocidade média com que ela se desloca para o atendimento das ordens. As ordens de serviço devem ser reunidas de modo que a localização das tarefas seja o mais dissimilar possível entre os agrupamentos, isto é, manter as tarefas mais próximas a central do agrupamento, diminuindo assim o espaço de deslocamento da equipe que atendem as ordens de serviço daquela área específica.

Ocorre que as equipes de atendimento de serviço das concessionárias já estarão pré-determinadas para o atendimento de ordens programadas no momento em que as ordens emergenciais ocorrem. Neste instante, surge o problema abordado neste estudo, em que se busca modelar e comparar esse cenário, refletindo a relação de simultaneidade entre esses dois períodos das ordens de despacho: a ocorrência de emergências irá interferir na zona de abrangência das equipes no atendimento de ordens comerciais já programadas.

Geralmente o que ocorre é que essas ordens deixarão de ser prioridade no momento em que as emergenciais ocorrerem, busca-se alocar às equipes uma nova rota, mas mantendo o atendimento posterior das ordens programadas. Todavia, nem sempre essa será a melhor decisão a ser tomada, quando pondera-se e conclui-se que o custo de postergar o atendimento da ordem comercial por mais tempo pode ser maior do que o de atrasar a ordem emergencial. Isto implicará na avaliação dos critérios de decisão considerados pelo gestor de despachos das ordens, possibilitando a comparação desses custos em atender uma ou outra ordem primeiro, logo tomará a decisão de como alocará a emergência na rota para obter o melhor resultado entre aqueles possíveis.

Neste sentido, esse cenário de distribuição das ocorrências para as equipes realizarem os atendimentos deve levar em conta para a tomada de decisão de uma série de critérios, tais

como: o número de ocorrências, a quantidade de equipes de campo, o tipo de cada ocorrência (cliente isolado ou unidade transformadora), os tempos de duração das ocorrências, as localizações das ocorrências (endereços) e os posicionamentos das equipes, o que inclui particularidades como a programação residual das equipes quando da designação da ordem emergencial, a "capacidade" da equipe de executar a ordem e a probabilidade de ultrapassar a jornada diária prevista.

Conforme o escopo deste estudo, já existem diferentes trabalhos vistos na literatura, onde foram utilizados variados critérios para o problema do atendimento de emergências, já considerados assim, para decisão ao despacho de ordens de serviço, onde tais critérios são direcionados de acordo com a decisão dos atributos envolvidos em cada problema. Este estudo busca justamente explorar qual o peso que estes diferentes critérios podem ter e como podem influenciar na decisão do despacho, quais são os mais indicados para serem usados e como classificá-los ao elaborar uma rota para cada equipe, na qual é preciso designar uma sequência de atendimento de clientes.

Também deve ser decidido quais os atributos que serão considerados, o quanto pode custar deixar de atender ou não uma ordem programada *a priori* para atender uma emergencial. Considera-se ainda se o tempo de interrupção da rede terá um maior custo, dando prioridade a uma ordem emergencial, destacando quando uma ordem pode representar uma prioridade como o fator perigo.

Para complementar o entendimento do problema, destaca-se que o tempo total de atendimento de um chamado é composto por um tempo de preparo do servidor (setup time), tempo de viagem do servidor até o local da ocorrência, tempo de execução do serviço junto ao usuário (tempo em cena) e o tempo de retorno à base.

4 O MODELO MATEMÁTICO PARA O PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS (PRV)

O problema de roteamento de veículos, é utilizado para atender as ordens de despacho das equipes de campo das concessionárias, uma vez que auxilia na programação das rotas de serviço. Assim, nesta seção é apresentado o modelo tradicional do PRV, seguido do modelo adaptado que foi elaborado para o desenvolvimento deste estudo. Neste sentido, além de representar uma generalização do Problema do Caixeiro Viajante, Laporte (1992) descreve o Problema de Roteamento de Veículos como o problema de projetar a entrega ideal, ou definir as rotas de coleta de um ou vários depósitos para um número de cidades ou clientes geograficamente dispersos, sujeito a um conjunto de restrições.

Para Eksioglu et al. (2009), o PRV consiste em encontrar um conjunto de k circuitos simples, cada um corresponde a um trajeto de veículos com um custo mínimo, sendo este custo definido como a soma dos custos de arcos dos circuitos tais que:

- i. Cada rota começa e termina no depósito;
- ii. Toda cidade, com exceção do depósito, é visitada somente uma vez e ainda por somente um veículo;
- iii. A demanda total de qualquer rota não deve superar a capacidade Q de um veículo.

Uma variante do PCV é o Problema do Caixeiro Viajante Múltiplo (PCVM), e de acordo com Goldberg e Luna (2000), essa variante consiste em obter rotas, todas iniciando e terminando em um certo vértice em G , normalmente associados a r caixeiros, cuja soma total é mínima.

Fisher e Jaikumar (1981) apresentam uma das formulações mais usadas para o PRV, cuja descrição é apresentada nas equações a seguir.

$$\text{Minimizar } z = \sum_{i,j} (c_{ij} \sum_k x_{ijk}) \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_k y_{ik} = 1, \quad i = 2, \dots, n \quad (1.1)$$

$$\sum_k y_{ik} = m, \quad i = 1 \quad (1.2)$$

$$\sum_i q_i y_{ik} \leq Q_k, \quad k = 1, \dots, m \quad (1.3)$$

$$\sum_j x_{ijk} = y_{ik}, \quad i = 1, \dots, n; \quad k = 1, \dots, m \quad (1.4)$$

$$\sum_i x_{ijk} = y_{jk}, \quad j = 1, \dots, n; \quad k = 1, \dots, m \quad (1.5)$$

$$\sum_{i,j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1, \quad S \subseteq \{2, \dots, n\}; \quad k = 1, \dots, m \quad (1.6)$$

$$y_{ik} \in \{0,1\}, \quad i = 1, \dots, n; \quad k = 1, \dots, m \quad (1.7)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, \quad i, j = 1, \dots, n; \quad k = 1, \dots, m \quad (1.8)$$

Onde:

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

y_{ik} = variável binária que assume o valor de 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 ao j ;

m = representa o número de veículos;

n = representa o número de clientes;

k = quantidade de veículos;

S = representa o conjunto de nós pertencentes a solução, ou seja, o depósito que é o ponto de partida do veículo k e os clientes que ele visita.

A função objetivo (Equação 1) minimiza o custo total de todos os deslocamentos realizados. A restrição (1.1) assegura que um veículo não visita mais uma vez um cliente. A restrição (1.2) garante que o depósito receba uma visita de todos os veículos. A restrição (1.3) obriga que as capacidades dos veículos não sejam ultrapassadas. As restrições (1.4) e (1.5) garantem que os nós escolhidos para a visita tenham apenas um arco de chegada e um de saída. A restrição (1.6) constitui as tradicionais restrições de eliminação de subciclos ou sub rotas. Finalmente as restrições (1.7) e (1.8) definem o domínio das variáveis.

O PCV pode conter vários ciclos dirigidos, chamados caminhos pré-hamiltonianos. A Equação (2) apresenta uma opção de restrição que elimina esses subciclos que é aplicada à modelagem matemática anterior. Novamente deve ser observado que o conjunto S representa o conjunto de todos os nós do problema, incluindo o nó que representa o depósito, ou ponto de partida para todos os k veículos.

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

Outra maneira de excluir subciclos 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, através da formulação de Miller et. al. (1960). Essas restrições são descritas conforme as Equações (3), (3.1) e (3.2), a seguir.

$$u_1 = 1, \quad (3)$$

$$2 \leq u_i \leq n, \quad \forall i \neq 1, \quad (3.1)$$

$$u_i - u_j + 1 \leq (n - 1)(1 - x_{ij}), \quad \forall i \neq 1, \forall j \neq 1 \quad (3.2)$$

Vidal et al. (2012) apresentam em seu estudo a formulação de Fisher e Jaikumar (1981), caracterizando o PCV como um caso especial quando $m = 1$ e $Q = +\infty$, o que permite classificar o PRV como NP-difícil (GAREY e JOHNSON, 1979). Eles também definiram uma restrição adicional sobre o comprimento máximo de cada rota, que frequentemente é encontrada na literatura. Uma duração de serviço τ_i está associada a cada cliente, a soma dos tempos de serviço do cliente e o tempo de viagem da rota, limitando-se, então para T Equação (4).

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n (c_{ij} + \tau_i) x_{ijk} \leq T, \quad k = 1, \dots, m \quad (4)$$

Ao associar o PRV ao presente estudo, visando a formação de rotas para o atendimento dos serviços de uma concessionária de distribuição de energia elétrica, é importante salientar que estas organizações estão sujeitas às regulamentações do órgão regulador do setor, a ANEEL, que determina prazos de atendimento às inúmeras solicitações dos consumidores. Esses atendimentos levam as concessionárias a contratarem equipes de atendimento e os prazos estabelecidos para atendimento são cumpridos tendo em vista o dimensionamento adequado da força de trabalho (CPFL, 2013), sabendo-se que também é necessário reduzir os custos envolvidos sem, no entanto, incorrer em penalizações por violação das metas.

Neste contexto, este trabalho apresenta os seguintes atributos considerados fundamentais na execução dos serviços pelas equipes de atendimento:

- (i) localização do serviço: onde está a demanda de pedido do cliente;
- (ii) prioridade: tipo de serviço, grau de importância;
- (iii) tempo de execução do serviço: ao mesmo tempo, assume-se que a gestão dos serviços, na forma da designação às equipes, envolve a observância do tempo de deslocamento, dado que a jornada de trabalho é composta de um conjunto de tempos de deslocamento e de um conjunto de tempos de execução dos serviços.

O processo dos pedidos recebidos e o despacho destes para as equipes de atendimento está ilustrado na Figura 1:

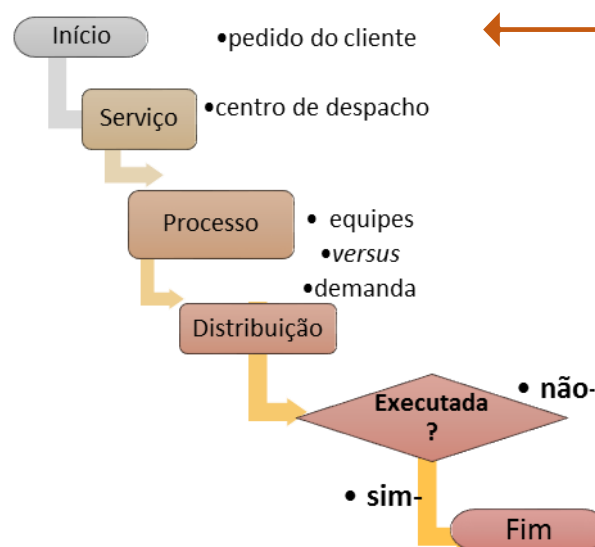


Figura 1 – Processo de atendimentos dos serviços em uma rede elétrica

Fonte: elaborado pela autora.

A fim de exemplificar mais detalhadamente o cenário de despachos dos serviços, será utilizado como exemplo a descrição apresentada no estudo de Weintraub et al. (1999). No estudo realizado, os autores descrevem um modelo automatizado da gestão de ordens de despachos em que buscou-se imitar o processo interno utilizado pelos profissionais da concessionária para designar os serviços às equipes, considerando-se fatores como menor distância e as prioridades no atendimento das ocorrências.

No presente trabalho, tal como o estudo de Weintraub et al. (1999) e com embasamento nas premissas já estabelecidas e listadas em um trabalho anterior de Fortes, Garcia e Guimarães (2014), buscou-se definir o problema da gestão dos atendimentos a partir da consideração do problema de roteamento de veículos, com o objetivo de minimizar os tempos de deslocamento entre os atendimentos. Deste modo, o modelo matemático adequado ao presente estudo possui seus parâmetros diretamente relacionados aos tempos de atendimento e aos tempos das rotas.

Portanto, é necessária uma sequência de alterações na representação e significado das variáveis contidos no modelo matemático definido na seção anterior, passando agora enfoque ao principal aspecto atrelado à definição das variáveis consideradas: o tempo. Em primeiro momento, a função objetivo no modelo matemático é alterada, onde o somatório anterior representava o custo de deslocamento em distância, isto é, a soma dos custos de arcos dos circuitos percorridos (c_{ij}).

Agora, a função objetivo passa a ser o somatório total dos tempos de deslocamento de cada arco pertencente ao circuito, mais os tempos de execução dos serviços em cada nó. Com isso, refere-se a um conceito chamado de tempo de chegada no nó, definido como t . Mais especificamente, evidencia-se que a variável t_j é definida como o tempo de chegada no nó anterior a j na sequência de atendimento, acrescido do tempo de serviço do nó anterior e também do tempo de deslocamento do nó anterior até o nó j . Chama-se o nó anterior de i e identifica-se o tempo de deslocamento entre eles como c_{ij} . O tempo de chegada no nó anterior é definido como t_i e o tempo de serviço no nó i é chamado de ts_i . Dessa forma, calcula-se o tempo t_j como $t_j = t_i + ts_i + c_{ij}$.

É preciso agora considerar este tempo de chegada em cada nó a partir da relação inerente com a definição das rotas, sendo esta definição atrelada ao conceito das variáveis x_{ijk} . Dessa forma, será incluída uma restrição adicional no modelo que relaciona os tempos de chegada com as variáveis que definem as rotas (x_{ijk}). A variável x_{ijk} , representa a visita (1)

ou não (0) do nó j após o nó i pelo veículo k . Esta variável é que deve “acionar” ou não o tempo de chegada no nó j caso exista a ligação i - j , do contrário o limite mínimo de t_j deve ser muito baixo a ponto de permitir $t_j=0$. Um fator M multiplica a parcela $(1 - x_{ijk})$ de modo que ela torne o lado direito da inequação a seguir bem menor que zero sempre que $x_{ijk} = 0$: $t_j \geq t_i + ts_i + c_{ij} - (1 - x_{ijk})M$. Portanto, o tempo em j deve ser maior que o tempo do nó anterior i caso exista a ligação i - j ($x_{ijk} = 1$), acrescido do tempo de serviço do nó anterior (ts_i) e o tempo de deslocamento de i para j (c_{ij}).

A seguir são listados no Quadro 1, os parâmetros e as variáveis pertencentes ao modelo matemático com essas modificações citadas acima (Equação 5 a 5.14), com as correspondentes definições acerca de cada um deles, desde os conjuntos dos nós considerados até as variáveis diferenciadas quanto ao tempo de espera inseridas.

Conjunto		Descrição
V_s	:	Localização de cada equipe;
V_c	:	Conjunto dos nós que correspondem aos clientes comerciais;
V_e	:	Conjunto dos nós que correspondem aos clientes emergenciais;
V_t	:	Conjunto dos nós terminais de cada rota, criados apenas para estimar o tempo total de cada rota;
V	:	$V_s \cup V_c \cup V_e \cup V_t$;
E	:	Conjunto dos veículos, ou rotas criadas;
Parâmetro		Descrição
m	:	Número total de veículos disponíveis (neste caso são 2, k_1 e k_2);
n	:	Total de nós (clientes);
T	:	Tempo máximo para cada rota;
M	:	Um número grande, tipicamente 100T ;
c_{ij}	:	Tempo de percurso da rota de i ao j ;
ts_i	:	Tempo de serviço realizado em cada nó i ;
Variável	:	Tipo / Descrição
u_i	:	Variável que define a ordem do nó i estará na rota;
O_i	:	Custo de cada nó (peso);
t_i	:	Tempo de chegada do 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.

Quadro 1 – Descrição dos dados e variáveis do modelo proposto

Fonte: elaborado pela autora.

A função objetivo (5) minimiza a soma dos tempos de chegada, com o intuito de aumentar a produtividade das equipes e postergar serviços com tempos maiores. Essa função envolve a ponderação dos dois critérios por meio de uma combinação convexa entre o somatório do tempo de chegada para os nós comerciais e o somatório dos tempos de chegada para os nós emergenciais. Cada tempo de chegada é ponderado pela importância do respectivo nó, assumido neste modelo como o seu custo. Quando assume-se $\alpha = 1$ atribui-se toda a importância para os tempos de chegada nos nós comerciais, ao passo que quando $\alpha = 0$ atribui-se a importância da função objetivo para minimizar os tempos de chegada nos nós emergenciais.

A Equação (5.1) garante que todos os nós estarão vinculados a somente um veículo. As restrições (5.2) e (5.3) obrigam que exista apenas uma ligação de chegada e uma ligação de saída de cada nó, sabendo que a restrição (5.4) não permite que exista uma conexão envolvendo o mesmo nó como origem e destino.

$$\text{Minimizar} \quad \alpha \sum_{i \in V_c} O_i t_i \quad + \quad (1 - \alpha) \sum_{j \in V_e} O_j t_j \quad (5)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k \in E} y_{ik} = 1 \quad \forall i \in V \quad (5.1)$$

$$\sum_{j \in V, j \neq i} x_{ijk} = y_{ik}, \quad \forall i \in V, \forall k \in E \quad (5.2)$$

$$\sum_{j \in V, j \neq i} x_{jik} = y_{ik}, \quad \forall i \in V, \forall k \in E \quad (5.3)$$

$$x_{iik} = 0, \quad \forall i \in V, \forall k \in E \quad (5.4)$$

$$\sum_{i \in V_e} y_{ik} = 1, \quad \forall k \in E \quad (5.5)$$

$$\sum_{j \in V_c \cup V_e} x_{ijk} = 0, \quad \forall i \in V_e, \forall k \in E \quad (5.6)$$

$$u_i = 1, \quad \forall i \in V_s \quad (5.7)$$

$$2 \leq u_i \leq |V_c \cup V_e|, \quad \forall i \in V_c \cup V_e \quad (5.8)$$

$$u_i - u_j + 1 \leq (|V_c \cup V_e| - 1)(1 - x_{ijk}), \quad \forall i, j \in V_c \cup V_e \quad (5.9)$$

$$t_i = 0, \forall i \in V_s \quad (5.10)$$

$$t_j \geq t_i + ts_i + c_{ij} - (1 - x_{ijk})M, \quad \forall i, j \in V_c \cup V_t, \forall k \in E \quad (5.11)$$

$$t_i \leq T, \forall i \in V_t \quad (5.12)$$

$$x_{ijk}, y_{ik} \in \{0,1\} \forall i, j \in V, \forall k \in E \quad (5.13)$$

$$u_i, t_i \geq 0, \forall i \in V \quad (5.14)$$

As restrições (5.5) obrigam que cada rota deva ter um, e exatamente um, nó terminal. O conjunto de restrições (5.6) não permitem que os nós terminais estejam em outra posição que não seja a última em cada rota. A eliminação de subciclos é garantida pelas restrições (5.7) a (5.9), conforme já mencionado na seção anterior.

Finalmente nas restrições (5.10) e (5.11) há a definição do tempo de chegada em cada nó, com o devido acoplamento com as variáveis, sendo que os tempos de chegada nos nós terminais correspondem aos tempos de rota e são limites máximos que não podem extrapolar T , conforme as restrições (5.12). O domínio das variáveis x_{ijk}, y_{ik}, u_i e t_i é definido segundo as restrições (5.13) e (5.14).

Portanto, fica torna-se bastante apelativa e compatível essa modelagem proposta para resolver o problema de designar ordens emergenciais para as equipes disponíveis.

5 ESTUDO DE CASO: UM EXEMPLO DIDÁTICO DO PRV PARA ORDENS DE SERVIÇO EMERGENCIAIS

Visando melhorar a compreensão do problema analisado, nesta seção é apresentado um exemplo prático, elaborado com o auxílio de uma planilha eletrônica. Este exemplo é composto de um cenário inicial, que representa a rota programada para as ordens comerciais conhecidas *a priori* mostrando o atendimento desses clientes e tempos de rotas e de espera que se obtém. Em seguida são apresentados nove cenários que passam incluir a ordem emergencial e, a fim de contextualizar visualmente a mudança das rotas quando as ordens programadas já estão inclusas na rota (Figura 2), surge uma ordem emergencial e busca-se elencar as alternativas possíveis de alocar a esta ordem emergencial em uma das rotas já estabelecidas para atender as ordens comerciais (Figura 3).

Este exemplo objetivou representar o cenário de decisão que o gestor das ordens de despacho se depara quando surge uma ordem emergencial e precisa decidir em um curto espaço de tempo em qual rota, e em qual localização específica da rota, deve ser programado o atendimento da emergência. Assim, em virtude de muitas alternativas de escolha, o gestor tem um trabalho difícil de comparar as opções par a par, visando escolher a melhor delas.

O problema se torna ainda mais complexo quando se tem um cenário com mais de um objetivo para se atingir, onde a escolha de uma alternativa que pareça a melhor para uma determinada meta pode causar grande prejuízo no cumprimento de outra. Esse contexto é o típico cenário onde pode-se caracterizar como um processo decisório multicritério e é justamente o escopo de investigação desta dissertação: o critério de minimização do Tempo de Espera comercial e o critério de minimização do Tempo de Espera emergencial.

O exemplo apresentado a seguir apresenta uma exploração exaustiva de todas as alternativas de atendimento dessa ordem emergencial, considerando as rotas pré-existentes. Compara-se o resultado de cada alternativa com relação aos dois critérios definidos a fim de discutir o trabalho que o decisor terá para escolher uma alternativa que lhe pareça mais conveniente (Tabela 6).

Ao concluir-se o exemplo é possível concluir que não há como escolher uma solução como a melhor de todas assumindo os dois critérios simultaneamente: elas são alternativas. Para a resolução dessa tomada de decisão, evidencia-se assim a pertinência da aplicação da metodologia AHP para um contexto de tomada de decisão multicritério, a qual inclui a

subjetividade do gestor na quantificação da importância relativa entre os critérios envolvidos a fim de propiciar uma ponderação única a ser aplicada para todas as alternativas disponíveis. O desenvolvimento dessa metodologia AHP será demonstrado no capítulo 6, a partir dos resultados apresentados nessa seção.

Inicialmente define-se uma instância particular para representar o PRV relacionado com o atendimento de ordens emergenciais, considerando as premissas dos trabalhos de Garcia et al. (2014) e de Fortes, Garcia e Guimarães (2014). Nessa instância, ocorrem um conjunto de ordens comerciais, com as prioridades iguais neste exemplo, que ainda requisitam atendimento, formando uma rota pré-estabelecida para cada equipe disponível. O depósito é o ponto de partida assumido de cada rota, neste caso, por conveniência, assumiu-se que o ponto de partida é o mesmo para as duas rotas. A Tabela 1 apresenta os dados de tempos de deslocamento c_{ij} e tempos de serviço ts_i de cada ordem, com uma velocidade constante de 20 km/h.

Tabela 1 – Descrição da instância considerada

Número do Nó	Coord. X 20 km/h	Coord. Y 20 km/h	Tempo de serviço (minutos)
0	0	18	0
1	6	32	10
2	0	0	30
3	20	28	12
4	20	3	6
5	10	26	55
6	14	40	6

A partir das coordenadas de cada nó, define-se a matriz que representa as distâncias em minutos para quaisquer dois nós, conforme ilustra a Tabela 2 a seguir:

Tabela 2 – Matriz de distâncias em minutos

Distância ij (minutos)	Nº do nó (minutos)						
c_{ij}	Velocidade: 20 km/h						
	0	1	2	3	4	5	6
0	0	15	18	22	25	13	26
1	15	0	33	15	32	7	11
2	18	33	0	34	20	28	42
3	22	15	34	0	25	10	13
4	25	32	20	25	0	25	37
5	13	7	28	10	25	0	15
6	26	11	42	13	37	15	0

Considera-se então uma rota pré-programada com essas demandas de clientes conhecidas, sendo todos os clientes comerciais e com a mesma prioridade de atendimento. São considerados para o problema dois veículos com uma velocidade constante de 20 km/h que atendem os seis clientes, formando duas rotas que são apresentadas na Figura 2 e na Figura 3, e os respectivos dados no Quadro 2.

R1	0	1	6	5	0
R2	0	3	4	2	0

Figura 2 – Formação das rotas considerando as demandas já conhecidas

Fonte: elaborado pela autora.

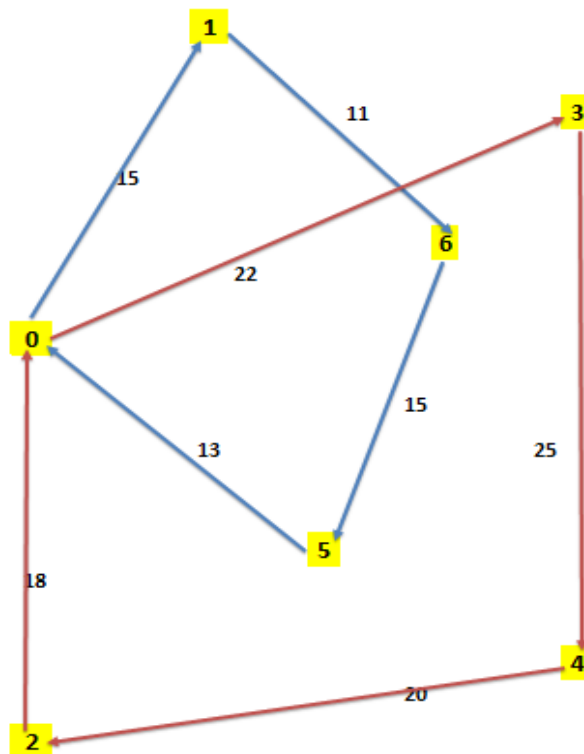


Figura 3 – Definição de rotas considerando as demandas já conhecidas

Fonte: Elaborado pela autora.

	Tempo de Rota (só a distância) c_{ij} (min)	Tempo de Espera t_j (min)	Tempo de Espera (t_j) Comerciais (min)
ROTA 1	112	109	109
ROTA 2	116	167	167
TOTAL	228	276	276

Quadro 2 – Resultados para a rota programada a *priori*

Fonte: Elaborado pela autora.

Dado o cenário inicial que consistiu exclusivamente no atendimento das ordens comerciais, passa a ser considerada agora a ocorrência de uma ordem emergencial, para este exemplo das Figuras 2 e 3: tem-se agora o problema de despacho de ordens de serviço emergenciais cujo modelo matemático foi apresentado na seção anterior. Neste caso, é necessário considerar não apenas as ordens comerciais descritas na Tabela 2, mas também a ordem emergencial que originou o problema descrito. Tal problema corresponde a escolher o

momento em que a ordem emergencial será atendida, ou mesmo será mantida em espera sem designá-la para as equipes de serviço disponíveis.

Desta forma, em um segundo momento passa-se a considerar um cenário com uma ordem de emergência, a qual surge durante um dia comum de jornada de trabalho da concessionária. Foram ajustadas as tabelas 1 e 2, inserindo os dados referentes a uma chamada de emergência, considerada como “cliente 7”, tendo sua localização e tempo de serviço apresentados na Tabela 3. Para tanto, foram recalculadas as distâncias entre os nós para todos os clientes quando inserido esse novo cliente de caráter emergencial na rota (Tabela 4), como visto a seguir:

Tabela 3 – Descrição da instância considerando a ordem de emergência

Tipo de cliente	Número do cliente (nó)	X	Y	Tempo de serviço t_{si} (minutos)
Comercial	0	0	18	0
Comercial	1	6	32	10
Comercial	2	0	0	30
Comercial	3	20	28	12
Comercial	4	20	3	6
Comercial	5	10	26	55
Comercial	6	14	40	6
Emergencial	7	22	28	20
			TOTAL	129

Tabela 4 – Matriz de distâncias em minutos considerando a ordem de emergência

Tipo de cliente	Distância ij	Nº do nó							
	c_{ij}	0	1	2	3	4	5	6	7
Comercial	0	1000	15	18	22	25	13	26	24
Comercial	1	15	1000	33	15	32	7	11	16
Comercial	2	18	33	1000	34	20	28	42	36
Comercial	3	22	15	34	1000	25	10	13	2
Comercial	4	25	32	20	25	1000	25	37	25
Comercial	5	13	7	28	10	25	1000	15	12
Comercial	6	26	11	42	13	37	15	1000	14
Emergencial	7	24	16	36	2	25	12	14	1000

Baseado na inserção das instâncias da rota emergencial nos dados de entrada para a decisão do despacho das equipes (Tabelas 3 e Tabela 4), foram elaborados então nove cenários, todos formados com as mesmas ordens comerciais programadas, considerando então a ocorrência da ordem emergencial e sua alocação ao longo de uma das duas rotas (dois veículos) existentes no problema.

Esses nove cenários representam a formação de alternativas pelo resultado da aplicação do PRV, possibilitando ao gestor visualizar por meio desse conjunto de soluções geradas, o quanto alteraria em cada um dos 9 casos:

- O Tempo Total de Rota (considerando somente a distância c_{ij});
- O Tempo de Espera Comercial (t_j);
- O Tempo de Espera Emergencial (quando alocada na rota);
- O Tempo de Espera Total de Rota (t_j).

Há também a consideração de um cenário em que a ordem não é alocada, e deixa de ser atendida, sem designá-la para nenhuma equipe.

Desta forma, em cada uma das duas rotas, simula-se o quanto alteraria o tempo de rota quando a ordem emergencial é alocada, ou então caso não seja alocada, entre cada arco que liga dois nós de atendimentos dos veículos no circuito. Essa alteração se refere aos parâmetros de instâncias e tempo de serviço dessa ordem emergencial, que é considerada com os mesmos valores para todos os casos (Tabela 3 e 4). Portanto, altera-se unicamente seu ponto de alocação na sequência de atendimento de cada rota, e isso implicará em um valor diferente nos tempos de rota e de espera de acordo com sua localização em relação ao demais clientes da rota.

Salienta-se que com o surgimento da ordem emergencial não há alteração na sequência das ordens comerciais, as rotas permanecem em sua sequência inicial de visitas, ocorrendo somente a inserção da chamada emergencial em uma determinada aresta entre dois nós (clientes) da rota. Neste exemplo, a inserção da ordem emergencial sempre ocorrerá unicamente em uma das rotas (1 ou 2), em vista de que é só uma emergência, permanecendo os mesmos tempos de atendimento e sequência original na rota em que ela não foi alocada. O tempo de espera em cada nó da rota será calculado com base na equação (5.11).

Primeiramente, considerou-se um cenário onde há uma ocorrência de ordem emergencial (Figura 4) e a mesma não será atendida, o que corresponde a deixá-la sem designar a nenhuma equipe. Observa-se nas Figuras 5 e 6 o que ocorre com as ordens comerciais e com a ordem emergencial, quando a mesma não é atendida.

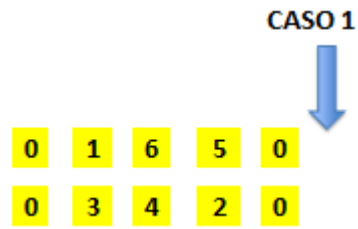


Figura 4 – Definição de rotas sem atender a ordem de emergência

Fonte: Elaborado pela autora.



Figura 5 – Definição de rotas sem atender a ordem de emergência

Fonte: Elaborado pela autora.

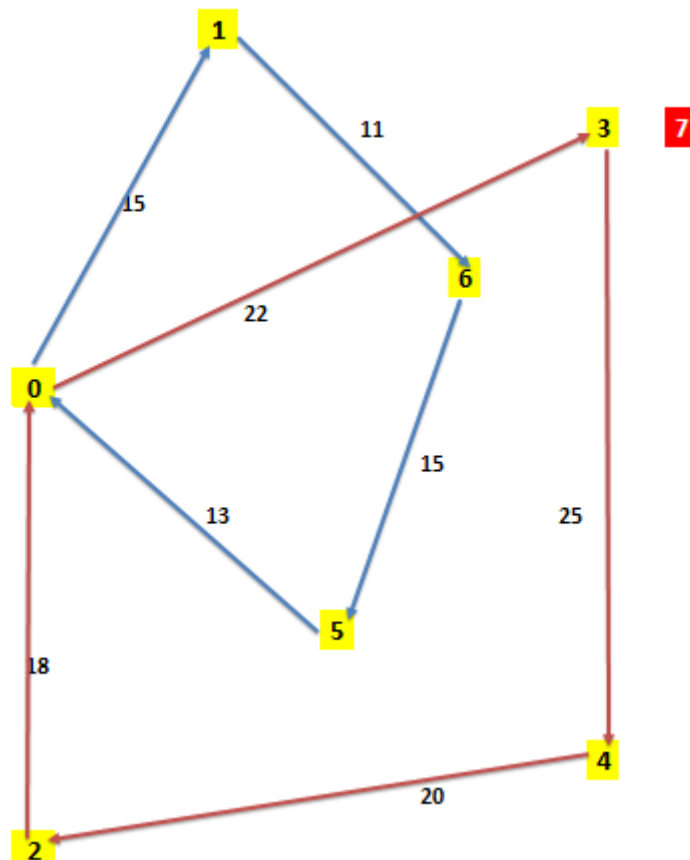


Figura 6 – Definição de rotas sem atender a ordem de emergência

Fonte: Elaborado pela autora.

	Tempo de Rota (só a distância) c_{ij} (min)	Tempo de Espera (t_j) Emergência (min)	Tempo de Espera (t_j) Comerciais (min)	Tempo de Espera Total (t_j) (min)
ROTA 1	112	–	109	109
ROTA 2	116	–	167	167
TOTAL	228	1000	276	276

Quadro 3 – Tempos de rota e espera quando não atende-se a ordem de emergência

Fonte: Elaborado pela autora.

No cenário do caso 1, as duas rotas permanecem inalteradas, conforme é ilustrado na Figura 6. Observa-se no Quadro 3 que não há alteração no seu tempo de rota nem no tempo de espera para os clientes de caráter comercial. Por outro lado, o não-atendimento da ordem emergencial deve ser referido na função que totaliza o tempo de espera para este tipo de ordem de alguma forma. Assumiu-se, neste exemplo, que o não-atendimento de uma ordem emergencial seria equivalente a 1000 minutos.

Desta forma, a partir desse exemplo inicial, serão apresentados outros oito cenários do momento em que surge a ordem de emergência, mostrando cada uma das alternativas do conjunto de solução do PRV para a alocação nas rotas, entre cada cliente, sem alterar a sequência já elaborada da rota comercial, apenas inserindo a emergência em cada ligação entre dois clientes da rota. Com os próximos exemplos, será evidenciado o quanto podem se alterar os tempos das ordens comerciais e a emergencial, de acordo com o local onde será alocada a emergência na rota das equipes de atendimentos.

O caso 2 é apresentado nas Figuras 7, 8 e 9, com o atendimento da ordem emergencial na última posição da primeira rota.



Figura 7 – Definição de rotas atendendo a ordem de emergência

Fonte: Elaborado pela autora.

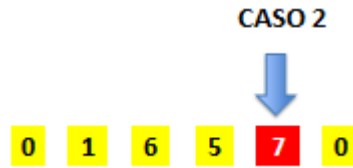


Figura 8 – Definição de rotas atendendo a ordem de emergência

Fonte: Elaborado pela autora.

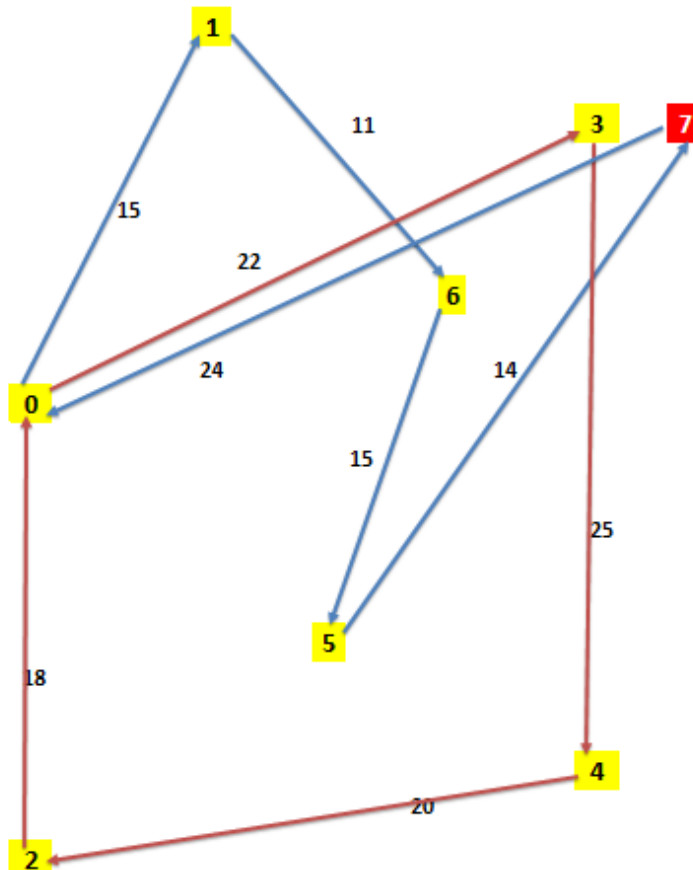


Figura 9 – Definição de rotas considerando a ordem de emergência para o Caso 2

Fonte: Elaborado pela autora.

	Tempo de Rota (só a distância) c_{ij} (min)	Tempo de Espera (t_j) Emergência (min)	Tempo de Espera (t_j) Comerciais (min)	Tempo de Espera Total (t_j) (min)
ROTA 1	144	124	109	233
ROTA 2	116	–	167	167
TOTAL	260	124	276	400

Quadro 4 – Resultados com o atendimento da emergência para o Caso 2

Fonte: Elaborado pela autora.

No caso 2, a ordem de emergência foi inserida na Rota 1 como último atendimento, permanecendo a Rota 2 inalterada, como é possível observar na Figura 9. No que se refere aos tempos, é possível perceber no Quadro 4 que apenas os tempos de espera das ordens comerciais não são alterados.

Na terceira simulação, a emergência foi alocada então no início da Rota 1, ou seja, entre o depósito e primeiro nó atendido (cliente 1), conforme observa-se nas Figuras 10, 11 e 12, que ilustram o caso 3:



Figura 10 – Definição de rotas com o atendimento da ordem de emergência

Fonte: Elaborado pela autora.



Figura 11 – Definição de rotas com o atendimento da ordem de emergência

Fonte: Elaborado pela autora.

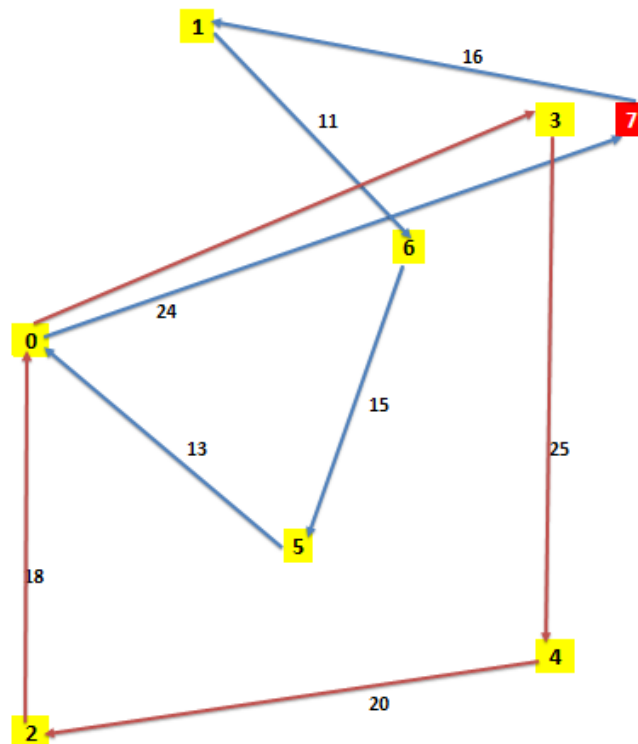


Figura 12 – Definição de rotas considerando a ordem de emergência para o Caso 3

Fonte: Elaborado pela autora.

	Tempo de Rota (só a distância) c_{ij} (min)	Tempo de Espera (t_j) Emergência (min)	Tempo de Espera (t_j) Comerciais (min)	Tempo de Espera (t_j) Total (min)
ROTA 1	158	24	245	269
ROTA 2	116	–	167	167
TOTAL	274	24	412	437

Quadro 5 – Resultados com o atendimento da emergência para o Caso 3

Fonte: Elaborado pela autora.

No caso 3 (Figuras 10, 11 e 12), a emergência é inserida na rota 1 antecedendo todas as ordens comerciais. Como pode-se observar no Quadro 5, neste caso há uma alta redução no tempo de espera da ordem emergencial. Por outro lado, todas as ordens comerciais da Rota 1 são atrasadas, aumentando seu tempo de espera, e o tempo total de espera (Quadro 5). Na Rota 2 os tempos das ordens comerciais permanecem o mesmo da rota original.

No cenário seguinte, a ordem emergencial foi alocada na rota entre o primeiro atendido (cliente 1) e o segundo cliente (cliente 6), na Rota1, como visto nas Figuras 13, 14 e 15 a seguir:



Figura 13 – Definição de rotas com o atendimento da ordem de emergência

Fonte: Elaborado pela autora.



Figura 14 – Definição de rotas com o atendimento da ordem de emergência

Fonte: Elaborado pela autora.

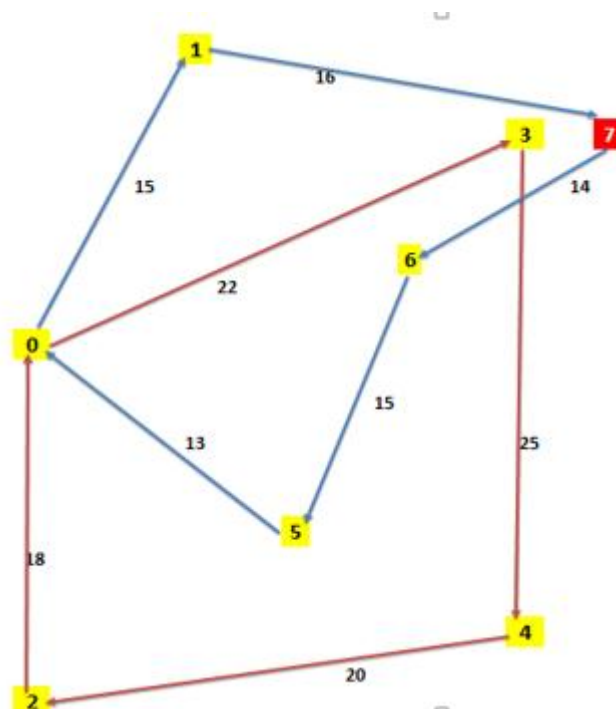


Figura 15 – Definição de rotas considerando a ordem de emergência para o Caso 4

Fonte: Elaborado pela autora.

	Tempo de Rota (só a distância) c_{ij} (min)	Tempo de Espera (t_j) Emergência (min)	Tempo de Espera (t_j) Comerciais (min)	Tempo de Espera (t_j) Total (min)
ROTA 1	152	42	188	230
ROTA 2	116	–	167	167
TOTAL	268	42	355	397

Quadro 6 – Resultados com o atendimento da emergência para o Caso 4

Fonte: Elaborado pela autora.

No caso 4, a partir dos dados do Quadro 6, a postergação no atendimento da ordem emergencial aumenta o tempo de espera desta ordem em relação ao caso anterior. As ordens que restam ainda depois deste serviço emergencial ainda são impactadas com o atraso. Além disso, a Rota 2 permanece com seus tempos iguais, já que não houve alterações na mesma (Quadro 6).

O caso 5 atrasa uma posição a mais no atendimento da ordem emergencial, designada para a equipe da Rota 1 entre o cliente 6 e o último cliente a ser atendido na rota original (cliente 5), como visto nas Figuras 16, 17 e 18 e com os resultados apresentados no Quadro 7.



Figura 16 – Definição de rotas com o atendimento da ordem de emergência

Fonte: Elaborado pela autora.



Figura 17 – Definição de rotas com o atendimento da ordem de emergência

Fonte: Elaborado pela autora.

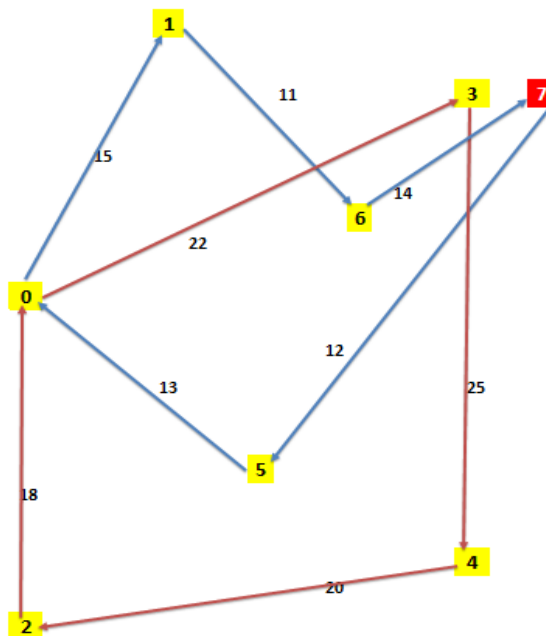


Figura 18 – Definição de rotas considerando a ordem de emergência para o Caso 5

Fonte: Elaborado pela autora.

	Tempo de Rota (só a distância) c_{ij} (min)	Tempo de Espera (t_j) Emergência (min)	Tempo de Espera (t_j) Comerciais (min)	Tempo de Espera(t_j) Total (min)
ROTA 1	144	57	141	198
ROTA 2	116	–	167	167
TOTAL	260	57	308	365

Quadro 7 – Resultados com o atendimento da emergência para o Caso 5

Fonte: Elaborado pela autora.

O caso 6 apresenta a emergência alocada no final da Rota 2, ou seja, entre o último ponto atendido (cliente 2) e o depósito (cliente 0), deixando a Rota 1 inalterada (Figuras 19, 20 e 21).



Figura 19 – Definição de rotas com o atendimento da ordem de emergência

Fonte: Elaborado pela autora.

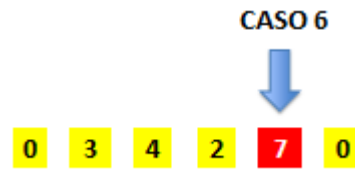


Figura 20 – Definição de rotas com o atendimento da ordem de emergência

Fonte: Elaborado pela autora.

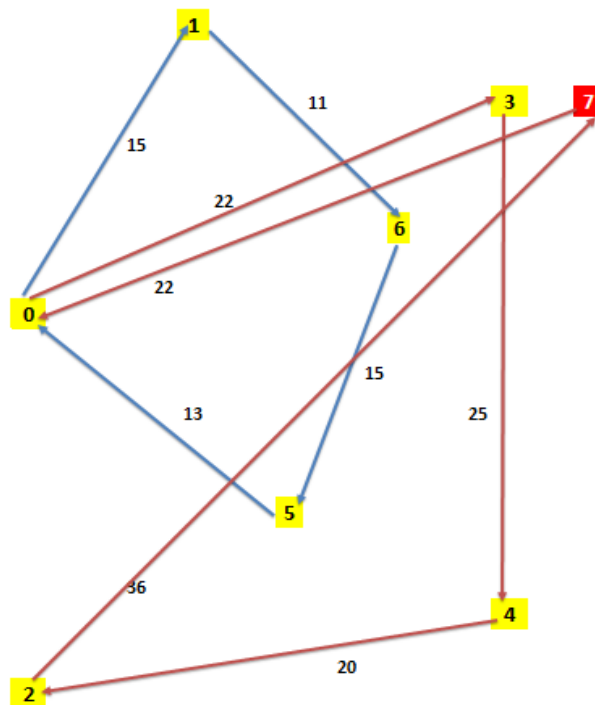


Figura 21 – Definição de rotas considerando a ordem de emergência para o Caso 6

Fonte: Elaborado pela autora.

	Tempo de Rota (só a distância) c_{ij} (min)	Tempo de Espera (t_j) Emergência (min)	Tempo de Espera (t_j) Comerciais (min)	Tempo de Espera (t_j) Total (min)
ROTA 1	112	–	109	109
ROTA 2	171	151	167	428
TOTAL	283	151	276	537

Quadro 8 – Resultados com o atendimento da emergência para o Caso 6

Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se agora que, mesmo atendendo a emergência ao final da Rota 2 (Figura 21), todas as ordens comerciais pertencentes a estas rotas não sofrem alterações em seus tempos de espera, ou seja, não haverá atraso em nenhuma delas, apenas aumentará o tempo total de rota e de espera na Rota 2 (Quadro 8).

Na simulação do caso 7, a emergência foi alocada ao início da Rota 2, ou seja, entre o depósito (cliente 0) e o primeiro cliente atendido (cliente 3), como visto nas Figuras 22, 23 e 24.



Figura 22 – Definição de rotas com o atendimento da ordem de emergência

Fonte: Elaborado pela autora.



Figura 23 – Definição de rotas com o atendimento da ordem de emergência

Fonte: Elaborado pela autora.

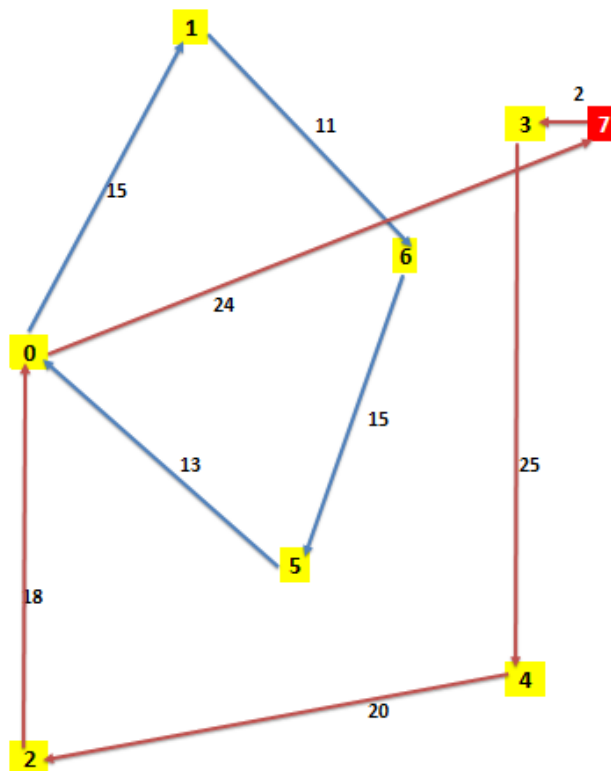


Figura 24 – Definição de rotas considerando a ordem de emergência para o Caso 7

Fonte: Elaborado pela autora.

	Tempo de Rota (só a distância) c_{ij} (min)	Tempo de Espera (t_j) Emergência (min)	Tempo de Espera (t_j) Comerciais (min)	Tempo de Espera (t_j) Total (min)
ROTA 1	112	–	109	109
ROTA 2	139	24	239	263
TOTAL	251	24	348	372

Quadro 9 – Resultados com o atendimento da emergência para o Caso 7

Fonte: Elaborado pela autora.

No caso 7, quando há a inserção da emergência no início da Rota 2 (Figuras 22, 23 e 24), percebe-se que ela atrasará o atendimento de todas as demais ordens comerciais contidas nesta Rota (Quadro 9). Por outro lado, o tempo de espera da ordem emergencial fica consideravelmente reduzido. Já a Rota 1 permanece com seus valores inalterados. Para a

simulação do caso 8, a emergência foi inserida na Rota 2 entre o primeiro cliente atendido (cliente 3) e o segundo (cliente 4), como observado nas Figuras 25, 26 e 27.



Figura 25 – Definição de rotas com o atendimento da ordem de emergência

Fonte: Elaborado pela autora.



Figura 26 – Definição de rotas com o atendimento da ordem de emergência

Fonte: Elaborado pela autora.

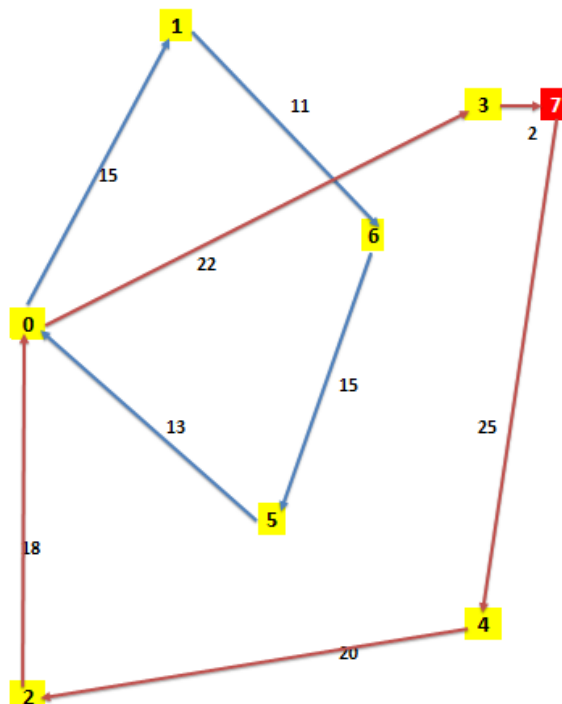


Figura 27 – Definição de rotas considerando a ordem de emergência para o Caso 8

Fonte: Elaborado pela autora.

	Tempo de Rota (só a distância) c_{ij} (min)	Tempo de Espera (t_j) Emergência (min)	Tempo de Espera (t_j) Comerciais (min)	Tempo de Espera (t_j) Total (min)
ROTA 1	112	–	109	109
ROTA 2	138	59	256	314
TOTAL	250	59	365	423

Quadro 10 – Resultados com o atendimento da emergência para o Caso 8

Fonte: Elaborado pela autora.

No exemplo acima do caso 8, com a ordem emergencial alocada no meio do percurso Rota 2, ela não atrasa o atendimento do cliente comercial 3 (Figura 27) mas eleva os tempos de espera considerando o somatório total da rota (Quadro 10). E a Rota 1, por sua vez, fica inalterada tendo seus tempos mantidos (Quadro 10).

Por fim, na última simulação da Rota 2, a emergência foi designada para a Rota 2 entre o cliente 4 e o último cliente a ser atendido na rota original (cliente 2), obtendo o seguinte cenário conforme ilustram as Figuras 28, 29 e 30.



Figura 28 – Definição de rotas com o atendimento da ordem de emergência

Fonte: Elaborado pela autora.



Figura 29 – Definição de rotas com o atendimento da ordem de emergência

Fonte: Elaborado pela autora.

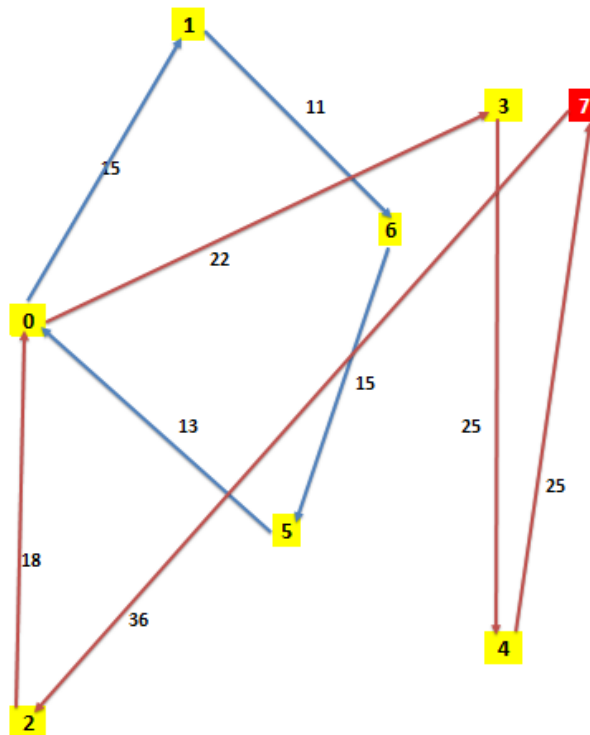


Figura 30 – Definição de rotas considerando a ordem de emergência para o caso 9

Fonte: Elaborado pela autora.

	Tempo de Rota (só a distância) c_{ij} (min)	Tempo de Espera (t_j) Emergência (min)	Tempo de Espera (t_j) Comerciais (min)	Tempo de Espera (t_j) Total (min)
ROTA 1	112	–	109	109
ROTA 2	176	104	252	356
TOTAL	288	104	361	465

Quadro 11 – Resultados para com o atendimento da emergência para o Caso 9

Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se no caso 9, que a inserção da emergência na Rota 2 apenas a frente do cliente comercial 2 (Figura 30), atrasa o tempo de espera somente dele, por outro lado o tempo de espera da emergência é maior (Quadro 11), e isso se reflete em um tempo total de espera para atendimento maior na Rota 2 (Quadro 11).

5.1 Discussão dos resultados

A partir dos exemplos apresentados, com as simulações de alternativas para a alocação de uma emergência entre os clientes pertencentes a uma rota, percebe-se o quanto uma ordem de emergência, ou seja, uma demanda não programada para ser atendida naquele dia, poderá alterar o tempo de trajeto de uma equipe e o tempo de atendimento, conseqüentemente isso significa aumento de custos para a concessionária. Percebe-se também que, caso a ordem emergencial não seja atendida, isso poderá acarretar um alto custo para a concessionária

Faz-se relevante ressaltar novamente que no momento em que a ordem emergencial é inserida em uma das rotas para atendimento, ela não altera seqüência original da rota pré-programada das ordens comerciais, somente ficará alocada entre os arcos que ligam dois pontos (clientes) da rota original. Além disso, quando inserida em uma das rotas, como nos nove exemplos apresentados contendo apenas uma ordem emergencial, a outra rota permanece a mesma, com a elaboração *a priori* das rotas comerciais, assim como seus tempos de espera.

Desta forma, diante desse cenário, a concessionária busca decidir pela melhor alternativa, onde seja capaz de satisfazer todas as demandas, mas ao mesmo tempo em que esse atendimento represente o menor custo possível dentro da realidade que está trabalhando. Assim, quanto maior for a capacidade do gestor de contemplar dados da realidade na sua análise para a tomada de decisão, melhores serão as chances de uma decisão mais assertiva.

Neste sentido, é possível constatar pelo exemplo que minimizar tempo de espera é diferente de minimizar tempo de rota e este tempo de espera retrata de forma mais própria o esforço de aumentar a produtividade das equipes envolvidas. Isso ocorre porque tempos maiores de atendimento são propagados para aqueles que restam à frente da rota.

Há que se observar um cenário para a tomada de decisão que contemple um compromisso entre o impacto causado no atraso das ordens comerciais com a premência de atendimento dos serviços emergenciais, ambos mensurados com o tempo de espera de cada tipo de atendimento. Caso fosse possível uma enumeração exaustiva, seria necessário proceder com o mesmo procedimento ilustrado no exemplo anterior, com a análise de todas as possibilidades de atendimento dos serviços emergenciais pendentes. As Tabelas 5 e 6 apresentam um resumo de todos os casos do exemplo, com os detalhes acerca dos tempos de espera em cada um desses casos. A Figura 31, por sua vez, ilustra o compromisso entre o tempo de espera para as ordens comerciais e emergenciais para cada um dos 9 casos.

Tabela 5 – Resultados dos tempos totais de todas as rotas

Número do caso	Tempo total de rota (distância c_{ij})	Tempo de espera (t_j) emergencial	Tempo de espera (t_j) comercial	Tempo de espera total de rota (t_j)
CASO 1	228	1000	276	276
CASO 2	260	124	276	400
CASO 3	274	24	412	437
CASO 4	268	42	355	397
CASO 5	260	57	308	365
CASO 6	283	151	276	537
CASO 7	251	24	348	372
CASO 8	250	59	365	423
CASO 9	288	104	361	465

Tabela 6 – Comparação dos Tempos totais de espera das ordens comerciais e emergenciais

CASOS	Tempo de espera emergencial	Tempo de espera Comercial
1	1000	276
2	124	276
3	24	412
4	42	355
5	57	308
6	151	276
7	24	348
8	59	365
9	104	361

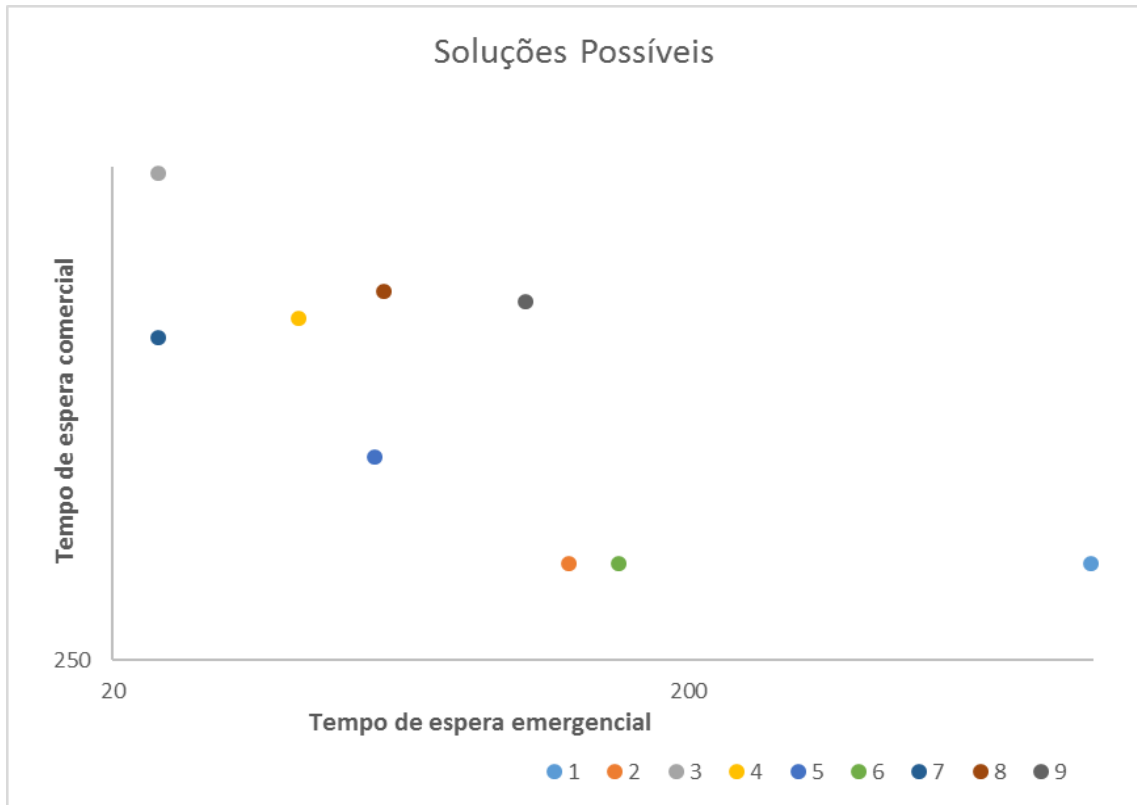


Figura 31 – Conjunto de Soluções para os 9 Casos

Fonte: Elaborado pela autora.

Observando-se a Tabela 6 e as três soluções destacadas, 2, 3 e 8, não há como afirmar que existe uma solução melhor entre essas três: quando os dois critérios são assumidos simultaneamente, tempo de espera para as ordens comerciais e tempo de espera para as ordens emergenciais são assumidos, uma solução apresenta vantagem em relação a outra em um critério e desvantagem em relação ao outro. Tal situação descreve a não-dominância em otimização multiobjetivo (FONSECA e FLEMING, 1995). O que pode-se analisar a partir dessa comparação é que por um lado seria mais indicado escolher o caso 2, por ter um tempo de ordem comercial menor, no entanto, quando considera-se o tempo de espera da ordem emergencial, é mais interessante optar pelo caso 8, onde esse tempo é menor. A partir dessa comparação, percebe-se que a decisão tratará de uma contradição: assumir a alternativa 2 considerando o tempo de espera das ordens comerciais e assumir a alternativa 8 quando se considera o tempo de espera emergencial.

Desta forma, torna-se inviável escolher uma única alternativa assumindo os dois critérios simultaneamente, o que sugere uma metodologia que vá além dessa comparação mais simples como a demonstrada neste estudo de caso. A Metodologia AHP representa uma

possibilidade de eliminar esta dificuldade na tomada de decisão, por meio da definição de ponderações assumidas a priori para cada critério considerado, sendo esta ponderação posteriormente aplicada às alternativas de solução consideradas.

Nas próximas seções será abordado uso dessa metodologia, mostrando o quanto ela melhora a qualidade da tomada de decisão, é mais objetiva e cria um cenário que retrata melhor os pesos de cada alternativa para a tomada de decisão, com base nos trabalhos citados no referencial, que aborda as decisões do PRV com essa abordagem de multicritérios.

6 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA AHP PARA A TOMADA DE DECISÃO NO ROTEAMENTO DE ORDENS EMERGENCIAIS

6.1 Processo Analítico Hierárquico – (Analytic Hierarchy Process - AHP)

O ajuste das prioridades no AHP fundamenta-se na habilidade do ser humano de perceber o relacionamento entre objetos e situações observadas, comparando pares à luz de um determinado foco ou critério (julgamentos paritários).

A priorização das alternativas (BOAS, 2005) é obtida de respostas a perguntas do tipo: “qual a importância do critério 1 em relação ao critério 2?” Esse procedimento é conhecido por comparação par a par (pair wise comparison), sendo utilizado para estimar a escala em que os elementos de cada nível da hierarquia são medidos e avaliar, no final, a performance de cada alternativa em relação aos critérios.

Portanto, o método se baseia na comparação entre pares de critérios e subcritérios e na construção de uma série de matrizes quadradas. As comparações par a par, expressas em termos verbais, são convertidas em valores numéricos usando a Escala Fundamental de Saaty para julgamentos comparativos, sendo essa escala de valores, que varia de 1 a 9, demonstrada no quadro (13). Mede-se então, o grau de importância do elemento de um determinado nível sobre os elementos de um nível inferior

Intensidade da Importância	Definição	Explicação
1	Mesma importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação a outra
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação a outra
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação a outra, sua demonstração de importância é demonstrada na prática
9	Importância absoluta	Quando se procura uma relação de compromisso entre duas definições
2,4,6,8	Valores Intermediários entre os valores adjacentes	Quando se procura uma condição entre duas definições.

Quadro 12 – Escala Fundamental de Saaty

Fonte: Adaptado de Saaty (1991)

A partir do estudo de caso apresentado no capítulo cinco, será demonstrada agora a aplicação da metodologia AHP, utilizando os resultados obtidos na definição do problema de decisão de roteamento de veículos para a alocação da ordem emergencial.

O objetivo que se busca com a metodologia AHP está na possibilidade de calcular os pesos dos critérios envolvidos na tomada de decisão de um gestor de despacho de equipes de atendimentos, de modo a indicar a classificação mais adequada às ponderações subjetivas definidas *a priori*.

A partir do estudo de caso do capítulo cinco, busca-se a classificação dos 9 casos segundo a importância dada para os critérios de tempo de espera para atendimento das ordens emergenciais e o critério de tempo de espera para atendimento das ordens comerciais, cujos valores para esses 9 casos são apresentados na Tabela 7 e o gráfico de dispersão correspondente é apresentado na Figura 32.

Salienta-se que os cálculos foram executados em *Microsoft Excel* e também executados e recalculados a fim de confiabilidade com o Software *Matlab*.

Tabela 7 – Tempos totais de espera das ordens comerciais e emergenciais

CASOS	Tempo de espera emerg.ae	Tempo de espera Comercial ac
1	1000	276
2	124	276
3	24	412
4	42	355
5	57	308
6	151	276
7	24	348
8	59	365
9	104	361

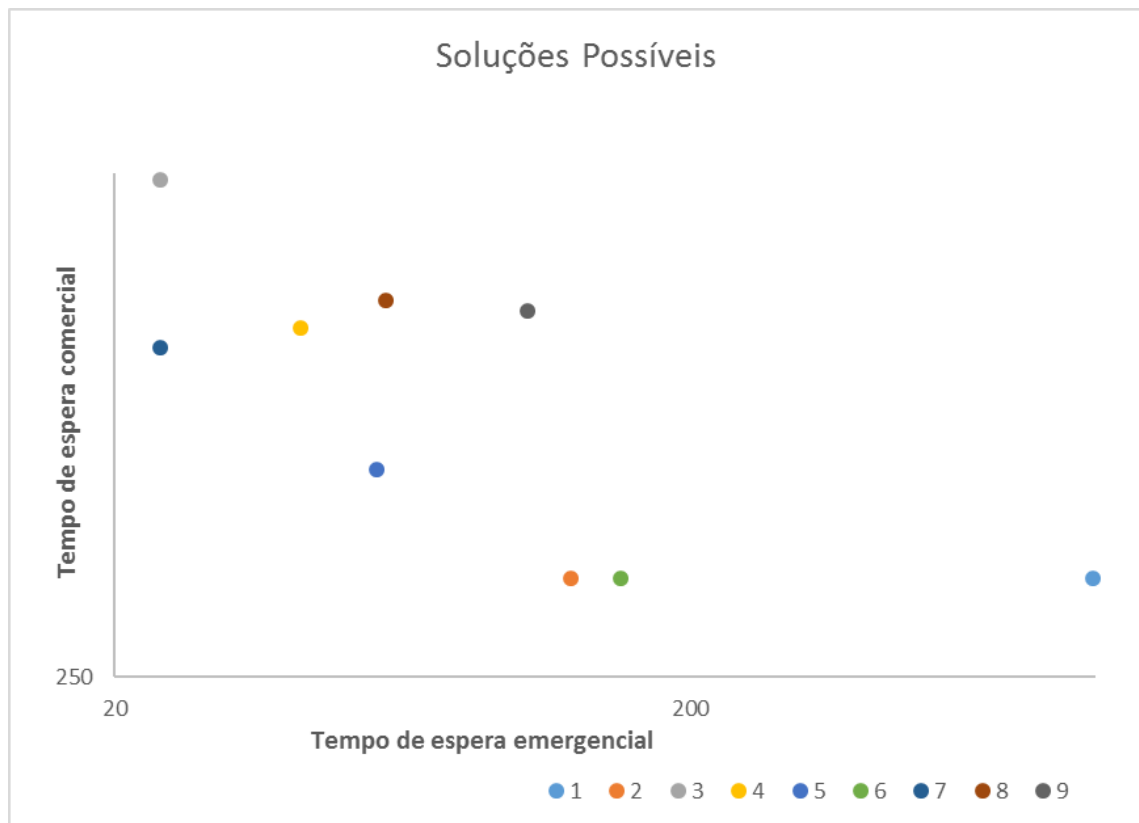


Figura 32 – Conjunto de Soluções para os 9 Casos elaborados no capítulo 5

Fonte: Elaborado pela autora.

Primeiramente é formada uma Matriz de comparação das hierarquias de cada valor dos dois critérios (Tempo Emergencial-Ci e Tempo Comercial-Cj), fazendo a comparação de pesos entre os nove casos para estes dois critérios.

Como pode-se ver abaixo, a comparação par a par gera matrizes quadradas, onde o número na linha i e na coluna j dá a importância do critério C_i em relação ao critério C_j , como se observa na forma matricial indicada a seguir.

Os elementos a_{ij} indicam o julgamento do par de critérios (C_i, C_j) e α o valor da intensidade de importância. Saaty (1991) define as seguintes regras para cada elemento a_{ij} da matriz:

Se $a_{ij} = \alpha$, então $a_{ji} = 1/\alpha, \alpha \neq 0$.

• Se C_i é julgado como de igual importância relativa a C_j , então $a_{ij} = 1, a_{ji} = 1$ e

$a_{ij} = 1$, para todo i .

Para o exemplo proposto, a matriz abaixo demonstra a comparação do desempenho das alternativas à luz dos dois critérios envolvidos no problema, traduzida em julgamentos.

No cálculo para obter a matriz abaixo divide-se, por exemplo: o segundo elemento (124) pelo primeiro elemento da coluna (1000), (vide Tabela 7): $124 / 1000 = 0,124$. O resultado dessa divisão procura evidenciar quantas vezes um é menor que outro: $1 / 0,124 = 8,06$. Este resultado é exatamente o segundo elemento da primeira coluna da matriz abaixo.

Calcula-se os demais elementos da matriz da mesma forma, visando obter a relação de quantas vezes um número é menor que o outro, destacando positivamente essa diferença entre eles, sendo considerado que os menores resultados são os melhores, pois eles representam os menores tempos e o problema objetiva a minimização desses tempos.

	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,00	2	0,12	0,02	0,04	0,06	0,15	0,02	0,06	0,10	
8,06	3	1,00	0,19	0,34	0,46	1,22	0,19	0,48	0,84	
41,6	4	5,17	1,00	1,75	2,38	6,29	1	2,46	4,33	
23,8	5	2,95	0,57	1,00	1,36	3,60	0,57	1,40	2,48	
17,5	6	2,18	0,42	0,74	1,00	2,65	0,42	1,04	1,82	
6,62	7	0,82	0,16	0,28	0,38	1,00	0,16	0,39	0,69	
41,6	8	5,17	1,00	1,75	2,38	6,29	1,00	2,46	4,33	
16,95	9	2,10	0,41	0,71	0,97	2,56	0,41	1,00	1,76	
9,62		1,19	0,23	0,40	0,55	1,45	0,23	0,57	1,00	

A partir as matrizes normalizadas, procede-se com o cálculo das médias das linhas, com a ilustração da média para as primeiras linhas das duas matrizes anteriores (T_E e T_C) mostrada a seguir.

$$w_{E1} = \frac{0,005990 + 0,005990 + 0,005990 + 0,005990 + 0,005990 + 0,005990 + 0,005990 + 0,005990 + 0,005990}{9}$$

$$w_{E1} = 0,005990$$

$$w_{C1} = \frac{0,130595 + 0,130595 + 0,130595 + 0,130595 + 0,130595 + 0,130595 + 0,130595 + 0,130595 + 0,130595}{9}$$

$$w_{C1} = 0,130595$$

Foram elaborados então as Tabelas 8, 9 e 10, a fim de comparar todos os critérios em relação às alternativas e em relação ao objetivo Global. Cumprida a fase de coleta dos julgamentos de valor, e conseqüente formação das matrizes de comparação para cada nó de julgamento dos níveis hierárquicos, a fase que segue é o momento de associação de prioridades às alternativas viáveis. Para o primeiro caso, considera-se um gestor que dará prioridade para as ordens emergências, atribuindo 64% (0,64) de importância para o tempo de espera das ordens emergências. Para as ordens comerciais, resta 36% ($1-0,64=0,36$). Os resultados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Classificação dos Pesos priorizando o critério $T.E$

CLASSIFICAÇÃO DOS PESOS	Critério $T.E:0,64$	Critério $T.C:0,36$	VALORES	NÚMERO DO CASO
1º	0,159739	0,037287	0,197026	7
2º	0,159740	0,031495	0,191234	3
3º	0,091280	0,036552	0,127831	4
4º	0,067259	0,042129	0,109388	5
5º	0,064979	0,035550	0,100529	8
6º	0,030917	0,047014	0,077931	2
7º	0,036863	0,035944	0,072807	9
8º	0,025389	0,047014	0,072403	6
9º	0,003834	0,047014	0,050848	1

Já no segundo caso, considera-se um gestor que dará prioridade as ordens comerciais (64% para o tempo de espera das ordens comerciais e 36% para o tempo de espera das ordens emergenciais), visando manter o atendimento das ordens de caráter comercial antes das emergenciais, buscando elencar as emergências para o fim da rota. Os resultados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Classificação dos Pesos priorizando o critério $T.C$

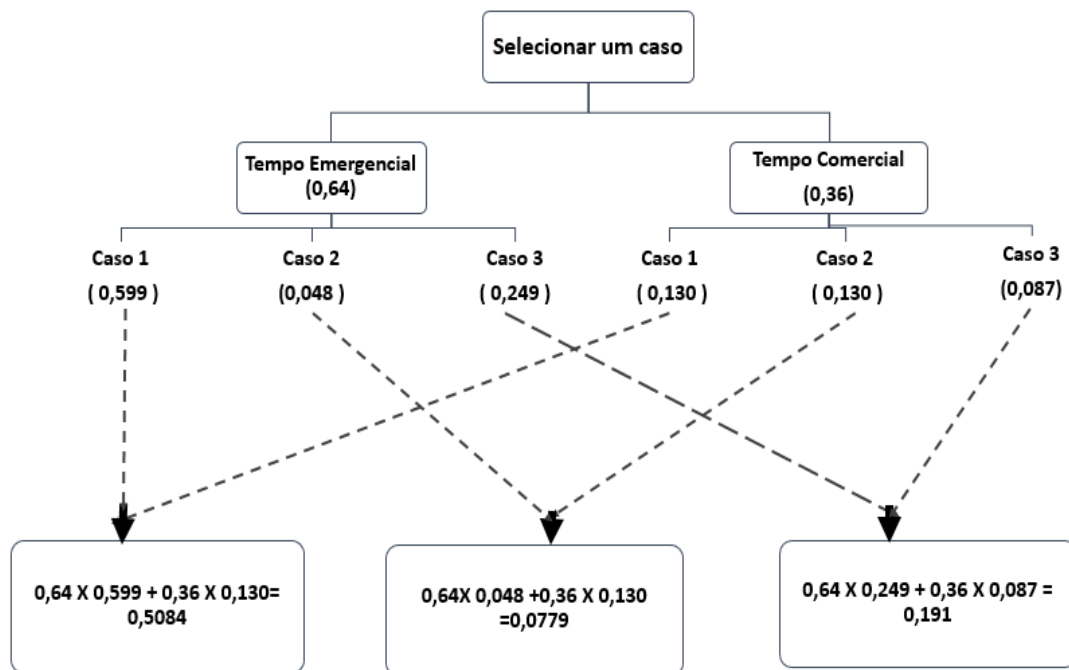
CLASSIFICAÇÃO DOS PESOS	Critério $T.E:0,36$	Critério $T.C:0,64$	VALORES	NÚMERO DO CASO
1º	0,089853	0,066288	0,156142	7
2º	0,089854	0,055991	0,145844	3
3º	0,051345	0,064981	0,116326	4
4º	0,037833	0,074897	0,112730	5
5º	0,017391	0,083581	0,100972	2
6º	0,036551	0,063201	0,099751	8
7º	0,089854	0,066288	0,097862	6
8º	0,002156	0,083581	0,085737	1
9º	0,020735	0,063901	0,084636	9

Por fim, exemplifica-se um caso onde o especialista considera os dois critérios igualmente importantes, atribuindo 50% para cada um deles.

Tabela 10 – Classificação dos Pesos com importância equivalentes dos critérios

CLASSIFICAÇÃO DOS PESOS	Critério $T.E:0,50$	Critério $T.C:0,50$	VALORES	NÚMERO DO CASO
1º	0,124797	0,051788	0,176584	7
2º	0,124797	0,043743	0,168539	3
3º	0,071312	0,050766	0,122079	4
4º	0,052546	0,058513	0,111059	5
5º	0,050765	0,049376	0,100140	8
6º	0,024154	0,065297	0,089452	2
7º	0,019835	0,065297	0,085133	6
8º	0,028799	0,049923	0,078722	9
9º	0,002995	0,065297	0,068292	1

Desta forma, a estrutura geral do processo de decisão AHP para os nove casos, considerando os dois critérios definidos (tempo de espera para as ordens emergenciais e tempo de espera para as ordens comerciais), é apresentada nas Figuras 33,34 e 35. Pode-se compreender o desdobramento do problema com a ilustração da Figura 36, onde envolve-se uma única hierarquia (nível) com dois critérios (Tempo Emergencial e Tempo Comercial) e nove alternativas de decisão (Caso 1 ao Caso 9).

Figura 33 – Resumo dos cálculos do AHP de priorização do critério $T.E$ (Caso 1 ao 3)

Fonte: Adaptação da figura 13.1, conforme disposto em Taha (2008, p. 220).

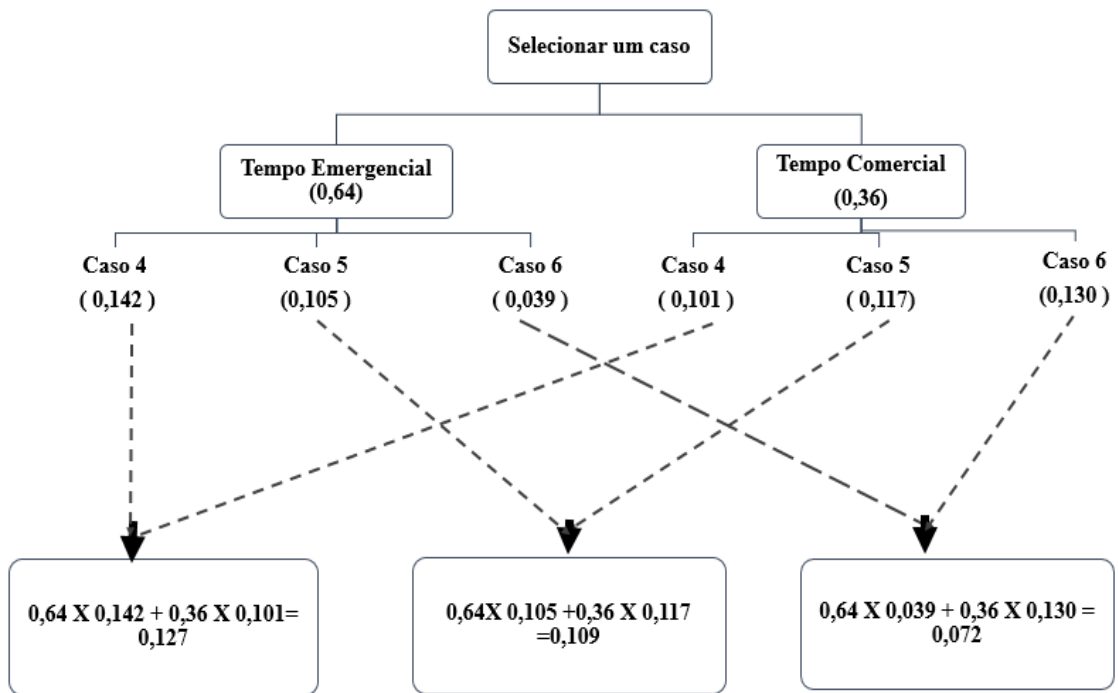


Figura 34 – Resumo dos cálculos do AHP de priorização do critério $T.E$ (Caso 4 ao 5)

Fonte: Adaptação da figura 13.1, conforme disposto em Taha (2008, p .220).

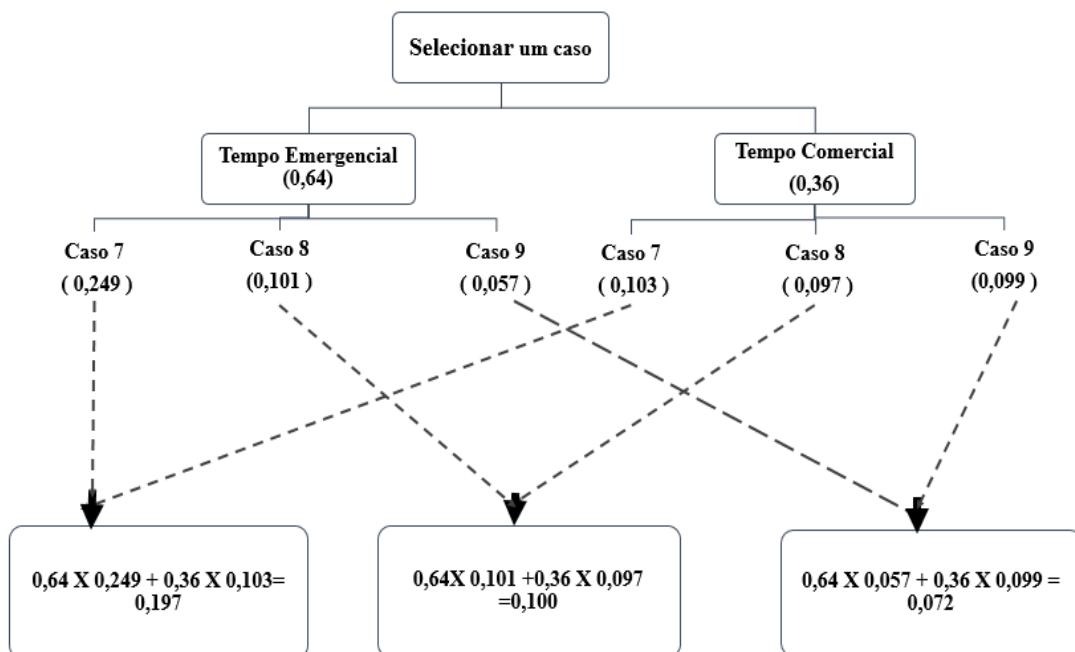


Figura 35 – Resumo dos cálculos do AHP de priorização do critério $T.E$ (Caso 7 ao 9)

Fonte: Adaptação da figura 13.1, conforme disposto em Taha (2008, p. 220).

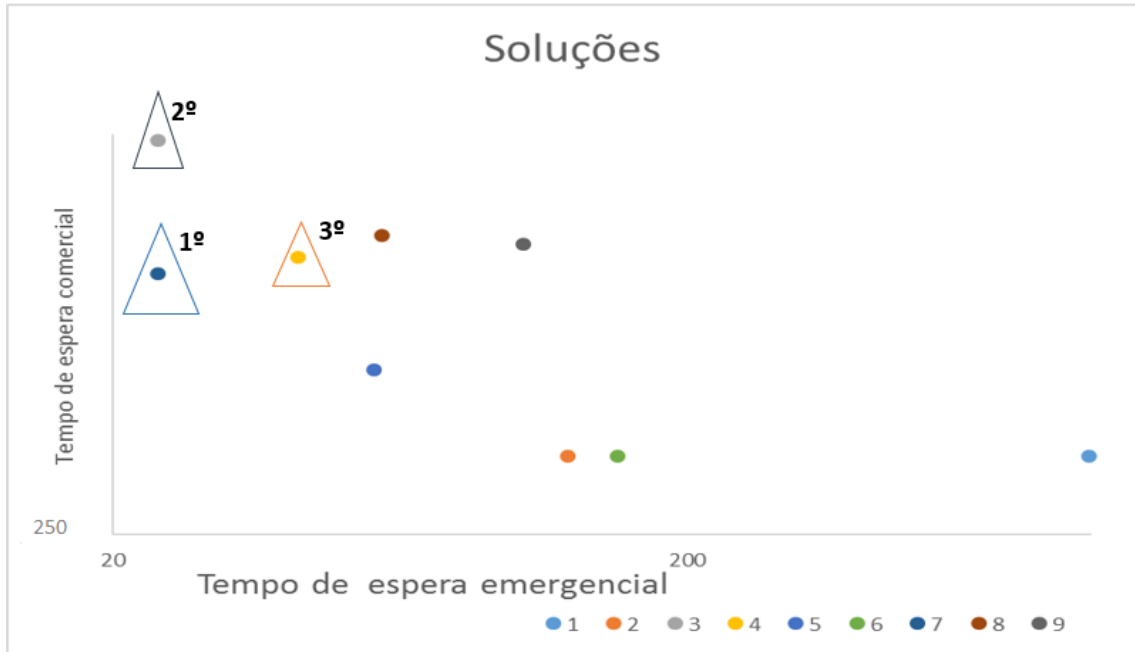


Figura 36 – Classificação dos Casos com a Metodologia AHP

Fonte: Elaborado pela autora.

Ao verificar esses resultados, constata-se que o Caso número 7, o qual tem ($T.E= 24$; $T.C= 248$) apresentou o peso composto mais alto, logo representa a melhor opção para ser admitida pelo analista responsável pelas ordens de despacho quando ocorre uma ordem emergencial no cenário. Este resultado é comprovado no cenário ao observar a Figura 36, onde o ponto 7 está em 1º lugar da classificação dos pesos, seguido do ponto 3 em segundo lugar (caso 3) e do ponto 4 (Caso 4) em terceiro lugar como melhor opção.

Ao final verifica-se que a classificação obtida é coerente com o processo decisório prático empreendido e o caso 7, ilustrado na Figura 27, resulta na melhor alternativa, que corresponde à designação da ordem emergencial no início da Rota 2.

Desta forma, decide-se por antecipar o atendimento da emergência postergando as demais ordens comerciais contidas na rota, apontando assim como a melhor alternativa em relação a todas as outras nove testadas no problema.

7 RESULTADOS: ESTUDO DE CASOS COM DADOS REAIS

Após a definição da abordagem para tratamento da metodologia AHP na tomada de decisão para o problema de despacho de ordens de serviço emergenciais, são apresentados neste capítulo os resultados da resolução de duas instâncias práticas, oriundas de cenários reais de despacho colhidos em uma concessionária de distribuição de energia elétrica.

Foram considerados os dois critérios já descritos no capítulo anterior: a minimização do tempo de espera para atendimento das ordens emergenciais e a minimização do tempo de espera para atendimento das ordens comerciais. Ficou evidente a natureza conflitante entre eles, o que sugere o emprego de um algoritmo baseado na obtenção de um conjunto de soluções eficientes.

Nos casos considerados até então, tratava-se da minimização dos tempos de espera, seja para as ordens emergenciais ou mesmo para as ordens comerciais. Nestes dois estudos de caso apresentados neste capítulo foram considerados os custos em Reais (R\$) para os tempos de espera das ordens emergenciais e comerciais. Este custo é obtido por meio do produto entre o tempo de espera de cada ordem e o respectivo custo em R\$/hora.

As subseções 5.1 e 5.2 referenciam o estudo de caso 1 e o estudo de caso 2, respectivamente.

7.1 Estudo de caso 1

Neste estudo de caso foi contemplada uma instância com os seguintes dados:

- 30 ordens comerciais;
- 6 ordens emergenciais;
- 3 equipes.

Há que se decidir qual será a rota e a posição relativa para cada uma das 6 ordens emergenciais nas 3 rotas existentes, uma para cada equipe disponível.

O algoritmo (GARCIA et al., 2014) utilizado fornece um conjunto de soluções não-dominadas que representam o resultado de um processo de otimização baseado no conceito de otimização de Pareto. Baseou-se nas mesmas premissas descritas nos capítulos 3 e 4,

considerando os pontos de partida, os tempos de deslocamento c_{ij} e os tempos de serviço t_{si} para cada cliente.

A Tabela 11 apresenta as soluções não-dominadas encontradas pelo algoritmo adotado, que promove a solução do problema de roteamento de veículos quando consideradas as 3 rotas e as 36 ordens da instância. São apresentados os valores de cada um dos dois critérios considerados para as soluções: o custo do tempo de espera das ordens emergenciais (CT_e) e o custo do tempo de espera para as ordens comerciais (CT_c).

Tabela 11 – Custos para os tempos de espera das ordens emergenciais e comerciais de cada solução alternativa para o estudo de caso 1

SOLUÇÃO	CT_e (R\$)	CT_c (R\$)
1	291,0148734	354,975792
2	272,8561448	412,5623969
3	272,8507388	412,5804728
4	276,3997586	411,6803824
5	276,3314765	411,805271
6	288,9123292	410,9723627

A partir desse resultado foi possível obter o gráfico da Figura 37, que demonstra a dispersão destas soluções no espaço CT_e x CT_c . Não há como definir uma melhor solução entre as 6 apresentadas que seja melhor que todas as outras, assumindo os dois critérios simultaneamente. Contudo, o decisor precisa adotar uma delas como a solução do despacho e justamente nesta circunstância que entra a tomada de decisão apoiada pela metodologia AHP.

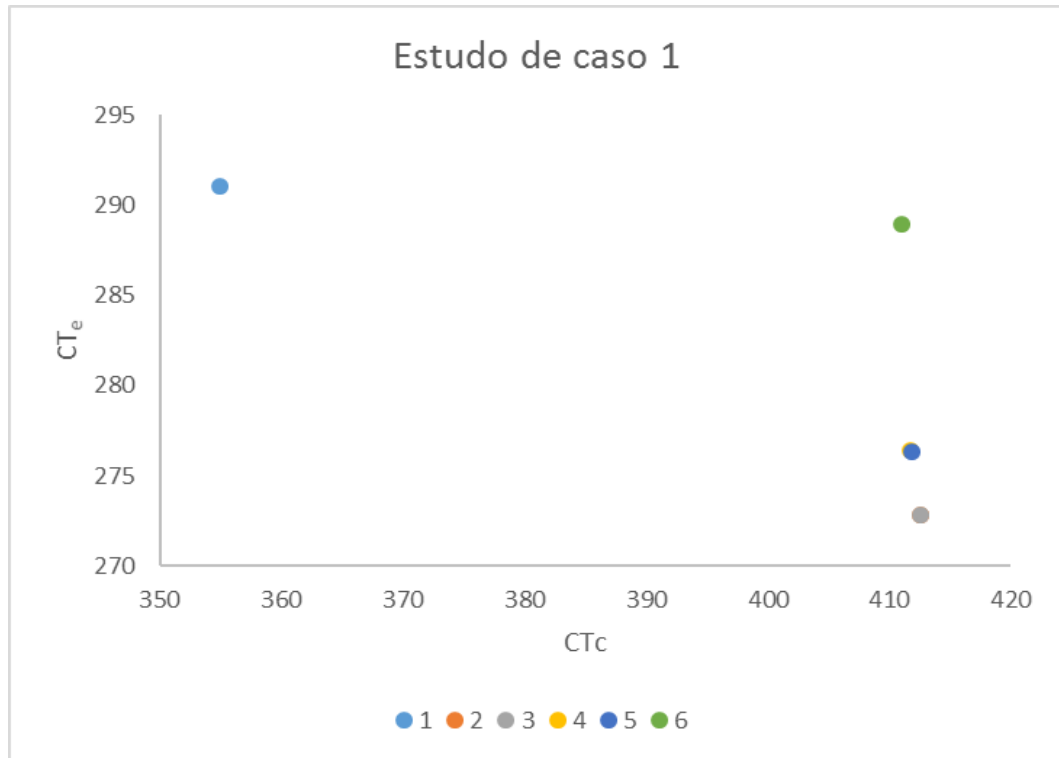


Figura 37 – Conjunto de Soluções para o Estudo de Caso 1

Fonte: Elaborado pela autora.

Foram consideradas as mesmas premissas da metodologia AHP descrita no capítulo 4 para obtenção da matriz de julgamentos normalizada, descrita na Equação 10. Para cada nó de julgamento da hierarquia calculou-se a matriz normalizada para os dois critérios analisados (CT_e , CT_c) para as 6 soluções alternativas encontradas. Por fim, realizou-se a normalização da matriz, com a divisão pelas colunas e o somatório das médias das linhas assim como nas equações 11, 12 e 13 do capítulo 4, resultando na matriz apresentada a seguir:

$$\begin{array}{c}
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \end{array}
 \begin{array}{cc}
 CT_E & CT_C \\
 \left(\begin{array}{cc}
 \mathbf{0,10673} & \mathbf{0,12558} \\
 \mathbf{0,11383} & \mathbf{0,10805} \\
 \mathbf{0,11383} & \mathbf{0,10804} \\
 \mathbf{0,11237} & \mathbf{0,10828} \\
 \mathbf{0,1124} & \mathbf{0,10825} \\
 \mathbf{0,1075} & \mathbf{0,10847}
 \end{array} \right)
 \end{array}$$

Obtidos esses valores foi então elaborada a Tabela 12, como comparação para todos os critérios em relação às alternativas e em relação ao objetivo principal. Cumprida a fase de

coleta dos julgamentos de valor, e consequente formação das matrizes de comparação para cada nó de julgamento dos níveis hierárquicos, foi então feita a associação de prioridades às alternativas viáveis com os seguintes valores que hipoteticamente o gestor atribuiria a cada critério considerando sua subjetividade: $CT_E:0,75$ e o $CT_C:0,25$, isto é, dando maior importância para o cálculo ao critério de emergência, como observa-se a seguir.

Tabela 12 – Classificação dos Pesos priorizando o critério CT_E para o estudo de caso 1

CLASSIFICAÇÃO DOS PESOS	Critério $CT_E:0,75$	Critério $CT_C:0,25$	VALORES	NÚMERO DA SOLUÇÃO
1º	0,10673	0,12558	0,11238	1
2º	0,11383	0,10805	0,1121	2
3º	0,11383	0,10804	0,1121	3
4º	0,1124	0,10825	0,11115	4
5º	0,11237	0,10828	0,11114	5
6º	0,1075	0,10847	0,10779	6

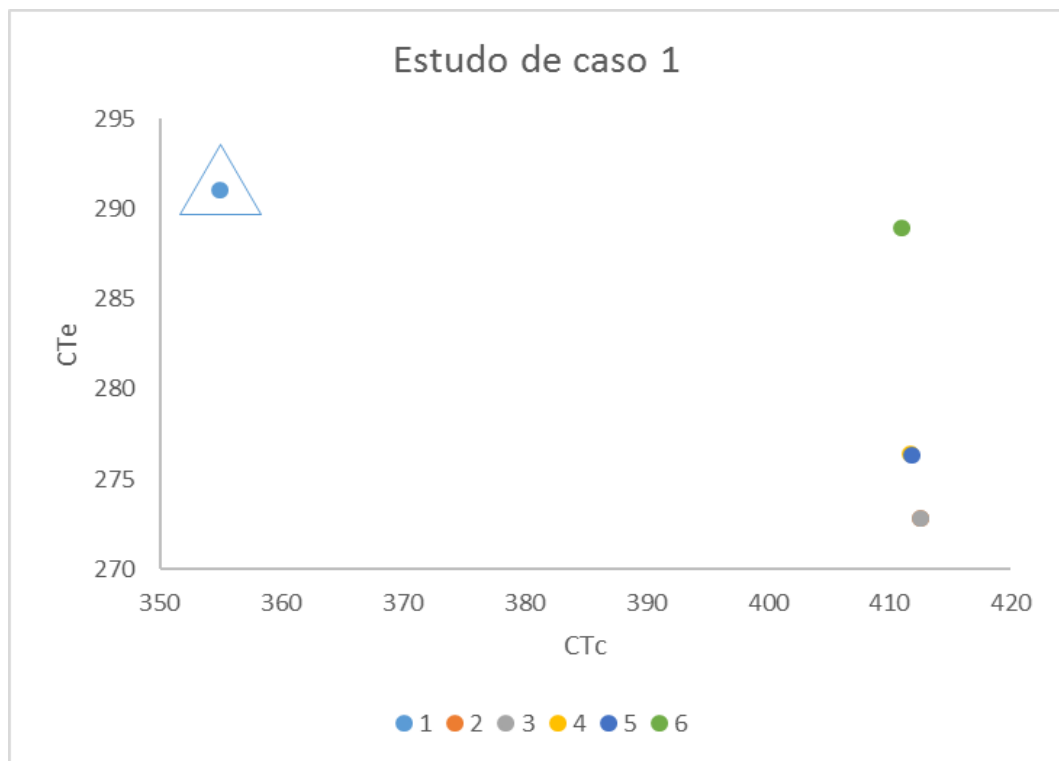


Figura 38 – Classificação do Caso 1 com a Metodologia AHP

Fonte: Elaborado pela autora.

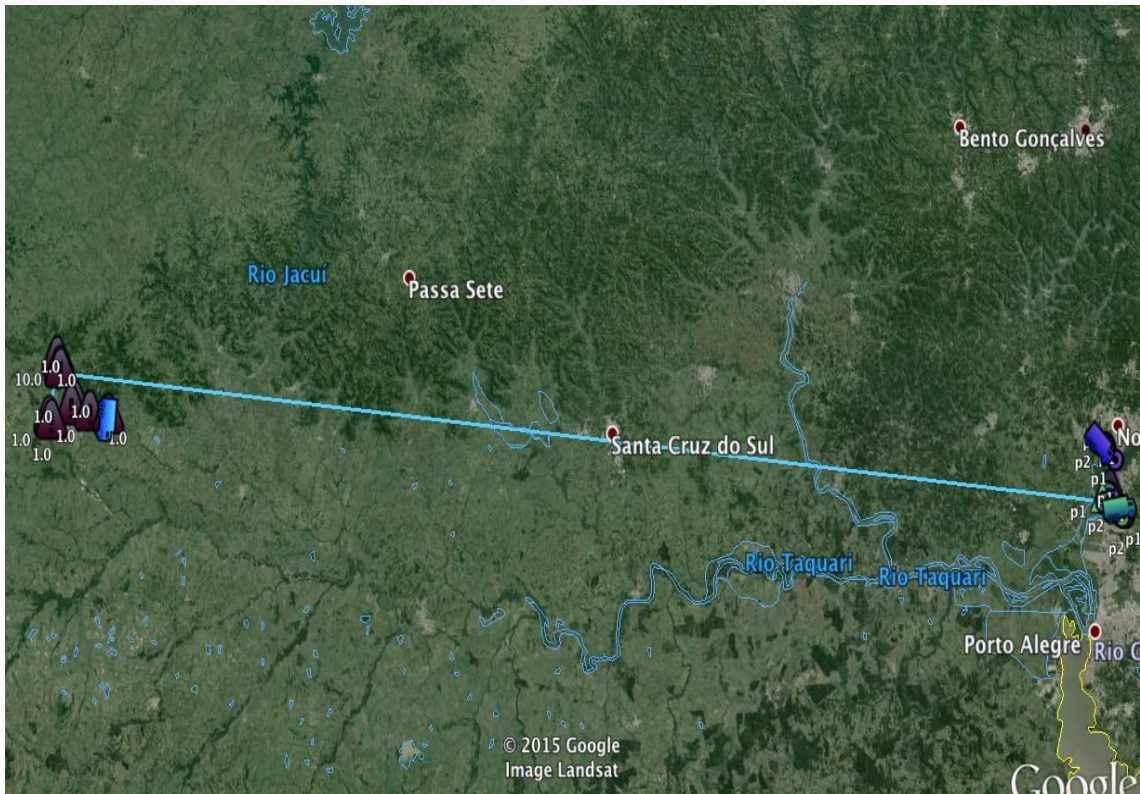


Figura 39 – Rotas das equipes com o atendimento das emergências para o Caso 1

Fonte: Elaborado com a Ferramenta Google Earth

A partir dos resultados observados na Tabela 12 e na Figura 38, entende-se que a melhor alternativa corresponde à solução 1, pois a partir da aplicação da metodologia AHP ela foi elencada como de maior peso na classificação, com o valor de 0,11238.

7.2 Estudo de caso 2

Neste estudo de caso foi contemplada uma instância com os seguintes dados:

- 18 ordens comerciais;
- 9 ordens emergenciais;
- 3 equipes.

Há que se decidir qual será a rota e a posição relativa para cada uma das 9 ordens emergenciais nas 3 rotas existentes, uma para cada equipe disponível.

Novamente foi utilizado o algoritmo multiobjectivo de Garcia et al. (2014) para o PRV, a fim de obter um conjunto de soluções não-dominadas que representam o resultado de um processo de otimização baseado no conceito de otimização de Pareto. Foram consideradas as mesmas premissas descritas nos capítulos 3 e 4, considerando os pontos de partida, os tempos de deslocamento c_{ij} e os tempos de serviço t_{si} para cada cliente.

A Tabela 12 apresenta as soluções não-dominadas encontradas pelo algoritmo adotado, que promove a solução do problema de roteamento de veículos quando consideradas as 3 rotas e as 27 ordens da instância. São apresentados os valores de cada um dos dois critérios considerados para as soluções: o custo do tempo de espera das ordens emergenciais (CT_e) e o custo do tempo de espera para as ordens comerciais (CT_c).

Tabela 13 – Custos para os tempos de espera das ordens emergenciais e comerciais de cada solução alternativa para o estudo de caso 1

SOLUÇÃO	CT_e (R\$)	CT_c (R\$)
1	118,0555146	649,42989
2	133,7629204	633,2183099
3	129,0640375	636,5967231
4	128,1442119	637,2549955
5	127,2275338	638,001387
6	125,6229874	640,1326011
7	126,8941634	638,7695152
8	126,5570099	639,5267523
9	133,4293799	633,9115981
10	129,579072	634,1011507

A partir do resultado da Tabela 13 foi possível obter o gráfico de dispersão da Figura 39, evidenciando que não há uma dominância de melhor valor de uma solução sobre a outra, não tendo um resultado final para ser elencado como ideal nestes parâmetros.

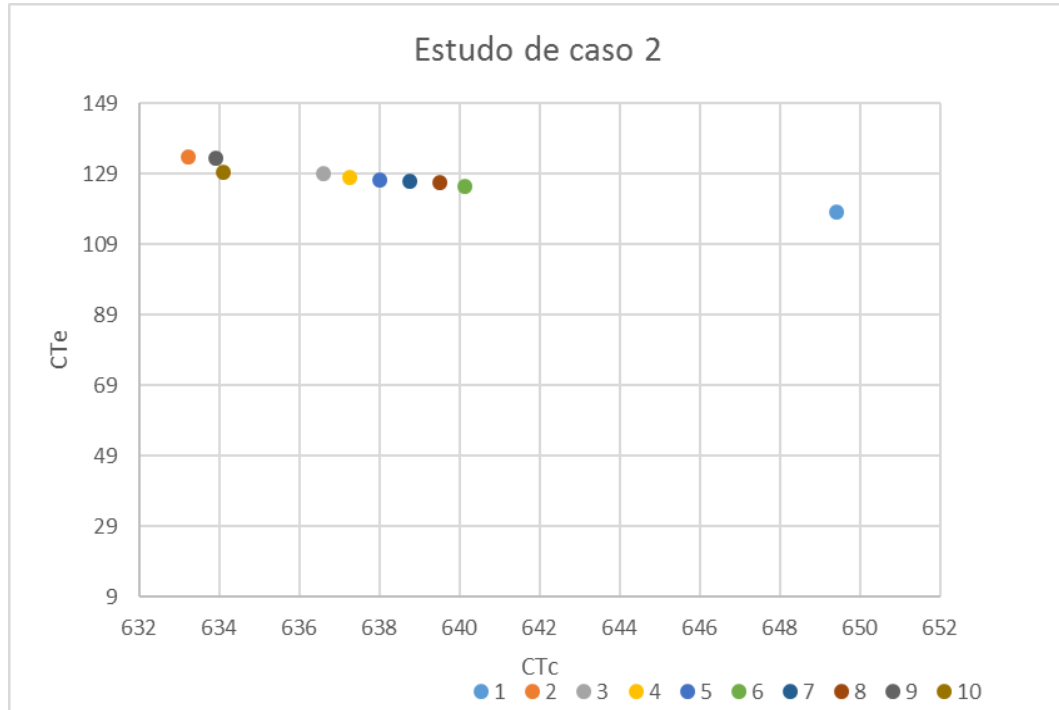


Figura 40 – Conjunto de Soluções para o Estudo de Caso 2

Fonte: Elaborado pela autora.

Assim como no estudo de caso 1, aplicou-se então a metodologia AHP, foram efetuados os cálculos necessários (vide capítulo 4) e posteriormente obtida a matriz de julgamentos normalizada (Equação 10). Em seguida, realizou-se para cada nó de julgamento da hierarquia o cálculo da matriz normalizada para os dois critérios analisados (CT_E ; CT_C) agora para os 9 casos gerados pelos resultados do PRV. A matriz normalizada com os valores para cada critério é apresentada a seguir.

	CT_E CT_C	
1	0,120182	0,109167
2	0,106069	0,111961
3	0,109931	0,111367
4	0,110720	0,111252
5	0,111518	0,111122
6	0,112942	0,110752
7	0,111811	0,110988
8	0,112109	0,110857
9	0,106335	0,111839
10	0,109494	0,111806

A partir da matriz de julgamentos acima foi elaborada a Tabela 14, para a determinação dos pesos com a comparação para todos os critérios em relação às alternativas e referente ao seu objetivo maior.

Desta forma, a partir do momento de coleta dos julgamentos de valor, e conseqüente formação das matrizes de comparação para cada nó de julgamento dos níveis hierárquicos, procedeu-se da mesma forma que no estudo de caso 1: associando as prioridades às alternativas viáveis com valores que hipoteticamente o gestor atribuiria a cada critério: $CT_E:0,70$ e o $CT_C:0,30$, isto é, dando maior importância para o cálculo ao critério de emergência, como observa-se na tabela abaixo:

Tabela 14 – Classificação dos Pesos priorizando o critério T_E para o estudo de caso 2

CLASSIFICAÇÃO DOS PESOS	Critério $CT_E:0,70$	Critério $CT_C:0,30$	VALORES	NÚMERO DA SOLUÇÃO
1º	0,12018201	0,10916651	0,116877358	1
2º	0,1129423	0,11075205	0,112285221	6
3º	0,11210875	0,11085697	0,111733218	8
4º	0,11181088	0,11098839	0,111564134	7
5º	0,11151791	0,11112201	0,11139914	5
6º	0,11072017	0,11125216	0,110879766	4
7º	0,10993108	0,1113672	0,110361914	3
8º	0,10949414	0,1118055	0,110187546	10
9º	0,10633452	0,11183893	0,107985841	9
10º	0,10606937	0,11196138	0,107836973	2

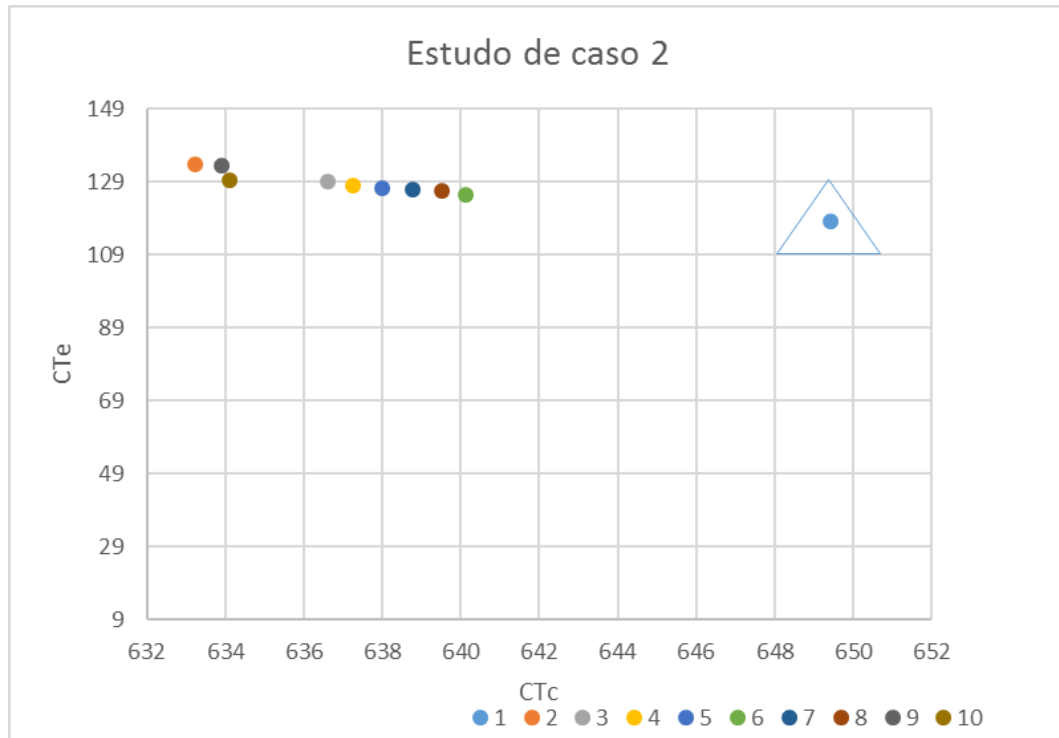


Figura 41 – Classificação do Caso 2 com a Metodologia AHP

Fonte: Elaborado pela autora.

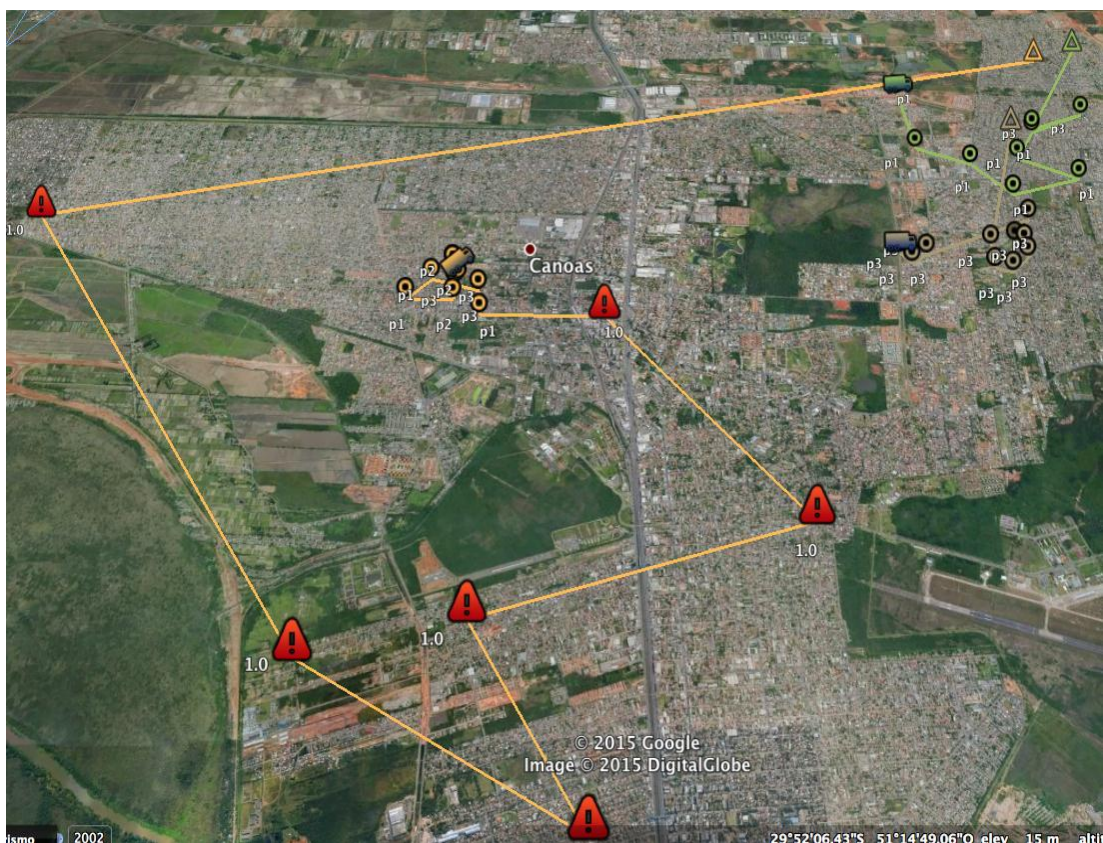


Figura 42 – Rotas das equipes com o atendimento das emergências para o Caso 2

Fonte: Elaborado com a Ferramenta Google Earth.

A partir da Tabela 14 é possível identificar a solução melhor classificada segundo a metodologia AHP. A alternativa 1 (0,116877358) representa a melhor solução, aquela que será empregada como solução do despacho.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação tratou do problema de atendimento de ordens emergenciais das concessionárias de energia elétrica, considerando características práticas que permitem resguardar a vinculação com situações reais de despacho enfrentadas nessas empresas. Foi possível identificar a relevância do problema quando se observa os paradigmas regulatórios e a premissa cada vez mais representativa quanto à redução de custos de manutenção.

O objetivo maior deste trabalho foi descrever as características mais representativas que mantém correspondência com cenários reais vivenciados nos centros de operação das concessionárias, incorporando-as na forma de um modelo matemático que permita identificar a natureza do problema e relacionar os modelos correlatos que sugiram abordagens baseadas em soluções computacionais. O problema de roteamento de veículos (PRV) foi o problema de otimização combinatória identificado como correlato do problema de despacho e a partir dele foi empregada uma metodologia para tomada de decisão que envolve a enumeração de soluções não-dominadas para posterior classificação mediante o processo analítico hierárquico de análise (AHP).

Inicialmente procedeu-se com a análise do processo de atendimento de ordens de serviço das concessionárias, com especial atenção para o processo relacionado com o atendimento de ordens emergenciais. Posteriormente buscou-se no referencial teórico as direções que apoiassem o estudo proposto, momento no qual foi considerando que o tempo de espera representaria o aspecto mais representativo para nortear as decisões relacionadas com o despacho de ordens emergenciais. A seguir foi elaborado o modelo matemático que representa o referido problema de despacho, descrito um exemplo didático para elucidar as peculiaridades do tratamento matemático considerado para a seguir detalhar a abordagem baseada na metodologia AHP para tomada de decisão. Finalmente foram elaborados dois estudos de caso para verificar o desempenho da abordagem proposta nestes casos reais obtidos de uma concessionária de energia elétrica.

Ficou bem destacada a conveniência em considerar um processo de tomada de decisão com o apoio da metodologia AHP. A inclusão dos aspectos subjetivos para classificar soluções não-dominadas representa uma abordagem simples e eficaz para representar as imprecisões e as comparações entre as soluções alternativas encontradas.

Também foi possível constatar que as ordens de serviço emergenciais promovem uma perturbação significativa nas rotas construídas *a priori* para as equipes, requisitando um compromisso bastante crítico entre menor tempo de espera e menor perturbação das rotas existentes.

É preciso destacar ainda que o minimizar o tempo de espera promove resultados bastante diferentes daqueles obtidos quando se quer minimizar o tempo total das rotas, justamente pela forma cumulativa com que os tempos de serviço considerados.

Observando os resultados do capítulo 5, obtidos a partir da enumeração das soluções alternativas proporcionadas pelo algoritmo de Garcia et al. (2014), verifica-se que a abordagem é bastante promissora para contextos práticos, permitindo possibilidades de análises ao decisor de modo a ponderar as suas escolhas subjetivas definidas *a priori*.

Como sugestões para trabalhos futuros, vislumbra-se que sejam elaborados estudos com maior número de critérios na função objetivo e elaboração de um maior número de estudos de caso com instâncias reais.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. ANEEL RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 414, 9 de setembro de 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. A265r (Brasil). Relatório ANEEL 10 anos / **Agência Nacional de Energia Elétrica**. – Brasília: ANEEL, 2008.129 p.: il.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos da Distribuição**, Módulo 1_ Revisão _0 -PRODIST, Brasília, DF, 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos da Distribuição**, Módulo 8. PRODIST, Brasília, DF, 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos da Distribuição**, Módulo 1_ Revisão _5. PRODIST, Brasília, DF, 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Rede, Brasília**. DF, 2011.

ALKAHTANI, A. M. S.; WOODWARD, M. E.; L-BEGAIN, K. Prioritised best effort routing with four quality of service metrics applying the concept of the analytic hierarchy process, **Computers&OperationsResearch**, v. 33, 3 March. 2006, p. 559–580.

AMORIM, M. L. F. **Otimização de Atendimentos de Emergência em Redes de Distribuição de Energia Elétrica**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense, Área de concentração: Computação Científica e Sistemas de Potência, Niterói, RJ, 2010.

ARROYO, J. E. C. **Heurísticas e metaheurísticas para otimização combinatória multiobjetivo**. 256f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, 2002.

BERTSIMAS, D. J.; VAN RYZIN, G. A stochastic and dynamic vehicle routing problem in the Euclidean plane. **Operations Research**, n. 39, p. 601-615, 1991.

BOAS, V. C. L. Método multicritérios de análise de decisão (MMAD) para as decisões relacionadas ao uso múltiplo de reservatórios: analytic hierarchy process (AHP). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16., 2005, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: ABRH, 2005.

BOTELHO, B. D. **Uma metodologia de análise de desempenho econômico dos serviços de atendimento emergencial ao consumidor de energia elétrica: estudo de caso do Ceará.** Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Logística E Pesquisa Operacional. Centro de Tecnologia Pró-Reitoria De Pesquisa E Pós-Graduação, Universidade Federal Do Ceará. Fortaleza, Ceará, 2010.

BUYURGANA, N.; SAYGIN, C. Application of the analytical hierarchy process for real-time scheduling and part routing in advanced manufacturing systems. **Journal of Manufacturing Systems**, Elsevier, 27, 2008, p. 101 a 110.

CHAKRABORTY, S., DEY, S. Design of an analytic-hierarchy-process-based expert system for nontraditional machining process selection. **International Journal Advanced Technology**, v. 31, pp. 409-500, 2006.

CPFL, Renováveis. “Visão Geral do Setor de Energia Elétrica”. Renováveis, 2013. Disponível em: <<http://www.cpfrenovaveis.com.br/ri/show.aspx?idCanal=wku79TYTX/RcDEOqPK DN6==>>>. Acesso em: 10 abr. 2014.

DI PIETRO, M. S. Z. **Direito administrativo**. 20. ed. SP: Atlas, 2007.

DURBACH, I.; LAHDELMA, R.; SALMINEN, P. Modelling uncertainty in multi-criteria decision analysis. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, 2014, p. 238, 1-8.

EKSIOGLU, B.; VURAL, A. V.; REISMAN, A. The vehicle routing problem: a taxonomia review. **Computers e Industrial Engineering**, 57(4): 1472-1486, 2009.

FAGUNDES, L. D. **Mapeamento de Falhas em Concessionária do Setor Elétrico: Gestão do Conhecimento auxiliando a Gestão da Manutenção.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2005.

FERNANDES, B. C. **Fatores críticos de sucesso a cadeia de serviços cliente - empresa de Distribuição de energia elétrica.** Universidade Federal de Itajubá. Dissertação, de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Itajubá, 2011.

FISHER, M. L.; JAIKUMAR, R. **A generalized assignment heuristic for vehicle routing.** Networks, 1981, v. 11, p. 109-124.

FONSECA, C. M.; FLEMING, P. J. (1995). An overview of evolutionary algorithms in multiobjective optimization. **Evolutionary Computation**, v. 3, n. 1, pp. 1-16.

FORTES, B. J.; GARCIA, V. J.; GUIMARÃES, I. G. O problema de roteamento de veículos: um estudo de caso para o atendimento de serviços em concessionárias de distribuição de energia elétrica. In: 8º SEMINÁRIO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA E CONTROLE E O 2º SEMINÁRIO DE ENERGIA E SISTEMAS DE POTÊNCIA. 8º SEPOC +2ºSESP, 2014. **Anais...** Santa Maria, RS, Brasil, agosto de 20014.

GARCIA, V. J.; BERNARDON, D. P.; ABAIDE, A.; FONINI, J. **Multi-Criteria Approach For Emergency Service Orders In Electric Utilities.** In: Electric Utilities, ECMS 2014 Proceedings edited by: Flaminio Squazzoni, Fabio Baronio, Claudia Archetti, Marco Castellani European Council for Modeling and Simulation. doi:10.7148/2014-0676, 2014.

GAREY, M.; JOHNSON, D. **“Computers and intractability”**, W. H. Freeman, San Francisco, 1979.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. **Otimização Combinatória e Programação Linear - Modelos e Algoritmos.** Campus, Rio de Janeiro, 2000.

GOMES, A. R. F.; PRATA, B. A.; BARROSO, E. C.; ARRUDA, J. B. F. Uma heurística para o problema de despacho dinâmico de equipes Aplicada na logística de Resposta emergencial de uma Concessionária de energia Elétrica. In: XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. XXVII ENEGEP, 2008. **Anais...** Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 13 a 16 de outubro de 2008.

KOSTAS, T. J.; BORELLA, M. S.; SIDHU, I.; SCHUSTER, G. M.; GRABIEC, J.; MAHLER, J. Real-Time voice over packet-switched networks. **IEEE Networks**, 1998; 12(1):18-27. <http://dx.doi.org/10.1109/65.660003>.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa Operacional na Tomada de Decisões.** 2. ed., Rio de Janeiro: Pearson Prentice Hall, 2009.

LAMBERT, G.; SILVA, L. E. B.; AOKI, A. R.; M. JORAES, C. H. V.; COSTA, B. R.; BARBOSA, J. A. Sistema inteligente de locomoção de viaturas para atendimentos na rede de distribuição. In: XVI SEMINARIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - SENDI, 16.2004, Brasília, DF. **Anais...** Brasília: DF: CEB, 2004.

LAPORTE, G. The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms, **European Journal of Operational Research**. 59(3), 345-358, 1992.

LARSEN, A. **The dynamic vehicle routing problem**. PhD Thesis-Denmark Technical University, Lyngby, 2000.

LIN, Y.; AMBLER, T. **A knowledge-based dispatching model for field service**. System IEEE International Conference, v. 4, n. 10, pp. 3717-3722, 2005.

LOOTSMA, F. A. The French and American School in Multi-Critéria Decision Analysis. **Operations Research**, v. 24, pp. 263-285, May, 1980.

MAURI, G. R. **Uma nova abordagem para o problema de roteirização e programação de veículos**. 2006. 39 f. Monografia (Qualificação do Curso de Doutorado em Computação Aplicada) - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE, São José dos Campos, 2006.

MILLER, C. E.; TUCKER, A. W.; ZEMLIN, R. A. Integer programming formulations and traveling salesman problems. **Journal of ACM**, v. 7, pp. 326-329, 1960.

MURAKAMI, M. **Decisão estratégica em TI: estudo de caso**. Dissertação de M. Sc., USP, São Paulo, SP, Brasil, 2003.

ÑAHUIS, F. V. C. **Automação do despacho dinâmico de viaturas para o atendimento das ordens de serviços nas redes de distribuição de energia elétrica**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia UNESP- Ilha Solteira, Av. Brasil 56 Centro, 15385000- Ilha Solteira, SP, 2013.

PARETO, V. **Cours d'Economie Politique**. 1. ed., Lausanne: Rouge, 1896.

PRATA, B.; GOMES, F. A.; BARROSO, G. C.; FURTADO, J. B. Análise de desempenho de sistemas de atendimento emergencial em redes de distribuição de energia elétrica: uma aplicação de Redes Petri Coloridas. In: XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 28., 2008, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ABEPRO, 2008.

PRESIDENCIA DA REPUBLICA. CASA CIVIL, Subchefia para assuntos Jurídicos. Art. 2º e Art. 3º, Art. 29 e no Art. 30 da Lei no 8.987, de 13 de fevereiro de 1995, de outras incumbências expressamente previstas em lei e observado o disposto no § 1º, compete à ANEEL, (Redação dada pela Lei nº 10.848, de 2004) (Vide Decreto nº 6.802, de 2009). Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9427cons.htm>2007.>. Acesso em: 25 out. 2014.

PRODIST, **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional**, Resolução 395 da Agência Nacional de Energia Elétrica, jan., 2010.

PSARAFTIS, H. A dynamic-programming solution to the single vehicle many-to-many immediate request dial-a-ride problem. **Transportation Science**, 14, 2. ed, 1988, p. 130-154.

RADUAN, A. C. **Roteirização parcialmente dinâmica aplicada a serviços de campo**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Área de Concentração: Engenharia de Sistemas Logísticos. Departamento de Engenharia de transporte. São Paulo, 2009.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**. N. York, USA: McGraw-Hill, 1980.

SAATY, T. L. Decision Making for Leaders. 2. ed. Pittsburg. **RWS Publications**, 1991.

SAATY, T. L.; VARGAS. L. G. Dispersion of group judgments, *Mathematical and Computer Modelling*, v. 46(7-8), 918-925, 2007.

SAMPIERI, R. H.; COLLADO, C. F.; LUCIO, P. B. **Metodologia de pesquisa**. 3. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

SCIP. Disponível em: <<http://scip.zib.de>>. Acesso em: 20 jan. 2015.

SHIMIZU, T. **Decisão nas organizações**: introdução aos problemas de decisão encontrados nas organizações e nos sistemas de apoio à decisão. São Paulo: Atlas, 2001.

STEINER, T. A.; ZAMBONE, L. V. S.; COSTA, D. M. B.; CARNIERI, C.; SILVA, A. L. O. Problema do Roteamento no Transporte Escolar. **Pesquisa Operacional**, v. 20, n. 1, p. 83-99, jun., 2000.

STEINER, M. T. A.; COSTA, C. E. S.; COSTA, D. M. B.; FILHO, E. A.; ZAMBENEDETTI, V. C. Técnicas da Pesquisa Operacional Aplicadas à Logística de Atendimento aos Usuários de uma Rede de Distribuição de Energia Elétrica. **Revista Eletrônica Sistemas & Gestão**, v. 1, n. 3, p. 229-243, set./dez. 2006.

TAHA, H. A. **Pesquisa Operacional**. 8. ed., São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008, p. 219-138.

TELLES, C.; RODRIGUES, L. E.; COUTO, A.; M. SILVEIRA. **Sistema integrado de Gerenciamento da Manutenção de Redes de Distribuição (SGM)**. Salvador, 2005. Projeto de pesquisa desenvolvido para implantação de Software na COELBA. Disponível em: <www.buscatextual.cnpq.br>. Acesso em: 10 out. 2014.

TICONA, W. G. C. **Aplicação de algoritmos genéticos multi-objetivo para alinhamento de sequencias biológicas**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Carlos, Brasil, 2003.

TOTH, P.; VIGO, D. An overview of vehicle routing problems. In: TOTH, P.; VIGO, D. (Ed.). **The vehicle routing problem**. Philadelphia, Pennsylvania: Society for Industrial & Applied Mathematics (SIAM), (Monographs on Discrete Mathematics and Applications). 2001. p. 02-26.

VIDAL, T.; CRAINIC, T. G.; GENDREAU, M.; PRINS, C. Heuristics for Multi-attribute vehicle routing problems: a survey and synthesis. **CIRRELT Interuniversity Research Centre on Enterprise Networks**, Logistics and Transportation, 2012.

VOLPI, N. M. P.; WILHELM, V. E.; STEINER, M. T. A.; ZAMBENEDETTI, V. C.; PINTO, C. L. S. Logística de atendimento aos usuários de energia elétrica via simulação. XXVIII Encontro Nacional De Engenharia De Produção. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 18, 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2008. p. 1-12.

WEINTRAUB, A.; ABOUD, J.; FERNANDEZ, C.; LAPORTE, G.; RAMIREZ. An emergency vehicle dispatching system for an electric utility in Chile. **Journal of the Operational Research Society**. v. 50, n. 7, 1999.

ZIMPL. Disponível em: <<http://zimpl.zib.de>>. Acesso em 19janeiro 2015.