

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CÂMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA

DENILSON FAGUNDES BARBOSA

**APLICAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS AO  
PROBLEMA DE MÚLTIPLOS CAIXEIROS VIAJANTES NO  
ATENDIMENTO COMERCIAL E EMERGENCIAL EM UMA  
EMPRESA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2015



DENILSON FAGUNDES BARBOSA

**APLICAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS AO  
PROBLEMA DE MÚLTIPLOS CAIXEIROS VIAJANTES NO  
ATENDIMENTO COMERCIAL E EMERGENCIAL EM UMA  
EMPRESA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR como requisito parcial para a obtenção do título de “Mestre em Informática”.

Orientador: Prof. Dr. André Yoshiaki Kashiwabara

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Nascimento Silla Junior

CORNÉLIO PROCÓPIO

2015

---

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

- B238    Barbosa, Denilson Fagundes  
Aplicação da otimização por colônia de formigas ao problema de múltiplos caixeiros viajantes no atendimento comercial e emergencial em uma empresa de distribuição de energia elétrica / Denilson Fagundes Barbosa. – 2015.  
107 f. : il. ; 30 cm
- Orientador: André Yoshiaki Kashiwabara.  
Coorientador: Carlos Nascimento Silla Junior  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Informática. Cornélio Procópio, 2015.  
Bibliografia: p. 103-107.
1. Energia elétrica - Distribuição. 2. Problema do caixeiro viajante. 3. Otimização matemática. 4. Algoritmos da formiga 5. Informática - Dissertações. I. Kashiwabara, André Yoshiaki, orient. II. Silla Junior, Carlos Nascimento, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Informática. IV. Título.

CDD (22. ed.) 004



**Título da Dissertação Nº 12:**

**“Aplicação da Otimização por Colônia de Formigas ao Problema de Múltiplos Caixeiros Viajantes no Atendimento Comercial e Emergencial em uma Empresa de Distribuição de Energia Elétrica”.**

por

**Denilson Fagundes Barbosa**

Orientador: **Prof. Dr. André Yoshiaki Kashiwabara**

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM INFORMÁTICA – Área de Concentração: Computação Aplicada, pelo Programa de Pós-Graduação em Informática – PPGI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Cornélio Procópio, às 13h do dia 03 de dezembro de 2015. O trabalho foi APROVADO pela Banca Examinadora, composta pelos professores:

---

Prof. Dr. André Yoshiaki Kashiwabara  
(Presidente – UTFPR-CP)

---

Prof. Dr. Carlos Nascimento Silla Junior  
(Coorientador – UTFPR-CP)

---

Prof. Dr. Ademir Aparecido Constantino  
(UEM-PR)

---

Prof. Dr. Clodis Boscaroli  
(UNIOESTE-PR)

Visto da coordenação:

---

**Carlos Nascimento Silla Junior**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Informática  
UTFPR Câmpus Cornélio Procópio

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Programa.



## **AGRADECIMENTOS**

À minha esposa Verônica e à minha filha Vitória, pelo apoio e compreensão.

À minha mãe Luciana e à minha irmã Maria José, pelo incentivo e confiança.

Aos meus orientadores Prof. Dr. André Y. Kashiwabara e Prof. Dr. Carlos N. Silla Jr., pela paciência, disposição e motivação constantes.

A todos os professores e demais integrantes do Programa de Pós-Graduação em Informática da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Cornélio Procópio, pela qualidade e credibilidade do programa.

A todos meus amigos, pelas ideias, discussões, críticas e sugestões.



## RESUMO

BARBOSA, Denilson F. Aplicação da otimização por colônia de formigas ao problema de múltiplos caixeiros viajantes no atendimento comercial e emergencial em uma empresa de distribuição de energia elétrica. 2015. 107 f. Dissertação (Mestrado em Informática) – Programa de Pós-Graduação em Informática, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

O atendimento comercial e emergencial consiste basicamente na execução de serviços por equipes de eletricitistas em diferentes pontos do sistema de distribuição de energia elétrica, compreendendo as atividades necessárias para a manutenção corretiva do sistema de distribuição e para a gestão comercial dos consumidores. Esta atividade reflete diretamente na qualidade das empresas de distribuição de energia, que procuram executar os serviços de forma a cumprir as metas da Agência Nacional de Energia Elétrica e a diminuir o tempo de resposta às solicitações dos clientes. A partir da análise do método manual utilizado em uma empresa real para designar os serviços às equipes, foi constatada a necessidade de uma metodologia computacional que utilize os dados disponíveis nos sistemas de informação da empresa para orientar o despacho de serviços, a fim de que mais serviços sejam atendidos pelas equipes no mesmo intervalo de tempo. O problema foi abordado em duas etapas. Na primeira etapa, foi configurado o Problema de Despacho Estático, no qual todos os serviços são conhecidos antes da otimização. Na segunda etapa, foi abordado o Problema de Despacho Dinâmico, no qual novos serviços surgem e são despachados às equipes durante o dia de trabalho, podendo ser emergenciais. Para o problema estático foram construídas instâncias do Problema de Múltiplos Caixeiros Viajantes a partir das posições dos serviços, que foram submetidas a dois algoritmos da Otimização por Colônia de Formigas. Para o problema dinâmico, foi desenvolvido um protótipo de um sistema para orientar o despacho dos serviços durante o dia de trabalho, denominado Sistema de Despacho Dinâmico, que aplica a metodologia estática até o surgimento de um novo serviço. Quando surge um novo serviço, o sistema reage de acordo com o tipo do serviço: se emergencial, é despachado imediatamente à equipe mais próxima; se comercial, uma nova instância é construída e novamente otimizada. A experimentação da metodologia estática foi realizada com 17 instâncias construídas a partir de dados reais, e reduziu em 44,43%, em média, a maior rota individual dos dias de trabalho utilizando custos temporais previstos para representação das instâncias. Os experimentos para a metodologia dinâmica, que simularam o surgimento de novos serviços durante o dia de trabalho a partir dos seus horários de despacho reais, reduziram em média 15,48% o custo total e 17,18% o custo da maior rota individual dos dias de trabalho. Esses resultados comprovam que tanto a metodologia estática quanto a dinâmica são capazes de equilibrar a carga de trabalho das equipes, possibilitando que mais serviços sejam executados no mesmo intervalo de tempo, melhorando o método atual de despacho de serviços na empresa.

**Palavras-chave:** Distribuição de energia elétrica. Problema de múltiplos caixeiros viajantes. Otimização por colônia de formigas.



## ABSTRACT

BARBOSA, Denilson F. Applying the ant colony optimization to solve the multiple traveling salesmen problem to execution of commercial and emergency services in a electric power distribution company. 2015. 107 f. Dissertação (Mestrado em Informática) – Programa de Pós-Graduação em Informática, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

The commercial and emergency service consist of the execution of service orders by electrician teams in different points of the electric power distribution system, comprising the activities required for corrective maintenance of the distribution system and the commercial management of consumers. This activity directly reflects in the quality of the power distribution companies, which seek to execute the services in order to meet the rules of the Brazilian National Agency of Electric Energy and to reduce the response time of customer requests. From the analysis of manual method used in an actual company to assign the services to the teams, we found the need for a computational method that uses the available data in the information systems of company to guide the dispatching services, in order that teams execute more services in the same time interval. We approach the problem in two steps. In the first step, we configure the Static Dispatch Problem, in which all services are known before the optimization. In the second step, we approach the Dynamic Dispatch Problem, in which new services arise and are dispatched to the teams during the workday and can be emergency orders. For the static problem, we build instances of the Multiple Traveling Salesmen Problem with the locations of orders, which were submitted to two Ant Colony Optimization algorithms. For the dynamic problem, we developed a system prototype called Dynamic Dispatch System to guide the dispatch of orders during the workday, which applies the static approach until the appearance of a new order. When a new order arises, the system reacts accordingly to the type of order: if it is an emergency order, then it is dispatched immediately to the nearest team; if it is a commercial order, a new instance is constructed and optimized again. For the static methodology, we performed experiments using 17 instances constructed from actual data. The experiments with the static methodology has reduces the largest route of single teams by an average of 44.43%, using predicted time costs for representation of instances. The experiments for the dynamic methodology, which simulated the appearance of new orders during the workday from actual dispatch times, reduced the total cost by 15.48% on average and the cost of larger individual routes by 17.18% on average. These results show that both the static and the dynamic methodologies are able to balance the workload of the teams, enabling that more services are performed in the same time interval, improving the current method of dispatching services in the company.

**Keywords:** Distribution of electric power. Multiple traveling salesmen problem. Ant colony optimization.



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Segmentos do Sistema Elétrico de Potência .....	21
FIGURA 2	– Esquema do método atual do atendimento comercial e emergencial ....	28
FIGURA 3	– Representação de uma instância do Problema de Despacho Estático. Os losangos vermelhos representam os serviços e o círculo azul corresponde à garagem da agência .....	30
FIGURA 4	– Representação gráfica do Problema de Despacho Dinâmico. (a) Em $T_0$ as equipes se encontram na garagem $g$ e existe um conjunto $S = (s_1, s_2, \dots, s_x)$ de serviços comerciais a executar; (b) Em $T_1$ os serviços são distribuídos entre as equipes, que definem manualmente suas rotas; (c) Em $T_2$ as equipes se deslocaram e estão executando seu primeiro serviço; (d) Em $T_3$ surge um novo serviço $s_{novo}$ .....	32
FIGURA 5	– Variações do MTSP quanto ao formato das soluções: (a) único depósito e rotas fechadas, (b) único depósito e rotas abertas, (c) múltiplos depósitos e rotas fechadas, (d) múltiplos depósitos e rotas abertas .....	45
FIGURA 6	– Esquema de funcionamento do Sistema de Despacho Dinâmico .....	64
FIGURA 7	– MTSP com múltiplos depósitos iniciais e único depósito final. (a) Uma instância de exemplo, com $n = 10$ e $m = 2$ ; (b) Uma possível solução para a instância em (a) .....	67
FIGURA 8	– Rotas reais do dia de trabalho 3 considerando deslocamentos euclidianos	88
FIGURA 9	– Solução com menor custo da maior rota individual para o dia de trabalho 3 construída pelo STACS .....	88



## LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– Exemplos de serviços comerciais e seus prazos de execução	26
TABELA 2	– Serviços executados no município de Cornélio Procópio, Paraná, de 1º de fevereiro a 23 de fevereiro de 2014	71
TABELA 3	– Resultados obtidos pelo STACS minimizando o custo total das soluções MTSP	74
TABELA 4	– Resultados obtidos pelo STACS minimizando o custo da maior rota individual das soluções MTSP	75
TABELA 5	– Tempo médio de execução de 1.000 ciclos do STACS	76
TABELA 6	– Comparação entre o STACS e o STRBAS minimizando o custo total das soluções MTSP, analisando o custo total das melhores soluções encontradas em cada execução	78
TABELA 7	– Comparação entre o STACS e o STRBAS minimizando o custo da maior rota individual das soluções MTSP, analisando o custo da maior rota individual das melhores soluções encontradas em cada execução	79
TABELA 8	– Tempo médio de execução de 1.000 ciclos do STACS e do STRBAS	80
TABELA 9	– Melhores conjuntos de parâmetros obtidos experimentalmente para os algoritmos ACO originais aplicados à instâncias de TSP	81
TABELA 10	– Resultados da variação de $\beta$ nos dois algoritmos adaptados	82
TABELA 11	– Configuração 1: resultados dos dois algoritmos adaptados para as 17 instâncias reais representadas por matrizes de custo com distâncias euclidianas	84
TABELA 12	– Configuração 2: resultados dos dois algoritmos adaptados para as 17 instâncias reais representadas por matrizes de custo com distâncias previstas de deslocamento	84
TABELA 13	– Configuração 3: resultados dos dois algoritmos adaptados para as 17 instâncias reais representadas por matrizes de custo com tempos previstos de deslocamento	85
TABELA 14	– Comparação entre as rotas reais e a média das soluções de 100 execuções do STRBAS, para as três configurações: distâncias euclidianas, distâncias previstas e tempos previstos. Os valores correspondem ao custo da maior rota individual das soluções	86
TABELA 15	– Serviços executados no município de Cornélio Procópio, Paraná, no dia 3 de fevereiro de 2014	92
TABELA 16	– Melhoramento das soluções reais com a aplicação do SDD	97
TABELA 17	– Comparação entre as soluções geradas utilizando a regra do vizinho mais próximo e as geradas pelo SDD	98
TABELA 18	– Dados reais dos 17 dias de trabalho analisados	109



## LISTA DE SIGLAS

ACO	<i>Ant Colony Optimization</i>
ACS	<i>Ant Colony System</i>
AGF	Atualização Global de Feromônio
ALF	Atualização Local de Feromônio
AMPL	<i>A Modeling Language for Mathematical Programming</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AS	<i>Ant System</i>
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DIC	Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
DMIC	Duração Máxima de Interrupção por Unidade Consumidora
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FIC	Frequência Individual de Interrupção por Unidade Consumidora
GPS	<i>Global Position System</i>
LNS	<i>Large Neighborhood Search</i>
MMAS	<i>MAX-MIM Ant System</i>
MTSP	<i>Multiple Traveling Salesmen Problem</i>
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
PPMC	Problema de p-Mediana Capacitado
PRV	Problema de Roteamento de Veículos
RAF	Regra de Atualização de Feromônio
RBAS	<i>Rank-Based Ant System</i>
RTE	Regra de Transição de Estado
SDD	Sistema de Despacho Dinâmico
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SOD	Sistema de Operação da Distribuição
STACS	<i>Single Team Ant Colony System</i>
STRBAS	<i>Single Team Rank-Based Ant System</i>
TACO	<i>Team Ant Colony Optimization</i>
TSP	<i>Traveling Salesman Problem</i>
UTM	Universal Transverso de Mercator



## LISTA DE SÍMBOLOS

$u$	Número de equipes a serviço de uma agência em um dia de trabalho
$n_p$	Número de interrupções de fornecimento em um período de apuração
$t_{int}$	Duração de uma interrupção de fornecimento
$Cc$	Número de consumidores de um conjunto
$S$	Conjunto de serviços a executar
$s_i$	Serviço de identificação $i$
$e_i$	Equipe de atendimento de identificação $i$
$T_i$	Instante de tempo de identificação $i$
$s_{novo}$	Serviço gerado durante o dia de trabalho
$V$	Conjunto de vértices
$A$	Conjunto de arestas
$G = (V, A)$	Grafo $G$ formado pelo conjunto $V$ e pelo conjunto $A$
$p$	Número de medianas de um problema de $p$ -medianas
$E$	Conjunto de equipes de atendimento
$c_{SE}$	Custo ao designar um serviço em $S$ a uma equipe em $E$
$n$	Número de cidades de uma instância de TSP ou MTSP
$C$	Matriz de custos
$c_{ij}$	Custo entre os vértices identificados por $i$ e $j$
$m$	Número de caixeiros de uma instância de MTSP
$v_0$	Depósito de uma instância de MTSP
$(i, j)$	Aresta entre os vértices identificados por $i$ e $j$
$x_{ij}$	Variável binária que define se a aresta $(i, j)$ faz parte da solução
$B$	Cardinalidade dos subconjuntos de $V$
$w$	Número de formigas que depositam feromônio no RBAS
$N$	Número de soluções criadas em um ciclo de um algoritmo ACO
$k$	Uma formiga da ACO
$v_k$	Vértice onde está posicionada a formiga $k$
$c(v_i, v_j)$	Custo entre os vértices $v_i$ e $v_j$
$CP(k)$	Custo parcial da rota da formiga $k$
$l$	Uma formiga da ACO
$\tau_0$	Quantidade inicial de feromônio depositada em todas as arestas
$cl_{size}$	Número de itens da lista de candidatos
$S_{m.ciclo}$	Melhor solução gerada num ciclo do algoritmo

$S_{m.exec}$	Melhor solução gerada numa execução do algoritmo
$\rho$	Coefficiente de evaporação de feromônio
$C^{mn}$	Custo da solução aplicando um algoritmo do vizinho mais próximo à instância
$p_{ij}^k(t)$	Probabilidade da formiga $k$ se mover do vértice $i$ para o vértice $j$ no instante $t$
$\tau_{ij}(t)$	Quantidade de feromônio na aresta $(i, j)$ no instante $t$
$\eta_{ij}$	Visibilidade da aresta $(i, j)$ , igual a $1/c_{ij}$
$\alpha$	Peso do feromônio nas escolhas das formigas
$\beta$	Peso da visibilidade nas escolhas das formigas
$r$	Posição da solução no <i>ranking</i> das melhores criadas no ciclo
$C^r$	Custo da solução de posição $r$ no <i>ranking</i>
$\Delta\tau_{ij}^r$	Inverso do custo da solução de posição $r$ , igual a $1/C^r$
$C^{bs}$	Custo da melhor solução da execução do algoritmo ( <i>best so far solution</i> )
$\Delta\tau_{ij}^{bs}$	Inverso do custo da <i>best so far solution</i> , igual a $1/C^{bs}$
$S_i^k$	Conjunto de vértices permitidos à formiga $k$ posicionada no vértice $i$
$q$	Variável aleatória uniformemente distribuída em $[0, 1]$
$q_0$	Coefficiente de determinismo do <i>Ant Colony System</i>
$J$	Vértice escolhido pela Regra de Transição de Estado do <i>Ant System</i>
$\xi$	Coefficiente local de evaporação de feromônio do <i>Ant Colony System</i>
$T^{bs}$	Conjunto de arestas que compõem a <i>best so far solution</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>21</b>
1.1	MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	22
1.2	OBJETIVOS	23
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	24
<b>2</b>	<b>DESCRIÇÃO DO CAMPO DE ESTUDO</b>	<b>25</b>
2.1	SERVIÇOS COMERCIAIS E EMERGENCIAIS	25
2.2	MÉTODO ATUAL	28
2.3	DEFINIÇÃO DOS PROBLEMAS	29
2.3.1	Problema de Despacho Estático	30
2.3.2	Problema de Despacho Dinâmico	31
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>35</b>
3.1	ABORDAGENS ESTÁTICAS	35
3.2	ABORDAGENS DINÂMICAS	37
3.3	O PROBLEMA DE MÚLTIPLOS CAIXEIROS VIAJANTES	43
3.4	A OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS	48
3.5	A ACO APLICADA AO MTSP	50
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
<b>4</b>	<b>METODOLOGIAS</b>	<b>55</b>
4.1	METODOLOGIA PARA O PROBLEMA DE DESPACHO ESTÁTICO	55
4.1.1	Algoritmo ACO para MTSP	56
4.1.2	Inicialização	57
4.1.3	Construção das soluções	58
4.1.4	Busca local, avaliação das soluções e finalizações dos ciclos e da execução	59
4.1.5	STACS	60
4.1.6	STRBAS	62
4.2	METODOLOGIA PARA O PROBLEMA DE DESPACHO DINÂMICO	63
4.2.1	Sistema de Despacho Dinâmico	65
4.2.2	MTSP com múltiplos depósitos iniciais e único depósito final	67
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
<b>5</b>	<b>EXPERIMENTOS COM O PROBLEMA DE DESPACHO ESTÁTICO</b>	<b>69</b>
5.1	DESCRIÇÃO DA BASE DE DADOS	71
5.2	PROTOCOLO EXPERIMENTAL	72
5.3	EXPERIMENTO 1: STACS	73
5.3.1	Detalhes experimentais	73
5.3.2	Resultados e discussão	74
5.3.3	Tempos computacionais	76
5.4	EXPERIMENTO 2: STRBAS	77
5.4.1	Detalhes experimentais	77
5.4.2	Resultados e discussão	77
5.4.3	Tempos computacionais	79
5.5	EXPERIMENTO 3: VARIANDO O PARÂMETRO $\beta$	80
5.5.1	Detalhes experimentais	80
5.5.2	Resultados e discussão	82
5.6	EXPERIMENTO 4: MATRIZES DE CUSTO ASSIMÉTRICAS	82

5.6.1	Detalhes experimentais .....	83
5.6.2	Resultados e discussão .....	83
5.7	COMPARAÇÃO COM AS ROTAS REAIS .....	86
5.8	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	87
<b>6</b>	<b>EXPERIMENTOS COM O PROBLEMA DE DESPACHO DINÂMICO .....</b>	<b>91</b>
6.1	DESCRIÇÃO DA BASE DE DADOS .....	91
6.2	DETALHES EXPERIMENTAIS .....	93
6.3	PROTOCOLO EXPERIMENTAL .....	94
6.3.1	Custos temporais das rotas parciais .....	95
6.3.2	Solução aplicando a regra do vizinho mais próximo .....	96
6.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	96
6.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	98
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>99</b>
7.1	CONTRIBUIÇÃO ACADÊMICA .....	100
7.2	TRABALHOS FUTUROS .....	101
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>103</b>
	<b>ANEXO A - BASE DE DADOS UTILIZADA .....</b>	<b>109</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) corresponde à infraestrutura que possibilita o fornecimento de energia elétrica aos consumidores, em geral dispersos por uma grande área geográfica. O SEP é composto pelos segmentos de Geração, Transmissão e Distribuição, que estão representados na Figura 1. A Geração é constituída por usinas, linhas e subestações que transformam outras fontes de energia em energia elétrica; a Transmissão é responsável pela interconexão entre os centros de geração e os centros de consumo; e a Distribuição é o segmento formado pelas instalações, equipamentos e redes do sistema elétrico de distribuição, que viabilizam a entrega de energia ao usuário final (LEÃO, 2011).



**Figura 1 – Segmentos do Sistema Elétrico de Potência**

**Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (2015).**

No Brasil, o segmento de Distribuição é constituído por empresas concessionárias reguladas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Dentre outras competências, cabe a estas concessionárias: a manutenção do sistema elétrico de distribuição, definido como todas as instalações elétricas em tensões inferiores a 230 quilovolts; e a gestão comercial dos consumidores localizados na sua área de concessão, que podem ser residenciais, comerciais, rurais e industriais, dentre outras classes (AGÊNCIA..., 2015).

A área sob concessão da subsidiária de Distribuição da Companhia Paranaense de Energia (COPEL) no estado do Paraná, por exemplo, possui um sistema de distribuição com mais de 190 mil quilômetros de redes, propiciando o fornecimento de energia a aproximada-

mente 4 milhões de consumidores, alcançando a quase totalidade das residências urbanas e rurais do estado, além das indústrias e estabelecimentos comerciais atendidos (COMPANHIA..., 2015).

Na COPEL Distribuição a área de concessão é repartida entre agências de atendimento, de forma que cada agência pode ser responsável por um grupo de municípios vizinhos, um único município, ou um grupo de bairros adjacentes de uma grande cidade. Cabe às agências a execução dos serviços de sua partição, que podem ser comerciais, quando relacionados à gestão de consumidores; ou emergenciais, quando relacionados à interrupções de fornecimento ou situações de risco à segurança.

Em cada dia de trabalho, uma agência de atendimento dispõe de um conjunto de equipes de eletricitas equipadas com veículos e materiais necessários para execução dos serviços. Os serviços a executar são distribuídos entre as equipes por técnicos no início do dia de trabalho, que também despacham em tempo real às equipes os serviços que surgem durante o dia. O objeto de estudo desta pesquisa é o método de designação dos serviços às equipes utilizado na COPEL Distribuição.

## 1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A motivação inicial surgiu a partir da observação direta do método de despacho utilizado na empresa pelo autor deste trabalho, que atuou profissionalmente como eletricitista membro de uma equipe de atendimento comercial e emergencial na COPEL Distribuição por um período de 6 anos. Nesse período foi possível observar que o despacho de serviços para as equipes disponíveis de uma agência e a definição de suas rotas são processos realizados manualmente, apesar de a empresa dispor de infraestrutura tecnológica e sistemas de informação que possibilitam que essas tarefas sejam otimizadas computacionalmente.

A melhoria do método de despacho dos serviços é relevante sob vários aspectos. A principal missão das empresas de distribuição é o fornecimento de energia elétrica de forma contínua e com qualidade, para que se alcance o nível desejado de satisfação dos consumidores (AMORIM, 2010). O cumprimento desta missão está diretamente relacionado ao despacho dos serviços emergenciais, que deve ser realizado o mais rápido possível à equipe mais próxima, de forma a minimizar o tempo de indisponibilidade do serviço. Um método eficiente de despacho reduz a duração das interrupções com conseqüente melhora dos índices de continuidade definidos pela ANEEL (ÑAHUIS, 2013). Além disso, outro fator a ser considerado é que o tempo de resposta aos serviços emergenciais representa um fator crítico em situações de risco à segurança (GARCIA *et al.*, 2012).

Em relação ao despacho de serviços comerciais, a ANEEL define prazos para execução dos serviços de acordo com o seu tipo. Se os prazos não forem cumpridos, multas são aplicadas às distribuidoras (MASCIA *et al.*, 2010). Além do cumprimento dos prazos, o despacho dos serviços comerciais deve buscar o equilíbrio entre as cargas de trabalho das equipes, a fim de que um maior número de serviços sejam executados pelas equipes no mesmo intervalo de tempo (ZOGRAFOS; DOULIGERIS; TSOUMPAS, 1998).

Devido ao grande número de variáveis a serem consideradas, atender à demanda de serviços observando as orientações da ANEEL é um desafio às empresas de distribuição (GARCIA *et al.*, 2012). A complexidade do problema aumenta ao se considerar que as demandas dos serviços comerciais e emergenciais são aleatórias (ZOGRAFOS; DOULIGERIS; TSOUMPAS, 1998). Dessa forma, um sistema computacional para auxiliar o despacho dos serviços torna-se essencial, a fim de se alcançar um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis.

Dentre outras vantagens, um sistema computacional para auxiliar o despacho dos serviços traz benefícios aos consumidores, ao diminuir o tempo de atendimento; e à empresa de distribuição, com a redução das distâncias percorridas pelas equipes (VOLPI *et al.*, 2011). Além do problema de despacho de serviços, esse tipo de sistema pode ser aplicado em ambientes semelhantes, como atendimento médico por ambulâncias, policiamento ou segurança privada, controle de incêndios pelo corpo de bombeiros e a restauração de outras redes de infraestrutura básica, como água e telecomunicações (GOMES *et al.*, 2008).

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é investigar uma metodologia computacional para melhorar o método atual de despacho de serviços comerciais e emergenciais às equipes de atendimento na empresa de distribuição de energia elétrica em estudo.

Como objetivos específicos têm-se:

- Aprimorar a utilização das informações disponíveis nos sistemas de informação da empresa.
- Desenvolver uma metodologia aplicável a qualquer área de atendimento.
- Orientar o despacho dos serviços a partir da criação de rotas otimizadas para as equipes.
- Permitir que diferentes custos sejam utilizados para o cálculo das rotas, como distâncias previstas e tempos previstos de deslocamento com veículo.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O restante deste trabalho está organizado da seguinte maneira: no Capítulo 2 é detalhado o campo de estudo desta pesquisa, apresentando o método atual de despacho da empresa e definindo as etapas estática e dinâmica utilizadas nesta dissertação para tratamento do problema de despacho de serviços.

No Capítulo 3 são apresentadas as referências relacionadas ao atendimento comercial e emergencial das empresas de distribuição, que utilizam diferentes abordagens e metodologias para tratamento do problema de despacho de serviços. Também são apresentadas as referências sobre o Problema de Múltiplos Caixeiros Viajantes (*Multiple Traveling Salesmen Problem*, MTSP) e sobre a Otimização por Colônia de Formigas (*Ant Colony Optimization*, ACO), utilizadas para elaboração das metodologias propostas nesta dissertação.

No Capítulo 4 as metodologias desenvolvidas neste trabalho para o problema estático e dinâmico são detalhadas, e nos Capítulos 5 e 6 são apresentados os experimentos realizados com a utilização de uma base de dados reais e os resultados obtidos.

O Capítulo 7 descreve as contribuições desta pesquisa e aponta o caminho para sua continuação.

O Anexo A apresenta a base de dados reais utilizada nos experimentos.

## 2 DESCRIÇÃO DO CAMPO DE ESTUDO

O atendimento comercial e emergencial corresponde ao conjunto de atividades executadas pelas empresas de distribuição de energia elétrica necessárias à manutenção corretiva do sistema de distribuição e à gestão comercial dos consumidores. Na COPEL Distribuição, as agências representam as unidades funcionais responsáveis pelo atendimento em partições da área total de concessão da empresa. Cada agência dispõe, em cada dia de trabalho, de um número variável de equipes para execução dos serviços comerciais e emergenciais localizados em sua partição.

As informações para desenvolvimento desta dissertação, além dos trabalhos relacionados apresentados no Capítulo 3, são provenientes da agência responsável pelo atendimento comercial e emergencial no município de Cornélio Procópio, localizado na mesorregião do Norte Pioneiro, estado do Paraná, que possui 637,95  $km^2$  de extensão territorial e 19.276 consumidores de energia elétrica, dos quais 3,76% estão localizados na área rural (INSTITUTO..., 2014).

Para descrever este campo de estudo, na Seção 2.1 são apresentadas as principais características dos serviços executados pelas equipes e a maneira como a ANEEL regula a qualidade do atendimento prestado. Em seguida, na Seção 2.2, é detalhado o método atual de despacho de serviços utilizado na empresa. Na Seção 2.3 são apresentadas as duas etapas consideradas nesta dissertação para o problema de despacho de serviços: o problema estático, no qual todos os serviços são previamente conhecidos; e o problema dinâmico, no qual novos serviços devem ser despachados durante o dia de trabalho das equipes.

### 2.1 SERVIÇOS COMERCIAIS E EMERGENCIAIS

Os serviços são denominados comerciais quando ligados à gestão dos consumidores e representam a maior parte dos serviços executados pelas empresas de distribuição de energia (VOLPI *et al.*, 2008). Magro (2003) identifica em seu trabalho em torno de 80 tipos diferentes de serviços comerciais. A religação de uma unidade consumidora, por exemplo, é um tipo de serviço comercial executado frequentemente pelas equipes. Normalmente este serviço surge a partir de uma solicitação de um cliente realizada pela central de atendimento telefônico da empresa, o que pode ocorrer a qualquer momento, e envolve o deslocamento de uma equipe até a unidade consumidora e sua reconexão à rede de distribuição.

A ANEEL regula a qualidade do atendimento comercial definindo prazos de execução para os serviços comerciais de acordo com o seu tipo. A religação de uma unidade consumidora que foi desligada por falta de pagamento, por exemplo, deve ser realizada em até 24 horas a partir do momento da solicitação do cliente. A empresa possui, então, um prazo que permite que a realização do serviço possa ser programada. A Tabela 1, adaptada da Resolução Normativa nº 414/2010 (AGÊNCIA..., 2010), que estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica, apresenta alguns tipos de serviços comerciais mais executados pelas equipes e seus prazos de execução.

**Tabela 1 – Exemplos de serviços comerciais e seus prazos de execução**

<b>Descrição</b>	<b>Prazo</b>
Vistoria de unidade consumidora em área urbana	3 dias úteis
Vistoria de unidade consumidora em área rural	5 dias úteis
Ligação de unidade consumidora em área urbana	2 dias úteis
Ligação de unidade consumidora em área rural	5 dias úteis
Substituição do medidor após constatação da deficiência	30 dias
Atendimento de solicitações de aferição dos medidores	30 dias
Religação quando constatada a suspensão indevida	4 horas
Religação em área urbana, quando cessado o motivo da suspensão	24 horas
Religação em área rural, quando cessado o motivo da suspensão	48 horas
Religação de urgência em área urbana	4 horas
Religação de urgência em área rural	8 horas
Solução de reclamação do consumidor	5 dias úteis

**Fonte: Resolução Normativa nº 414/2010 (AGÊNCIA..., 2010).**

Os serviços emergenciais relacionam-se a defeitos no sistema que causam interrupção no fornecimento de energia a um ou mais consumidores, ou a situações que envolvam risco à segurança. Podem surgir a qualquer momento e devem ser atendidos imediatamente. Quando a empresa recebe a informação de um condutor de energia rompido em uma área pública, por exemplo, uma equipe deve deslocar-se imediatamente ao local da ocorrência visando à segurança de terceiros. Eventos como esse podem ocorrer a qualquer momento e exigem respostas imediatas que visem diminuir o tempo de atendimento, como a designação da equipe que se encontre mais próxima (GARCIA *et al.*, 2012).

O atendimento dos serviços emergenciais impacta diretamente sobre o desempenho da empresa quanto à continuidade do fornecimento. Quanto mais rapidamente um serviço emergencial for atendido, menor será o tempo que os consumidores afetados ficarão sem energia elétrica. Para quantificar a qualidade do fornecimento, a ANEEL define indicadores individuais e coletivos, subdividindo a área de concessão da empresa em conjuntos de consumidores e estipulando valores máximos para os indicadores em cada conjunto. Esses valores máximos representam metas de qualidade a serem atingidas pelas empresas.

Os principais indicadores de continuidade individuais correspondem à Frequência Individual de Interrupção por Unidade Consumidora (FIC), à Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (DIC) e à Duração Máxima de Interrupção por Unidade Consumidora (DMIC). O FIC representa o número de vezes que uma determinada unidade consumidora teve o fornecimento de energia interrompido no período de apuração, que normalmente corresponde a um mês ou a um ano. O DIC corresponde ao tempo total que uma unidade consumidora ficou sem energia no período e o DMIC representa a duração da maior interrupção do período.

Matematicamente, sendo  $n_p$  o número de interrupções no período e  $t_{int}(i)$  o tempo de cada interrupção, a Equação 1 define o FIC, a Equação 2 o DIC, e a Equação 3 o DMIC, tendo sido extraídas de (AGÊNCIA..., 2014):

$$FIC = n_p \quad (1)$$

$$DIC = \sum_{i=1}^{n_p} t_{int}(i) \quad (2)$$

$$DMIC = Max_{i=1...n_p} \{t_{int}(i)\} \quad (3)$$

Os principais indicadores coletivos controlados pelas ANEEL são a Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC) e a Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC). O FEC corresponde a quantas vezes cada consumidor do conjunto ficou sem energia, em relação a todos os consumidores do conjunto.

Sendo  $C_c$  o total de consumidores do conjunto, o FEC é calculado a partir da Equação 4. O índice DEC é calculado de forma semelhante, por meio da Equação 5. Ambas as equações foram retiradas de (AGÊNCIA..., 2014):

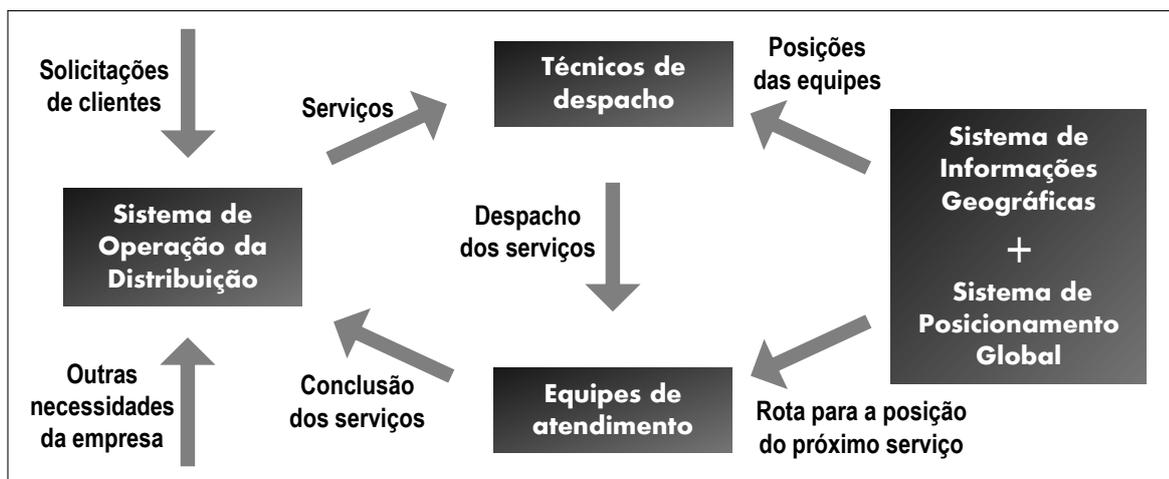
$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^{C_c} FIC(i)}{C_c} \quad (4)$$

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^{C_c} DIC(i)}{C_c} \quad (5)$$

## 2.2 MÉTODO ATUAL

Na agência de atendimento de Cornélio Procópio, as equipes iniciam o dia de trabalho a partir da garagem da agência e retornam a ela no final do dia. Normalmente, todas estão aptas a executar qualquer tipo de atividade, não havendo restrições quanto à habilidade das equipes na distribuição dos serviços. Esta descrição pode ser estendida às demais agências da COPEL Distribuição com poucas adaptações, como em agências que definem diferentes horários para o turno das equipes. A análise dos trabalhos relacionados, que estão descritos nas Seções 3.1 e 3.2, sugere que esta descrição pode ser estendida às demais concessionárias brasileiras também com poucas adaptações.

No método atual da empresa para realização do atendimento comercial e emergencial, dados de diversos sistemas de informação estão disponíveis para auxiliar os técnicos de despacho e as equipes na execução dos serviços, além dos dispositivos necessários para acesso a esses sistemas. A Figura 2 apresenta um esquema gráfico contendo os principais agentes e o fluxo de informações do método atual de atendimento.



**Figura 2 – Esquema do método atual do atendimento comercial e emergencial**

**Fonte: Autoria própria.**

A COPEL Distribuição dispõe de um sistema utilizado para gerenciamento dos serviços denominado Sistema de Operação da Distribuição (SOD) que, dentre outras funções, armazena todas as informações sobre os serviços desde o momento em que são gerados. Os serviços podem surgir a partir de solicitações dos clientes, registradas através do sistema de atendimento telefônico da empresa; ou a partir de necessidades da própria empresa, como vistorias e operações em equipamentos da rede de distribuição a serem realizadas pelas equipes.

Logo depois que um serviço é gerado, o técnico de despacho é informado em seu terminal de computador executando o SOD que há um novo serviço a despachar. Existem equipes técnicas distintas para o despacho comercial e emergencial, devido principalmente à atenção

exclusiva necessária ao despacho dos serviços emergenciais. Quando um serviço surge fora do horário normal de trabalho das equipes de atendimento, duas ações podem ser realizadas: se o serviço for emergencial, o técnico de despacho emergencial aciona a equipe que estiver de sobreaviso e despacha o serviço o mais rápido possível; se o serviço for comercial, ele é adicionado ao conjunto  $S$ , que contém todos os serviços já gerados mas ainda não executados, que serão despachados às equipes no início de seus turnos de trabalho.

A empresa também possui um Sistema de Informações Geográficas (SIG) no qual estão cadastradas as localizações dos equipamentos da rede de distribuição e dos seus consumidores. Integrado ao SIG, um Sistema de Posicionamento Global (*Global Position System*, GPS) permite aos técnicos de despacho verificarem em tempo real a posição das equipes. Dessa forma, quando um novo serviço surge durante o dia de trabalho, os técnicos de despacho podem verificar a posição instantânea das equipes para decidir para qual delas despachar o novo serviço. O SIG e o GPS são alimentados e atualizados por setores específicos da empresa, sendo utilizados apenas para extração de informações no escopo do atendimento comercial e emergencial.

As equipes de atendimento dispõem de um *tablet* executando um módulo específico do SOD, no qual os serviços são recebidos e através do qual informam os dados sobre a conclusão dos serviços após executados. Os dados de conclusão são armazenados pelo SOD para, entre outros objetivos, geração dos relatórios de atendimento para a ANEEL. Os *tablets* das equipes também contém uma versão específica do SIG integrado ao GPS da empresa, que permite a elas consultarem o endereço de seu próximo serviço a executar e até traçarem uma rota otimizada pelo GPS a partir da sua posição atual.

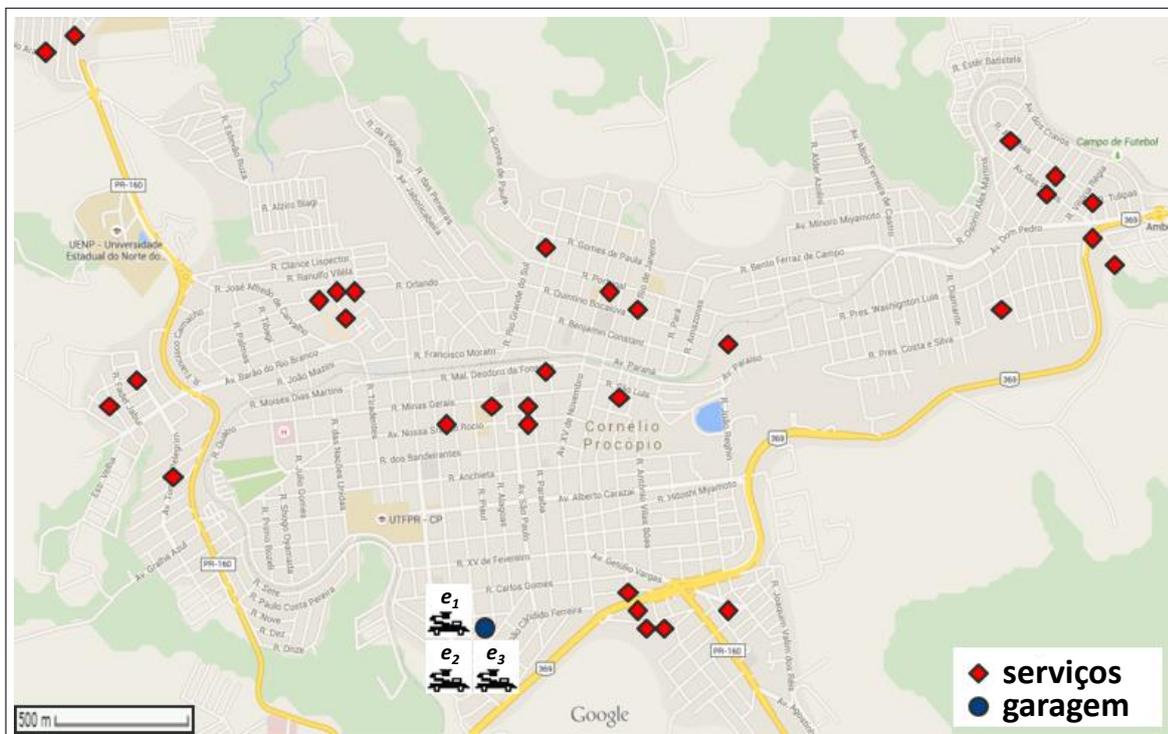
### 2.3 DEFINIÇÃO DOS PROBLEMAS

Nesta dissertação, a otimização do método de despacho de serviços foi dividido em duas etapas. Na primeira etapa, antes do início do dia de trabalho na agência de atendimento, existe um conjunto  $S$  de serviços comerciais espalhados pela área de atendimento que devem ser despachados a  $u$  equipes disponíveis. Qual a melhor maneira de distribuir os serviços entre as equipes? E quais as melhores rotas que as equipes devem percorrer? Estas duas questões compõem o Problema de Despacho Estático, detalhado na Seção 2.3.1.

Na segunda etapa, além dos serviços presentes em  $S$  no início do dia, durante o dia de trabalho novos serviços surgem a partir de solicitações de clientes e de outros setores da própria empresa, enquanto as equipes estão executando os outros serviços que já lhes foram designados. O que fazer quando surge um novo serviço durante o dia de trabalho? Esta questão configura o Problema de Despacho Dinâmico, detalhado na Seção 2.3.2.

### 2.3.1 Problema de Despacho Estático

Dado um conjunto  $S = (s_1, s_2, \dots, s_x)$  composto por  $x$  serviços comerciais a executar, e um número  $u$  de unidades de atendimento, ou equipes, qual a melhor forma de distribuir os  $x$  serviços entre as equipes disponíveis, e quais as melhores rotas a serem percorridas pelas equipes? Uma representação gráfica de uma instância do Problema de Despacho Estático pode ser observada na Figura 3, onde os losangos vermelhos representam os 31 serviços executados no município de Cornélio Procópio em 3 de fevereiro de 2014, em um dia de trabalho típico. O círculo azul representa a garagem da agência de atendimento, local onde as 3 equipes,  $e_1$ ,  $e_2$  e  $e_3$ , iniciaram e concluíram suas rotas neste dia.



**Figura 3 – Representação de uma instância do Problema de Despacho Estático. Os losangos vermelhos representam os serviços e o círculo azul corresponde à garagem da agência**  
**Fonte: Mapa de Google Maps e posições dos serviços de COPEL Distribuição.**

Devido à grande quantidade de formas possíveis de realizar a distribuição dos serviços, a solução adotada na empresa para realização do despacho estático é a execução dessa atividade por técnicos que realizam manualmente a análise das informações disponíveis, como a posição de todos os serviços conhecidos, para distribuí-los entre as equipes no início dos dias de trabalho. Normalmente, o técnico divide a área de atendimento em um número igual ao de equipes e designa a cada equipe os serviços de uma das divisões. A sequência na qual os serviços são executados é determinada pela própria equipe, que analisa cada solicitação individualmente e cria intuitivamente uma rota que procure minimizar o seu deslocamento total.

Dessa forma, no método atual compete aos técnicos de despacho distribuir os serviços entre as equipes de atendimento, tentando equilibrar a carga de trabalho entre elas; e cabe a cada equipe definir a sequência em que realizará seus atendimentos, buscando percorrer a menor distância possível em sua rota. Estes objetivos são coerentes com o objetivo geral da empresa, que deseja que todos os serviços em  $S$  sejam atendidos no menor intervalo de tempo possível, para alcançar as metas da ANEEL e a satisfação dos clientes, o que exige cargas de trabalho equilibradas entre as equipes e rotas otimizadas em seus deslocamentos. O método para o Problema de Despacho Estático desenvolvido nesta dissertação, que busca aproveitar computacionalmente as informações disponíveis para alcançar estes objetivos, encontra-se detalhado na Seção 4.1.

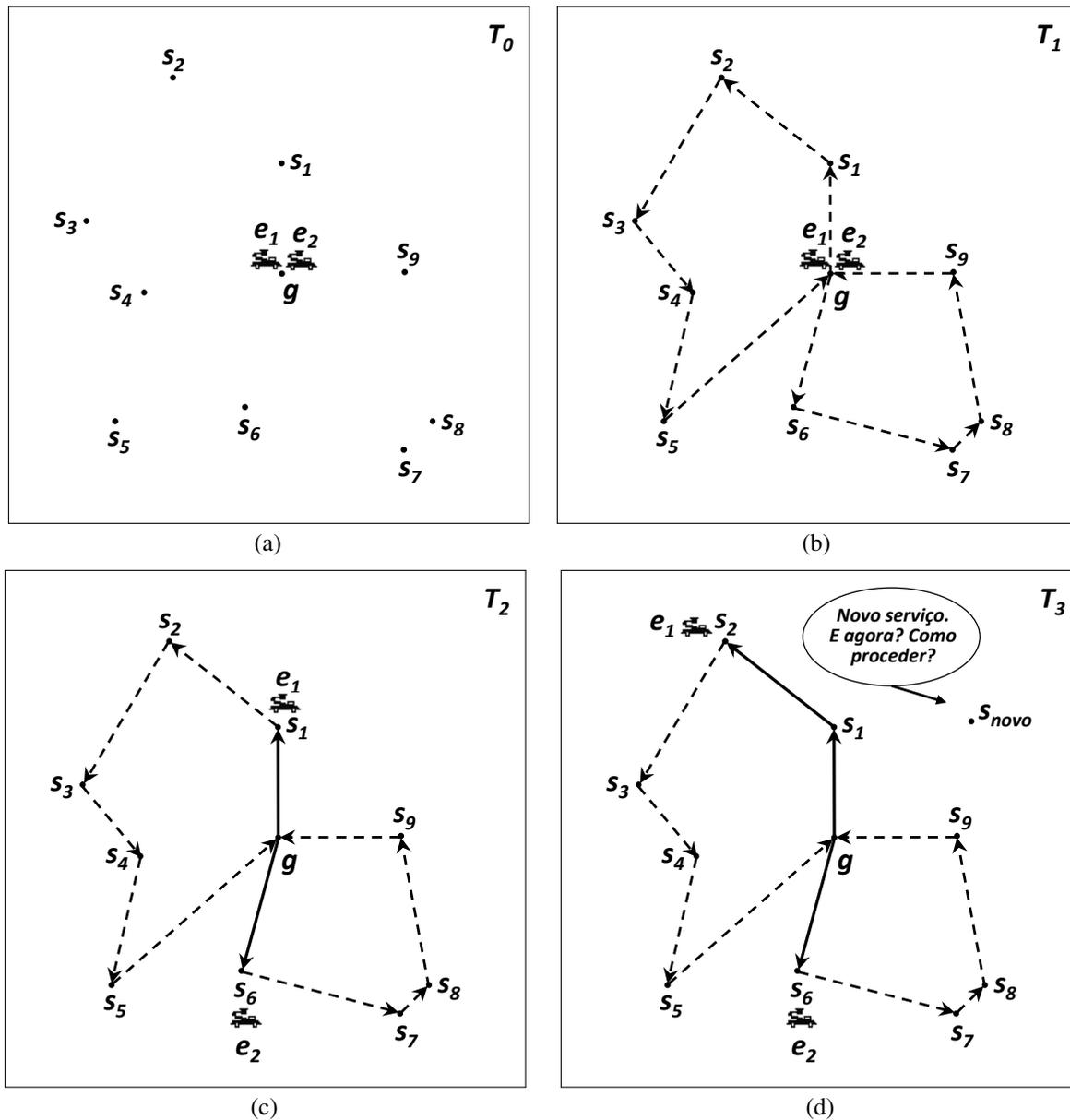
### 2.3.2 Problema de Despacho Dinâmico

Ao contrário da abordagem estática, na qual todos os serviços são conhecidos antes do início do dia de trabalho, no Problema de Despacho Dinâmico novos serviços surgem durante o dia, podendo ser comerciais ou emergenciais. Se emergencial, o serviço deve ser despachado imediatamente à equipe mais próxima. Se comercial, o serviço deve ser despachado a uma das equipes para que esta o inclua em sua rota. Uma representação gráfica deste ambiente está apresentada na Figura 4.

O instante  $T_0$  na Figura 4(a) representa o início de um dia de trabalho de uma agência de atendimento comercial e emergencial, na qual existe um conjunto  $S = (s_1, s_2, \dots, s_x)$  constituído por serviços comerciais aguardando execução. O valor de  $x$  corresponde ao número de serviços em  $S$  e  $g$  à posição da garagem da agência, onde  $u$  equipes encontram-se preparadas para iniciar seus atendimentos. Na Figura 4(a),  $x = 9$  e  $u = 2$ .

No método de trabalho atual da empresa, em  $T_1$  todos os elementos de  $S$  são distribuídos entre as  $u$  equipes de acordo com subdivisões da área de atendimento e as equipes planejam manualmente suas rotas. Em  $T_2$  cada equipe está realizando seu primeiro atendimento. Quando surge um novo serviço  $s_{novo}$ , que pode ser comercial ou emergencial, como em  $T_3$ , um técnico da empresa analisa visualmente em seu terminal de computador qual a melhor equipe a realizar o atendimento, consultando as suas posições em tempo real, e despacha o serviço imediatamente à equipe selecionada.

Como no problema estático, nesta etapa dinâmica existe uma grande quantidade de informação disponível que não é totalmente aproveitada devido às limitações do método manual de despacho. O método computacional para o Problema de Despacho Dinâmico desenvolvido nesta pesquisa encontra-se detalhado na Seção 4.2.



**Figura 4 – Representação gráfica do Problema de Despacho Dinâmico.** (a) Em  $T_0$  as equipes se encontram na garagem  $g$  e existe um conjunto  $S = (s_1, s_2, \dots, s_x)$  de serviços comerciais a executar; (b) Em  $T_1$  os serviços são distribuídos entre as equipes, que definem manualmente suas rotas; (c) Em  $T_2$  as equipes se deslocaram e estão executando seu primeiro serviço; (d) Em  $T_3$  surge um novo serviço  $s_{novo}$

Fonte: Autoria própria.

## 2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir desta descrição do campo de estudo, é possível concluir que o despacho dos serviços às equipes influencia diretamente na qualidade do atendimento de uma empresa de distribuição de energia elétrica. Um sistema de despacho eficiente leva ao atendimento de mais serviços no mesmo intervalo de tempo, melhorando o tempo de resposta às solicitações dos clientes e contribuindo para o cumprimento das metas da ANEEL.

O Problema de Despacho Estático e o Problema de Despacho Dinâmico, definidos na Seção 2.3, representam as duas etapas que foram consideradas neste trabalho para aprimorar o método de despacho utilizado na empresa. Ambos representam duas funções que são realizadas manualmente por técnicos no método atual: dividir um conjunto de serviços entre as equipes disponíveis no início do dia de trabalho (problema estático) e despachar novos serviços para as equipes que já estão trabalhando (problema dinâmico).

Os trabalhos que tratam o problema de despacho de serviços aplicando diferentes abordagens e metodologias são descritos no Capítulo 3, que ao final apresenta uma discussão comparando estas abordagens dos trabalhos relacionados à abordagem realizada nesta pesquisa.



### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

O problema de gerenciamento do atendimento comercial e emergencial das empresas de distribuição de energia elétrica tem atraído a atenção de pesquisadores das áreas de Engenharia da Produção, Engenharia Elétrica, Matemática e Computação. Em geral, os trabalhos relacionados selecionam dados entre a grande quantidade disponível no ambiente e geram soluções que melhoram o processo atual de atendimento das empresas sob um ou mais aspectos. Há grande diversidade, porém, nos objetivos, métodos e dados considerados por estes trabalhos, que podem ser divididos em duas categorias: metodologias que produzem soluções estáticas, a partir do conhecimento prévio de todos os dados do problema; e metodologias dinâmicas, que consideram os dados do ambiente e geram soluções em tempo real.

Na Seção 3.1 são apresentadas as abordagens que tratam o problema apenas em cenários estáticos, em geral considerando apenas os serviços comerciais. Na Seção 3.2 são apresentados os trabalhos que abordam o problema na sua forma dinâmica, buscando soluções em tempo real para distribuição dos serviços e roteamento das equipes. Na literatura também são encontradas abordagens que buscam dimensionar as equipes necessárias a uma determinada área de atendimento, como em Magro (2003) e Volpi *et al.* (2008).

#### 3.1 ABORDAGENS ESTÁTICAS

Steiner *et al.* (2006) objetivam otimizar o deslocamento das equipes aos locais de execução dos serviços comerciais e emergenciais. Para isso, procuram determinar qual o menor trajeto a ser percorrido ao se deslocar entre duas rotas de leitura quaisquer das 48 que compõem uma das seis agências de atendimento do município de Curitiba, Paraná. Uma agência de atendimento é responsável por uma partição da área de concessão da empresa de distribuição, sendo constituída por uma determinada quantidade de equipes de atendimento comercial e emergencial e pela delimitação de uma região de atendimento. Uma rota de leitura é uma subdivisão da região de atendimento de uma agência que agrupa consumidores geograficamente próximos.

Em sua metodologia, Steiner *et al.* (2006) consideram as posições centrais das rotas de leitura como os pontos que definem os vértices de um grafo assimétrico  $G = (V, A)$ . O conjunto de arestas  $A$  é definido por uma matriz preenchida pelos custos de se deslocar de uma rota a outra qualquer. A partir do grafo é utilizada uma implementação do algoritmo de Floyd, que é capaz de fornecer os custos mínimos e os caminhos de menor distância entre os pares de nós de um grafo. Os resultados da aplicação são duas matrizes que relacionam as 48 rotas de

leitura entre si, uma apontando o menor custo entre elas, para ser utilizada pelo despachador no momento que um serviço deve ser designado. A outra matriz apresenta o trajeto de menor custo entre duas rotas de leitura quaisquer, e deve ser consultada pelas equipes antes de iniciarem seus deslocamentos durante a execução dos atendimentos.

Costa, Costa e Goes (2006) focam seu trabalho na distribuição entre as equipes dos serviços comerciais, cuja execução pode ser programada antecipadamente. Os autores propõem uma solução que busca encontrar os melhores agrupamentos de rotas de leitura em setores de atendimento, a fim de homogeneizar a distribuição dos serviços entre as equipes disponíveis. Um setor de atendimento é uma subdivisão da região de atendimento da agência e é formado por um conjunto de rotas de leitura.

Analisando os dados de um mês dos atendimentos da mesma agência que Steiner *et al.* (2006), Costa, Costa e Goes (2006) verificam que as demandas de serviços dos setores de atendimento são significativamente diferentes, o que dificulta uma divisão homogênea dos serviços entre as equipes, já que cada equipe fica responsável por um ou mais setores. Sugerem a solução deste problema modelando-o como um Problema de  $p$ -Medianas Capacitado (PPMC), definindo os centros das rotas de leitura como os vértices do grafo, assim como Steiner *et al.* (2006).

O Problema de  $p$ -Medianas é um problema de otimização combinatória que consiste em se determinar em um grafo um número  $p$  de vértices, denominados medianas, de forma que todos os outros vértices do grafo estejam associados cada um a apenas uma mediana. A soma de todos os custos entre a mediana e os vértices do seu agrupamento, de todos os agrupamentos, deve ser a menor possível. Caso seja definido um custo máximo para cada agrupamento, tem-se um Problema de  $p$ -Medianas Capacitado.

Costa, Costa e Goes (2006) criam as soluções através de duas metodologias. Na primeira, é criada uma aplicação para a geração de um modelo matemático a partir do PPMC e das características do problema real, na qual é definida uma capacidade temporal para as equipes. O modelo gerado alimenta uma ferramenta comercial de otimização que realiza os agrupamentos. Na segunda metodologia, é implementado um algoritmo genético específico para o problema.

Em Garcia *et al.* (2010a) e Garcia *et al.* (2010b) é apresentada uma metodologia específica para designação de serviços programáveis, assim como no trabalho de Costa, Costa e Goes (2006). Objetivam o aumento da produtividade das equipes, modelando o problema combinando o PPMC com o Problema de Roteamento de Veículos (PRV). A modelagem como um PPMC é realizada definindo os locais dos serviços como os vértices do grafo e determinando uma capacidade temporal para os agrupamentos. Para tratar o problema, é proposto um

algoritmo baseado na heurística construtiva de Ahmadi e Osman, que considera uma medida de densidade ao gerar os agrupamentos (AHMADI; OSMAN, 2005). Heurísticas construtivas inicialmente criam uma solução e efetuam buscas locais para melhorar sua qualidade.

A partir dos agrupamentos criados, Garcia *et al.* (2010b) consideram cada grupo individualmente como uma instância de um PRV e calculam o custo da rota. Caso o custo seja maior que a capacidade das equipes, a solução é descartada e são gerados novos agrupamentos. O PRV é um dos problemas mais estudados na área de otimização combinatória que consiste no atendimento de um conjunto de consumidores por uma frota de veículos que partem de um ou mais depósitos. No PRV existe uma restrição sobre a capacidade das equipes que limita o número de consumidores atendidos por um veículo.

Goel e Meisel (2013) focam as atividades das equipes de manutenção, que necessitam de desligamentos de trechos da rede de distribuição para serem executadas. Os desligamentos são programados e aproveitados para execução de todos os reparos necessários em diversos pontos do trecho desenergizado. O trabalho de Goel e Meisel (2013) tem como objetivo designar cada tarefa para um trabalhador e determinar um escalonamento que minimize os deslocamentos entre os serviços e o tempo de desligamento da rede para realização das tarefas. Utilizam a meta-heurística Busca em Larga Vizinhança (*Large Neighborhood Search*, LNS), combinada com técnicas de programação matemática. A meta-heurística LNS procura escapar de ótimos locais realizando movimentos em uma grande vizinhança durante a criação das soluções. A metodologia foi implementada em um aplicação que gera o modelo matemático, utilizado como entrada em uma ferramenta comercial de otimização que gera as soluções.

### 3.2 ABORDAGENS DINÂMICAS

Zografos, Douligeris e Tsoumpas (1998) apresentam um estudo de caso para gerenciamento do atendimento emergencial de uma empresa de distribuição de energia elétrica de grande porte do sudeste dos Estados Unidos, considerando a totalidade de sua região de atendimento. Focam seu trabalho na redução da duração das interrupções de fornecimento de energia, através da otimização do aproveitamento das equipes e da utilização da grande quantidade de informação disponível de maneira adequada. Estes objetivos são buscados no desenvolvimento de um sistema de informação integrado composto por três módulos. O módulo de gerenciamento de dados consiste num SIG usado para representar e gerenciar os dados espaciais relacionados à área de atendimento e ao atendimento emergencial. O segundo módulo, de monitoramento de veículos e comunicação, obtém as posições correntes das equipes e viabiliza a comunicação entre elas e os outros módulos do sistema.

O terceiro módulo, de modelagem, analisa as informações fornecidas pelos outros dois e gera informações otimizadas para despacho dos serviços e roteamento das equipes. Para isso, inicialmente a área de atendimento é particionada com base em dados do histórico da empresa, buscando o equilíbrio nas demandas das partições, cada uma ficando sob a responsabilidade de uma equipe de atendimento. O despacho dos serviços em tempo real pode ser realizado utilizando-se duas políticas. A primeira implementa a regra *primeiro a chegar, primeiro a ser servido*, baseando-se apenas nas diferentes prioridades dos serviços emergenciais. A segunda política usa a regra do *vizinho mais próximo*, despachando o serviço emergencial para a equipe que se encontre mais próxima de sua posição de atendimento. Para o desenvolvimento do sistema apresentado, Zografos, Douligieris e Tsoumpas (1998) utilizam dados de um ano da empresa em estudo, além de informações obtidas diretamente com os despachantes e com as equipes de atendimento. Os experimentos realizados apontam que a implantação pela empresa do sistema desenvolvido resultou em melhora nos tempos de resposta aos serviços emergenciais.

O ambiente estudado por Gomes *et al.* (2008), assim como o de Zografos, Douligieris e Tsoumpas (1998), contempla apenas atendimentos emergenciais, consistindo no município de Fortaleza, estado do Ceará. O objetivo de sua metodologia é propor uma heurística para realizar a previsão do horário de atendimento dos serviços emergenciais e redefinir a ordem de execução dos atendimentos quando do surgimento de novos serviços. As reordenações devem atender aos seguintes objetivos, que estão citados na ordem que são aplicados: atender primeiramente as emergências de maior prioridade; minimizar o desvio entre a previsão inicial do tempo de atendimento e a previsão final; minimizar a distância total percorrida por todas as equipes.

A heurística proposta funciona da seguinte forma: quando surge um novo serviço emergencial, ele é inserido numa lista de espera de acordo com sua prioridade. Em seguida é aplicada a *regra de designação*, que define que a melhor equipe para atendimento do novo serviço é a que tiver o menor custo somando-se o tempo de atendimento do serviço em execução mais o tempo de deslocamento para o novo serviço. Após definida a equipe, é estimado um tempo total de atendimento para o novo serviço, que tem que ser recalculado quando as ordens de execução são reprogramadas. Para a definição dos custos temporais, foram utilizadas as distâncias euclidianas entre as posições geográficas. Para a realização dos experimentos, Gomes *et al.* (2008) define aleatoriamente uma velocidade média de 30 km/h para todos os deslocamentos e um tempo de execução de 30 minutos para cada atendimento.

Quando na lista de serviços a executar houver mais de um serviço com a mesma prioridade, é executada uma busca local para definir a melhor ordem de execução entre eles. A busca local foi implementada com base no algoritmo *Steepest Descent* (Descida mais Íngreme), que executa determinados movimentos numa solução e reinicia a busca quando é encontrada

uma solução melhor que a inicial. O movimento utilizado é denominado *shift*, que retira um elemento da solução de sua posição original e o insere em outro ponto qualquer da solução. Para verificar se uma solução é melhor que a anterior é verificado se, além do custo total de deslocamento ser menor, os serviços na fila não extrapolaram um limite predefinido de variação dos tempos de execução inicialmente previstos. Caso isto ocorra, a nova solução é descartada.

Para verificar a eficácia de sua metodologia, Gomes *et al.* (2008) realizam experimentos com instâncias geradas aleatoriamente. Para cada instância foi realizada uma simulação utilizando a metodologia atual da empresa (atender os serviços na ordem que surgem) e outra com a heurística proposta. Segundo os autores, os resultados mostraram melhoras nos objetivos considerados com a aplicação da heurística proposta.

O trabalho de Amorim (2010), assim como os dois anteriores, está focado no atendimento emergencial. Ele propõe uma metodologia para aumentar a eficiência do despacho dos serviços emergenciais dividida em três etapas. A primeira etapa é responsável pela preparação dos dados que serão utilizados nas fases seguintes, que correspondem ao número de equipes disponíveis e às coordenadas geográficas (longitude e latitude) de todos os serviços a executar, como também a classificação desses serviços como individuais (afetam apenas um consumidor) ou coletivos (geralmente causadas por defeitos em circuitos de baixa tensão, que alimentam em média 150 consumidores).

A segunda fase é responsável pela distribuição dos serviços entre as equipes disponíveis. As coordenadas fornecidas pela primeira fase definem as posições dos serviços, que são agrupados com a utilização do algoritmo de agrupamento *k-means*, sendo o número de grupos igual ao número de equipes disponíveis. Na fase três, para cada grupo gerado da fase anterior, é definida a ordem que os serviços devem ser executados através um algoritmo genético, que busca minimizar os tempos de atendimento de cada equipe, como também o número médio de horas que os clientes ficaram sem fornecimento de energia.

Amorim (2010) realiza sua pesquisa a partir de dados da empresa concessionária de energia responsável pelo abastecimento da capital do estado do Rio de Janeiro e de outras cidades do interior do mesmo estado. A validação da metodologia, porém, utilizou cenários cujos serviços foram gerados aleatoriamente, e ocorreu através da comparação entre os resultados obtidos por experimentos que consideraram diferentes critérios na função de aptidão do algoritmo genético desenvolvido.

O trabalho de Verboski (2010) apresenta um algoritmo para otimização do despacho dos serviços comerciais e emergenciais às equipes modelando o problema como um Problema de Designação e utilizando o método de Munkres na busca de soluções em tempo real. Um

problema de designação consiste em encontrar o menor custo total ao se designar a um conjunto de equipes  $E$  um conjunto de serviços  $S$ , com cada equipe recebendo apenas um serviço. Desta forma,  $c_{SE}$  corresponde ao custo de se atribuir um serviço a uma equipe, e consiste nos valores que preenchem a matriz sobre a qual é aplicada o algoritmo de Munkres. Seu valor é calculado através de uma função que considera três fatores: a distância entre a equipe e o serviço; o número de clientes atendidos pelo serviço; e o tempo que falta para que o prazo de execução do serviço se esgote.

O método de Munkres consiste numa variação do método Húngaro de otimização sobre uma matriz de custos, utilizado para resolver problemas de designação. A variação consiste numa melhor utilização de espaço em memória pelo método de Munkres ao se trabalhar com matrizes retangulares. O método Húngaro é um método discreto de otimização baseado na manipulação de matrizes que pode ser aplicado a diversos problemas práticos de designação. Verboski (2010) valida seus resultados por meio de simulações variando os pesos das características consideradas para definição de  $c_{SE}$ . Também são realizados testes em situações reais em uma agência de Curitiba e em mais dois municípios paranaenses, que apontam a eficiência da metodologia proposta.

Rocha (2011) aborda o atendimento comercial e emergencial como um PRV dinâmico e estocástico, com um único depósito e tamanho da frota limitado e homogêneo. Como considera também os serviços comerciais, afirma que o dinamismo do problema é moderado, pois em torno de 50% dos serviços são conhecidos antes do início do horário de trabalho das equipes. A sua metodologia consiste na utilização de uma heurística de inserção, que insere novos serviços nas rotas anteriormente programadas para as equipes, com base em diferentes critérios pré-configurados. Para a realização de experimentos, são utilizados dados reais de um dia de uma empresa do interior do estado do Rio Grande do Sul, que comprovam a eficácia do algoritmo para todos os critérios analisados. Nos experimentos são utilizadas distâncias euclidianas multiplicadas por coeficientes para representar com maior fidelidade os custos reais de deslocamento. Também considera apenas uma velocidade média constante para as equipes, igual a 60 km/h.

Garcia *et al.* (2012) abordam o problema do despacho de serviços como um PRV que requer um sistema de tempo real para vincular cada serviço a uma equipe. Segundo os autores, as formas possíveis de distribuir os serviços entre as equipes e o número de rotas que estas podem executar são quantidades que crescem exponencialmente em relação ao número de serviços, de forma que encontrar as melhores combinações configuram estas tarefas como problemas de otimização combinatória. De acordo com Garcia *et al.* (2012), para muitas instâncias destes problemas encontrar a solução ótima exige tempo computacional proibitivo, de forma

que a utilização de métodos exatos torna-se inviável. Dessa forma, os autores concluem que o uso de métodos aproximativos representam boas opções para o tratamento dessa classe de problemas.

Ainda segundo Garcia *et al.* (2012), os serviços comerciais são conhecidos, *a priori*, e os serviços emergenciais podem surgir a qualquer momento. Então, existe a necessidade de reprogramação das rotas de todas as equipes quando do surgimento de serviços emergenciais, que devem ser atendidos imediatamente. Para isso, propõem um modelo matemático com três funções objetivo: 1: minimizar o tempo total das rotas de todas as equipes; 2: minimizar o tempo que os clientes aguardam a execução dos serviços emergenciais; e 3: minimizar o *makespan* (diferença entre os custos finais das rotas das equipes). Foram atribuídos pesos a cada um dos objetivos, o que permite que o modelo matemático seja configurado a considerá-los com diferentes intensidades ao ser resolvido.

Utilizando o modelo matemático, é realizado um experimento com dados reais em dois cenários. No primeiro cenário existem 62 serviços comerciais e 3 equipes de atendimento. No segundo cenário, duas horas após as equipes iniciarem seus atendimentos, surgem 4 serviços emergenciais simultaneamente, em pontos diferentes da área de atendimento. Neste segundo cenário são desconsiderados os serviços já executados e atualizadas as posições das equipes. O modelo matemático é resolvido para os dois cenários utilizando o pacote comercial *CPLEX 12.1*. Os pesos dos objetivos 1 e 2 foram configurados com o mesmo valor e o objetivo 3 recebeu peso zero, pois não foi possível aplicá-lo com tempo computacional aceitável. Os resultados são analisados comparando entre os dois cenários os horários em que as equipes concluem todos os serviços, e através da análise visual das rotas realizadas.

Ñahuis (2013) apresenta uma metodologia para automação do despacho dinâmico das equipes de atendimento, classificando o problema como um Problema de Alocação Generalizada e apresentando um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista (PLIM). A metodologia inclui uma ferramenta computacional para hierarquizar o conjunto de serviços a executar e atribuí-los às equipes disponíveis. A cada novo serviço gerado, o conjunto de serviços a executar é reordenado e uma nova atribuição é realizada a todas as equipes.

Inicialmente, Ñahuis (2013) criou um grafo não orientado a partir de um mapa da área urbana da cidade de Presidente Prudente, estado de São Paulo, cujos vértices correspondem aos pontos do mapa onde ocorrem alterações na direção dos deslocamentos, em geral nas esquinas das vias para automóveis. O grafo inicial passou então por uma simplificação ficando resumido a 178 vértices, sendo os comprimentos das arestas calculados um a um com o auxílio da ferramenta *AutoCad*, possibilitando a determinação das distâncias reais. Em seguida foram definidas

velocidades médias para as arestas de acordo com o tipo de via que representam: 30 km/h para vias como passeios e ruas e 50 km/h para vias como avenidas. Além disso, foram consideradas a existência de escolas, faixas de pedestres e semáforos, que aumentam o tempo de deslocamento das vias. As velocidades médias foram estimadas e a sinalização das vias levantadas a partir da observação direta pelo autor da área de atendimento. Todas essas informações foram organizadas em um modelo simplificado da cidade, composto por listas (de adjacências entre pontos, de distâncias, de velocidades, de sinais de trânsito), que serve de base para o modelo matemático desenvolvido.

Na fase 1 da modelagem matemática, as posições das equipes e dos serviços são conhecidas previamente e são representadas por vértices do modelo simplificado da cidade criado anteriormente. Esta fase da modelagem resulta numa matriz de tempos de deslocamento que armazena os menores tempos de trajeto desde as posições atuais das equipes até cada uma das posições dos serviços a executar, considerando todas as informações fornecidas pelo modelo simplificado da cidade.

Na segunda fase da modelagem matemática é realizada a distribuição dos serviços entre as equipes e definidas as sequências que estes devem ser executados. Além da matriz gerada na fase anterior, são considerados também o número de equipes disponíveis para cada tipo de serviço, o tempo de atendimento de cada serviço, o grau de prioridade de cada serviço, a origem do serviço (empresa ou consumidor), o prazo limite de execução, o valor de multa em caso de não atendimento do prazo e o número de consumidores atingidos. A função objetivo desta segunda fase do modelo minimiza a soma de quatro termos que representam, em valores monetários: o custo de não atendimento de um serviço com determinada prioridade; o custo de horas extras das equipes; o custo por ultrapassar o prazo de atendimentos emergenciais; e o custo gerado pelo não cumprimento do índice DEC para o período considerado.

Para a validação de sua metodologia, Ñahuis (2013) implementou o modelo matemático através da linguagem algébrica AMPL (*A Modeling Language for Mathematical Programming*) e o resolveu utilizando o solver comercial CPLEX. Os testes foram realizados sobre dois cenários estáticos. No primeiro cenário existem 6 equipes em diferentes posições do grafo e 12 serviços a executar. No segundo cenário são 12 equipes e 6 serviços. Os resultados obtidos para ambos os cenários foram analisados a partir da verificação das designações realizadas, uma a uma, e a partir dos custos totais das rotas percorridas.

### 3.3 O PROBLEMA DE MÚLTIPLOS CAIXEIROS VIAJANTES

O Problema do Caixeiro Viajante (*Traveling Salesman Problem*, TSP) é um dos problemas de otimização combinatória mais pesquisados, que se destaca por ser de fácil declaração mas de difícil resolução, pertencendo à classe dos problemas NP-completos (AUGUSTINE, 2002). Em sua definição clássica, em uma instância do problema existem  $n$  cidades a serem visitadas por um caixeiro, que objetiva realizar a menor rota possível que passe por todas as cidades exatamente uma vez e retorne à cidade de partida. Várias aplicações do mundo real podem ser modeladas como instâncias de um TSP, como rotas de transporte escolar, sequenciamento de DNA, manufatura de circuitos de microchips e inspeções em plataformas de petróleo (KANANDA, 2014).

Uma instância de TSP pode ser representada em um grafo completamente conectado e não direcionado  $G = (V, A)$ , no qual  $V$  é o conjunto composto por  $n$  vértices, representando as cidades, e  $A$  é o conjunto de arestas que conectam todas as cidades entre si. Cada elemento de  $A$  possui um custo associado, que geralmente é uma medida de distância ou tempo, os quais são organizados numa matriz  $C$  na qual cada elemento  $c_{ij}$  é o custo do deslocamento iniciando no vértice  $i \in V$  até o vértice  $j \in V$ . A matriz de custos é dita simétrica quando  $c_{ij} = c_{ji}, \forall i, j \in V$ , ou assimétrica caso contrário. Na Teoria dos Grafos, uma solução para o TSP corresponde a um ciclo hamiltoniano, que consiste num caminho que percorre todos os vértices de um grafo univocamente formando um circuito fechado. Dessa forma, o objetivo do TSP é encontrar o ciclo hamiltoniano de menor distância total em um grafo ponderado.

O Problema de Múltiplos Caixeiros Viajantes (*Multiple Traveling Salesmen Problem*, MTSP) é uma generalização do TSP na qual mais de um caixeiro participa da solução. Como explica Bektas (2006), o MTSP é mais apropriado para aplicações do mundo real que o TSP e pode ser estendido para uma grande variedade de PRVs (Problemas de Roteamento de Veículos) com a adição de restrições às soluções. PRV é o nome dado a toda uma classe de problemas envolvendo a visita de clientes por veículos.

Na definição geral do MTSP, ou MTSP básico, existem  $m > 1$  caixeiros inicialmente posicionados em um vértice comum, normalmente indexado como o primeiro vértice da instância,  $v_0 \in V$ , e denominado depósito. Os demais vértices da instância são chamados de intermediários. O objetivo é minimizar o custo total da solução, que corresponde aos custos das rotas de todos os caixeiros somados, sendo que todas as rotas devem começar e terminar no depósito e todos os nós intermediários devem ser visitados exatamente uma vez. Nesta dissertação, o termo “rota” é empregado ao conjunto de cidades visitadas por um caixeiro ordenadas pelo instante da visita, e o termo “solução” é empregado para uma solução completa do problema.

A forma mais comum de modelar o MTSP é a formulação baseada em atribuição utilizando a programação linear inteira. A formulação do MTSP básico com o objetivo de minimizar o custo total da solução apresentada a seguir foi extraída de Bektas (2006). Nesta formulação,  $n$  corresponde ao número de elementos de  $V$ , que é o conjunto de vértices da instância incluindo o depósito;  $m$  é o número de caixeiros;  $i$  e  $j$  são vértices da instância;  $x_{ij}$  é a variável binária que informa se a aresta  $(i, j)$  faz parte da solução do problema;  $c_{ij}$  é o custo associado à aresta  $(i, j)$ ; e  $B$  é o número de elementos dos subconjuntos de  $V$ , que constituem os vértices atribuídos a cada caixeiro. Na criação do modelo, inicialmente é definida a variável binária  $x_{ij}$ :

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se a aresta } (i, j) \text{ é usada na solução} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (6)$$

A função objetivo é:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (7)$$

Sujeita às seguintes restrições:

$$\sum_{j=2}^n x_{1j} = m \quad (8)$$

$$\sum_{j=2}^n x_{j1} = m \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j = 2, \dots, n \quad (10)$$

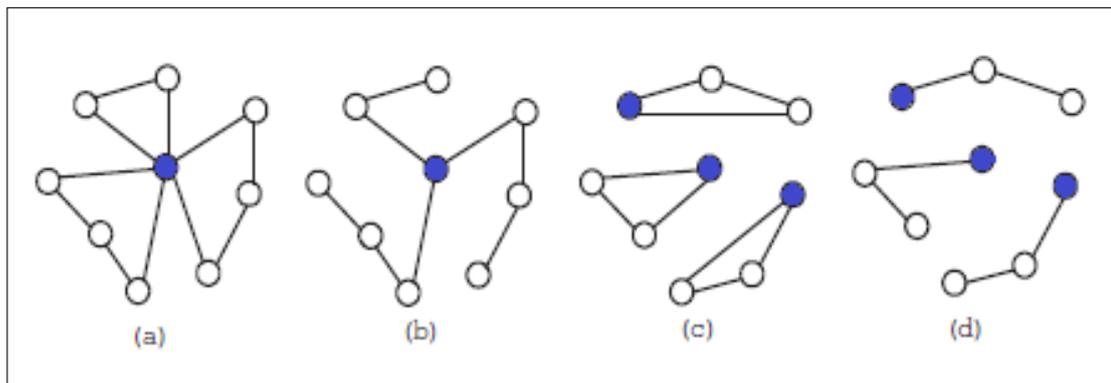
$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = 2, \dots, n \quad (11)$$

$$\sum_{i \notin B} \sum_{j \in B} x_{ij} \geq 1, \quad \forall B \subseteq V \setminus \{1\}, \quad B \neq \emptyset \quad (12)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in V \quad (13)$$

As restrições das Equações 8 e 9 garantem que exatamente  $m$  caixeiros farão parte da solução. As restrições das Equações 10, 11 e 13 representam as regras de atribuição e a restrição da Equação 12 previne a criação de subconjuntos de cardinalidade  $B$  que não contenham o depósito.

Wang, Liu e Hou (2013) apresentam quatro variações possíveis do MTSP, que estão representadas na Figura 5, na qual os vértices em azul representam os depósitos. A solução em (a) corresponde a de um MTSP básico. Na solução em (b), todos os caixeiros partem do mesmo depósito, mas não retornam a ele depois de visitarem todos os vértices intermediários. Esta variação é denominada MTSP com rotas abertas (*open paths*). Em (c), o número de depósitos é maior que 1, e cada caixeiro retorna ao seu próprio depósito, configurando o MTSP com múltiplos depósitos e rotas fechadas. Em (d) cada caixeiro também tem seu próprio depósito, mas não retorna a ele, consistindo no MTSP com múltiplos depósitos e rotas abertas.



**Figura 5 – Variações do MTSP quanto ao formato das soluções: (a) único depósito e rotas fechadas, (b) único depósito e rotas abertas, (c) múltiplos depósitos e rotas fechadas, (d) múltiplos depósitos e rotas abertas**

Fonte: Wang, Liu e Hou (2013).

Outra variação importante do MTSP está relacionada ao objetivo do problema. Okonjo-Adigwe (1988) aponta que o MTSP sem restrições não considera importantes parâmetros de problemas reais, entre eles o equilíbrio da carga de trabalho (*workload balance*) entre os caixeiros. Para buscar o equilíbrio entre os custos das rotas em um MTSP, ao invés de minimizar o custo total da solução, o custo a ser minimizado passa a ser o da maior rota da solução, que é composta por  $m$  rotas, uma de cada caixeiro. Esta variação é também denominada MTSP com objetivo *minmax*.

Liu, Li e Zhao (2009) apresentam um modelo matemático multiobjetivo para o MTSP para a minimização do custo total das soluções e também a minimização da maior rota individual das soluções. Neste modelo,  $C_1, C_2, \dots, C_m$  correspondem às  $m$  rotas, ou ciclos fechados, que devem compor a solução; e  $\omega(C_i)$  é o custo da rota  $i$ . As funções objetivo são:

$$\text{Min} \sum_{j=1}^m \sum_{e_i \in (C_j)} \omega(e_i) \quad (14)$$

$$\text{Min} \quad \text{argmax}[\omega(C_i)] \quad (15)$$

$$\text{Sujeitas a } \begin{cases} v_0 \in C_i(V) (i = 1, 2, \dots, m) \\ \bigcup_{i=1}^m C_i(V) = G(V) \end{cases} \quad (16)$$

Neste modelo, a Equação 14 limita o custo total das soluções MTSP e a Equação 15 restringe o custo das rotas individuais de cada caixeiro. As restrições na Equação 16 definem que um depósito e  $m$  rotas devem compor a solução (LIU; LI; ZHAO, 2009).

Entre os trabalhos de outros autores que propõem métodos para tratamento do MTSP, a maioria utiliza a descrição geral do problema, ou MTSP básico, com único depósito e rotas fechadas. Quanto ao objetivo, os trabalhos equilibram-se entre os que minimizam o custo total das soluções (*minsum* MTSP) e os que minimizam o custo da maior rota individual das soluções (*minmax* MTSP).

Somhom, Modares e Enkawa (1999) criam uma rede neural baseada em competição (*competition-based neural network*) para tratamento do *minmax* MTSP. Comparam seu algoritmo com um algoritmo de rede elástica (*elastic net*) e com a heurística 2-opt generalizada, a partir de experimentos com instâncias da *Traveling Salesman Problem Library* (TSPLIB). A TSPLIB é uma biblioteca digital com várias instâncias de TSP e de problemas relacionados (REINELT, 1991).

Tang *et al.* (2000) buscam melhorar a programação do processo de *hot rolling* (moldagem por meio de rolos da espessura de uma chapa de metal em altas temperaturas) em uma indústria chinesa de ferro e aço de grande porte. Para isso, modelam o problema real como um MTSP com depósitos iniciais e finais distintos e minimizam o custo total das soluções com um algoritmo genético modificado especialmente desenvolvido para o problema. Avaliam a eficiência de seu algoritmo comparando-o com o algoritmo exato de Volgenant e Jonker, em experimentos realizados utilizando instâncias de MTSP aleatórias; e também comparando-o com o método utilizado na empresa, em experimentos com dados reais.

Zhu e Yang (2003) minimizam o custo total das soluções para o MTSP básico considerando o equilíbrio da carga de trabalho em sua metodologia, aplicando uma abordagem baseada em um *Self-Organizing Map* melhorado em conjunto com uma rede neural artificial. Comparam os resultados obtidos com a utilização do mapa convencional com os do mapa melhorado em experimentos com instâncias da TSPLIB, considerando os custos totais das soluções e os tempos computacionais dos algoritmos ao realizar a comparação.

Carter e Ragsdale (2006) e Brown, Ragsdale e Carter (2007) trabalham com o MTSP básico, realizando experimentos minimizando o custo total e experimentos minimizando a

maior rota individual das soluções. Aplicam um algoritmo genético com um novo cromossomo e operadores relacionados para tratamento do MTSP a instâncias aleatórias com 51, 100 e 150 cidades. Nos experimentos, comparam os resultados obtidos com seu novo cromossomo com os resultados de outros dois cromossomos já existentes, fixando o tempo de execução e analisando os custos das soluções.

Yuan *et al.* (2013) apresentam um algoritmo genético para o MTSP básico com um novo operador de *crossover*, propondo a utilização de seu algoritmo na locação automatizada de portos marítimos. Realizam experimentos minimizando o custo total e minimizando a maior rota individual das soluções, sobre as mesmas instâncias de Carter e Ragsdale (2006). Comparam seu novo operador com outros três operadores já existentes e com os resultados de Carter e Ragsdale (2006). Também realizam experimentos com 5 instâncias pequenas, de 11 a 16 nós, cujas soluções ótimas são conhecidas.

Wang, Liu e Hou (2013) abordam uma variação específica do problema, o MTSP com múltiplos depósitos e rotas abertas. Utilizando conceitos da Teoria dos Grafos, criam um modelo para simplificação de grafos que representam as instâncias de MTSP, que são aplicadas para criação das soluções otimizadas para as instâncias. Para validação do método, realizam experimentos sobre 37 instâncias da TSPLIB, com 2 a 10 caixeiros para cada instância, comparando os seus resultados com o custo das soluções ótimas para TSP das instâncias, já conhecidas.

Arya, Goyal e Jaiswal (2014) apresentam um algoritmo genético para o MTSP básico, minimizando o custo total das soluções. Executam seu algoritmo sobre uma instância com 50 nós e 3 caixeiros, mostrando em detalhes a melhora das soluções de acordo com as iterações. Arya, Goyal e Jaiswal (2014) dão uma importante contribuição ao citar o grande número de aplicações possíveis para sua metodologia: roteamento de veículos, cabeamento de computadores, perfuração de placas de circuito impresso, revisão de motores de turbina a gás, cristalografia de raios X, problema de separação de encomendas em depósitos, problema de programação de entrevistas, problema de planejamento de missões, projeto de redes de levantamento a partir de sistemas de navegação global por satélite, fabricação de microchips e sequenciamento de DNA.

Venkatesh e Singh (2015) apresentam duas versões de um algoritmo baseado em *Artificial Bee Colony* (Colônia de Abelhas Artificial) para o MTSP básico. A *Artificial Bee Colony* é uma das mais recentes metodologias de otimização definidas, sendo baseada no comportamento inteligente de colônias de abelhas reais. Venkatesh e Singh (2015) propõem também outro algoritmo para o MTSP, baseado em *Invasive Weed Optimization* (Otimização Invasiva por Ervas Daninhas, tradução literal), que é uma nova meta-heurística inspirada no processo biológico robusto de colonização e distribuição das ervas daninhas em um ecossistema. Os três

algoritmos desenvolvidos são aplicados às mesmas instâncias de Yuan *et al.* (2013), Brown, Ragsdale e Carter (2007) e Carter e Ragsdale (2006), tanto para o *minsum* quanto para o *min-max* MTSP. Os resultados obtidos são comparados com os dos outros autores, sendo também realizada uma comparação da eficiência dos três algoritmos com ou sem a aplicação da busca local 2-opt integrada a eles.

### 3.4 A OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS

A Otimização por Colônia de Formigas (*Ant Colony Optimization*, ACO) está entre as principais meta-heurísticas usadas para o TSP, que também tem alcançado resultados consistentes para outros problemas de otimização combinatória (KANDA, 2014). Heurísticas são regras e métodos utilizados em algoritmos que buscam encontrar melhores soluções para problemas de otimização combinatória, enquanto que meta-heurística é uma heurística genérica que utiliza a combinação de escolhas aleatórias e conhecimento histórico de resultados anteriores na construção das soluções.

A ACO recebe esta denominação por ser baseada na maneira como colônias de formigas reais encontram rotas mais curtas até suas fontes de alimento se comunicando através de trilhas de feromônio. O feromônio é uma substância odorífera e volátil depositada pelas formigas por onde passam e que tende a se acumular naturalmente em caminhos mais curtos.

Na ACO aplicada ao TSP, as soluções são geradas num processo iterativo no qual agentes inteligentes, as formigas, percorrem todas as cidades da instância escolhendo à cada iteração a próxima cidade de sua rota a partir de probabilidades calculadas considerando a distância entre as cidades e também a quantidade de feromônio entre elas. Essas probabilidades são calculadas a partir da Regra de Transição de Estado (RTE). Depois que constroem suas rotas, que equivale ao final de um ciclo, ocorre o processo de evaporação do feromônio e, em seguida, as formigas depositam feromônio por onde passaram de acordo com a qualidade da solução criada: quanto melhor a solução, mais feromônio é depositado nas arestas que a compõem. A evaporação e o depósito são controlados pela Regra de Atualização de Feromônio (RAF), que determina como o feromônio influenciará as escolhas das formigas nos próximos ciclos.

A partir do primeiro algoritmo ACO, denominado *Ant System* (AS) (DORIGO; MANNIEZZO; COLORNI, 1996), que obteve resultados encorajadores para o TSP, a ACO tem sido aplicada com sucesso para vários problemas NP-difíceis de otimização combinatória. Dentre os algoritmos que surgiram a partir de aperfeiçoamentos no *Ant System*, destacam-se: o *Elitist Ant System*, o *Ant-Q*, o *MAX-MIN Ant System*, o *Rank-Based Ant System* (RBAS) e o *Ant Colony System* (ACS) (DORIGO; STUTZLE, 2004).

Os dois algoritmos ACO que servem de base para a metodologia apresentada nesta dissertação são o RBAS e o ACS. O RBAS, também abreviado como  $AS_{rank}$ , foi apresentado em Bullnheimer, Hart e Straub (1999) e altera a forma como o feromônio é depositado no AS. Ao contrário de todas as formigas depositarem feromônio ao final do ciclo, como ocorre no AS, apenas as  $w - 1$  formigas que geraram as melhores soluções depositam feromônio por onde passaram, em quantidade proporcional à posição no *rank* das melhores soluções geradas no ciclo, sendo  $w$  um parâmetro. A formiga que criou a melhor solução até o momento atual da execução do algoritmo, a *best so far solution*, também deposita feromônio ao final do ciclo, em maior quantidade que as outras formigas.

O ACS foi outro algoritmo que surgiu a partir de aperfeiçoamentos no AS, tendo sido apresentado em Dorigo e Gambardella (1997), e difere dele em três pontos principais: utiliza uma RTE mais agressiva; a RAF determina que a evaporação e o depósito de feromônio, ao final de cada ciclo, acontecem apenas nas arestas pertencentes à *best-so-far solution*; e, a cada vez que uma formiga utiliza uma aresta numa solução, uma quantidade predefinida de feromônio é removida da aresta, para aumentar a exploração de caminhos alternativos. Outra diferença importante é em relação ao número  $N$  de formigas que percorrem o grafo e constroem suas próprias soluções simultaneamente: enquanto no *Ant System* o melhor valor encontrado experimentalmente por Dorigo e Stutzle (2004) foi  $N = n$ , sendo  $n$  o número de cidades da instância, para o ACS o melhor valor encontrado foi  $N = 10$ .

O TACO (*Team Ant Colony Optimization*, Otimização por Colônia com Equipes de Formigas) é o algoritmo desenvolvido por Vallivaara (2008) para o planejamento de rotas para múltiplos robôs em um ambiente hospitalar. O TACO adapta o ACS para instâncias de MTSP substituindo cada formiga do ACS, que gera soluções para o TSP, por um time de formigas formado por  $m$  elementos, onde cada formiga de um time corresponde a um caixeiro na construção de uma solução para MTSP.

No início da construção de uma solução pelo TACO, todas as formigas de todos os times são posicionadas no depósito. Para realizar a distribuição da carga de trabalho, a formiga que tem a menor rota parcial, em qualquer momento da construção do solução, escolhe sua próxima cidade de acordo com a Regra de Transição de Estado do ACS. Segundo Vallivaara (2008), este método é eficiente para a distribuição da carga de trabalho, mas em muitos casos as escolhas das formigas tendem para soluções não ótimas. Para tratar este problema, é verificado a cada escolha se, caso a cidade escolhida fosse cedida a qualquer outra formiga do time, não haveria um tamanho total menor da solução, considerando também o retorno ao depósito. Se houver, é a formiga com menor rota parcial que se movimenta, podendo realizar uma nova escolha do seu próximo vértice a partir da RTE.

Matematicamente, estando uma formiga  $k$  posicionada em um vértice  $v_k$ ; sendo  $v_0$  o depósito da instância;  $c(v_i, v_j)$  o custo de deslocamento entre dois vértices  $v_i$  e  $v_j$  quaisquer;  $CP(k)$  o custo parcial da rota já percorrida pela formiga  $k$ ; e tendo sido escolhido o vértice  $v_j$  como seu próximo vértice de acordo com a RTE; o método consiste em verificar, antes da formiga de mover, se existe qualquer outra formiga  $l$  da instância em que

$$c(v_l, v_j) + c(v_j, v_0) + CP(l) < c(v_k, v_j) + c(v_j, v_0) + CP(k) \quad (17)$$

Se houver outra formiga  $l$  da instância que atenda ao primeiro termo da inequação 17, é permitido que esta nova formiga  $l$  escolha seu próximo vértice novamente de acordo com a RTE, e se movimente para o novo vértice escolhido. Outra técnica utilizada por Vallivaara (2008) é a aplicação de algoritmos de buscas locais para melhoramento das soluções geradas. A busca local 2-opt, que tenta trocar duas arestas quaisquer da solução, é aplicada a todas as soluções geradas. A busca local 3-opt, que tenta comutar quaisquer três arestas de uma solução ao mesmo tempo, é aplicada apenas à melhor solução dentre as  $N$  geradas simultaneamente pelos times em um ciclo.

A partir do TACO, do RBAS e do ACS, dois algoritmos adaptados para o MTSP foram desenvolvidos e aplicados na otimização de instâncias reais do problema em estudo, o STACS e o STRBAS, que estão detalhados na Seção 4.1.

### 3.5 A ACO APLICADA AO MTSP

Além do TACO de Vallivaara (2008), outros trabalhos aplicando a ACO ao MTSP foram encontrados na literatura. Junjie e Dingwei (2006) definem seu trabalho como o primeiro que aplica um algoritmo ACO ao MTSP com restrição de habilidade (MTSP *with ability constraint*). Segundo eles, o objetivo geral do MTSP, de minimizar a distância total, chamado de critério mínimo (objetivo *minsum*), gera soluções desequilibradas. Como em problemas do mundo real todos os caixeiros têm habilidade semelhante, os autores definem um número máximo de cidades que cada caixeiro pode visitar durante a construção de uma solução para tentar equilibrar as rotas. O algoritmo utiliza as mesmas RTE e RAF do *Ant System*.

Ao iniciar a construção de uma solução, no algoritmo de Junjie e Dingwei (2006) cada um dos  $m$  caixeiros recebe um número aleatório de nós a visitar, de forma que a soma de todos esses números seja igual ao número de nós da instância menos um, para desconsiderar o depósito. Em seguida,  $N$  formigas são posicionadas no depósito, com cada formiga possuindo sua própria lista tabu, que armazena os nós já visitados pela formiga durante a construção de

uma solução. Cada formiga escolhe então sua primeira cidade não visitada, independentemente das outras formigas, e se desloca para ela, de forma que todas as formigas se desloquem para a primeira cidade do primeiro caixeiro. O processo de escolha e movimento se repete para todas as formigas até que o primeiro caixeiro atinja seu número pré-calculado de cidades. Neste momento todas as formigas retornam ao depósito e iniciam as visitas para o segundo caixeiro. O processo se repete até que o último caixeiro visite sua última cidade, instante em que todas as  $N$  formigas criaram, cada uma, uma solução completa para o MTSP.

Em resumo, Junjie e Dingwei (2006) buscam soluções mais equilibradas do que as do MTSP básico limitando o número de cidades de cada caixeiro pode visitar, chamando-o de MTSP com restrição de habilidade. O objetivo continua sendo o critério mínimo de encontrar a solução com a menor distância total (objetivo *minsum*), mas não há garantia, porém, que os comprimentos das rotas individuais dos caixeiros estejam equilibrados nas soluções geradas.

Assim como Junjie e Dingwei (2006), Wang *et al.* (2007) determinam em sua abordagem que número máximo de cidades que um caixeiro pode visitar esteja limitado a um intervalo predefinido, utilizando as regras do *Ant System* na construção de soluções para o MTSP básico com objetivo *minsum*. Utilizam seu algoritmo para o agrupamento e roteamento de nós sensores em redes de sensores multimedia sem fio, visando o consumo eficiente de energia. Comparam seus resultados com um algoritmo de *simulated annealing* e com um algoritmo genético, aplicando-os a uma instância de 200 sensores e 3 grupos, analisando o consumo de energia resultante das três abordagens.

Liu, Li e Zhao (2009) desenvolvem um algoritmo para o MTSP básico aplicando a RTE do *Ant Colony System* (ACS) e a RAF do *MAX-MIM Ant System* (MMAS). Assim como no MMAS, o mecanismo de reinicialização de feromônio é implementado para fugir do comportamento de estagnação. Para melhorar a qualidade do algoritmo, Liu, Li e Zhao (2009) submete todas as soluções criadas a 4 heurísticas de busca local. Em Liu *et al.* (2009), o algoritmo desenvolvido é aplicado na distribuição de cigarros em uma empresa chinesa de grande porte. Para isso, foi realizado um experimento com dados reais com 2153 pontos de entrega, que resultou na diminuição de 8 para 7 o número de veículos necessários para realização da distribuição.

Ghafurian e Javadian (2011) trabalham com uma variação específica do MTSP: com múltiplos depósitos e rotas fechadas, de forma que cada caixeiro retorna para o seu próprio depósito. Para criação de soluções, desenvolvem um algoritmo que implementa as regras do *Ant System*, de forma que cada formiga constrói uma solução completa e o número máximo de cidades que cada uma delas pode visitar fica limitado a um intervalo predefinido. Utilizando

instâncias próprias criadas aleatoriamente com 30, 40, 50 e 60 nós, Ghafurian e Javadian (2011) realizam um ajuste de parâmetros em seu algoritmo para: o número de formigas, o coeficiente de persistência, a quantidade inicial de feromônio e o critério de parada; e comparam os resultados com as soluções ótimas obtidas pelo software de otimização Lingo 8.0, em relação ao tempo computacional necessário para criação das soluções.

Costa *et al.* (2012) trabalham com o MTSP básico com objetivo *minsum*. Desenvolvem um algoritmo ACO no qual várias colônias produzem soluções paralelamente e cada formiga constrói uma solução completa. Mais um fator é incluído na RTE do ACS, para considerar o quanto de feromônio contém as arestas das outras colônias, sendo implementada a mesma RAF do ACS. Realizam experimentos com 6 instâncias da TSPLIB, de 124 a 789 nós, sendo três delas assimétricas. Nas conclusões, Costa *et al.* (2012) informam que o seu algoritmo auxilia no processo de decisão relacionado ao planejamento de rotas nos reparos em caso de apagões elétricos.

Vasagam (2012), assim como Liu, Li e Zhao (2009), apresenta um algoritmo para o MTSP básico aplicando a RTE do *Ant Colony System* (ACS) e a RAF do *MAX-MIM Ant System* (MMAS). O objetivo é o de minimizar o custo total das soluções. Para realização dos experimentos, implementa o algoritmo ACO e um algoritmo genético; coleta os resultados de execuções com instâncias com 20, 30, 50 e 75 nós; e compara os custos totais das soluções obtidas com os dois algoritmos. A partir da análise dos resultados, conclui que o algoritmo ACO funciona melhor para as instâncias maiores.

Yousefikhoshbakht e Sedighpour (2012) utilizam um algoritmo construtivo denominado *Sweep Algorithm* para construir uma solução inicial, e uma variação do *Elitist Ant System* combinada com a busca local 3-opt para melhorar a solução inicial. Durante a construção desta primeira solução, cada caixeiro visita um número de cidades  $n/m$  e então retorna ao depósito. Isto garante uma distribuição equilibrada de cidades entre os caixeiros, mas não há garantia que os custos das rotas individuais sejam semelhantes. A distribuição da carga de trabalho ocorre antes do início da construção da solução e os caixeiros retornam obrigatoriamente ao depósito quando seu número de cidades é alcançado. Em Yousefikhoshbakht, Didehvar e Rahmati (2013), outro algoritmo ACO é apresentado, no qual mais um fator é incluído na RTE do *Ant System*. Este algoritmo aplica a lista de nós candidatos com 30% do total de nós da instância limitada a 20 nós. Uma nova RAF é definida e as buscas locais *insert*, *swap* e 2-opt são utilizadas para melhoramento das soluções obtidas.

Zhou e Yao (2013) criam uma versão melhorada do *MAX-MIM Ant System* para tratamento do MTSP básico com objetivo *minsum*. No algoritmo desenvolvido, a visibilidade é

substituída por um valor variável na RTE e são realizadas modificações na RAF do MMAS. A fim de obter um melhor desempenho, executam experimentos para inferência de parâmetros com instâncias com 30, 50 e 100 nós criadas aleatoriamente. A eficiência da metodologia é comprovada comparando os resultados obtidos pelo MMAS melhorado com sua versão original adaptada para o MTSP.

### 3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo dos trabalhos relacionados ao problema real mostram que diferentes abordagens têm sido aplicadas para melhoramento do método de despacho das empresas de distribuição de energia elétrica. O problema foi modelado como um Problema de Alocação ou Problema de Designação (*Scheduling Problem*) nos trabalhos de Verboski (2010), Ñahuis (2013) e Goel e Meisel (2013). Nos trabalhos de Zografos, Douligieris e Tsoumpas (1998), Costa, Costa e Goes (2006) e Amorim (2010), a modelagem ocorre a partir de variações do Problema de Agrupamento (*Clustering Problem*). O Problema de Roteamento de Veículos (PRV) é utilizado para descrição do problema por Rocha (2011) e Garcia *et al.* (2012), além dos artigos de Garcia *et al.* (2010a) e Garcia *et al.* (2010b) que combinam o PRV ao Problema de Agrupamento para otimização do atendimento comercial e emergencial.

Nesta dissertação, o MTSP é utilizado para modelar o Problema de Despacho Estático, descrito na Seção 2.3.1. Como todas as informações que representam o ambiente ficam concentradas na matriz de custos de uma instância de MTSP, diferentes valores podem ser utilizados para representar o ambiente, como tempos de deslocamento, por exemplo. Esta característica também possibilita que a metodologia proposta seja aplicável a outras áreas de atendimento, atendendo a outro dos objetivos deste trabalho. As soluções para as instâncias de MTSP geradas são utilizadas para dividir os serviços entre as equipes e também definir suas sequências de atendimento, sendo este mais um fator que influenciou para a escolha do MTSP.

De acordo com as referências apresentadas na seção 3.5, a aplicação a ACO ao MTSP é um tema de pesquisa ainda pouco explorado. Devido a isso, nesta dissertação dois algoritmos baseados na ACO são desenvolvidos e aplicados às instâncias de MTSP geradas a partir dos Problemas de Despacho Estático e Dinâmico, conforme explicado no Capítulo 4.



## 4 METODOLOGIAS

Nesta dissertação o problema de despacho de serviços é tratado em duas etapas. A primeira etapa é denominada como o Problema de Despacho Estático, e considera que todos os serviços a serem despachados já são conhecidos e não possuem prioridade de atendimento uns sobre os outros. Esta etapa estática permite que a distribuição dos serviços entre as equipes e a programação das rotas sejam realizadas antes das equipes iniciarem seu dia de trabalho, sendo apresentada na Seção 4.1. A segunda etapa é denominada como o Problema de Despacho Dinâmico, e considera que novos serviços surgem durante o dia de trabalho e são despachados em tempo real às equipes. Esta abordagem também considera a existência dos serviços emergenciais, que possuem prioridade de atendimento em relação aos comerciais, estando detalhada na Seção 4.2.

### 4.1 METODOLOGIA PARA O PROBLEMA DE DESPACHO ESTÁTICO

A metodologia proposta para o Problema de Despacho Estático modela o ambiente real das equipes de atendimento comercial como instâncias de MTSP e aplica algoritmos baseados na ACO para construção de soluções otimizadas, que são usadas para distribuição dos serviços e roteamento das equipes. Para construção das instâncias, as coordenadas geográficas do sistema de projeção Universal Transverso de Mercator (UTM) são utilizadas para definir as posições da garagem e dos serviços, tendo sido obtidas do histórico da agência de atendimento. O UTM é o sistema de coordenadas cartesianas oficial brasileiro para mapeamentos (MACHADO JR; DAL SANTO; LOCH, 2004).

Neste trabalho, duas adaptações de algoritmos ACO para o MTSP foram desenvolvidas para otimização das instâncias: o STACS (*Single Team Ant Colony System*) e o STRBAS (*Single Team Rank-Based Ant System*). Os dois algoritmos adaptados diferem entre si em dois pontos: a forma como uma formiga escolhe a próxima cidade de sua rota, que é controlado pela Regra de Transição de Estado (RTE); e a forma que o feromônio é inicializado e atualizado durante a execução do algoritmo, que é controlado pela Regra de Atualização de Feromônio (RAF). Dessa forma, um algoritmo ACO para MTSP geral é apresentado na Seção 4.1.1 e, a partir deste algoritmo, são implementadas duas adaptações para MTSP: o STACS, baseado no ACS, detalhado na Seção 4.1.5; e o STRBAS, baseado no RBAS, detalhado na Seção 4.1.6. Vallivaara (2008) é a principal referência para o algoritmo ACO para MTSP geral da Seção 4.1.1.

## 4.1.1 Algoritmo ACO para MTSP

O pseudocódigo do algoritmo ACO para MTSP geral está representado no Algoritmo 1, no qual as linhas em negrito correspondem às regras específicas de cada um dos dois algoritmos adaptados. O funcionamento deste algoritmo encontra-se detalhado nas Seções 4.1.2, 4.1.3 e 4.1.4.

---

**Algoritmo 1:** Algoritmo ACO para MTSP
 

---

**Entrada:** Instância MTSP e parâmetros ACO  
**Saída:** Melhor solução MTSP criada

- 1 **Início**
- 2      $n \leftarrow$  número de cidades da instância, incluindo o depósito;
- 3      $m \leftarrow$  número de caixeiros da instância;
- 4      $v_0 \leftarrow$  cidade depósito da instância;
- 5      $N \leftarrow$  **número de soluções geradas em cada ciclo;**
- 6     Defina o objetivo do MTSP;
- 7     Construa a matriz de custos da instância;
- 8     **Inicialize a matriz de feromônio;**
- 9     **Enquanto** *o critério de parada não for atingido* **faça**
- 10         **Para** *contador\_de\_soluções*  $\leftarrow 1$  **até**  $N$  **faça**
- 11             Crie um time com  $m$  formigas;
- 12             Esvazie a lista tabu da colônia;
- 13             Posicione as  $m$  formigas do time em  $v_0$ ;
- 14             **Enquanto** *houver cidades não visitadas* **faça**
- 15                 Selecione uma formiga  $k$  do time;
- 16                 Crie a lista de candidatos para  $k$ ;
- 17                 **Escolha a próxima cidade  $j$  da rota de  $k$ ;**
- 18                 Verifique o movimento selecionado;
- 19                 **se** *houver uma formiga  $l$  que resulta num melhor movimento* **então**
- 20                     Selecione a formiga  $l$ ;
- 21                     Atualize a lista de candidatos para  $l$ ;
- 22                     **Escolha uma nova próxima cidade  $j$  para  $l$ ;**
- 23                 **fim**
- 24                 Movimente a formiga selecionada para a cidade escolhida;
- 25                 Insira a cidade visitada na lista tabu;
- 26                 **Aplique a atualização local de feromônio à aresta percorrida;**
- 27             **Fim**
- 28             Retorne todas as  $m$  formigas para  $v_0$ ;
- 29             Aplique a busca local à solução MTSP criada;
- 30             Atualize a melhor solução do ciclo  $S_{m\_ciclo}$ ;
- 31         **Fim**
- 32         Atualize a melhor solução da execução  $S_{m\_exec}$ ;
- 33         **Aplique a atualização global de feromônio;**
- 34     **Fim**
- 35     **Retorne**  $S_{m\_exec}$ ;
- 36 **Fim**

---

**Fonte:** Autoria própria.

#### 4.1.2 Inicialização

As entradas do Algoritmo 1 são a instância de MTSP e os parâmetros do algoritmo ACO adaptado utilizado. A instância é composta: pela matriz de custos relacionando todas as cidades; pelo número  $m$  de caixeiros; e pela definição de qual das cidades corresponde ao depósito, que será o ponto inicial e final de todas as rotas. O retorno é a melhor solução MTSP com único depósito e rotas fechadas criada.

O algoritmo ACO para MTSP geral inicia com a declaração das variáveis principais. Nas linhas 2 a 4 do algoritmo são declarados: o valor inteiro  $n$ , que equivale ao total de cidades da instância, incluindo o depósito; o número  $m$  de caixeiros; e a cidade  $v_0$  correspondente ao depósito. Esses dados são fornecidos pela instância de MTSP. Na linha 5 é definido o valor de  $N$ , que corresponde ao número de soluções que serão criadas em cada ciclo do algoritmo. Nos algoritmos ACO originais aplicados ao TSP,  $N$  equivale ao número de formigas que geram soluções simultaneamente durante um ciclo. No ACS aplicado ao TSP, o melhor valor encontrado experimentalmente foi  $N = 10$  (DORIGO; STUTZLE, 2004), o que significa que 10 formigas são posicionadas inicialmente em cidades distintas da instância e se movimentam alternadamente de forma que, ao final do ciclo, 10 soluções para TSP foram criadas. Para o RBAS aplicado ao TSP, o melhor valor encontrado foi  $N = n$ , o que significa que  $n$  soluções foram criadas ao final de um ciclo, sendo  $n$  o número de cidades da instância.

Vallivaara (2008) adapta o ACS para o MTSP transformando cada formiga da ACO em um time composto por  $m$  formigas, cada formiga representando um caixeiro na construção das soluções. Dessa forma, cada time gera uma solução completa para MTSP e, em cada ciclo,  $N$  times se movimentam alternadamente, de forma que  $N$  soluções foram criadas ao final do ciclo. No algoritmo ACO para MTSP proposto, cada formiga de um time também corresponde a um caixeiro, mas apenas um time percorre a instância por vez. As soluções são geradas uma após a outra e, quando  $N$  foram geradas, o ciclo é finalizado. Na linha 6 é definido o objetivo do MTSP, que pode ser o de minimizar o custo total da solução ou o de minimizar o custo da maior rota individual da solução.

A matriz de custos da instância é construída na linha 7. Caso estejam sendo aplicadas as distâncias euclidianas, a matriz de custos é simétrica e é calculada a partir das coordenadas planas das cidades. Caso estejam sendo utilizados custos previstos, a fim de uma melhor representação do ambiente real, a matriz é assimétrica e todos os custos terão que ser fornecidos para confecção da matriz. A matriz é assimétrica porque deslocamentos entre dois pontos reais podem ser diferentes de acordo com o sentido (ir de A para B tem um custo diferente que ir de B para A, devido a vias de mão única, por exemplo).

Na inicialização da matriz de feromônio, que ocorre na linha 8, todas as arestas recebem a mesma quantidade de feromônio, indicando que nenhuma informação foi ainda adquirida sobre a instância. A quantidade inicial de feromônio é definida pelo parâmetro  $\tau_0$ , sendo os melhores valores obtidos experimentalmente para este parâmetro específicos para cada variação de algoritmo ACO. Os valores de  $\tau_0$  utilizados pelo STACS e pelo STRBAS são detalhados nas Seções 4.1.5 e 4.1.6, respectivamente.

Na linha 9 iniciam-se os ciclos do algoritmo, que são limitados pelo critério de parada. No protótipo desenvolvido três critérios diferentes podem ser definidos: um número máximo de ciclos; um número máximo de ciclos sem que a melhor solução da execução seja atualizada; ou um limite temporal, em segundos. A possibilidade de utilização de diferentes critérios de parada será útil em experimentos futuros, que visem constatar qual deles é mais apropriado a cada um dos algoritmos desenvolvidos.

#### 4.1.3 Construção das soluções

Na linha 10 do Algoritmo 1 iniciam-se a construção das soluções, num total de  $N$  soluções criadas por ciclo. Na linha 11 é criado um time com  $m$  formigas, cada uma representando um caixeiro da instância. Apenas um time constrói uma solução de cada vez. O time possui uma lista tabu comum que armazena as cidades já visitadas durante a construção da solução, que é esvaziada na linha 12, indicando que todas as cidades ainda são permitidas nos movimentos. Em seguida, na linha 13, todas as formigas do time são posicionadas no depósito, de onde iniciarão suas rotas.

Na linha 14 iniciam-se os movimentos do time, que consistem no deslocamento de uma das formigas de sua cidade atual para a próxima cidade de sua rota. A formiga escolhida para se movimentar é aquela que possui a rota parcial com menor custo, como aplicado por Vallivaara (2008), o que ocorre na linha 15. Empates são resolvidos aleatoriamente (no protótipo, é selecionada a formiga com menor número de identificação). Esta estratégia é adequada ao *minmax* MTSP ao tentar equilibrar os custos das rotas já na seleção da formiga a se movimentar. Após selecionada uma formiga, na linha 16 é criada a lista de candidatos, que é formada pelas  $cl_{size}$  cidades mais próximas da cidade onde se encontra a formiga selecionada. O objetivo da lista de candidatos é restringir o espaço de busca à arestas mais prováveis de comporem uma boa solução, reduzindo o tempo computacional. Em todos os experimentos realizados,  $cl_{size}$  é fixado em 20. A linha 17 corresponde à Regra de Transição de Estado (RTE) do algoritmo ACO, que é quando uma formiga escolhe a próxima cidade de sua rota. Os dois algoritmos adaptados utilizam diferentes RTEs, que estão detalhadas nas Seções 4.1.5 e 4.1.6.

Após escolhida a próxima cidade da formiga selecionada, é realizada uma verificação antes da execução do movimento, que começa a partir da linha 18. Esta verificação é necessária porque, como explica Vallivaara (2008), as escolhas das formigas para se movimentar de acordo com o menor custo parcial de suas rotas tendem para soluções não ótimas. Para tratar este problema, é verificado a cada movimento se, caso a cidade escolhida fosse cedida a qualquer outra formiga do time, não resultaria em um deslocamento menor que o da formiga selecionada, considerando também o retorno ao depósito. Isto significa que se houver qualquer outra formiga do time que: partindo de sua cidade atual, visite a cidade escolhida, retorne ao depósito, e este trajeto resulte num deslocamento menor que o da formiga selecionada para realizar o mesmo trajeto, é permitido que a formiga com menor deslocamento se movimente. Na linha 20, a formiga que resulta no menor deslocamento é selecionada, não se movendo obrigatoriamente para a cidade escolhida pela formiga anterior, sendo a lista de candidatos refeita para a posição da nova formiga e a RTE executada novamente, nas linhas 21 e 22, onde uma próxima cidade diferente pode ser escolhida.

Na linha 24, a formiga selecionada inclui a cidade escolhida em sua rota e atualiza a sua posição. A cidade que acabou de ser visitada é incluída na lista tabu na linha 25, para que não volte a ser selecionada durante a construção da solução atual. Na linha 26 ocorre a Atualização Local de Feromônio (ALF), na qual uma quantidade de feromônio é removida da aresta que acabou de ser percorrida, para aumentar a exploração de caminhos alternativos. A ALF é implementada apenas no STACS. Os movimentos do time, da linha 15 à linha 26, se repetem até que não haja mais cidades a serem visitadas. Quando isso ocorre, todas as formigas retornam ao depósito, na linha 28, concluindo a construção de uma solução para o MTSP.

#### 4.1.4 Busca local, avaliação das soluções e finalizações dos ciclos e da execução

Nesta adaptação de algoritmos ACO para MTSP, a busca local é aplicada à todas as soluções geradas, o que ocorre na linha 29 do algoritmo 1. A busca local utilizada é a 2-opt, que tenta melhorar uma solução substituindo as arestas que a compõem, duas a duas. Se uma troca resulta em solução melhor, a nova solução substitui a anterior. A busca 2-opt implementada realiza todas as substituições possíveis nas rotas individuais das soluções (*intra routes*) e também entre rotas diferentes (*inter routes*).

Após a solução construída ser submetida à busca local, ocorre a atualização da melhor solução gerada no ciclo, na linha 30. Se a nova solução gerada for melhor do que a que se encontra armazenada em  $S_{m\_ciclo}$ , esta substitui a anterior. Quando ocorre a finalização de um ciclo, é verificado na linha 32 se a melhor solução do último ciclo é melhor que a melhor solução

encontrada até o momento em toda execução, a *best so far solution*, que fica armazenada em  $S_{m\_exec}$ . Se for, a melhor solução da execução é atualizada.

A Atualização Global de Feromônio (AGF) acontece ao final de cada ciclo, e ocorre de forma diferente no STACS e no STRBAS. As AGFs dos dois algoritmos adaptados estão detalhadas em 4.1.5 e 4.1.6, respectivamente. Quando o número de ciclos realizados atinge o critério de parada, o algoritmo finaliza e retorna  $S_{m\_exec}$ , que armazena a melhor solução gerada em toda a execução.

#### 4.1.5 STACS

Os algoritmos STACS e STRBAS foram implementados a partir do algoritmo ACO geral mostrado no Algoritmo 1, baseados no ACS e no RBAS, respectivamente. As duas adaptações, replicando os algoritmos originais, são diferentes nas seguintes linhas do algoritmo geral: na linha 5, porque cada algoritmo adaptado cria uma quantidade diferente de soluções por ciclo; na linha 8, na qual cada algoritmo inicializa a matriz de feromônio com um valor diferente; nas linhas 17 e 22, onde são aplicadas as RTEs específicas de cada algoritmo; e nas linhas 26 e 33, onde ocorre a atualização da matriz de feromônio, que também ocorre a partir de RAFs específicas de cada algoritmo. Nesta seção é detalhado o STACS, e na Seção 4.1.6 o STRBAS.

O STACS foi o primeiro algoritmo ACO adaptado para MTSP aplicado às instâncias do problema real nesta pesquisa (BARBOSA; SILLA JR; KASHIWABARA, 2015). O melhor valor para o parâmetro  $N$ , inferido experimentalmente por Dorigo e Stutzle (2004) a partir da aplicação do ACS ao TSP, foi  $N = 10$ . Para  $\tau_0$ , o melhor valor inferido por Dorigo e Stutzle (2004) é obtido a partir da Equação 18:

$$\tau_0 = 1/nC^{mn} \quad (18)$$

Na Equação 18,  $n$  corresponde ao número de cidades da instância e  $C^{mn}$  ao custo da solução do algoritmo do vizinho mais próximo aplicado à instância. Dorigo e Stutzle (2004) informam que, de fato, qualquer algoritmo razoável para o cálculo de  $C^{mn}$  pode ser utilizado. Nesta metodologia, a solução do vizinho mais próximo para MTSP foi criada da seguinte forma: todos os caixeiros partem do depósito; o caixeiro com a menor rota parcial se move para a cidade mais próxima de sua posição atual; o movimento se repete até que não haja mais cidades a serem visitadas; todos os caixeiros retornam ao depósito. À  $C^{mn}$  foi atribuído o custo total da solução calculada conforme descrito.

Tanto o ACS quanto o RBAS utilizam RTEs baseadas na regra do *Ant System*, o primeiro algoritmo da ACO. A RTE do *Ant System* está representada na Equação 19:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta} & \text{se } j \text{ é uma aresta permitida à } k \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (19)$$

A Equação 19 determina a probabilidade de uma cidade ser escolhida por uma formiga em um movimento.  $i$  representa a cidade na qual a formiga  $k$  se encontra, e  $j$  uma das possíveis cidades para a qual ela pode se deslocar. As cidades permitidas à formiga são aquelas ainda não visitadas até a fase atual da construção da solução. Cada formiga armazena as cidades já visitadas em sua memória, que é denominada como lista tabu.  $\tau_{ij}(t)$  corresponde à quantidade de feromônio presente na aresta entre as cidades  $i$  e  $j$  no instante  $t$ .  $\eta_{ij}$  corresponde à visibilidade da aresta, que é definida pelo valor  $1/c_{ij}$ , onde  $c_{ij}$  é o custo de deslocamento da aresta.  $\alpha$  e  $\beta$  são parâmetros que definem o peso da trilha de feromônio e da visibilidade, respectivamente, na escolha da próxima cidade pela formiga.

A RTE do ACS e do STACS está mostrada na Equação 20, na qual  $j$  representa a cidade escolhida por uma formiga  $k$  que se encontra no vértice  $i$  ao se movimentar.

$$j = \begin{cases} \operatorname{argmax}_{l \in S_i^k} \{ \tau_{il} [\eta_{il}]^\beta \}, & \text{se } q \leq q_0; \\ J, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (20)$$

A Equação 20 é chamada de regra proporcional pseudoaleatória, pois o parâmetro  $q_0$  define a porcentagem das escolhas que serão feitas de forma determinística pelas formigas, onde  $0 \leq q_0 \leq 1$ . Sendo  $q$  uma variável aleatória uniformemente distribuída em  $[0, 1]$  e atualizada a cada movimento, se  $q_0 = 1$ , todas as escolhas das formigas serão realizadas de forma determinística, pelo valor máximo de  $\tau_{il} [\eta_{il}]^\beta$ , onde  $l \in S_i^k$  corresponde ao conjunto de cidades permitidas à formiga no movimento. Se, ao contrário,  $q_0 = 0$ , todas as escolhas serão realizadas de forma estocástica, pois  $J$  representa uma cidade escolhida através das probabilidades calculadas pela RTE do *Ant System* (Equação 19), com a única diferença que o parâmetro  $\alpha$  foi excluído, ou seja, seu valor foi fixado em 1. O melhor valor definido experimentalmente por Dorigo e Stutzle (2004) foi  $q_0 = 0.9$ , o que significa que 90% das escolhas serão determinísticas.

A RAF de um algoritmo ACO inclui uma regra que determina a evaporação do feromônio. A regra de evaporação do *Ant System* está representada na Equação 21.

$$\tau_{ij} = (1 - \rho) \tau_{ij}, \forall (i, j) \in A, \quad (21)$$

Na Equação 21,  $\tau_{ij}$  corresponde à quantidade atual de feromônio na aresta.  $\rho$  é um parâmetro de define a taxa de evaporação de forma que  $0 < \rho \leq 1$ , e  $A$  é o conjunto formado por todas as arestas da instância.

No ACS, a evaporação de feromônio ocorre como no AS (Equação 21), só que apenas nas arestas que fazem parte da *best so far solution*, e não em todas as arestas da instância como no AS. A RAF do ACS define que a atualização de feromônio ocorre em dois momentos, além da evaporação ao final do ciclo: uma atualização global (AGF), ao final de cada ciclo do algoritmo; e uma atualização local (ALF), logo depois que uma formiga se move de uma cidade a outra, ou seja, inclui mais uma aresta na sua rota. A regra de AGF do ACS e do STACS está apresentada na Equação 22, onde  $\rho$  é o coeficiente de evaporação de feromônio, cujo melhor valor encontrado por Dorigo e Stutzle (2004) para o ACS aplicado ao TSP foi  $\rho = 0.1$ .

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij} + \rho\Delta\tau_{ij}^{bs}, \quad \forall (i, j) \in T^{bs}, \quad (22)$$

$\Delta\tau_{ij}^{bs} = 1/C^{bs}$ , onde  $T^{bs}$  corresponde ao conjunto de arestas que fazem parte da melhor solução encontrada até o momento atual da execução do algoritmo, a *best so far solution*, e  $C^{bs}$  corresponde ao custo de  $T^{bs}$ .

A ALF do ACS e do STACS está apresentada na Equação 23, na qual  $\xi$  é um parâmetro cujo melhor valor experimentalmente calculado por Dorigo e Stutzle (2004) aplicando o ACS ao TSP foi  $\xi = \rho = 0.1$ :

$$\tau_{ij} = (1 - \xi)\tau_{ij} + \xi\tau_0, \quad (23)$$

#### 4.1.6 STRBAS

O STRBAS é a adaptação do RBAS para o MTSP utilizando a estrutura mostrada no Algoritmo 1. O melhor valor para o parâmetro  $N$ , que corresponde ao número de soluções que serão criadas em cada ciclo do algoritmo, foi calculado experimentalmente como sendo igual a  $n$ , quando o RBAS foi aplicado à instâncias de TSP (DORIGO; STUTZLE, 2004).  $n$  corresponde ao número de cidades da instância. Este valor foi mantido para o STRBAS nos experimentos computacionais. Isto significa que, para uma instância com 65 cidades incluindo o depósito, por exemplo, foram criadas 65 soluções em cada ciclo do STRBAS.

Na inicialização da matriz de feromônio dos algoritmos ACO, todas as arestas recebem a mesma quantidade de feromônio, que é definida pelo parâmetro  $\tau_0$ . Para o RBAS aplicado

ao TSP, o melhor valor obtido experimentalmente por Dorigo e Stutzle (2004) para  $\tau_0$  é obtido pela Equação 24.

$$\tau_0 = 0.5w(w - 1)/\rho C^m \quad (24)$$

Na Equação 24,  $w$  é um parâmetro que também será utilizado para definir o número de soluções que serão consideradas para atualização do feromônio; e  $\rho$  corresponde à taxa de evaporação de feromônio.  $C^m$  corresponde ao custo da solução criada quando aplicando o algoritmo do vizinho mais próximo à instância, calculada da mesma forma como descrito na Seção 4.1.5.

O RBAS e o STRBAS compartilham a mesma RTE do *Ant System*, apresentada na Equação 19. O RBAS não aplica a Atualização Local de Feromônio (ALF), de forma que a linha 26 do Algoritmo 1 não é executada para o STRBAS. Em sua RAF, o RBAS implementa a evaporação em todas as arestas da matriz de feromônio, aplicando a mesma regra do AS, que está representada na equação 21.

Na AGF do RBAS, é permitido que as  $w - 1$  melhores formigas depositem feromônio, em quantidade proporcional à sua posição no *rank* das melhores soluções geradas no ciclo.  $w$  é um parâmetro cujo melhor valor inferido experimentalmente por Dorigo e Stutzle (2004) para o TSP foi 6. A formiga que gerou a melhor solução até o momento atual da execução também deposita feromônio, em maior quantidade que as anteriores. No STRBAS, são os times que geraram as  $w - 1$  melhores soluções e a *best so far solution* que realizam o depósito (linha 33 do Algoritmo 1). A regra da AGF do RBAS está representada na Equação 25.

$$\tau_{ij} = \tau_{ij} + \sum_{r=1}^{w-1} (w - r)\Delta\tau_{ij}^r + w\Delta\tau_{ij}^{bs} \quad (25)$$

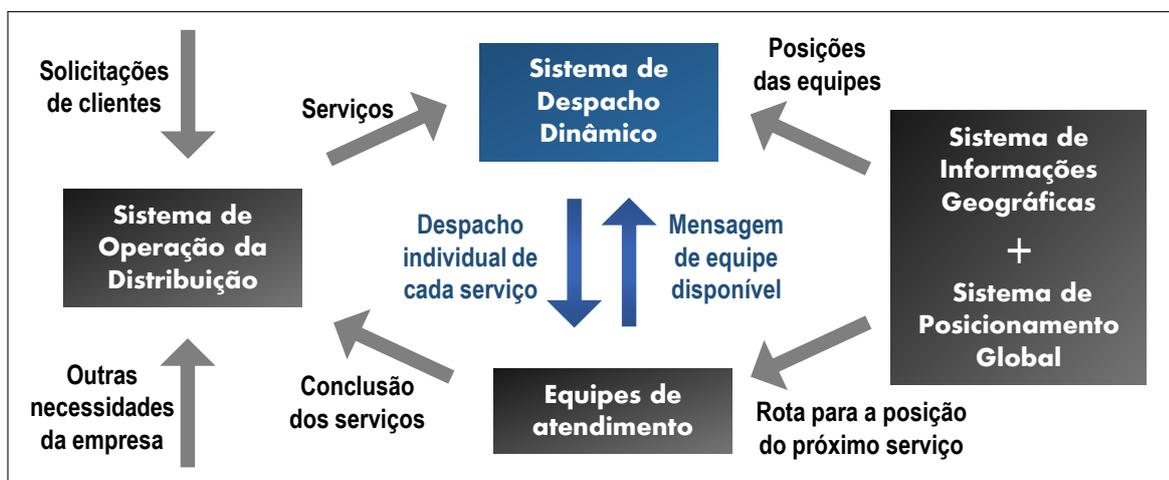
Na Equação 25,  $r$  equivale à posição no *rank* formado pelas melhores soluções do ciclo.  $\Delta\tau_{ij}^r$  é igual a  $1/C^r$ , onde  $C^r$  é o custo da solução criada pelo time de *rank*  $r$ . A quantidade de feromônio depositada pelo time que gerou a *best so far solution*,  $\Delta\tau_{ij}^{bs}$ , é igual a  $1/C^{bs}$ , onde  $C^{bs}$  é o custo da *best so far solution*.

## 4.2 METODOLOGIA PARA O PROBLEMA DE DESPACHO DINÂMICO

Caso as equipes de atendimento executem apenas serviços já conhecidos antes do início do dia de trabalho, a metodologia para o despacho estático, apresentada na Seção 4.1, cria uma instância de MTSP a partir destes serviços, constrói uma solução otimizada por meio

de um algoritmo ACO e utiliza esta solução para orientar o despacho dos serviços durante todo o dia de trabalho. Na agência de atendimento em estudo, porém, além dos serviços que já são conhecidos antes do início do dia de trabalho, novos serviços surgem durante o dia e são despachados às equipes enquanto estas estão executando os outros atendimentos que já lhe foram designados. Os novos serviços podem ser comerciais, podendo ser programados para execução posterior; ou emergenciais, devendo ser executados o mais rápido possível.

Para tratamento do Problema de Despacho Dinâmico, a metodologia proposta consiste em um sistema que recebe os serviços a executar do sistema de gerenciamento de serviços da empresa, o SOD, e despacha os serviços às equipes, um a um, quando estas informam que estão disponíveis (no início do dia de trabalho ou quando estão concluindo o último serviço despachado); ou imediatamente à equipe que estiver mais próxima em caso do serviço ser emergencial. Esta metodologia foi denominada Sistema de Despacho Dinâmico (SDD), e seu esquema de funcionamento está representado na Figura 6. Apesar de nesta representação o SDD substituir os técnicos de despacho quando comparado-a ao método atual na Figura 2, o SDD pode atuar como uma ferramenta para auxílio a estes técnicos, propondo a eles quais serviços devem ser despachados a quais equipes.



**Figura 6 – Esquema de funcionamento do Sistema de Despacho Dinâmico**

Fonte: Autoria própria.

Com a utilização do SDD, as equipes passam a conhecer apenas o serviço que estão executando no momento. Quando uma equipe informa a conclusão de seu serviço atual, o que já ocorre no método atual, pois os dados sobre a execução dos serviços são transmitidos ao SOD pelas equipes assim que os finalizam, o SDD também recebe uma mensagem informando a equipe que ficou disponível, que imediatamente retorna o próximo serviço a ser despachado para a equipe livre.

Quando surge um novo serviço emergencial, no método atual o técnico verifica em seu terminal a posição das equipes e despacha a emergência para aquela que estiver mais próxima

do seu local de execução. Esta tarefa também é automatizada pelo SDD, que, ao receber um novo serviço emergencial do sistema de gerenciamento de serviços, verifica a posição atual das equipes e despacha o serviço para a que estiver mais próxima.

#### 4.2.1 Sistema de Despacho Dinâmico

Como pode ser verificado na Figura 6, o SDD recebe duas entradas: os serviços assim que são gerados, provenientes do SOD; e as mensagens de disponibilidade quando as equipes estão aguardando o próximo serviço a executar. Estas duas entradas acontecem aleatoriamente no tempo e em quantidade durante o dia de trabalho, e correspondem aos eventos que acionam os procedimentos do SDD.

Quando um novo serviço é recebido, o SDD executa o procedimento detalhado no Algoritmo 2. Além do novo serviço, são definidas como entradas o conjunto  $S$  de serviços já conhecidos e o vetor  $posicoes\_equipes$  que armazena as posições das  $u$  equipes em serviço no dia de trabalho. Numa implementação real, essas duas estruturas de dados podem ser variáveis locais do SDD, que permanece em constante execução. Nos experimentos dinâmicos apresentados no Capítulo 6, a posição atual de uma equipe é considerada como sendo a posição do serviço que a equipe está realizando no momento, mas no ambiente real podem ser utilizadas as posições instantâneas exatas das equipes. A saída do Algoritmo 2 é a solução MTSP para a instância composta por todos os serviços presente no conjunto  $S$  e pela posição das equipes em  $posicoes\_equipes$ .

---

#### Algoritmo 2: Procedimento do SDD quando recebe um novo serviço

---

**Entrada:** Novo serviço  $s_{novo}$ ; Conjunto  $S$  de serviços a executar já conhecidos; vetor  $posicoes\_equipes$  com a localização das  $u$  equipes;

**Saída:**  $solucao\_MTSP$ ; despacho emergencial;

```

1 Início
2   Atualize  $posicoes\_equipes$ ;
3   se  $s_{novo}$  for emergencial então
4     | Seleccione a equipe  $e$  que se encontre mais próxima de  $s_{novo}$  ;
5     | Despache  $s_{novo}$  à  $e$ ;
6     | Atualize  $posicoes\_equipes[e]$  para a localização de  $s_{novo}$ ;
7   fim
8   senão
9     | Adicione  $s_{novo}$  ao conjunto  $S$ ;
10  fim
11   $instancia\_MTSP \leftarrow$  nova instância MTSP a partir de  $S$  e  $posicoes\_equipes$ ;
12   $solucao\_MTSP \leftarrow$  algoritmo_ACO_MTSP( $instancia\_MTSP$ );
13  Retorne  $solucao\_MTSP$ ;
14 Fim

```

---

**Fonte:** Autoria própria.

Como pode ser verificado entre as linhas 3 e 7 do Algoritmo 2, caso o novo serviço que acionou o SDD for emergencial, além de retornar a solução MTSP, ele também localiza a equipe mais próxima do serviço emergencial e o despacha imediatamente. A posição da equipe à qual foi designada o serviço emergencial é atualizada para a posição deste serviço, considerando que obrigatoriamente a equipe vai se deslocar até sua posição.

Caso o novo serviço for comercial, ele não é despachado imediatamente, mas adicionado ao conjunto  $S$ , que armazena todos os serviços a executar já conhecidos. Em seguida, a partir de  $S$  e  $posicoes\_equipes$  atualizados, uma instância de MTSP é criada. Como explicado na Seção 4.2.2, uma variação específica de MTSP é utilizada para representação das instâncias reais dinâmicas: o MTSP com múltiplos depósitos iniciais e único depósito final. A instância criada é então otimizada pelo algoritmo ACO para MTSP apresentada na Seção 4.1.1. A melhor solução criada é a que será utilizada para orientar o despacho dos serviços, até que surja um novo serviço ou até o encerramento do dia de trabalho.

O despacho dos serviços comerciais ocorre quando as equipes informam que concluíram o serviço anterior, conforme verificado no Algoritmo 3. As entradas são a identificação da equipe disponível, para a qual será despachada o próximo serviço; a solução MTSP que será utilizada para definir o despacho; e o conjunto de serviços conhecidos  $S$ . Essas duas últimas estruturas de dados, a solução MTSP e o conjunto  $S$ , podem ser implementadas como variáveis locais do SDD operando de forma contínua. A saída do algoritmo é o despacho do próximo serviço comercial para a equipe  $e$  que está disponível.

---

**Algoritmo 3:** Procedimento do SDD quando recebe uma mensagem de equipe disponível

---

**Entrada:** Identificação da equipe disponível  $e$ ;  $solucao\_MTSP$ ; Conjunto  $S$  de serviços a executar já conhecidos;

**Saída:** Despacho comercial;

1 **Início**

2 | Exclua o serviço concluído por  $e$  do conjunto  $S$ ;

3 | Localize em  $solucao\_MTSP$  o próximo serviço  $s_{proximo}$  de  $e$ ;

4 | Despache  $s_{proximo}$  à  $e$ ;

5 **Fim**

---

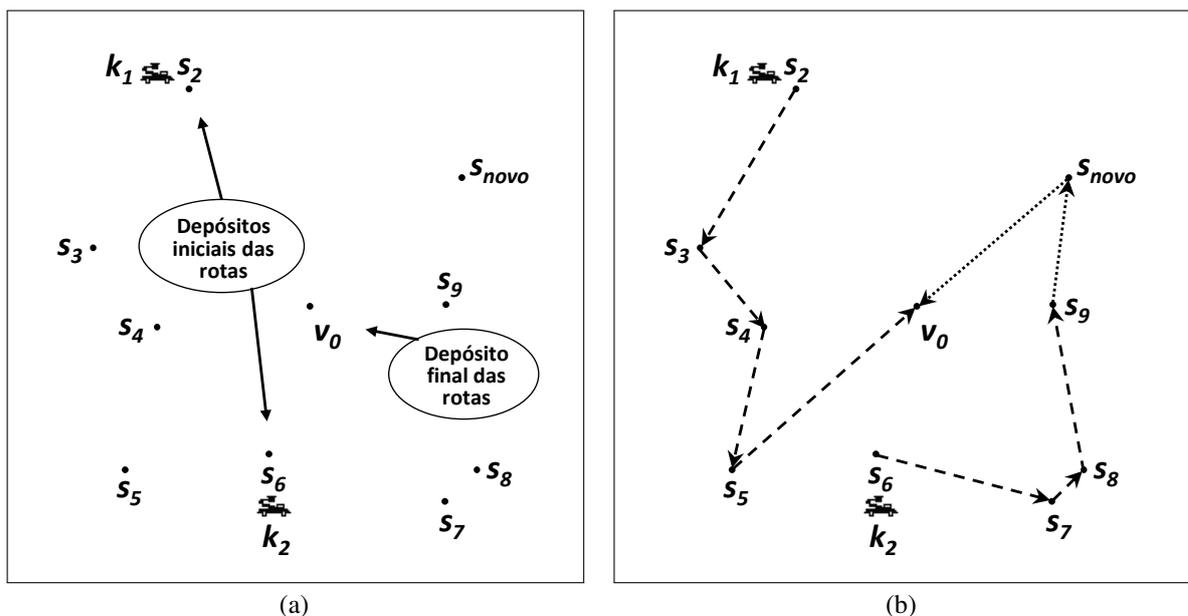
**Fonte: Autoria própria.**

Na linha 2 do Algoritmo 3, quando uma equipe informa a conclusão de um serviço, ele é excluído de  $S$ , para que a nova solução MTSP a ser gerada, quando surgir um novo serviço, desconsidere os já executados. Em seguida, na linha 3, o próximo serviço a ser despachado à equipe disponível é extraído da solução MTSP. Isto é feito localizando na solução o serviço que  $e$  está concluindo e selecionando o serviço que esteja conectado a ele na solução, que ainda não tenha sido executado. Na linha 4 o serviço selecionado é despachado à equipe  $e$ .

#### 4.2.2 MTSP com múltiplos depósitos iniciais e único depósito final

Na metodologia estática na seção 4.1, os dias de trabalho das equipes são modelados como instâncias de MTSP com único depósito e rotas fechadas. Este tipo de MTSP é o mais abordado na literatura e define um ponto comum onde iniciam e concluem todas as rotas: o depósito. Como todas as equipes de atendimento partem e retornam à garagem da agência, esta variação do MTSP, também denominada MTSP básico, se adapta corretamente ao problema estático de despacho de serviços.

Nesta metodologia para a versão dinâmica do problema, porém, as equipes já não se encontram mais na garagem da agência quando surge um novo serviço, momento em que uma nova instância MTSP é gerada. O ponto final das rotas continua sendo a garagem da agência, mas os pontos iniciais são distintos e correspondem às posições atuais das equipes. Um exemplo gráfico desse tipo de instância de MTSP pode ser vista na figura 7 (a).



**Figura 7 – MTSP com múltiplos depósitos iniciais e único depósito final. (a) Uma instância de exemplo, com  $n = 10$  e  $m = 2$  ; (b) Uma possível solução para a instância em (a)**

**Fonte: Autoria própria.**

Neste exemplo, a equipe  $k_1$  se encontra na posição do serviço  $s_2$  e a equipe  $k_2$  na posição de  $s_6$ , quando surgiu um novo serviço  $s_{novo}$ , que passa a fazer parte da instância. Os serviços que já foram executados foram excluídos, pois as rotas já percorridas não podem mais ser otimizadas. O ponto  $v_0$ , a garagem da agência, continua sendo o ponto final das rotas das duas equipes, que retornam à agência ao final do dia. Dessa forma,  $k_1$  e  $k_2$  devem partir de suas posições atuais, atender todos os serviços a executar, e retornar à garagem, percorrendo a menor distância possível. Assim como no MTSP básico, também pode ser definida a minimização da maior rota individual da solução, ou objetivo *minmax*. Esta variação específica de MTSP

desenvolvida para o Problema de Despacho Dinâmico foi denominada MTSP com múltiplos depósitos iniciais e único depósito final, e uma possível solução para a instância de exemplo pode ser vista na Figura 7 (b).

### 4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O tratamento do Problema de Despacho Estático a partir da criação de instâncias de MTSP utilizando a posição dos serviços é uma das contribuições desse trabalho. O principal motivo para esta escolha é que as soluções para MTSP criadas possibilitam a distribuição dos serviços entre as equipes e o roteamento das mesmas.

Outra contribuição deste trabalho é o algoritmo ACO para MTSP apresentado na Seção 4.1.1. Nesta dissertação foram implementados e comparados dois algoritmos da ACO para o MTSP, a partir dos algoritmos originalmente aplicados ao TSP, mas o algoritmo da Seção 4.1.1 possibilita que outros algoritmos da ACO sejam experimentados, inclusive combinando regras de diferentes algoritmos. Esta é uma das possibilidades de continuação deste trabalho, com a finalidade de procurar algoritmos mais eficientes para o MTSP.

Para o Problema de Despacho Dinâmico foi necessária a definição de uma variação do MTSP quanto ao formato das rotas, o MTSP com múltiplos depósitos iniciais e único depósito final. A diferença em relação ao MTSP com único depósito e rotas abertas é que neste último, em sua descrição geral, os pontos finais das rotas não são previamente definidos, ao contrário da variação apresentada neste trabalho, onde os depósitos iniciais são fixos pois correspondem à posição atual das equipes.

## 5 EXPERIMENTOS COM O PROBLEMA DE DESPACHO ESTÁTICO

O objetivo dos experimentos apresentados neste capítulo é verificar se a metodologia desenvolvida para o Problema de Despacho Estático, detalhada na Seção 4.1, é capaz de criar soluções mais eficientes que as rotas obtidas através do método manual de distribuição de serviços e roteamento das equipes. Foram utilizados dados reais do histórico de uma agência de atendimento para confecção de 17 instâncias de MTSP, cada uma representando um dia de trabalho, as quais foram otimizadas pelos algoritmos ACO adaptados para o MTSP. Na Seção 5.1 são apresentados os dados reais coletados, e na Seção 5.2 é detalhado o protocolo experimental aplicado. As soluções criadas foram comparadas com as rotas reais, o que comprovou que o método desenvolvido é capaz de reduzir significativamente a distância percorrida pela equipe que mais se deslocou no dia, o que indica que menos tempo foi necessário para a execução de todo o conjunto de serviços do dia, de acordo com o objetivo do Problema de Despacho Estático, definido na Seção 2.3.1.

O Experimento 1, detalhado na Seção 5.3, verifica se as soluções produzidas pelo STACS, o primeiro algoritmo ACO adaptado para MTSP, são melhores que as rotas reais percorridas pelas equipes. Esta comparação inicial foi necessária para confirmar que melhores soluções podem ser geradas computacionalmente do que com a utilização do método manual da empresa. As 17 instâncias de MTSP foram representadas por distâncias euclidianas e submetidas a duas configurações diferentes do STACS: a primeira minimizando o custo total das soluções (objetivo *minsum*) e a segunda minimizando a maior rota individual das soluções MTSP (objetivo *minmax*). Com o objetivo *minsum*, a distância total das rotas das equipes reduziu em média 42,23%. Com o objetivo *minmax*, a redução da distância total foi de 19,84%, mas as equipes percorreram rotas equilibradas, indicando que o objetivo *minmax* é mais adequado ao problema real, já que o equilíbrio da carga de trabalho das equipes resulta na diminuição do tempo necessário para o atendimento de todo o conjunto de serviços, considerando uma velocidade média equivalente para todas as equipes. Estes resultados foram os primeiros obtidos para avaliação da metodologia desenvolvida para o Problema de Despacho Estático, tendo sido publicados em (BARBOSA; SILLA JR; KASHIWABARA, 2015)<sup>1</sup>.

No Experimento 2, Seção 5.4, o objetivo é verificar se o segundo algoritmo ACO adaptado para MTSP neste trabalho, o STRBAS, é capaz de criar soluções otimizadas para o problema real assim como o STACS. Para isso, as 17 instâncias reais euclidianas foram subme-

---

<sup>1</sup>Para possibilitar a replicação destes experimentos, em <https://github.com/denilsonfag/STACS> encontram-se disponíveis os dados reais e o código fonte da versão do protótipo utilizados.

tidas ao STRBAS em duas configurações que diferem apenas em relação ao objetivo do MTSP, *minsum* na primeira e *minmax* na segunda, da mesma forma que no Experimento 1. Com o objetivo *minsum*, o STRBAS diminuiu em média 2,46% a distância total das soluções do STACS; e com o objetivo *minmax* a distância da maior rota individual das soluções do STRBAS foi em média 0,39% menor que as do STACS. Esses resultados indicam que o STRBAS é superior ao STACS para o conjunto de instâncias experimentadas e de acordo com o protocolo experimental definido.

O Experimento 3, na Seção 5.5, verifica se as soluções geradas pelo STACS e pelo STRBAS podem ser melhoradas a partir da variação do parâmetro  $\beta$ , que está presente nos dois algoritmos e determina o peso que a visibilidade de uma aresta (o inverso de seu custo,  $1/c_{ij}$ ) terá nas escolhas dos próximos vértices pelas formigas, durante a construção das soluções. Foi escolhida a maior dentre as 17 instâncias reais euclidianas, que foi submetida aos dois algoritmos em configurações com diferentes valores para  $\beta$ . Em todas as configurações o protótipo foi programado para o objetivo *minmax*. Os resultados obtidos mostram que, à medida que o valor de  $\beta$  diminui, ambos os algoritmos adaptados passam a produzir melhores soluções, sendo a melhor média obtida pelo STRBAS com  $\beta = 1$ .

O objetivo do Experimento 4, Seção 5.6, é comprovar a aplicabilidade da metodologia proposta à instâncias representadas por matrizes de custos assimétricas, preenchidas por custos que representem de forma mais fiel o ambiente real. Para isso, as 17 instâncias reais foram submetidas ao STACS e ao STRBAS em três configurações diferentes: na primeira as matrizes de custos são euclidianas, como nos demais experimentos deste capítulo; na segunda configuração são utilizadas distâncias estimadas de deslocamento com veículo entre os pontos da instância; e na terceira configuração são utilizados tempos estimados de deslocamento com veículo. As distâncias e os tempos previstos foram coletados da ferramenta de consulta cartográfica MapQuest (2015). Os resultados confirmam a superioridade do STRBAS sobre o STACS para as instâncias experimentadas aplicando o objetivo *minmax*, além de comprovar que os algoritmos adaptados são eficientes também com a utilização de matrizes assimétricas, com o STRBAS melhorando o custo da maior rota individual das soluções em média 35,35% na configuração com custos de deslocamento previstos; e em média 44,43% na configuração com tempos de deslocamento previstos, quando comparando com as soluções reais calculadas com os respectivos custos de cada configuração.

## 5.1 DESCRIÇÃO DA BASE DE DADOS

A base de dados reais disponibilizada pela COPEL Distribuição consiste no histórico de atendimento do município de Cornélio Procópio, estado do Paraná, do dia 1º de fevereiro a 23 de fevereiro de 2014. Esses dados foram coletados na data de 24 de fevereiro de 2014 e a quantidade de dias dos relatórios foi definido pela empresa. Os dados foram obtidos a partir do sistema de gerenciamento de serviços da empresa que, dentre outras funções, armazena as informações sobre os serviços desde a sua geração até a sua conclusão.

Os atendimentos realizados pelas equipes nos 23 dias está resumido na Tabela 2, que traz a divisão dos serviços de acordo com seu dia de execução e o número de equipes em serviço em cada dia. Nos dias 1º, 2, 8, 9 e 23 havia apenas uma equipe em serviço ( $m = 1$ ), o que gera instâncias para o TSP e não para o MTSP. Como o foco da metodologia desenvolvida é o MTSP, estes dias de trabalho não foram incluídos nos experimentos. No dia 16 não houve nenhum atendimento, sendo também excluído da base de dados. Dessa forma, os experimentos foram realizados sobre os 17 dias de trabalho restantes.

**Tabela 2 – Serviços executados no município de Cornélio Procópio, Paraná, de 1º de fevereiro a 23 de fevereiro de 2014**

<b>Dia de trabalho</b>	<b>Equipes</b>	<b>Serviços executados</b>
1	1	7
2	1	1
3	3	31
4	4	38
5	4	40
6	4	33
7	4	40
8	1	4
9	1	1
10	3	37
11	4	27
12	4	53
13	4	35
14	4	33
15	2	12
16	0	0
17	2	26
18	4	64
19	4	35
20	4	30
21	4	36
22	2	9
23	1	5

**Fonte: COPEL Distribuição.**

As informações utilizadas, referentes a cada serviço, foram: o código da equipe executora do serviço; o dia e horário de conclusão do serviço, que é o momento em que a equipe finalizou as atividades exigidas no serviço, iniciando seu deslocamento para o próximo atendimento; e as coordenadas UTM, que indicam a posição de execução do serviço. O código da equipe executora e o horário de conclusão do serviço são informados pelas próprias equipes para armazenamento no histórico, enquanto que as coordenadas UTM são provenientes do sistema de informações geográficas da empresa, no qual se encontram cadastradas as posições dos equipamentos do sistema elétrico de distribuição e dos consumidores da área de atendimento.

## 5.2 PROTOCOLO EXPERIMENTAL

O protocolo descrito nesta seção foi aplicado a todos os experimentos deste capítulo, que tratam do Problema de Despacho Estático. A partir das coordenadas UTM que indicam as posições de execução dos serviços, foi montada uma instância de MTSP para cada um dos 17 dias de trabalho da base de dados.

Além das posições dos serviços executados em seu respectivo dia, em cada instância de MTSP também foram incluídos: o número de equipes em serviço no dia, que corresponde ao número  $m$  de caixeiros da instância de MTSP; e a posição da garagem da agência de atendimento, correspondendo ao depósito da instância. Os tempos de execução dos serviços não foram considerados nesta experimentação para o problema estático, tendo sido incluídos na experimentação para o problema dinâmico, apresentada no Capítulo 6. As soluções geradas foram de MTSP com único depósito e rotas fechadas, já que todas as equipes iniciam e concluem suas rotas no mesmo ponto, a garagem da agência de atendimento.

Os algoritmos foram implementados em um protótipo escrito em C++ e compilado com o pacote de desenvolvimento *Cygwin 1.7.32*. O código para geração dos números pseudorrandômicos foi extraído de Press *et al.* (1992). Foi utilizado um computador executando o sistema operacional *Windows 8.1* em um processador de 64 bits com dois núcleos de 2,40 GHz e 8 GB de memória principal. Em todas as execuções dos algoritmos ACO adaptados para MTSP, o STACS e o STRBAS, o critério de parada foi fixado em 1.000 ciclos e o tamanho da lista de candidatos é igual a 20 cidades, tendo sido estes parâmetros definidos com base nos valores utilizados por Vallivaara (2008). Os demais parâmetros serão apresentados na descrição dos detalhes de cada experimento. Os resultados analisados são os valores médios de 100 execuções independentes dos algoritmos para cada configuração experimentada.

### 5.3 EXPERIMENTO 1: STACS

Pergunta alvo: o STACS é eficiente na criação de soluções otimizadas para o problema real?

O objetivo deste experimento é comprovar a aplicabilidade da metodologia desenvolvida para o Problema de Despacho Estático, que consiste na criação de uma instância de MTSP a partir da posição de execução dos serviços de um dia de trabalho; na otimização dessas instâncias por um algoritmo da ACO; e na utilização da melhor solução gerada para a distribuição dos serviços entre as equipes e definição das rotas que devem ser percorridas. Os resultados obtidos comprovam que o STACS, o primeiro algoritmo adaptado, é capaz de distribuir os serviços e gerar rotas mais eficientes que as realizadas pelas equipes pelo método manual de despacho adotado atualmente na empresa. Também foi possível verificar que a minimização do custo das maiores rotas individuais das soluções (MTSP com objetivo *minmax*) é mais adequado ao problema real, devido ao equilíbrio alcançado nas distâncias percorridas pelas equipes.

#### 5.3.1 Detalhes experimentais

O principal objetivo foi verificar se o STACS é eficiente na criação de soluções otimizadas para o problema real. Para isso, as 17 instâncias de MTSP elaboradas a partir dos dados reais foram otimizadas pelo STACS e as soluções obtidas foram comparadas com as rotas reais percorridas pelas equipes. A determinação das rotas reais foi possível a partir do histórico da agência, verificando os horários em que as equipes cadastraram a conclusão dos serviços que executaram.

Para a confecção das matrizes de custo das instâncias reais foram utilizadas as distâncias euclidianas, que foram calculadas a partir das coordenadas UTM dos pontos, obtidas da base de dados, e divididas por 1.000, resultando em valores em quilômetros, já que cada unidade no sistema de projeção UTM corresponde a um metro na superfície da Terra (MACHADO JR; DAL SANTO; LOCH, 2004). Os custos das rotas reais também foram calculados pelo protótipo com a utilização das distâncias euclidianas e servem de referência para a avaliação dos resultados.

Cada uma das 17 instâncias reais foi submetida à duas configurações diferentes do STACS. Na primeira configuração o STACS foi programado para minimizar o custo total das soluções, sem considerar a distribuição da carga de trabalho entre as equipes, como na descrição geral do MTSP, também denominado MTSP com objetivo *minsum*. Na segunda configuração o STACS minimiza o custo da maior rota individual das soluções, objetivando a construção de soluções formadas por rotas com custos equilibrados entre os caixeiros, como no MTSP

com equilíbrio da carga de trabalho, ou MTSP com objetivo *minmax*. Os demais parâmetros aplicados são iguais nas duas configurações:  $q_0 = 0.9$ ,  $\beta = 2$  e  $\xi = \rho = 0.1$ . Foram geradas  $N = 10$  soluções a cada ciclo. Esses valores foram os melhores obtidos experimentalmente por Dorigo e Stutzle (2004) ao aplicar o ACS a um grande conjunto de instâncias euclidianas de TSP e também foram os mesmos utilizados por Vallivaara (2008) em seus experimentos, e por isso adotados nestes experimentos.

### 5.3.2 Resultados e discussão

Na Tabela 3 estão os resultados obtidos para a primeira configuração, na qual o STACS minimiza o custo total das soluções de MTSP, ou seja, a soma de todos os custos das rotas individuais das equipes. Isto significa que, nas comparações entre duas soluções durante a execução do algoritmo, a que é considerada como sendo melhor é a que tiver menor custo total. Esta configuração pode ser útil no ambiente real caso se deseje exclusivamente reduzir o deslocamento total das equipes, sem se preocupar com a distribuição equilibrada dos serviços entre elas.

**Tabela 3 – Resultados obtidos pelo STACS minimizando o custo total das soluções MTSP**

Dia	Solução Real		Médias de 100 execuções do STACS				Melhoramento	
	Custo Total ( $CT_r$ )	Maior Rota ( $MR_r$ )	Custo Total ( $CT_p$ )	d. p.	Maior Rota ( $MR_p$ )	d. p.	Custo Total ( $CT_r - CT_p$ )	Maior Rota ( $MR_r - MR_p$ )
3	60,83	22,37	19,53	0,29	13,86	2,67	41,30	8,51
4	84,41	41,39	52,03	0,38	39,45	5,01	32,38	1,94
5	131,98	84,36	94,00	0,44	75,17	4,56	37,98	9,19
6	116,16	54,24	75,24	1,14	52,71	8,05	40,92	1,53
7	109,53	51,15	68,94	0,46	43,83	6,80	40,59	7,32
10	62,22	23,47	21,36	0,27	15,36	3,38	40,86	8,11
11	48,95	18,61	18,87	0,35	15,44	2,58	30,08	3,17
12	188,19	74,20	131,72	0,74	115,40	9,41	56,47	-41,20
13	52,25	23,05	21,01	0,32	13,43	1,51	31,24	9,62
14	60,53	23,78	23,07	0,44	14,42	3,73	37,46	9,36
15	140,44	133,77	111,08	0,01	104,84	0,00	29,36	28,93
17	37,75	20,22	16,75	0,46	13,26	3,44	21,00	6,96
18	71,73	24,05	27,13	0,26	15,32	3,89	44,60	8,73
19	56,26	21,65	26,09	0,60	19,61	1,91	30,17	2,04
20	55,31	23,83	22,23	0,43	12,05	3,40	33,08	11,78
21	70,62	28,70	24,22	0,43	15,55	3,32	46,40	13,15
22	138,59	108,06	105,03	0,00	103,05	0,00	33,56	5,01
<b>Totais</b>	<b>1485,75</b>	<b>776,90</b>	<b>858,29</b>		<b>682,75</b>		<b>627,46</b>	<b>94,15</b>

Fonte: Autoria própria.

Para esta primeira configuração, houve uma diminuição de 627,46 km no deslocamento total das equipes nos 17 dias de trabalho, comparando os custos reais com a média dos custos das soluções obtidas nas 100 execuções do STACS, o que corresponde a uma melhora de 42,23% em relação às rotas reais das equipes. Além disso, para todas as 17 instâncias foi encontrada uma solução com custo total menor e apenas para o dia de trabalho 12 houve um aumento da maior rota individual da solução.

Na segunda configuração, cujos resultados estão apresentados na Tabela 4, o STACS foi programado para minimizar a maior rota individual das soluções MTSP, sendo mantidos os demais parâmetros como na configuração anterior. Este objetivo é adequado ao ambiente real caso se deseje que as equipes tenham deslocamentos equilibrados entre si ao final da execução dos serviços, o que resulta na execução de mais serviços no mesmo intervalo de tempo pela agência como um todo.

**Tabela 4 – Resultados obtidos pelo STACS minimizando o custo da maior rota individual das soluções MTSP**

Dia	Solução Real		Médias de 100 execuções do STACS				Melhoramento	
	Custo Total ( $CT_r$ )	Maior Rota ( $MR_r$ )	Custo Total ( $CT_p$ )	d. p.	Maior Rota ( $MR_p$ )	d. p.	Custo Total ( $CT_r - CT_p$ )	Maior Rota ( $MR_r - MR_p$ )
3	60,83	22,37	24,16	0,54	8,32	0,03	36,67	14,05
4	84,41	41,39	61,80	2,38	33,89	0,00	22,61	7,50
5	131,98	84,36	103,94	1,60	73,29	0,00	28,04	11,07
6	116,16	54,24	127,12	12,25	39,58	0,08	-10,96	14,66
7	109,53	51,15	80,79	1,91	39,81	0,00	28,74	11,34
10	62,22	23,47	24,96	0,26	8,39	0,11	37,26	15,08
11	48,95	18,61	28,15	1,54	7,73	0,00	20,80	10,88
12	188,19	74,20	185,48	18,73	60,80	0,00	2,71	13,40
13	52,25	23,05	32,16	2,26	9,26	0,02	20,09	13,79
14	60,53	23,78	30,55	0,47	7,90	0,02	29,98	15,88
15	140,44	133,77	179,35	1,54	90,21	0,67	-38,91	43,56
17	37,75	20,22	17,49	0,10	8,77	0,06	20,26	11,45
18	71,73	24,05	32,00	0,41	8,14	0,09	39,73	15,91
19	56,26	21,65	38,77	1,58	11,64	0,02	17,49	10,01
20	55,31	23,83	28,90	0,21	7,41	0,02	26,41	16,42
21	70,62	28,70	32,44	0,14	8,15	0,02	38,18	20,55
22	138,59	108,06	162,86	3,74	83,70	0,00	-24,27	24,36
<b>Totais</b>	<b>1485,75</b>	<b>776,90</b>	<b>1190,93</b>		<b>507,00</b>		<b>294,82</b>	<b>269,90</b>

Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Tabela 4, para a segunda configuração a redução do deslocamento total das equipes nos 17 dias foi de 294,82 km, o que corresponde a uma melhora de 19,84% em relação aos custos totais das rotas reais, significativamente inferior ao ganho obtido pela

configuração anterior. Porém, quando verificando a maior rota individual das equipes, tem-se uma melhora de 94,15 km no primeiro experimento e 269,90 km no segundo. Apesar do ganho total nos deslocamentos ser menor, o ganho nas rotas individuais informa que as equipes trabalharam de maneira mais uniforme, concluindo suas rotas em instantes próximos, o que leva à execução de mais serviços em menos tempo, aumentando a qualidade do atendimento prestado. Devido a essa constatação, o MTSP com objetivo *minmax* é o que produz melhores soluções para o problema real, pois adianta o instante da conclusão do conjunto de serviços, melhorando o tempo de resposta às solicitações.

### 5.3.3 Tempos computacionais

A Tabela 5 apresenta o tempo médio de execução do algoritmo para cada instância, que foi obtido a partir da média do tempo gasto para execução dos 1.000 ciclos do STACS nas 100 execuções do algoritmo, para cada dia de trabalho. É possível verificar que para a maior instância experimentada, a do dia 18, com 64 serviços, foram gastos em média aproximadamente 10 segundos para execução dos 1.000 ciclos do algoritmo, que representam um tempo aceitável para o problema em estudo.

**Tabela 5 – Tempo médio de execução de 1.000 ciclos do STACS**

<b>Dia de trabalho</b>	<b>Número de equipes</b>	<b>Número de serviços</b>	<b>Tempo médio de execução (ms)</b>
3	3	31	2794
4	4	38	3805
5	4	40	4426
6	4	33	3327
7	4	40	4368
10	3	37	3534
11	4	27	2414
12	4	53	7197
13	4	35	4010
14	4	33	3667
15	2	12	677
17	2	26	1846
18	4	64	9993
19	4	35	3448
20	4	30	2658
21	4	36	3629
22	2	9	658

**Fonte: Autoria própria.**

## 5.4 EXPERIMENTO 2: STRBAS

Pergunta alvo: o STRBAS é mais eficiente do que o STACS para as mesmas instâncias do Experimento 1?

O objetivo deste experimento é verificar se o STRBAS, o segundo algoritmo ACO adaptado para MTSP, é capaz de criar soluções otimizadas para o problema real assim como o STACS. Para isso, as 17 instâncias reais euclidianas foram submetidas ao STRBAS, sendo os resultados comparados com os obtidos pelo STACS no Experimento 1. Os resultados indicam que o STRBAS é superior ao STACS para o conjunto de instâncias experimentadas e de acordo com o protocolo experimental definido.

### 5.4.1 Detalhes experimentais

Os custos utilizados para representação das instâncias reais, assim como no Experimento 1, foram as distâncias euclidianas entre os pontos. Também como no Experimento 1, as 17 instâncias reais foram submetidas à duas configurações diferentes: na primeira configuração ocorre a minimização do custo total das soluções e na segunda configuração o custo minimizado é o da maior rota individual da solução. Os demais parâmetros do STRBAS, comuns nas duas configurações, são:  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 2$ ,  $\rho = 0.1$  e  $w = 6$ . Foram geradas  $N = n$  soluções a cada ciclo, onde  $n$  corresponde ao número total de pontos da instância de MTSP incluindo o depósito. Esses valores foram os melhores obtidos experimentalmente por Dorigo e Stutzle (2004) ao aplicar o RBAS a um grande conjunto de instâncias euclidianas de TSP.

### 5.4.2 Resultados e discussão

Os resultados foram obtidos em 100 execuções independentes do STRBAS para cada uma das 17 instâncias reais para cada configuração, como nos demais experimentos deste capítulo. São mostrados o valor da melhor e da pior soluções encontradas nestas 100 execuções e também a média e o desvio padrão das melhores soluções obtidas.

Na Tabela 6 são comparados os resultados obtidos pelo STACS e pelo STRBAS, ambos configurados para minimizar o custo total da solução. Os resultados são de 100 execuções independentes dos algoritmos. De acordo com o objetivo configurado, os valores apresentados na tabela correspondem ao custo total das soluções MTSP. Os resultados do STACS foram obtidos pelo Experimento 1, e os resultados do STRBAS são os primeiros apresentados nesta dissertação. Como pode ser observado na Tabela 6, o STRBAS foi equivalente ou superior ao

STACS em todas as instâncias experimentadas, quando considerando o resultado médio dos custos totais das melhores soluções geradas pelos dois algoritmos nas 100 execuções. Calculando o melhoramento médio para as 17 instâncias, o STRBAS diminuiu em média 2,46% a distância total das soluções do STACS.

**Tabela 6 – Comparação entre o STACS e o STRBAS minimizando o custo total das soluções MTSP, analisando o custo total das melhores soluções encontradas em cada execução**

Dia	STACS				STRBAS				Melhora pelo STRBAS
	melhor	pior	média( $m_1$ )	d. p.	melhor	pior	média( $m_2$ )	d. p.	$(m_1 - m_2) / m_1 \times 100$
3	18,90	20,32	19,53	0,29	18,78	19,51	18,81	0,11	3,69%
4	51,00	52,83	52,03	0,38	51,01	52,47	51,73	0,31	0,58%
5	93,14	94,84	94,00	0,44	92,76	94,08	93,46	0,26	0,57%
6	71,36	78,10	75,24	1,14	69,46	73,28	71,61	0,89	4,82%
7	67,69	70,23	68,94	0,46	67,23	68,60	68,11	0,21	1,20%
10	20,59	21,96	21,36	0,27	20,03	21,28	20,52	0,41	3,93%
11	17,53	19,71	18,87	0,35	17,08	18,75	18,27	0,35	3,18%
12	129,63	133,21	131,72	0,74	128,47	131,56	130,05	0,53	1,27%
13	20,43	21,59	21,01	0,32	19,77	20,78	20,47	0,16	2,57%
14	21,73	23,76	23,07	0,44	21,39	23,14	22,35	0,34	3,12%
15	111,08	111,15	111,08	0,01	111,08	111,15	111,08	0,01	0,00%
17	15,93	17,34	16,75	0,46	15,93	17,11	16,67	0,34	0,48%
18	26,54	27,79	27,13	0,26	25,46	26,31	25,78	0,18	4,98%
19	24,69	27,37	26,09	0,60	24,42	26,15	24,93	0,42	4,45%
20	20,85	23,14	22,23	0,43	20,42	22,26	21,41	0,30	3,69%
21	23,06	25,10	24,22	0,43	22,56	24,13	23,41	0,34	3,34%
22	105,03	105,03	105,03	0,00	105,03	105,03	105,03	0,00	0,00%

Fonte: Autoria própria.

A superioridade do STRBAS também é verificada na Tabela 7, na qual são apresentados os resultados para os algoritmos configurados para minimizar o custo da maior rota individual das soluções. Os resultados são de 100 execuções independentes dos algoritmos, como nos demais experimentos. De acordo com este objetivo, os valores da tabela são referentes ao custo das maiores rotas individuais das soluções MTSP, na qual é verificado, calculando o melhoramento médio para os 17 dias, que a distância da maior rota individual das soluções do STRBAS foi em média 0,39% menor que as do STACS.

Nas Tabelas 6 e 7 é possível constatar que os desvios padrão dos custos das melhores soluções nas 100 execuções do STRBAS tenderam a ser inferiores aos do STACS, indicando que o STRBAS, além de obter os melhores valores médios, também foi o que apresentou menor variação no custo da melhor solução encontrada em diferentes execuções.

De acordo com os resultados deste experimento, o STRBAS produziu melhores soluções que o STACS para as 17 instâncias reais para as duas variações de MTSP. Também foi possível comprovar a versatilidade da metodologia desenvolvida e apresentada nesta dissertação quanto

**Tabela 7 – Comparação entre o STACS e o STRBAS minimizando o custo da maior rota individual das soluções MTSP, analisando o custo da maior rota individual das melhores soluções encontradas em cada execução**

Dia	STACS				STRBAS				Melhora pelo STRBAS
	melhor	pior	média( $m_1$ )	d. p.	melhor	pior	média( $m_2$ )	d. p.	$(m_1 - m_2) / m_1 \times 100$
3	8,28	8,47	8,32	0,03	8,27	8,40	8,30	0,01	0,24%
4	33,89	33,89	33,89	0,00	33,89	33,89	33,89	0,00	0,00%
5	73,29	73,29	73,29	0,00	73,29	73,29	73,29	0,00	0,00%
6	39,02	39,62	39,58	0,08	39,08	39,62	39,48	0,13	0,25%
7	39,81	39,81	39,81	0,00	39,81	39,81	39,81	0,00	0,00%
10	8,26	8,75	8,39	0,11	8,26	8,65	8,34	0,05	0,60%
11	7,69	7,74	7,73	0,00	7,65	7,73	7,66	0,03	0,91%
12	60,80	60,80	60,80	0,00	60,80	60,80	60,80	0,00	0,00%
13	9,24	9,31	9,26	0,02	9,24	9,30	9,25	0,02	0,11%
14	7,86	8,00	7,90	0,02	7,75	7,91	7,87	0,02	0,38%
15	89,94	91,86	90,21	0,67	89,94	90,01	89,95	0,02	0,29%
17	8,68	9,02	8,77	0,06	8,66	8,90	8,75	0,04	0,23%
18	7,92	8,41	8,14	0,09	7,82	8,16	8,02	0,07	1,47%
19	11,64	11,71	11,64	0,02	11,64	11,65	11,64	0,00	0,00%
20	7,39	7,64	7,41	0,02	7,38	7,40	7,40	0,00	0,13%
21	8,07	8,28	8,15	0,02	7,81	8,15	7,98	0,07	2,09%
22	83,70	83,70	83,70	0,00	83,70	83,70	83,70	0,00	0,00%

Fonte: Autoria própria.

ao algoritmo aplicado na otimização. Como o Problema de Despacho Estático é modelado como instâncias de MTSP, a otimização pode ser realizada por outros algoritmos desenvolvidos para tratamento do MTSP.

#### 5.4.3 Tempos computacionais

Na Tabela 8 estão apresentados os tempos de execução, em segundos, dos dois algoritmos adaptados, referente ao tempo médio de 100 execuções para cada instância real, com 1.000 ciclos cada execução, que apresentam uma desvantagem do STRBAS em relação ao STACS. Como no STRBAS foram geradas  $n$  solução por ciclo, enquanto no STACS foram geradas 10 soluções por ciclo, o tempo gasto pelo STRBAS é significativamente maior para execução de um ciclo, para instâncias com  $n > 10$ . A atualização de feromônio do STRBAS também consome mais tempo, pois utiliza as  $w = 6$  soluções na atualização, enquanto o STACS utiliza apenas a melhor solução encontrada até o momento na execução. Para a comparação dos algoritmos adaptados considerando prioritariamente o tempo computacional, uma nova experimentação deve ser realizada, definindo um critério de parada temporal para as execuções.

**Tabela 8 – Tempo médio de execução de 1.000 ciclos do STACS e do STRBAS**

Instância	Equipes	Serviços	Tempo médio de execução (s)	
			STACS	STRBAS
3	3	31	2,79	12,73
4	4	38	3,81	17,15
5	4	40	4,43	18,63
6	4	33	3,33	11,00
7	4	40	4,37	19,02
10	3	37	3,53	13,43
11	4	27	2,41	6,02
12	4	53	7,20	43,93
13	4	35	4,01	12,14
14	4	33	3,67	10,60
15	2	12	0,68	0,02
17	2	26	1,85	4,98
18	4	64	9,99	87,15
19	4	35	3,45	12,83
20	4	30	2,66	8,03
21	4	36	3,63	13,36
22	2	9	0,66	0,90

**Fonte: Autoria própria.**

## 5.5 EXPERIMENTO 3: VARIANDO O PARÂMETRO $\beta$

Pergunta alvo: qual o melhor valor de  $\beta$  para o STACS e o STRBAS?

Os resultados desta seção mostram que à medida que o valor do parâmetro  $\beta$  diminui os algoritmos ACO adaptados para MTSP apresentam melhores soluções para uma configuração específica experimentada, que é detalhada na Seção 5.5.1. Como foram utilizados apenas valores inteiros positivos para  $\beta$ , o melhor valor inferido foi  $\beta = 1$ .

### 5.5.1 Detalhes experimentais

O objetivo deste experimento é realizar uma seleção preliminar dos parâmetros a serem utilizados nos algoritmos ACO adaptados para MTSP. Esta inferência inicial foi realizada variando o valor do parâmetro  $\beta$  e comparando as soluções médias obtidas pelo STACS e pelo STRBAS.

O parâmetro  $\beta$  está presente nos dois algoritmos adaptados, e determina o peso que a visibilidade de uma aresta terá ao serem calculadas as probabilidades que os nós ainda não visitados terão de serem escolhidos por uma formiga em todos os movimentos da colônia durante a execução do algoritmo. A visibilidade corresponde ao inverso do custo da aresta ( $1/c_{ij}$ ).

Como em todos os experimentos deste capítulo, este foi realizado de acordo com o protocolo descrito na Seção 5.2, exceto pelo fato de ter sido realizado apenas sobre uma das 17 instâncias reais criadas. A instância selecionada é a maior dentre as 17 obtidas a partir dos dados reais: a do dia de trabalho 18, com 64 serviços e 4 equipes de atendimento. Neste caso, a instância MTSP possui 65 nós (com a inclusão da garagem) e 4 caixeiros. Como nos experimentos anteriores, foram utilizadas as distâncias euclidianas para representar os custos de deslocamento entre os pontos da instância.

Em Dorigo e Stutzle (2004), além da descrição das duas variações dos algoritmos ACO originais que foram adaptadas para o MTSP neste trabalho, também são encontrados os conjuntos de parâmetros que alcançaram os melhores resultados quando da aplicação destes algoritmos sobre um conjunto significativo de instâncias de TSP. Os valores destes parâmetros estão apresentados na Tabela 9, na qual células sem valores indicam que o parâmetro não é aplicado ao algoritmo. As descrições detalhadas desses parâmetros são encontradas na Seção 4.1.

**Tabela 9 – Melhores conjuntos de parâmetros obtidos experimentalmente para os algoritmos ACO originais aplicados à instâncias de TSP**

Parâmetro	RBAS	ACS
$\tau_0$	$0.5w(w-1)/\rho C^{mn}$	$1/nC^{mn}$
$N$	$n$	10
$\alpha$	1	-
$\beta$	2 a 5	2 a 5
$\rho$	0,1	0,1
$w$	6	-
$\xi$	-	0,1
$q_0$	-	0,9

**Fonte: Dorigo e Stutzle (2004).**

Na Tabela 9 pode ser observado que não é definido um valor único para  $\beta$ , sendo informado que os melhores resultados foram obtidos empiricamente com  $\beta$  assumindo um valor inteiro entre 2 e 5, em instâncias de TSP. Com base nisto, este experimento busca realizar uma seleção inicial do melhor valor para  $\beta$  para os dois algoritmos adaptados para o MTSP. A instância selecionada foi submetida aos dois algoritmos adaptados, com  $\beta$  assumindo valores entre 1 e 5, totalizando 10 configurações diferentes para cada algoritmo adaptado.

### 5.5.2 Resultados e discussão

Os resultados estão representados na Tabela 10, na qual os valores analisados, de acordo com o objetivo do problema, correspondem às médias de 100 execuções do custo da maior rota individual das melhores soluções MTSP, para uma instância de MTSP com 65 nós e 4 caixeiros. É importante destacar que os resultados do STACS e do STRBAS, para  $\beta = 2$ , já haviam sido obtidos nos Experimentos 1 e 2, respectivamente.

**Tabela 10 – Resultados da variação de  $\beta$  nos dois algoritmos adaptados**

$\beta$	STACS				STRBAS				Melhora pelo STRBAS
	melhor	pior	média( $m_1$ )	d. p.	melhor	pior	média( $m_2$ )	d. p.	$(m_1 - m_2) / m_1 \times 100$
1	7,76	8,54	8,04	0,13	7,70	8,15	7,97	0,08	0,84%
2	7,92	8,41	8,14	0,09	7,82	8,16	8,02	0,07	1,47%
3	7,84	8,50	8,15	0,10	7,82	8,20	8,05	0,07	1,22%
4	7,94	8,51	8,18	0,13	7,93	8,19	8,09	0,05	1,13%
5	8,00	8,60	8,27	0,12	8,01	8,22	8,12	0,05	1,76%

**Fonte: Autoria própria.**

Na Tabela 10 pode ser observado que as melhores médias foram obtidas com  $\beta = 1$ , para os dois algoritmos adaptados. Verifica-se também que, à medida que  $\beta$  cresce, ambos passam a apresentar piores médias. Dessa forma, o valor de  $\beta$  para os dois algoritmos, nos próximos experimentos realizados, é igual a 1. Esta conclusão sugere que a seleção deve se estender aos demais parâmetros, a fim da determinação do melhor conjunto a ser utilizado nos algoritmos adaptados para MTSP. O protótipo desenvolvido se apresenta como uma ferramenta útil para realização desta seleção na continuação deste trabalho.

## 5.6 EXPERIMENTO 4: MATRIZES DE CUSTO ASSIMÉTRICAS

Pergunta alvo: o STRBAS é mais eficiente do que o STACS quando aplicados a instâncias representadas por matrizes de custo assimétricas?

Neste experimento as 17 instâncias de MTSP formadas a partir dos dados reais foram submetidas aos dois algoritmos adaptados com diferentes matrizes de custos representando as instâncias. Os resultados obtidos comprovam que diferentes custos podem ser utilizados para representação do ambiente real do problema além das distâncias euclidianas, como distâncias de deslocamento estimadas e tempos de deslocamento estimados por sistemas de previsão de rotas, que utilizam informações sobre as vias a serem percorridas, resultando numa melhor representação do ambiente.

### 5.6.1 Detalhes experimentais

Este experimento verifica a eficiência na otimização de instâncias de MTSP representadas por matrizes de custo assimétricas pelo STACS e pelo STRBAS. Como nos experimentos anteriores, este também segue o protocolo descrito na Seção 5.2. O parâmetro  $\beta$  foi fixado em 1, de acordo com os resultados obtidos pelo Experimento 3, sendo os demais parâmetros mantidos como nos experimentos anteriores: para o STACS,  $q_0 = 0.9$ ,  $\xi = \rho = 0.1$  e  $N = 10$ ; e para o STRBAS,  $\alpha = 1$ ,  $\rho = 0.1$ ,  $w = 6$  e  $N = n$ . Os valores analisados correspondem ao custo da maior rota individual das soluções.

As matrizes de custos que representam as 17 instâncias reais são os elementos que variam nas 3 configurações executadas. Na configuração 1 os dois algoritmos são comparados utilizando instâncias representadas por matrizes simétricas compostas pelas distâncias euclidianas entre os pontos a serem percorridos pelas equipes. Na configuração 2 são utilizadas matrizes de custos assimétricas, compostas por distâncias previstas de deslocamento com veículo extraídas da ferramenta de consulta cartográfica MapQuest (2015) para representar as instâncias. Estes custos consideram os percursos das vias reais e foram obtidos a partir de consultas para todos os pares de pontos que formam as instâncias. A configuração 3 utiliza os custos temporais previstos de deslocamento para composição da matriz, também obtidas de MapQuest (2015), e são calculados considerando a distância, os limites de velocidade e os sentidos das vias reais. O objetivo das configurações 2 e 3 é comprovar a aplicabilidade da metodologia proposta a dados que representem de forma mais fiel as rotas a serem percorridas pelas equipes.

### 5.6.2 Resultados e discussão

Na Configuração 1 as instâncias foram representadas por matrizes de custos com as distâncias euclidianas, que foram calculadas a partir das coordenadas reais dos serviços. Os valores analisados na Tabela 11 correspondem ao valor médio obtido em 100 execuções dos algoritmos do custo da maior rota individual das melhores soluções encontradas. É importante destacar que esta comparação difere da realizada no Experimento 2, detalhada na Tabela 7, em relação ao valor do parâmetro  $\beta$  utilizado. No Experimento 2,  $\beta$  foi setado em 2 para os dois algoritmos, enquanto que na Tabela 11 os resultados foram obtidos com  $\beta = 1$ .

Na Tabela 11 é possível verificar que o novo algoritmo adaptado, o STRBAS, foi mais eficiente, em média, que o STACS na construção de soluções otimizadas para 16 das 17 instâncias reais. Apesar das melhores soluções para os dias de trabalho 3 e 18 terem sido encontradas pelo STACS, na média das 100 execuções as soluções do STRBAS foram 0,12% e 1,12% melhores para estes mesmos dias de trabalho, respectivamente.

**Tabela 11 – Configuração 1: resultados dos dois algoritmos adaptados para as 17 instâncias reais representadas por matrizes de custo com distâncias euclidianas**

Dia	STACS				STRBAS				Melhora pelo STRBAS
	melhor	pioir	média( $m_1$ )	d. p.	melhor	pioir	média( $m_2$ )	d. p.	$(m_1 - m_2) / m_1 \times 100$
3	8,22	8,51	8,31	0,03	8,26	8,32	8,30	0,01	0,12%
4	33,89	33,89	33,89	0,00	33,89	33,89	33,89	0,00	0,00%
5	73,29	73,29	73,29	0,00	73,29	73,29	73,29	0,00	0,00%
6	39,33	39,62	39,60	0,05	39,14	39,58	39,47	0,13	0,33%
7	39,81	39,81	39,81	0,00	39,81	39,81	39,81	0,00	0,00%
10	8,26	8,79	8,45	0,17	8,26	8,37	8,32	0,02	1,54%
11	7,65	7,73	7,72	0,02	7,65	7,69	7,65	0,00	0,91%
12	60,80	60,80	60,80	0,00	60,80	60,80	60,80	0,00	0,00%
13	9,24	9,30	9,26	0,02	9,24	9,28	9,24	0,01	0,22%
14	7,86	7,96	7,88	0,01	7,61	7,88	7,86	0,04	0,25%
15	89,94	89,94	89,94	0,00	89,94	89,94	89,94	0,00	0,00%
17	8,66	8,90	8,70	0,06	8,66	8,83	8,72	0,05	-0,23%
18	7,74	8,67	8,05	0,15	7,75	8,13	7,96	0,08	1,12%
19	11,64	11,68	11,64	0,00	11,64	11,64	11,64	0,00	0,00%
20	7,38	7,68	7,40	0,04	7,38	7,40	7,40	0,01	0,00%
21	7,81	8,36	8,09	0,12	7,81	8,15	7,91	0,10	2,22%
22	83,70	83,70	83,70	0,00	83,70	83,70	83,70	0,00	0,00%

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 12 – Configuração 2: resultados dos dois algoritmos adaptados para as 17 instâncias reais representadas por matrizes de custo com distâncias previstas de deslocamento**

Dia	STACS				STRBAS				Melhora pelo STRBAS
	melhor	pioir	média( $m_1$ )	d. p.	melhor	pioir	média( $m_2$ )	d. p.	$(m_1 - m_2) / m_1 \times 100$
3	11,46	12,68	11,91	0,35	11,46	12,53	11,67	0,15	2,02%
4	50,80	53,34	50,83	0,25	50,80	50,96	50,80	0,02	0,06%
5	96,81	99,97	98,87	0,47	96,81	99,06	98,14	0,67	0,74%
6	42,75	45,49	44,23	0,49	42,75	44,50	43,82	0,44	0,93%
7	50,32	53,50	52,49	1,09	50,32	53,20	51,11	0,94	2,63%
10	11,79	12,76	12,21	0,20	11,77	12,29	12,04	0,14	1,39%
11	10,20	11,21	10,46	0,32	10,20	10,50	10,26	0,06	1,91%
12	77,51	79,45	78,35	0,42	77,32	77,69	77,64	0,08	0,91%
13	10,83	11,43	10,95	0,11	10,74	11,16	10,86	0,07	0,82%
14	11,18	12,88	11,68	0,39	11,16	11,87	11,40	0,21	2,40%
15	118,52	118,52	118,52	0,00	118,52	118,52	118,52	0,00	0,00%
17	14,69	15,50	14,95	0,17	14,69	15,39	14,91	0,16	0,27%
18	11,13	12,63	11,88	0,37	11,14	12,69	11,78	0,34	0,84%
19	13,68	15,06	14,20	0,42	13,49	14,67	13,85	0,23	2,46%
20	10,73	11,68	10,84	0,14	10,73	10,96	10,79	0,02	0,46%
21	11,27	12,56	11,70	0,23	11,46	11,54	11,49	0,04	1,79%
22	201,85	202,32	201,92	0,17	201,85	201,85	201,85	0,00	0,03%

Fonte: Autoria própria.

Na Configuração 2 as instâncias foram representadas por matrizes de custos com as distâncias previstas de deslocamento com veículo, em quilômetros, obtidas da ferramenta de

consulta cartográfica MapQuest (2015). Para confecção das matrizes, foi necessária uma consulta para cada um dos pares de posições que compõem a instância. Segundo MapQuest (2015), os custos retornados pelas consultas consideram os percursos das vias reais, de forma que sua aplicação tende a resultar numa melhor representação do ambiente real.

Nos resultados apresentados na Tabela 12 pode ser observado que as distâncias previstas de deslocamento tendem a ser maiores que as distâncias euclidianas, pois os custos das maiores rotas individuais, para todos os dias de trabalho, foram significativamente superiores aos obtidos com as distâncias euclidianas, apresentados na Tabela 11. Também é possível verificar que novamente o valor médio de 100 execuções dos algoritmos do custo da maior rota individual das melhores soluções obtidas pelo STRBAS foram melhores ou iguais que as do STACS, desta vez para todos os 17 dias de trabalho; e que os percentuais de melhora do STRBAS são mais significativos que os obtidos com as matrizes simétricas da Configuração 1.

**Tabela 13 – Configuração 3: resultados dos dois algoritmos adaptados para as 17 instâncias reais representadas por matrizes de custo com tempos previstos de deslocamento**

Dia	STACS				STRBAS				Melhora pelo STRBAS $(m_1 - m_2) / m_1 \times 100$
	melhor	pioor	média( $m_1$ )	d. p.	melhor	pioor	média( $m_2$ )	d. p.	
3	1520	1584	1537,76	14,34	1524	1566	1527,09	8,34	0,69%
4	2984	3261	3046,33	41,05	2984	3028	3022,32	10,30	0,79%
5	5569	5981	5717,10	84,72	5569	5726	5656,16	46,86	1,07%
6	2196	2507	2341,84	78,14	2218	2282	2277,95	8,68	2,73%
7	2936	3217	3079,99	56,70	2936	3077	3018,48	31,40	2,00%
10	1504	1594	1549,72	19,92	1503	1591	1535,47	16,75	0,92%
11	1289	1515	1338,65	48,27	1289	1301	1289,66	2,58	3,66%
12	4503	4938	4669,11	106,65	4441	4580	4512,79	35,04	3,35%
13	1316	1437	1361,84	32,84	1318	1384	1339,97	7,11	1,61%
14	1374	1525	1430,54	40,11	1374	1454	1390,51	17,81	2,80%
15	6935	6946	6935,22	1,55	6934	6946	6934,90	1,19	0,00%
17	1706	1907	1749,65	60,71	1706	1864	1723,63	38,27	1,49%
18	1474	1667	1545,91	37,11	1434	1530	1496,39	23,59	3,20%
19	1452	1576	1494,72	26,13	1456	1542	1498,61	23,83	-0,26%
20	1227	1387	1287,71	37,86	1222	1251	1240,90	10,29	3,64%
21	1457	1620	1537,67	45,57	1431	1560	1484,53	12,90	3,46%
22	13034	13034	13034,00	0,00	13034	13034	13034,00	0,00	0,00%

Fonte: Autoria própria.

Na Configuração 3 as instâncias foram representadas por matrizes de custos com os tempos previstos de deslocamento com veículo, em segundos, também obtidas da ferramenta de consulta cartográfica MapQuest (2015). Os valores analisados na Tabela 13 correspondem ao valor médio de 100 execuções dos algoritmos do custo da maior rota individual das melhores soluções, como nas duas configurações anteriores. Novamente a superioridade do STRBAS pode ser observada, pois ele foi inferior ao STACS em apenas uma das instâncias.

As Configurações 2 e 3 comprovam que a metodologia desenvolvida pode ser aplicada a custos que representem de forma mais fiel as instâncias do problema, inclusive com matrizes de custos assimétricas. Como toda a informação que quantifica a instância fica armazenada na matriz de custos, bastou a substituição dos custos dessa matriz para gerar uma nova representação das mesmas instâncias do problema, que foram corretamente otimizadas pelos algoritmos adaptados, como apresentado nas tabelas 12 e 13. Quanto à superioridade do STRBAS em relação ao STACS, além de uma seleção de parâmetros detalhada, é necessária a aplicação dos dois algoritmos sobre um conjunto maior de instâncias de MTSP, a fim de confirmar os resultados obtidos com as instâncias reais nesta experimentação.

## 5.7 COMPARAÇÃO COM AS ROTAS REAIS

Na Tabela 14 os custos das maiores rotas das equipes reais são comparados com a média das maiores rotas individuais obtidas pelo STRBAS, algoritmo que obteve melhor desempenho nos experimentos realizados.

**Tabela 14 – Comparação entre as rotas reais e a média das soluções de 100 execuções do STRBAS, para as três configurações: distâncias euclidianas, distâncias previstas e tempos previstos. Os valores correspondem ao custo da maior rota individual das soluções**

Dia	Solução Real			STRBAS			Melhoramento		
	euc.( $e_r$ )	dist.( $d_r$ )	tempo( $t_r$ )	euc.( $e_s$ )	dist.( $d_s$ )	tempo( $t_s$ )	$(e_r - e_s) / e_r \times 100$	$(d_r - d_s) / d_r \times 100$	$(t_r - t_s) / t_r \times 100$
3	22,37	32,14	4088	8,30	11,67	1527	62,89%	63,69%	62,64%
4	41,39	62,48	4188	33,89	50,80	3022	18,12%	18,69%	27,83%
5	84,36	112,55	7631	73,29	98,14	5656	13,12%	12,81%	25,88%
6	54,24	65,37	4859	39,47	43,82	2278	27,23%	32,96%	53,12%
7	51,15	70,80	5162	39,81	51,11	3018	22,17%	27,81%	41,52%
10	23,47	35,66	3913	8,32	12,04	1535	64,55%	66,24%	60,76%
11	18,61	25,97	3635	7,65	10,26	1290	58,90%	60,50%	64,52%
12	74,20	97,01	7420	60,80	77,64	4513	18,06%	19,97%	39,18%
13	23,05	35,31	4085	9,24	10,86	1340	59,91%	69,25%	67,20%
14	23,78	35,19	4023	7,86	11,40	1391	66,95%	67,61%	65,44%
15	133,77	169,97	10237	89,94	118,52	6935	32,76%	30,27%	32,26%
17	20,22	30,71	3743	8,72	14,91	1724	56,86%	51,45%	53,95%
18	24,05	35,43	4404	7,96	11,78	1496	66,91%	66,75%	66,02%
19	21,65	32,60	3213	11,64	13,85	1499	46,24%	57,51%	53,36%
20	23,83	40,97	3939	7,40	10,79	1241	68,94%	73,66%	68,50%
21	28,70	43,28	5009	7,91	11,49	1485	72,44%	73,45%	70,36%
22	108,06	251,60	15804	83,70	201,85	13034	22,54%	19,77%	17,53%
<b>Melhoramento médio:</b>							<b>34,88%</b>	<b>35,35%</b>	<b>44,43%</b>

Fonte: Autoria própria.

A partir do histórico da agência de atendimento foram obtidas as coordenadas de todos os serviços executados, o que possibilitou a construção de instâncias de MTSP representando os

17 dias de trabalho, que foram utilizadas nos experimentos. Analisando o horário de execução dos serviços disponível no histórico, também foi possível definir a sequência real dos atendimentos nos dias de trabalho, cujos custos das rotas calculados pelo protótipo com a utilização das matrizes de custos aplicadas nos experimentos servem de referência para a avaliação dos resultados obtidos pela metodologia proposta.

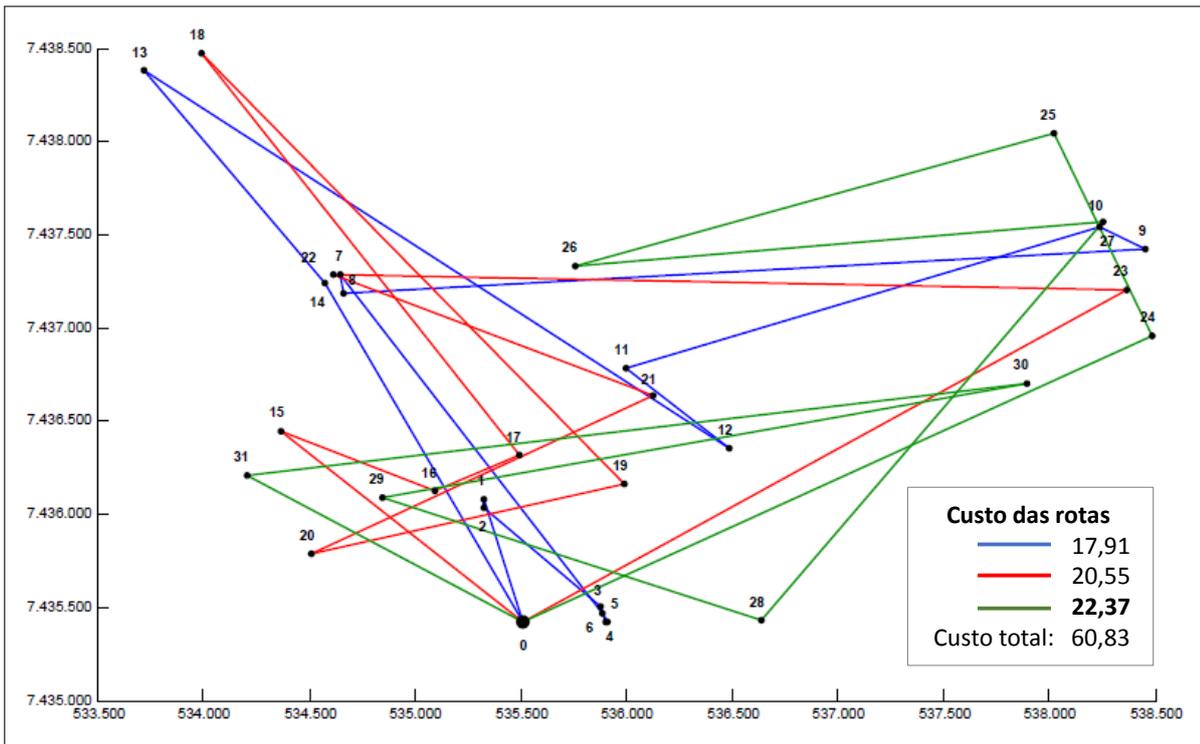
Pode ser verificado na Tabela 14 que o STRBAS gerou soluções com rotas individuais de 34,88% a 44,43% melhores que as rotas reais. Apesar de existirem fatores relevantes do problema real que ainda devem ser tratados pela metodologia, como por exemplo o surgimento de novos serviços durante o dia de trabalho das equipes, estes resultados iniciais comprovam que a ACO diminuiu consideravelmente os custos das rotas reais.

A fim de possibilitar uma comparação visual entre as rotas reais percorridas pelas equipes e as rotas criadas pelos algoritmos ACO desenvolvidos, a Figura 8 apresenta as rotas percorridas pelas equipes no dia de trabalho 3, considerando deslocamentos euclidianos; e na Figura 9 está representada a melhor solução gerada para este dia de trabalho, que foi retornada pelo STACS no Experimento 4, com a utilização de distâncias euclidianas.

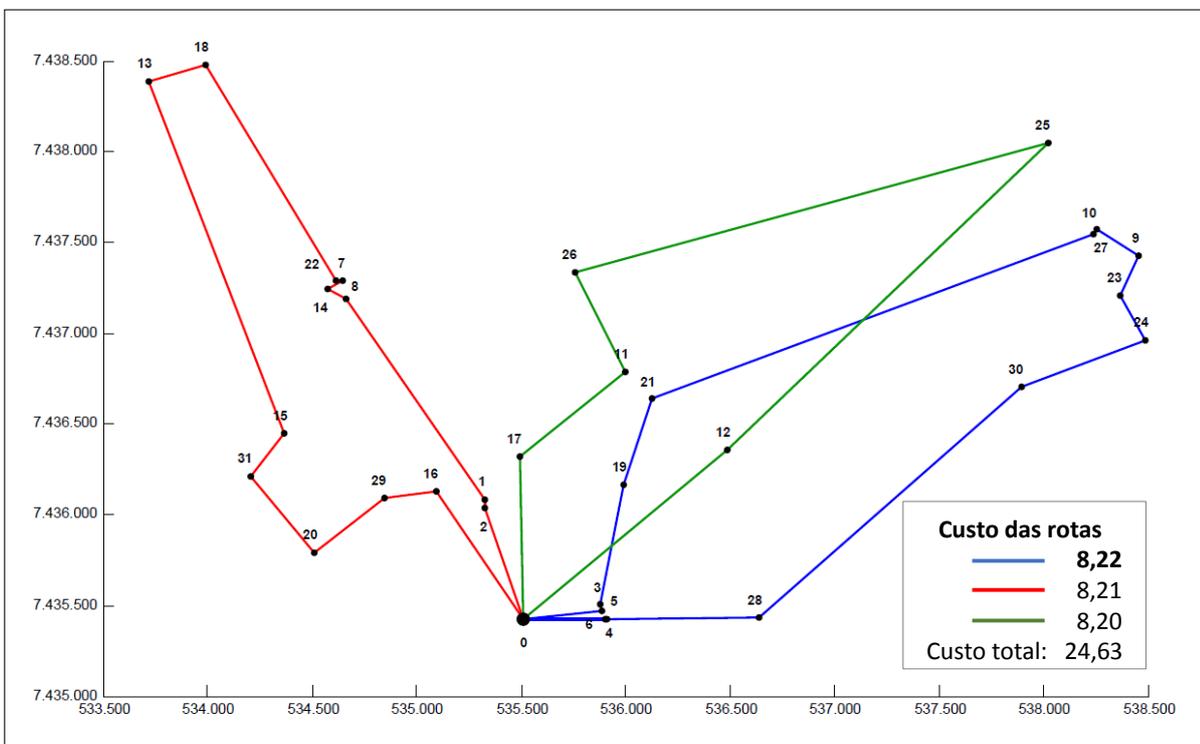
A partir da comparação entre as soluções das Figuras 8 e 9, é possível constatar que as rotas percorridas pelas equipes no método atual da empresa podem ser significativamente reduzidas pela metodologia desenvolvida. Além da redução do custo total das rotas, que representa economia para a empresa, a pequena diferença entre os custos das rotas individuais da solução da Figura 9 significa uma melhor distribuição entre a carga de trabalho das equipes, de forma que o momento final de execução do conjunto de serviços é adiantado, melhorando também o tempo de resposta às solicitações dos clientes.

## 5.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os experimentos apresentados neste capítulo comprovam que a metodologia desenvolvida é capaz de reduzir o deslocamento das equipes, melhorando o tempo de resposta às solicitações dos consumidores. Pelos resultados do Experimento 1 foi possível verificar que as soluções produzidas pelo STACS são melhores que as rotas reais percorridas pelas equipes, tanto minimizando o custo total das soluções quanto minimizando a maior rota individual das soluções MTSP (objetivo *minmax*). A análise destes resultados também apontaram que o objetivo *minmax* é mais adequado ao problema real. No Experimento 2 foi constatado que o STRBAS é capaz de criar soluções ainda melhores que o STACS. Ficou comprovada também a versatilidade da metodologia apresentada quanto ao algoritmo utilizado para otimização das instâncias de MTSP.



**Figura 8 – Rotas reais do dia de trabalho 3 considerando deslocamentos euclidianos**  
**Fonte: Autoria própria.**



**Figura 9 – Solução com menor custo da maior rota individual para o dia de trabalho 3 construída pelo STACS**  
**Fonte: Autoria própria.**

A inferência do parâmetro  $\beta$  no Experimento 3 informa que o melhor valor para este parâmetro, para as instâncias experimentadas e de acordo com o protocolo experimental, é igual a 1 tanto para o STACS quanto para o STRBAS. No Experimento 4 novamente ficou comprovada a versatilidade da metodologia proposta, agora em relação aos custos utilizados para representação do ambiente real do problema, já que os resultados obtidos para as instâncias representadas por matrizes de custos assimétricas foram equivalentes aos obtidos para as instâncias euclidianas.

Apesar dos resultados positivos obtidos com a metodologia desenvolvida para o Problema de Despacho Estático, uma questão relevante ainda precisa ser considerada sobre o ambiente do problema real. Nestes experimentos, todos os serviços e as posições das equipes são conhecidos antes da otimização. Na agência de atendimento em estudo, porém, serviços surgem durante o dia de trabalho das equipes e podem ter maior prioridade que outros, como os serviços emergenciais. Esta característica é tratada pela metodologia proposta para o despacho dinâmico, detalhada na Seção 4.2, cuja experimentação é apresentada no Capítulo 6.



## 6 EXPERIMENTOS COM O PROBLEMA DE DESPACHO DINÂMICO

Os experimentos descritos nesta seção avaliam a eficiência da metodologia desenvolvida para tratamento do Problema de Despacho Dinâmico, detalhada na Seção 4.2. A avaliação ocorre a partir de simulações de 17 dias de trabalho reais das equipes de atendimento, considerando o surgimento de novos serviços durante o dia de trabalho. Os resultados do Sistema de Despacho Dinâmico, que implementa a metodologia proposta, são comparados com as rotas reais das equipes e apontam que a metodologia proposta reduziu em média 17,18% a distância da maior rota individual das equipes e em média 15,48% a distância total percorrida.

Com o objetivo de confirmar que realmente as soluções geradas pelo algoritmo ACO estão reduzindo as distâncias percorridas pelas equipes, os resultados do SDD também foram comparados com os obtidos por uma abordagem aplicando a regra do vizinho mais próximo às instâncias, na qual o próximo serviço que uma equipe recebe quando informa sua disponibilidade é o que esteja mais próximo da sua posição atual. Comparadas com as soluções geradas pelo algoritmo do vizinho mais próximo, o SDD reduziu em média 19,59% a distância da maior rota individual e em média 24,32% a distância total, comprovando que a metodologia proposta é superior ao método no qual os serviços são despachados exclusivamente considerando a posição das equipes.

### 6.1 DESCRIÇÃO DA BASE DE DADOS

Novas informações da base de dados descrita na Seção 5.1 foram consideradas. Além das coordenadas dos serviços e das rotas reais das equipes, foram extraídas dos relatórios da agência de atendimento mais três informações de cada serviço: o tipo do serviço (comercial ou emergencial); o horário real de despacho do serviço à equipe; e o tempo de execução do serviço, que foi o tempo gasto pela equipe desde a sua chegada na posição de execução do serviço atual até o início de seu deslocamento para o próximo. Estas informações são utilizadas para a definição de custos temporais para as rotas, que são necessários para determinar as posições correntes das equipes quando um novo serviço emergencial surge.

A Tabela 15 representa os dados dos serviços executados no dia 03 de fevereiro de 2014, um dos 17 dias que compõem a base de dados reais. O primeiro atributo, **id**, é um inteiro para identificação do serviço. O atributo **tipo** informa se trata-se de um serviço comercial (C) ou emergencial (E). O atributo **data/hora de despacho** informa o momento em que o serviço foi despachado para uma equipe no dia de atendimento real. Os serviços cujo dia de despacho

é anterior ao dia atual são aqueles que já foram despachados a uma equipe anteriormente mas devido a algum fator, como o término da jornada de trabalho das equipes, não puderam ser atendidos ainda e retornaram ao conjunto de serviços a despachar.

**Tabela 15 – Serviços executados no município de Cornélio Procópio, Paraná, no dia 3 de fevereiro de 2014**

<b>Id</b>	<b>Tipo</b>	<b>Data/hora de despacho</b>	<b>Data/hora de término da execução</b>	<b>Tempo de execução (minutos)</b>	<b>Coord. UTM X</b>	<b>Coord. UTM Y</b>	<b>Equipe</b>	<b>Rotas reais</b>
1	C	30/01/14 13:46	03/02/14 08:47	7	535324	7436084	A	1
2	C	29/01/14 17:10	03/02/14 09:32	7	535325	7436040	A	2
3	C	29/01/14 11:06	03/02/14 09:48	6	535878	7435503	A	3
4	C	31/01/14 16:48	03/02/14 09:56	6	535905	7435428	A	4
5	C	31/01/14 16:48	03/02/14 10:06	6	535908	7435428	A	5
6	C	31/01/14 16:48	03/02/14 10:17	7	535885	7435468	A	6
7	C	31/01/14 16:31	03/02/14 11:10	29	534650	7437293	A	7
8	C	30/01/14 14:56	03/02/14 11:22	6	534663	7437186	A	8
9	C	03/02/14 08:20	03/02/14 14:45	45	538453	7437423	A	9
10	C	03/02/14 09:38	03/02/14 15:00	10	538237	7437542	A	10
11	C	31/01/14 15:31	03/02/14 15:18	6	536003	7436790	A	11
12	C	03/02/14 11:07	03/02/14 15:36	6	536489	7436359	A	12
13	C	03/02/14 08:20	03/02/14 16:07	5	533721	7438390	A	13
14	C	03/02/14 11:09	03/02/14 17:04	34	534579	7437244	A	14
15	C	31/01/14 17:14	03/02/14 08:49	21	534370	7436445	B	1
16	C	31/01/14 15:26	03/02/14 09:02	2	535092	7436131	B	2
17	E	03/02/14 09:34	03/02/14 10:42	52	535494	7436324	B	3
18	C	03/02/14 08:20	03/02/14 11:05	11	533994	7438474	B	4
19	E	03/02/14 11:03	03/02/14 11:34	14	535993	7436168	B	5
20	E	03/02/14 13:34	03/02/14 15:31	81	534515	7435792	B	6
21	E	03/02/14 13:52	03/02/14 16:45	60	536128	7436636	B	7
22	C	03/02/14 11:21	03/02/14 17:02	4	534612	7437285	B	8
23	C	03/02/14 09:14	03/02/14 17:32	15	538366	7437208	B	9
24	E	03/02/14 09:34	03/02/14 10:18	28	538490	7436960	C	1
25	C	27/01/14 16:29	03/02/14 10:27	7	538020	7438044	C	2
26	C	01/02/14 11:13	03/02/14 11:03	28	535756	7437336	C	3
27	C	03/02/14 08:20	03/02/14 15:30	20	538258	7437570	C	4
28	C	27/01/14 09:39	03/02/14 16:25	45	536643	7435434	C	5
29	C	31/01/14 09:40	03/02/14 16:51	6	534846	7436091	C	6
30	C	03/02/14 15:13	03/02/14 17:13	7	537892	7436707	C	7
31	E	03/02/14 17:30	03/02/14 18:40	20	534204	7436211	C	8

**Fonte: COPEL Distribuição.**

O atributo **data/hora de término da execução** informa o momento em que a equipe designada concluiu o serviço no dia de trabalho real. Este atributo permitiu determinar a sequência em que os serviços foram atendidos pelas equipes, possibilitando o cálculo dos custos das rotas reais, que serão utilizados para comparação com os resultados obtidos. Pode inclusive ser verificado que a Tabela 15 está ordenada de acordo com este atributo. O atributo **tempo**

**de execução** corresponde ao tempo gasto pela equipe desde o momento em que chegou ao local de execução de um serviço até o momento em que iniciou o deslocamento para o próximo atendimento. Esta informação foi utilizada para calcular custos temporais para as rotas das equipes. Os próximos atributos da tabela apresentam as coordenadas UTM que definem a posição geográfica de execução do serviço, em geral correspondendo ao endereço do consumidor que gerou a solicitação.

O atributo **equipe** informa para qual equipe disponível no dia de trabalho o serviço foi despachado. No dia em análise havia três equipes em serviço, identificadas como A, B e C. O atributo **rotas reais** apresenta a sequência em que os serviços foram executadas por cada uma das equipes, o que foi determinado pelo atributo **data/hora de término da execução**. Estes dois últimos atributos representam os resultados a serem otimizados com a metodologia desenvolvida: distribuir os serviços entre as equipes e definir suas rotas de atendimento.

## 6.2 DETALHES EXPERIMENTAIS

Para realização desta experimentação foi necessária a implementação de uma rotina denominada Simulador, que está representada no Algoritmo 4.

---

### Algoritmo 4: Simulador

---

**Entrada:** Histórico de atendimento comercial e emergencial  
**Saída:** Resultados das simulações de cada dia de trabalho

```

1 Início
2   Enquanto houver dias de trabalho na base de dados faça
3      $D \leftarrow$  próximo dia a ser simulado;
4      $S \leftarrow$  todos os serviços executados em  $D$ ;
5     Inicialize o  $SDD$ ;
6     Enquanto houver serviços em  $S$  faça
7        $proximo\_serviço \leftarrow$  serviço em  $S$  com menor horario_despacho;
8       Envie  $proximo\_serviço$  para o  $SDD$ ;
9       Retire  $proximo\_serviço$  do conjunto  $S$ ;
10    Fim
11     $solucao\_dia\_de\_trabalho \leftarrow$  despachos realizados pelo  $SDD$ ;
12    Finalize o  $SDD$ ;
13    Retorne  $solucao\_dia\_de\_trabalho$ ;
14  Fim
15 Fim

```

---

**Fonte:** Autoria própria.

Conforme detalhado na Seção 4.2, o SDD recebe como entrada os serviços à medida que surgem durante o dia de trabalho e os despacha, um a um, à medida que as equipes informam que estão disponíveis, de acordo com uma solução MTSP gerada por um algoritmo ACO para uma instância formada a partir dos serviços já conhecidos; exceto as emergências, que

são despachadas assim que surgem à equipe que se encontre mais próxima de sua posição de execução.

A partir do horário de despacho real dos serviços obtido da base de dados, os dias de trabalho das equipes foram simulados com o auxílio do Simulador, que lê as informações sobre os serviços na base e as envia ao SDD de acordo com sua hora de despacho real, simulando os dias de trabalho um a um. A entrada do Simulador é o arquivo de texto contendo as informações sobre todos os serviços executados em 17 dias de trabalho da agência real. Uma de suas funções é separar os serviços da base de dados de acordo com seu dia de execução, pois para cada dia foram realizadas simulações independentes. Após separar os serviços de um dos dias da base, o Simulador inicializa o SDD.

A próxima tarefa do Simulador é ordenar os serviços do dia atual de acordo com o seu horário de despacho, do mais antigo para o mais novo. Em seguida, os serviços vão sendo enviados para o SDD um a um, como ocorre em um dia de trabalho normal. Quando não existem mais serviços a serem despachados, o Simulador finaliza o SDD, que por sua vez salva em arquivo as rotas completas criadas para todas as equipes em serviço no dia. Em seguida, o Simulador carrega os serviços do próximo dia de trabalho, executando uma nova simulação dinâmica. Todo este processo se repete até que não haja mais dias de trabalho a serem simulados na base de dados.

### 6.3 PROTOCOLO EXPERIMENTAL

O SDD e o Simulador foram implementados no protótipo desenvolvido. Para cada dia de trabalho, foram realizadas 100 simulações. Os valores analisados são os custos das maiores rotas individuais dos dias de trabalho. Em cada simulação é utilizada uma semente randômica diferente, que fica armazenada no arquivo de *log* do experimento para possibilitar sua replicação. De cada simulação também são armazenadas toda a configuração do protótipo, incluindo os parâmetros do algoritmo ACO, além da melhor solução encontrada para todo o dia de trabalho, que corresponde a uma solução MTSP com único depósito e rotas fechadas.

O computador utilizado é o mesmo descrito na Seção 5.2. De acordo com o resultados obtidos com o problema estático, o algoritmo ACO utilizado para otimização das instâncias de MTSP é o STRBAS, com o parâmetro  $\beta = 1$ . Os demais parâmetros são:  $\alpha = 1$ ,  $\rho = 0.1$  e  $w = 6$ . O tamanho da lista de candidatos é igual a 20. Foram geradas  $N = n$  soluções a cada ciclo, onde  $n$  corresponde ao número total de pontos da instância de MTSP, incluindo o depósito.

Os custos utilizados para representação das instâncias reais foram as distâncias previstas de deslocamento com veículo entre os pontos, obtidas de MapQuest (2015). O algoritmo ACO foi configurado para minimização do custo da maior rota individual das soluções. O critério de parada foi de 1.000 ciclos a cada vez que o STRBAS foi acionado durante as simulações.

### 6.3.1 Custos temporais das rotas parciais

Para determinar as posições das equipes quando o SDD despacha um serviço emergencial, foram calculados custos temporais parciais para as rotas das equipes durante as simulações. Os tempos de deslocamento com veículo previstos entre os pontos das instâncias foram obtidos através da ferramenta de consulta cartográfica MapQuest (2015). Além do tempo de deslocamento, quando uma equipe conclui um serviço também é adicionado o tempo de execução real do serviço, extraído da base de dados, à rota temporal da equipe.

Ao realizar o cálculo dos custos temporais para as rotas reais das equipes conforme descrito, os custos obtidos para as rotas foram significativamente inferiores ao período normal de trabalho das equipes, de 8 horas diárias. Isto se deve ao fato de que nesta experimentação não estão sendo considerados os intervalos que ocorrem nos turnos de trabalho das equipes, comuns no ambiente real. Os intervalos consistem em períodos de almoço e café, entre outras necessidades das equipes e da empresa. Incluem-se a esses intervalos inclusive o tempo gasto pelas equipes para elaboração de sua rota. É comum uma equipe, após concluir um serviço, gastar um tempo considerável analisando os outros serviços que lhe foram despachados tentando identificar qual deles é o melhor a ser executado a seguir.

Como os custos temporais das rotas reais calculadas se mostraram inferiores ao período real de trabalho das equipes, a utilização do horário real de despacho dos serviços nas simulações se mostrou inviável: as equipes executavam todos ou quase todos os serviços antes do surgimento do próximo, deixando de representar corretamente o ambiente do problema em estudo. A solução adotada para as simulações foi a redefinição do horário de despacho dos serviços. Para esta redefinição, foi considerado o custo temporal parcial da rota real da equipe no momento em que ela começa se deslocar para o serviço. Quando uma equipe inicia o deslocamento para um serviço significa que o serviço já foi despachado para ela, o que valida a redefinição do horário de despacho para a realização das simulações. Os serviços que já eram conhecidos antes do início do dia de trabalho não tiveram seus tempos de despacho redefinidos por ser irrelevante ao experimento.

### 6.3.2 Solução aplicando a regra do vizinho mais próximo

Utilizando o SDD, quando um novo serviço comercial surge, ele é adicionado ao conjunto de serviços a executar. Em seguida, é verificado o número de elementos desse conjunto. Se o número de serviços for maior que o número de equipes, uma nova solução MTSP é gerada para orientar o despacho. Esta solução é referente a uma nova instância, na qual foi inserida o novo serviço que acabou de surgir e foram excluídos os já executados. Esta nova instância também tem os pontos iniciais das rotas alterados, já que as equipes provavelmente já não se encontram mais nas mesmas posições da instância anterior.

Mas, e se ao invés de geração de uma solução de MTSP para orientar os despachos, as equipes recebessem o serviço mais próximo da sua posição atual, quando ficarem disponíveis? Para verificar se o algoritmo de otimização pode gerar soluções mais eficientes que uma abordagem do vizinho mais próximo, foi realizada esta simulação para calcular os custos utilizando este segundo método, que serão comparados com os custos das soluções do SDD.

Para a criação da solução utilizando a abordagem do vizinho mais próximo, a cada novo serviço recebido pelo SDD enviado pelo Simulador, este foi incluído no conjunto de serviços a executar, como também ocorre no método desenvolvido. Porém, ao invés de ser utilizada uma solução MTSP para definir qual serviço deve ser despachado a uma equipe que ficou livre, o serviço despachado é aquele que, dentre todo o conjunto de serviços a executar, for o mais próximo da posição atual da equipe que ficou disponível. Os custos obtidos por esse algoritmo determinístico, utilizando as distâncias reais previstas, são comparados com os resultados médios do SDD na Seção 6.4.

## 6.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 16 estão apresentados os custos obtidos para as soluções reais, ou seja, o conjunto de  $m$  rotas percorridas pelas equipes em cada dia de trabalho. Estas soluções foram calculadas utilizando as matrizes de custo com as distâncias previstas de deslocamento com veículo entre os pontos, as mesmas utilizadas nas simulações. São analisados os custos totais das soluções e os custos das maiores rotas individuais das soluções, em quilômetros. Além dos custos das rotas reais, estão apresentados os custos médios e os desvios padrão obtidos por 100 simulações utilizando o SDD para despachar os serviços para as equipes.

Nas duas últimas colunas da Tabela 16 pode ser verificado que o SDD reduziu os custos das rotas reais de todas as instâncias simuladas, tanto a distância total quanto a distância da maior rota individual. O melhoramento médio, calculado a partir do quanto os custos das

**Tabela 16 – Melhoria das soluções reais com a aplicação do SDD**

Dia	Solução Real		Médias de 100 simulações do SDD				Melhoramento	
	Custo Total ( $CT_r$ )	Maior Rota ( $MR_r$ )	Custo Total ( $CT_p$ )	d. p.	Maior Rota ( $MR_p$ )	d. p.	Custo Total ( $CT_r - CT_p$ )	Maior Rota ( $MR_r - MR_p$ )
3	89,35	32,14	56,60	1,86	24,75	1,33	32,75	7,39
4	128,50	62,48	104,88	3,17	59,08	4,02	23,62	3,40
5	188,60	112,55	157,77	4,00	111,52	3,75	30,82	1,03
6	156,97	65,37	121,95	7,59	42,76	1,56	35,03	22,60
7	158,13	70,80	126,45	3,20	63,27	3,07	31,68	7,52
10	100,31	35,66	59,11	3,52	22,93	2,42	41,20	12,73
11	71,30	25,97	54,92	4,07	19,43	2,67	16,38	6,54
12	252,61	97,01	234,31	7,34	87,95	2,72	18,30	9,07
13	83,34	35,31	54,41	2,76	22,77	3,02	28,94	12,54
14	98,41	35,19	63,10	4,87	22,05	3,22	35,30	13,14
15	178,45	169,97	178,45	0,00	169,97	0,00	0,00	0,00
17	57,89	30,71	45,58	1,52	25,92	1,51	12,31	4,79
18	105,35	35,43	58,85	3,26	19,58	2,06	46,50	15,85
19	90,15	32,60	70,28	4,11	28,94	3,95	19,87	3,66
20	100,44	40,97	62,00	3,38	22,22	3,62	38,45	18,75
21	103,06	43,28	69,08	3,49	24,56	3,29	33,98	18,71
22	304,40	251,60	398,45	0,00	207,15	0,00	-94,05	44,45
<b>Totais</b>	<b>2267,26</b>	<b>1177,04</b>	<b>1916,19</b>		<b>974,86</b>		<b>351,07</b>	<b>202,19</b>

Fonte: Autoria própria.

rotas reais foram reduzidos nos 17 dias, é igual a 15,48% para o custo total e 17,18% para o custo da maior rota individual, comprovando que o SDD pode reduzir significativamente as distâncias percorridas pelas equipes no método manual de despacho de serviços

Na Tabela 17 os resultados médios das 100 simulações com o SDD são comparados com os custos da solução determinística criada aplicando a regra do vizinho mais próximo na simulação: quando uma equipe fica livre durante o dia de trabalho, o serviço que lhe é designado é o que se localize mais próximo de sua posição atual. O objetivo é verificar se as soluções ACO utilizadas pelo SDD estão realmente sendo úteis para definição dos melhores despachos.

O melhoramento médio do SDD em relação à solução do vizinho mais próximo é igual a 24,32% para o custo total e 19,59% para o custo da maior rota individual. Estes resultados comprovam que o algoritmo ACO utilizado para otimização das instâncias formadas por serviços a executar está sendo realmente eficaz, ao despachar os serviços de forma mais eficiente do que caso seja aplicada a regra de despachar o serviço mais próximo da equipe disponível, que aparentava ser uma boa solução para o problema de despacho dinâmico.

**Tabela 17 – Comparação entre as soluções geradas utilizando a regra do vizinho mais próximo e as geradas pelo SDD**

Dia	Vizinho mais próx.		Médias de 100 simulações do SDD				Melhoramento	
	Custo Total ( $CT_r$ )	Maior Rota ( $MR_r$ )	Custo Total ( $CT_p$ )	d. p.	Maior Rota ( $MR_p$ )	d. p.	Custo Total ( $CT_r - CT_p$ )	Maior Rota ( $MR_r - MR_p$ )
3	100,06	43,04	56,60	1,86	24,75	1,33	43,46	18,29
4	117,43	69,49	104,88	3,17	59,08	4,02	12,55	10,41
5	181,19	104,27	157,77	4,00	111,52	3,75	23,42	-7,25
6	194,75	69,37	121,95	7,59	42,76	1,56	72,80	26,61
7	133,76	67,47	126,45	3,20	63,27	3,07	7,31	4,20
10	74,61	29,53	59,11	3,52	22,93	2,42	15,50	6,60
11	78,88	28,45	54,92	4,07	19,43	2,67	23,96	9,02
12	295,66	108,65	234,31	7,34	87,95	2,72	61,35	20,70
13	71,11	29,19	54,41	2,76	22,77	3,02	16,70	6,42
14	100,95	38,84	63,10	4,87	22,05	3,22	37,85	16,79
15	367,63	195,79	178,45	0,00	169,97	0,00	189,18	25,82
17	61,34	32,07	45,58	1,52	25,92	1,51	15,76	6,15
18	81,68	30,33	58,85	3,26	19,58	2,06	22,83	10,75
19	90,67	25,79	70,28	4,11	28,94	3,95	20,39	-3,15
20	84,63	31,50	62,00	3,38	22,22	3,62	22,63	9,28
21	96,19	39,42	69,08	3,49	24,56	3,29	27,11	14,86
22	401,39	269,19	398,45	0,00	207,15	0,00	2,94	62,04
<b>Totais</b>	<b>2531,93</b>	<b>1212,39</b>	<b>1916,19</b>		<b>974,86</b>		<b>615,74</b>	<b>237,53</b>

Fonte: Autoria própria.

## 6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Assim como no método para o problema estático, o SDD despacha os serviços de acordo com uma solução otimizada para uma instância de MTSP construída pelo algoritmo baseado na ACO. Porém, ao contrário do método estático, no qual todos os serviços poderiam ser designados juntos às equipes, o SDD despacha os serviços um a um, à medida que as equipes ficam livres, para considerar o surgimento de novos serviços. O objetivo dos experimentos deste capítulo foi verificar se o despacho orientado pelo SDD, que utiliza soluções globais, é mais eficiente que o método atual, realizado manualmente; e mais eficiente que a aplicação da regra do vizinho mais próximo, que considera apenas uma solução local.

Os resultados das simulações comprovam que o SDD é mais eficiente que o método manual e que o método aplicando a regra do vizinho mais próximo para realização do despacho dinâmico de serviços. Isto se deve ao fato de que as soluções geradas pelo algoritmo ACO consideram as posições de todos os serviços e de todas as equipes, representadas na instância de MTSP, alcançando uma representação global do problema, e não uma visão parcial como a dos dois outros métodos.

## 7 CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho foi investigar uma metodologia computacional para melhorar o método atual de despacho de serviços comerciais e emergenciais numa empresa de distribuição de energia elétrica. O problema foi tratado em duas etapas: (i) Problema de Despacho Estático; (ii) Problema de Despacho Dinâmico. No Problema de Despacho Estático todos os serviços são conhecidos antes do início do dia de trabalho, enquanto que no Problema de Despacho Dinâmico novos serviços surgem durante o dia e podem ser emergenciais, devendo ser atendidos o mais rapidamente possível.

Conforme verificado durante a análise do campo de estudo, a grande quantidade de informação disponível não é aproveitada de forma eficiente devido ao método manual, pois é difícil para o técnico analisar a posição de todos os serviços antes de realizar os despachos. A fim de aprimorar a utilização destas informações, para o tratamento do Problema de Despacho Estático foram construídas instâncias de MTSP representando os dias de trabalho das equipes, a partir das coordenadas geográficas das posições de execução dos serviços.

O MTSP foi escolhido porque as soluções geradas, além de distribuir os serviços entre as equipes, também podem ser utilizadas para definir as rotas a serem percorridas pelas mesmas. Além disso, como toda a representação do problema fica concentrada na matriz de custos da instância de MTSP, basta a substituição desta matriz para a representação de outra instância. Dessa forma, a metodologia desenvolvida pode ser aplicada a qualquer conjunto de serviços, independentemente da área de atendimento; e também diferentes custos podem ser utilizados para representar os deslocamentos entre os serviços de uma mesma área de atendimento, como distâncias euclidianas, distâncias previstas de deslocamento com veículo ou tempos previstos de deslocamento, disponíveis em ferramentas como o MapQuest (2015). Dessa forma, a flexibilidade quanto à área de atendimento e quanto aos custos para representação dos deslocamentos eram objetivos que também foram alcançados por esse trabalho, de forma a tornar a metodologia aplicável a outras agências de atendimento.

Para criação de soluções para as instâncias de MTSP, foram aplicados algoritmos baseados na ACO. Os primeiros experimentos para avaliação da metodologia desenvolvida aplicada ao problema estático foram publicados em Barbosa, Silla Jr e Kashiwabara (2015), nos quais foram construídas 17 instâncias de MTSP a partir de dados reais do histórico de uma agência de atendimento, cada uma representando um dia de trabalho. Nestes experimentos, houve uma redução média de 42,23% da distância total percorrida pelas equipes quando minimizando o custo total das soluções MTSP; e uma redução média de 19,84% da distância percorrida pela

equipe que mais se deslocou em cada dia, quando minimizando a maior rota individual das soluções. A redução do custo da maior rota individual de um dia de trabalho significa que as rotas das equipes tiveram custos equilibrados, de forma que todo o conjunto de serviços foi executado num intervalo de tempo menor, melhorando a qualidade do atendimento da empresa de distribuição.

Para o Problema de Despacho Dinâmico foi desenvolvido o protótipo de uma aplicação que determina os despachos a serem realizados durante o dia de trabalho. A aplicação foi denominada Sistema de Despacho Dinâmico (SDD) e funciona a partir da utilização das soluções criadas pela metodologia estática para definir os despachos enquanto não surgirem novos serviços. As simulações de dias de trabalho reais mostraram que o SDD foi em média 17,18% mais eficiente que o método atual de despacho quando analisando o custo da maior rota individual das equipes; e em média 19,59% melhor que uma abordagem aplicando a regra do vizinho mais próximo para definição dos despachos.

De forma geral, os resultados da experimentação com dados reais mostraram que as metodologias propostas para o despacho estático e para o despacho dinâmico reduziram significativamente a maior rota individual dos dias de trabalho, em comparação com as rotas reais. Esta redução implica numa antecipação do instante final do atendimento do conjunto de serviços, melhorando o tempo médio de resposta às solicitações dos clientes. Estes resultados indicam que as metodologias desenvolvidas cumprem o objetivo geral desta pesquisa de propor uma solução para melhorar o método atual de despachos de serviços da empresa.

## 7.1 CONTRIBUIÇÃO ACADÊMICA

Além das metodologias para os Problemas de Despacho Estático e Dinâmico, o desenvolvimento deste trabalho possibilitou a exploração da aplicação da ACO ao MTSP, um campo ainda pouco estudado, de acordo com as referências da Seção 3.5.

O algoritmo ACO para MTSP geral apresentado na seção 4.1.1 e o protótipo que o implementa são algumas das principais contribuições deste trabalho. A partir deste algoritmo geral, duas variações da ACO originalmente aplicadas ao TSP, foram adaptadas para o MTSP: o algoritmo STRBAS (*Single Team Rank-Based Ant System*) é a adaptação do RBAS (*Rank-Based Ant System*) e o STACS (*Single Team Ant Colony System*) é a adaptação do ACS (*Ant Colony System*) para MTSP. Nos experimentos apresentados nesta dissertação o STRBAS obteve melhores resultados que o STACS, para as instâncias reais utilizadas e executando o mesmo número de ciclos.

A partir do algoritmo ACO para MTSP geral e do protótipo desenvolvido, outras variações da ACO podem ser aplicadas ao MTSP para comparação de desempenho, além de outras estratégias, como combinações de métodos entre diferentes algoritmos ACO e seleções de parâmetros detalhadas, entre eles o número de ciclos dos algoritmos. A inferência do parâmetro  $\beta$  realizada no Experimento 3, Seção 5.5 sugere que o desempenho dos algoritmos pode ser melhorado com uma seleção mais abrangente, com diferentes combinações de parâmetros e regras. A fim de estender esta tarefa a outros pesquisadores interessados, o protótipo desenvolvido e os dados reais utilizados encontram-se disponíveis em <https://github.com/denilsonfag/STACS>.

## 7.2 TRABALHOS FUTUROS

Quanto ao problema real, mais características ainda podem ser consideradas para aprimoramento da metodologia desenvolvida. A definição de prioridades entre serviços do mesmo tipo, comerciais e emergenciais, por exemplo, possibilitaria que mais serviços fossem atendidos dentro do prazo, melhorando ainda mais a qualidade do serviço prestado pelas empresas de distribuição de energia elétrica. Estas prioridades podem ser inseridas durante a montagem das matrizes de custos das instâncias de MTSP, que continuariam sendo otimizadas pelas metodologias apresentadas nesta dissertação.

Quanto à aplicação da ACO ao MTSP, várias configurações diferentes ainda podem ser testadas a fim de se alcançar o máximo desempenho do algoritmo ACO para MTSP geral apresentado neste trabalho. Nesta linha, os próximos passos da pesquisa são a implementação de outras regras da ACO originalmente aplicada ao TSP e a realização de experimentos comparando estatisticamente os resultados das diferentes combinações de regras e parâmetros.



## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 414/2010**. 2010. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>>. Acesso em: 23 jan. 2015.
- **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8: Qualidade de Energia Elétrica**. 2014. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Módulo8\\_Revisão\\_6\\_Retificação\\_1.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Módulo8_Revisão_6_Retificação_1.pdf)>. Acesso em: 25 mar. 2015.
- **Perdas de Energia**. 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=801>>. Acesso em: 04 ago. 2015.
- AHMADI, Samad; OSMAN, Ibrahim H. Greedy random adaptive memory programming search for the capacitated clustering problem. **European Journal of Operational Research**, v. 162, n. 1, p. 30–44, abr. 2005.
- AMORIM, Mauro L. F. **Otimização de atendimentos de emergência em redes de distribuição de energia elétrica**. 2010. 92 f. Dissertação (Mestrado em Computação Científica e Sistemas de Potência) — Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2010.
- ARYA, Varunika; GOYAL, Amit; JAISWAL, Vibhuti. An optimal solution to multiple travelling salesperson problem using modified genetic algorithm. **International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management**, v. 3, n. 1, p. 425–430, jan. 2014.
- AUGUSTINE, John E. **Offline and online variants of the traveling salesman problem**. 2002. 66 f. Dissertação (Master of Science in Electrical Engineering) — Department of Electrical and Computer Engineering, Louisiana State University, Baton Rouge, 2002.
- BARBOSA, Denilson F.; SILLA JR, Carlos N.; KASHIWABARA, André Y. Aplicação da otimização por colônia de formigas ao problema de múltiplos caixeiros viajantes no atendimento de ordens de serviço nas empresas de distribuição de energia elétrica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO, 11., 2015, Goiânia. **Anais...** Goiânia: Instituto de Informática da Universidade Federal de Goiás, 2015. v. 1, p. 23–30.
- BEKTAS, Tolga. The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures. **Omega**, v. 34, n. 3, p. 209–219, jun. 2006.
- BROWN, Evelyn C.; RAGSDALE, Cliff T.; CARTER, Arthur E. A grouping genetic algorithm for the multiple traveling salesperson problem. **International Journal of Information Technology & Decision Making**, v. 6, n. 2, p. 333–347, jun. 2007.
- BULLNHEIMER, Bernd; HART, Richard F.; STRAUB, Christine. A New Rank-Based Version of the Ant System: A Computational Study. **Central European Journal of Operations Research and Economics**, v. 7, n. 1, p. 25–38, 1999.
- CARTER, Arthur E.; RAGSDALE, Cliff T. A new approach to solving the multiple traveling salesperson problem using genetic algorithms. **European Journal of Operational Research**, v. 175, n. 1, p. 246–257, 2006.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. **História da Copel**. 2015. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2F0%2F6505401715872FAA032573FA0069734F>>. Acesso em: 07 set. 2015.

COSTA, Clarice E. S.; COSTA, Deise M. B.; GOES, Anderson R. T. Determinação de setores de atendimento em uma concessionária de energia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 38., 2006, Goiânia. **Anais...** Goiânia: Universidade Católica de Goiás, 2006. p. 951–962.

COSTA, Yasel J.; ABREU, René; COELLO, Norge I.; NOWÉ, Ann. Multi-type ant colony system for solving the multiple traveling salesman problem. **Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia**, v. 35, n. 3, p. 311–320, 2012.

DORIGO, Marco; GAMBARDILLA, Luca M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 1, n. 1, p. 53–66, 1997.

DORIGO, Marco; MANIEZZO, Vittorio; COLORNI, Alberto. The Ant System: optimization by a colony of cooperating agents. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v. 26, n. 1, p. 29–41, 1996.

DORIGO, Marco; STUTZLE, Thomas. **Ant Colony Optimization**. Cambridge: The MIT Press, 2004.

GARCIA, Vinícius J.; BASSI, Olinto A.; DHEIN, Guilherme; BERNARDON, Daniel P.; CARDOSO JR, Ghendy. Problema de roteamento de veículos para atendimento de ordens emergenciais em concessionária de distribuição de energia elétrica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 2012, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Congresso Latino-Iberoamericano de Investigación Operativa, 2012. p. 1222–1231.

GARCIA, Vinícius J.; BERNARDON, Daniel P.; SPERANDIO, Maurício; LOSER, Gilson; VALE, Cléverton; FERNANDES, James. Gestão estratégica das ordens de serviço: uma abordagem para despacho centralizado. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 19., 2010, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Engenheiros Eletricistas, 2010a. p. 1–8.

GARCIA, Vinícius J.; BERNARDON, Daniel P.; SPERANDIO, Maurício; VALE, Cleverton; FERNANDES, James. Service order dispatching in electric utilities. In: INTERNATIONAL UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE, 45., 2010, Cardiff. **Proceedings...** Cardiff: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2010b. p. 1–7.

GHAFURIAN, Soheil; JAVADIAN, Nikbakhsh. An ant colony algorithm for solving fixed destination multi-depot multiple traveling salesmen problems. **Applied Soft Computing**, v. 11, n. 1, p. 1256–1262, 2011.

GOEL, Asvin; MEISEL, Frank. Workforce routing and scheduling for electricity network maintenance with downtime minimization. **European Journal of Operational Research**, v. 231, n. 1, p. 210–228, 2013.

GOMES, Francisco R. A.; PRATA, Bruno A.; BARROSO, Giovani C.; ARRUDA, João 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: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 28., 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia de Produção, 2008. p. 1–13.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Caderno Estatístico do Município de Cornélio Procópio**. 2014. Disponível em: <<http://www.ipardes.gov.br/cadernos/MontaCadPdf1.php?Municipio=86300>>. Acesso em: 28 dez. 2014.

JUNJIE, Pan; DINGWEI, Wang. An ant colony optimization algorithm for multiple traveling salesman problem. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION AND CONTROL, 1., 2006, Beijing. **Proceedings...** Beijing: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2006. p. 210–213.

KANDA, Jorge Y. Sistema de meta-aprendizado para a seleção de meta-heurísticas para o problema do caixeiro viajante. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO, 10., 2014, Londrina. **Anais...** Londrina: Universidade Estadual de Londrina, 2014. p. 651–662.

LEÃO, Ruth P. S. **GTD: Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2011.

LIU, Weimin; LI, Sujian; ZHAO, Fanggeng. An ant colony optimization algorithm for the multiple traveling salesmen problem. In: IEEE CONFERENCE ON INDUSTRIAL ELECTRONICS AND APPLICATIONS, 4., 2009, Xi'an. **Proceedings...** Xi'an: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2009a. p. 1533–1537.

LIU, Weimin; LI, Sujian; ZHENG, Aiyun; ZHAO, Fanggeng. Tobacco distribution vehicle routing program and the resolving method. In: CHINESE CONTROL AND DECISION CONFERENCE, 2009, Guilin. **Proceedings...** Guilin: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2009b. p. 5172–5175.

MACHADO JR, Dirceu M.; DAL SANTO, Mariane A.; LOCH, Carlos. Considerações acerca de trabalhos em áreas de divisa de fusos UTM. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO, 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2004. p. 1–14.

MAGRO, Magda A. de B. **Dimensionamento de equipes baseado em modelos de previsão, simulação e alocação: caso de uma empresa do setor elétrico**. 2003. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

MAPQUEST. **MapQuest Maps - Driving Directions**. 2015. Disponível em: <<http://www.mapquest.com>>. Acesso em: 25 jul. 2015.

MASCIA, Antonio R.; RECK, Wagner de M.; GARCIA, Vinícius J.; BERNARDON, Daniel P.; SPERANDIO, Maurício; VALE, Cléverton. Algoritmo heurístico para agrupamento de ordens de serviço em concessionárias de distribuição de energia elétrica considerando priorização. In: CONGRESO INTERNACIONAL DE DISTRIBUCION ELECTRICA, 2010, Buenos Aires. **Anais...** Buenos Aires: Asociación de Distribuidores de Energía Eléctrica de la República Argentina, 2010. p. 1–5.

ÑAHUIS, Fernando V. C. **Automação do despacho dinâmico de viaturas para o atendimento das ordens de serviço nas redes de distribuição de energia elétrica**. 2013. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

OKONJO-ADIGWE, C. An effective method of balancing the workload amongst salesmen. **Omega**, v. 16, n. 2, p. 159–163, 1988.

PRESS, William; TEUKOLSKY, Saul; VETTERLING, William; FLANNERY, Brian. **Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing**. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

REINELT, Gerhard. TSPLIB - a traveling salesman problem library. **ORSA journal on computing**, v. 3, n. 4, p. 376–384, 1991.

ROCHA, Leonardo K. M. **Roteirização dinâmica de veículos em atividades de prestação de serviços no setor elétrico**. 2011. 28 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, 2011.

SOMHOM, Samerkae; MODARES, Abdolhamid; ENKAWA, Takao. Competition-based neural network for the multiple travelling salesmen problem with minmax objective. **Computers & Operations Research**, v. 26, n. 4, p. 395–407, 1999.

STEINER, Maria T. A.; COSTA, Clarice E. S.; COSTA, Deise M. B.; FILHO, Élsio A.; ZAMBENEDETTI, Vóldi 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, 2006.

TANG, Lixin; LIU, Jiyin; RONG, Aiyin; YANG, Zihou. A multiple traveling salesman problem model for hot rolling scheduling in Shanghai Baoshan Iron & Steel Complex. **European Journal of Operational Research**, v. 124, n. 2, p. 267–282, 2000.

VALLIVAARA, Ilari. A team ant colony optimization algorithm for the multiple travelling salesmen problem with minmax objective. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MODELING, IDENTIFICATION AND CONTROL, 27., 2008, Anaheim. **Proceedings...** Anaheim: ACTA Press, 2008. p. 387–392.

VASAGAM, Bharath M. **Ant colony algorithm and genetic algorithm for multiple travelling salesmen problem**. 2012. 48 f. Dissertação (Master of Science in Robotics and Automation) — University of Salford, Manchester, 2012.

VENKATESH, Pandiri; SINGH, Alok. Two metaheuristic approaches for the multiple traveling salesperson problem. **Applied Soft Computing**, v. 26, p. 74–89, jan. 2015.

VERBOSKI, Tatianne A. **Proposta e simulação de um algoritmo de designação otimizado para despacho de equipes de atendimento de uma empresa de energia elétrica**. 2010. 210 f. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos de Engenharia) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

VOLPI, Neida M. P.; WILHELM, Volmir E.; CARNIERI, Ricardo; ZAMBENEDETTI, Vóldi C.; GROSS, João H. Designação de serviços em uma empresa de distribuição de energia elétrica. **Revista Eletrônica Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento**, v. 3, n. 1, p. 58–68, 2011.

VOLPI, Neida M. P.; WILHELM, Volmir E.; STEINER, Maria T. A.; YUAN, J. Y.; MATIOLI, L. C.; ZAMBENEDETTI, Vóldi C.; KLIMKOWSKI, M.; PINTO, Cleverson da S. Definição do Número, do Turno e da Localização de Equipes de Atendimento aos Usuários de uma Rede de Distribuição de Energia Elétrica via Simulação. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 15., 2008, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2008. p. 344–354.

WANG, Xiaobin; LIU, Daibo; HOU, Mengshu. A novel method for multiple depot and open paths, multiple traveling salesmen problem. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON APPLIED MACHINE INTELLIGENCE AND INFORMATICS, 11., 2013, Herl'any. **Proceedings...** Herl'any: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2013. p. 187–192.

WANG, Xue; WANG, Sheng; BI, Daowei; DING, Liang. Hierarchical wireless multimedia sensor networks for collaborative hybrid semi-supervised classifier learning. **Sensors**, v. 7, n. 11, p. 2693–2722, 2007.

YOUSEFIKHOSHBAKHT, Majid; DIDEHVAR, Farzad; RAHMATI, Farhad. Modification of the ant colony optimization for solving the multiple traveling salesman problem. **Romanian Journal of Information Science And Technology**, v. 16, n. 1, p. 65–80, 2013.

YOUSEFIKHOSHBAKHT, Majid; SEDIGHPOUR, Mohammad. A combination of sweep algorithm and elite ant colony optimization for solving the multiple traveling salesman problem. In: ROMANIAN ACADEMY, 4., 2012, Bucareste. **Proceedings...** Bucareste: The Publishing House of the Romanian Academy, 2012. p. 295–301.

YUAN, Shuai; SKINNER, Bradley; HUANG, Shoudong; LIU, Dikai. A new crossover approach for solving the multiple travelling salesmen problem using genetic algorithms. **European Journal of Operational Research**, v. 228, n. 1, p. 72–82, 2013.

ZHOU, Wei; YAO, Pingxi. An improved ant colony optimization algorithm for multiple traveling salesman problem. **Advances in information Sciences and Service Sciences**, v. 5, p. 637–644, mai. 2013.

ZHU, Anmin; YANG, SX. An improved self-organizing map approach to traveling salesman problem. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS, INTELLIGENT SYSTEMS AND SIGNAL PROCESSING, 2003, Changsha. **Proceedings...** Changsha: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2003. p. 674–679.

ZOGRAFOS, Kostas G.; DOULIGERIS, Christos; TSOUMPAS, Panagiotis. An integrated framework for managing emergency-response logistics: The case of the electric utility companies. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 45, n. 2, p. 115–126, mai. 1998.



## ANEXO A - BASE DE DADOS UTILIZADA

A Tabela 18 contém os dados reais fornecidos pela agência de atendimento de Cornélio Procópio que foram utilizados nos experimentos apresentados nesta dissertação.

Cada linha da Tabela 18 representa um serviço executado. O atributo **Dia** corresponde ao dia do mês em que o serviço foi executado. O atributo **Id** identifica exclusivamente um serviço no seu dia de execução, e o atributo **Tipo** informa se o serviço é comercial (C) ou emergencial (E). O atributo **Data/hora de despacho** contém a data e horário reais em que o serviço foi despachado para a equipe selecionada. O atributo **Data/hora de término de execução** indica a data e horário reais em que a equipe designada concluiu a execução do serviço. O atributo **Tempo de execução** indica quantos minutos a equipe gastou para a realização das atividades referentes ao serviço. Os próximos dois atributos da Tabela 18 são as coordenadas geográficas que informam a localização em que o serviço foi executado. O atributo **Equipe** identifica a equipe executora do serviço; e o atributo **Rotas reais** informa a sequência real na qual os serviços foram executados pela equipe no dia de trabalho.

**Tabela 18 – Dados reais dos 17 dias de trabalho analisados** (continua)

<b>Dia</b>	<b>Id</b>	<b>Tipo</b>	<b>Data/hora de despacho</b>	<b>Data/hora de término da execução</b>	<b>Tempo exec. (min)</b>	<b>Coord. UTM X</b>	<b>Coord. UTM Y</b>	<b>Equipe</b>	<b>Rotas reais</b>
3	1	C	30/01/14 13:46	03/02/14 08:47	7	535324	7436084	A	1
3	2	C	29/01/14 17:10	03/02/14 09:32	7	535325	7436040	A	2
3	3	C	29/01/14 11:06	03/02/14 09:48	6	535878	7435503	A	3
3	4	C	31/01/14 16:48	03/02/14 09:56	6	535905	7435428	A	4
3	5	C	31/01/14 16:48	03/02/14 10:06	6	535908	7435428	A	5
3	6	C	31/01/14 16:48	03/02/14 10:17	7	535885	7435468	A	6
3	7	C	31/01/14 16:31	03/02/14 11:10	29	534650	7437293	A	7
3	8	C	30/01/14 14:56	03/02/14 11:22	6	534663	7437186	A	8
3	9	C	03/02/14 08:20	03/02/14 14:45	45	538453	7437423	A	9
3	10	C	03/02/14 09:38	03/02/14 15:00	10	538237	7437542	A	10
3	11	C	31/01/14 15:31	03/02/14 15:18	6	536003	7436790	A	11
3	12	C	03/02/14 11:07	03/02/14 15:36	6	536489	7436359	A	12
3	13	C	03/02/14 08:20	03/02/14 16:07	5	533721	7438390	A	13
3	14	C	03/02/14 11:09	03/02/14 17:04	34	534579	7437244	A	14
3	15	C	31/01/14 17:14	03/02/14 08:49	21	534370	7436445	B	1
3	16	C	31/01/14 15:26	03/02/14 09:02	2	535092	7436131	B	2
3	17	E	03/02/14 09:34	03/02/14 10:42	52	535494	7436324	B	3
3	18	C	03/02/14 08:20	03/02/14 11:05	11	533994	7438474	B	4
3	19	E	03/02/14 11:03	03/02/14 11:34	14	535993	7436168	B	5
3	20	E	03/02/14 13:34	03/02/14 15:31	81	534515	7435792	B	6
3	21	E	03/02/14 13:52	03/02/14 16:45	60	536128	7436636	B	7
3	22	C	03/02/14 11:21	03/02/14 17:02	4	534612	7437285	B	8
3	23	C	03/02/14 09:14	03/02/14 17:32	15	538366	7437208	B	9
3	24	E	03/02/14 09:34	03/02/14 10:18	28	538490	7436960	C	1

**Tabela 18 – Dados reais dos 17 dias de trabalho analisados** (continuação)

Dia	Id	Tipo	Data/hora de	Data/hora de	Tempo	Coord.	Coord.	Equipe	Rotas
			despacho	término da		exec.	UTM		
			execução		(min)	X	Y	reais	
3	25	C	27/01/14 16:29	03/02/14 10:27	7	538020	7438044	C	2
3	26	C	01/02/14 11:13	03/02/14 11:03	28	535756	7437336	C	3
3	27	C	03/02/14 08:20	03/02/14 15:30	20	538258	7437570	C	4
3	28	C	27/01/14 09:39	03/02/14 16:25	45	536643	7435434	C	5
3	29	C	31/01/14 09:40	03/02/14 16:51	6	534846	7436091	C	6
3	30	C	03/02/14 15:13	03/02/14 17:13	7	537892	7436707	C	7
3	31	E	03/02/14 17:30	03/02/14 18:40	20	534204	7436211	C	8
4	1	C	03/02/14 11:08	04/02/14 08:59	5	537075	7436941	A	1
4	2	C	03/02/14 14:06	04/02/14 10:00	40	534663	7437186	A	2
4	3	C	03/02/14 11:08	04/02/14 10:30	3	533233	7438099	A	3
4	4	C	31/01/14 11:14	04/02/14 10:55	6	534036	7438338	A	4
4	5	C	03/02/14 11:10	04/02/14 11:08	3	535042	7436038	A	5
4	6	C	03/02/14 14:58	04/02/14 14:09	16	535885	7435468	A	6
4	7	C	03/02/14 15:19	04/02/14 15:40	90	535905	7435428	A	7
4	8	C	03/02/14 15:19	04/02/14 15:51	10	535908	7435428	A	8
4	9	C	03/02/14 15:20	04/02/14 16:16	24	535885	7435468	A	9
4	10	C	03/02/14 17:46	04/02/14 17:44	32	534579	7437244	A	10
4	11	C	03/02/14 15:31	04/02/14 08:35	8	535385	7436466	B	1
4	12	C	03/02/14 15:14	04/02/14 09:11	17	535483	7436445	B	2
4	13	E	04/02/14 09:11	04/02/14 09:45	19	534791	7435700	B	3
4	14	C	03/02/14 15:31	04/02/14 09:57	3	534353	7436086	B	4
4	15	C	31/01/14 09:03	04/02/14 10:38	26	535295	7436037	B	5
4	16	C	03/02/14 16:02	04/02/14 10:50	1	535686	7435379	B	6
4	17	C	03/02/14 17:24	04/02/14 11:20	20	536128	7436636	B	7
4	18	C	27/01/14 11:21	04/02/14 14:25	25	535349	7434455	B	8
4	19	E	04/02/14 14:14	04/02/14 14:46	11	536101	7436536	B	9
4	20	E	04/02/14 14:42	04/02/14 15:39	36	534694	7436683	B	10
4	21	E	04/02/14 15:41	04/02/14 16:31	48	536882	7435266	B	11
4	22	E	04/02/14 16:32	04/02/14 17:00	10	534148	7435624	B	12
4	23	E	04/02/14 16:23	04/02/14 17:10	3	534384	7435857	B	13
4	24	E	04/02/14 16:17	04/02/14 17:21	5	534372	7436930	B	14
4	25	E	04/02/14 16:51	04/02/14 17:40	9	535145	7436650	B	15
4	26	C	03/02/14 14:26	04/02/14 10:02	32	535376	7436502	C	1
4	27	C	04/02/14 09:56	04/02/14 10:20	5	534733	7436252	C	2
4	28	C	03/02/14 17:19	04/02/14 10:44	14	535389	7436857	C	3
4	29	C	04/02/14 10:34	04/02/14 11:20	10	535965	7435502	C	4
4	30	E	04/02/14 15:42	04/02/14 16:35	35	536882	7435266	C	5
4	31	E	04/02/14 15:17	04/02/14 16:54	9	534515	7435792	C	6
4	32	C	04/02/14 15:31	04/02/14 18:05	20	528839	7419843	C	7
4	33	C	03/02/14 17:19	04/02/14 09:00	5	537574	7436723	D	1
4	34	C	04/02/14 09:12	04/02/14 09:50	10	536217	7436258	D	2
4	35	C	04/02/14 09:48	04/02/14 10:40	10	537557	7436451	D	3
4	36	E	04/02/14 14:07	04/02/14 14:15	5	536992	7437039	D	4
4	37	E	04/02/14 14:12	04/02/14 14:35	5	536937	7436824	D	5
4	38	E	04/02/14 14:27	04/02/14 14:51	6	536163	7436560	D	6
5	1	C	04/02/14 14:25	05/02/14 09:19	36	535324	7436084	A	1
5	2	C	03/02/14 17:27	05/02/14 10:12	24	535325	7436040	A	2
5	3	C	04/02/14 08:17	05/02/14 10:26	6	535337	7435974	A	3
5	4	C	03/02/14 15:58	05/02/14 11:12	36	536003	7436790	A	4

Tabela 18 – Dados reais dos 17 dias de trabalho analisados

(continuação)

Dia	Id	Tipo	Data/hora de despacho	Data/hora de término da execução	Tempo exec. (min)	Coord. UTM X	Coord. UTM Y	Equipe	Rotas reais
5	5	C	03/02/14 17:19	05/02/14 14:05	5	537670	7437322	A	5
5	6	C	03/02/14 08:20	05/02/14 15:10	40	538237	7437542	A	6
5	7	C	03/02/14 09:38	05/02/14 16:26	6	535225	7436119	A	7
5	8	C	05/02/14 08:14	05/02/14 16:54	4	535623	7434775	A	8
5	9	C	03/02/14 14:09	05/02/14 17:35	18	535231	7435929	A	9
5	10	E	05/02/14 08:17	05/02/14 09:28	54	534783	7437178	B	1
5	11	C	31/01/14 09:28	05/02/14 09:53	13	535918	7435265	B	2
5	12	C	31/01/14 09:01	05/02/14 10:17	17	535937	7435286	B	3
5	13	E	05/02/14 10:17	05/02/14 11:09	44	534515	7435792	B	4
5	14	C	04/02/14 16:53	05/02/14 14:17	32	534694	7436683	B	5
5	15	C	03/02/14 14:09	05/02/14 15:12	34	537233	7437626	B	6
5	16	C	03/02/14 08:20	05/02/14 15:43	16	537976	7437250	B	7
5	17	C	04/02/14 08:26	05/02/14 15:53	3	538011	7437515	B	8
5	18	C	05/02/14 11:43	05/02/14 16:35	8	534704	7436599	B	9
5	19	C	05/02/14 15:00	05/02/14 17:10	21	533891	7438417	B	10
5	20	C	04/02/14 17:10	05/02/14 17:32	14	534154	7438479	B	11
5	21	C	04/02/14 11:34	05/02/14 12:37	17	536128	7436636	C	1
5	22	C	05/02/14 13:59	05/02/14 15:40	5	535897	7436450	C	2
5	23	C	05/02/14 11:20	05/02/14 15:50	5	534750	7436081	C	3
5	24	C	05/02/14 09:57	05/02/14 16:00	5	534852	7435992	C	4
5	25	C	05/02/14 11:16	05/02/14 16:14	4	535494	7436324	C	5
5	26	C	05/02/14 10:14	05/02/14 16:50	5	535762	7436530	C	6
5	27	E	05/02/14 17:48	05/02/14 18:07	7	534612	7435852	C	7
5	28	C	05/02/14 09:06	05/02/14 18:15	2	535318	7436849	C	8
5	29	C	04/02/14 16:00	05/02/14 18:35	10	535386	7436890	C	9
5	30	C	05/02/14 14:59	05/02/14 19:11	21	536361	7437112	C	10
5	31	E	05/02/14 19:32	05/02/14 20:15	15	534678	7437395	C	11
5	32	E	05/02/14 21:28	05/02/14 23:23	23	524844	7400365	C	12
5	33	C	04/02/14 15:24	05/02/14 08:50	10	535952	7436091	D	1
5	34	C	05/02/14 11:38	05/02/14 13:20	5	536243	7436488	D	2
5	35	C	05/02/14 13:09	05/02/14 13:30	5	536111	7436326	D	3
5	36	E	05/02/14 13:02	05/02/14 14:31	16	533680	7438377	D	4
5	37	C	05/02/14 11:17	05/02/14 14:50	5	536582	7435340	D	5
5	38	C	05/02/14 14:10	05/02/14 15:45	5	538181	7437661	D	6
5	39	C	04/02/14 08:26	05/02/14 15:59	4	537669	7436877	D	7
5	40	C	05/02/14 16:16	05/02/14 16:40	5	538711	7437278	D	8
6	1	C	05/02/14 14:00	06/02/14 09:07	50	535757	7435631	A	1
6	2	C	03/02/14 09:15	06/02/14 10:25	5	535164	7435342	A	2
6	3	C	04/02/14 13:58	06/02/14 11:12	43	533721	7438390	A	3
6	4	C	04/02/14 16:36	06/02/14 17:19	19	535310	7436220	A	4
6	5	C	04/02/14 14:11	06/02/14 17:32	5	535042	7436038	A	5
6	6	C	04/02/14 10:47	06/02/14 10:02	21	538776	7437255	B	1
6	7	E	06/02/14 09:43	06/02/14 10:41	12	534102	7438438	B	2
6	8	C	06/02/14 10:18	06/02/14 11:00	6	534486	7436855	B	3
6	9	C	01/02/14 10:52	06/02/14 16:39	188	535431	7437006	B	4
6	10	E	06/02/14 16:12	06/02/14 17:17	11	534678	7437395	B	5
6	11	E	06/02/14 17:04	06/02/14 17:35	12	534900	7437267	B	6
6	12	E	06/02/14 11:34	06/02/14 11:52	12	532540	7430494	C	1
6	13	C	05/02/14 14:28	06/02/14 13:52	27	536069	7437287	C	2

**Tabela 18 – Dados reais dos 17 dias de trabalho analisados** (continuação)

Dia	Id	Tipo	Data/hora de	Data/hora de	Tempo	Coord.	Coord.	Equipe	Rotas
			despacho	término da		exec.	UTM		
				execução	(min)	X	Y		
6	14	C	06/02/14 10:43	06/02/14 14:00	4	535587	7436788	C	3
6	15	C	06/02/14 11:11	06/02/14 14:22	12	536018	7436461	C	4
6	16	C	06/02/14 08:08	06/02/14 14:40	5	534791	7435700	C	5
6	17	C	05/02/14 14:28	06/02/14 15:10	25	534527	7435596	C	6
6	18	C	06/02/14 13:52	06/02/14 15:18	4	534511	7435440	C	7
6	19	C	06/02/14 15:28	06/02/14 15:40	5	541444	7440054	C	8
6	20	C	06/02/14 14:29	06/02/14 16:12	4	535799	7437106	C	9
6	21	C	05/02/14 14:32	06/02/14 16:30	5	535286	7435717	C	10
6	22	C	05/02/14 14:28	06/02/14 17:08	33	535391	7435764	C	11
6	23	C	05/02/14 14:10	06/02/14 18:07	37	536331	7435534	C	12
6	24	C	05/02/14 14:00	06/02/14 18:44	29	538020	7437446	C	13
6	25	C	05/02/14 14:00	06/02/14 19:21	26	538006	7437398	C	14
6	26	E	06/02/14 07:37	06/02/14 08:05	5	532540	7430494	D	1
6	27	E	06/02/14 07:37	06/02/14 09:11	6	541595	7418620	D	2
6	28	E	06/02/14 07:37	06/02/14 11:16	6	545380	7422320	D	3
6	29	E	06/02/14 08:23	06/02/14 13:09	4	546650	7419415	D	4
6	30	E	06/02/14 10:34	06/02/14 13:58	3	547078	7420762	D	5
6	31	C	06/02/14 13:13	06/02/14 17:05	5	538636	7437463	D	6
6	32	C	06/02/14 15:54	06/02/14 17:25	5	538258	7437270	D	7
6	33	C	06/02/14 15:40	06/02/14 17:50	10	538131	7438074	D	8
7	1	C	06/02/14 09:05	07/02/14 09:30	58	535623	7434775	A	1
7	2	C	04/02/14 10:36	07/02/14 10:40	10	534337	7438410	A	2
7	3	C	04/02/14 15:00	07/02/14 10:57	5	534353	7436086	A	3
7	4	C	06/02/14 08:06	07/02/14 11:16	6	538258	7437570	A	4
7	5	C	04/02/14 15:38	07/02/14 11:16	6	537776	7436963	A	5
7	6	C	05/02/14 09:15	07/02/14 14:06	6	537459	7437533	A	6
7	7	C	05/02/14 18:31	07/02/14 15:00	26	533653	7438477	A	7
7	8	C	05/02/14 10:13	07/02/14 16:00	48	533302	7438376	A	8
7	9	C	06/02/14 08:07	07/02/14 17:11	29	533233	7438099	A	9
7	10	C	07/02/14 08:35	07/02/14 17:31	2	535042	7436038	A	10
7	11	C	05/02/14 15:28	07/02/14 09:56	20	534694	7436683	B	1
7	12	C	04/02/14 15:37	07/02/14 10:29	30	534513	7436627	B	2
7	13	C	07/02/14 10:03	07/02/14 10:47	7	534148	7435624	B	3
7	14	C	06/02/14 09:14	07/02/14 11:16	15	534515	7435792	B	4
7	15	C	07/02/14 09:16	07/02/14 11:38	6	537619	7437223	B	5
7	16	C	31/01/14 10:17	07/02/14 14:36	43	536220	7435791	B	6
7	17	C	07/02/14 13:15	07/02/14 16:04	5	533190	7438145	B	7
7	18	C	07/02/14 10:09	07/02/14 16:12	4	533166	7438164	B	8
7	19	C	07/02/14 08:04	07/02/14 16:32	4	535792	7436965	B	9
7	20	C	07/02/14 09:35	07/02/14 16:55	6	535756	7437336	B	10
7	21	C	07/02/14 09:35	07/02/14 17:24	12	536361	7437112	B	11
7	22	C	07/02/14 10:32	07/02/14 17:37	8	536325	7436979	B	12
7	23	C	04/02/14 14:59	07/02/14 11:05	55	534442	7435920	C	1
7	24	E	07/02/14 12:26	07/02/14 13:20	20	540145	7440510	C	2
7	25	C	07/02/14 13:26	07/02/14 15:44	4	536027	7435835	C	3
7	26	C	07/02/14 08:51	07/02/14 15:55	5	535549	7436062	C	4
7	27	C	07/02/14 08:04	07/02/14 16:06	4	535483	7436445	C	5
7	28	C	07/02/14 13:26	07/02/14 16:40	5	534382	7435624	C	6
7	29	C	07/02/14 14:14	07/02/14 17:24	34	535886	7436280	C	7

Tabela 18 – Dados reais dos 17 dias de trabalho analisados

(continuação)

Dia	Id	Tipo	Data/hora de despacho	Data/hora de término da execução	Tempo exec. (min)	Coord. UTM X	Coord. UTM Y	Equipe	Rotas reais
7	30	C	05/02/14 16:17	07/02/14 09:55	10	536215	7436379	D	1
7	31	C	05/02/14 16:57	07/02/14 10:27	12	536475	7435595	D	2
7	32	C	06/02/14 15:59	07/02/14 10:53	3	537364	7437641	D	3
7	33	C	06/02/14 08:08	07/02/14 13:15	3	537753	7436769	D	4
7	34	C	07/02/14 13:02	07/02/14 13:31	6	536273	7436240	D	5
7	35	C	07/02/14 13:14	07/02/14 13:45	5	536139	7436287	D	6
7	36	C	07/02/14 13:35	07/02/14 13:55	5	536114	7436119	D	7
7	37	C	06/02/14 16:20	07/02/14 14:30	15	537588	7436963	D	8
7	38	C	07/02/14 14:13	07/02/14 15:30	5	536559	7436480	D	9
7	39	C	06/02/14 08:08	07/02/14 15:52	7	535349	7434455	D	10
7	40	E	07/02/14 19:00	07/02/14 20:45	5	526820	7417513	D	11
10	1	C	06/02/14 15:28	10/02/14 09:25	45	538636	7437463	A	1
10	2	C	06/02/14 15:28	10/02/14 10:03	37	538657	7437491	A	2
10	3	C	07/02/14 16:43	10/02/14 10:40	27	538258	7437570	A	3
10	4	C	06/02/14 15:33	10/02/14 11:06	6	537075	7436941	A	4
10	5	C	07/02/14 10:57	10/02/14 14:40	50	535164	7435342	A	5
10	6	C	06/02/14 08:29	10/02/14 15:10	6	534041	7436715	A	6
10	7	C	07/02/14 08:04	10/02/14 15:50	20	533714	7438125	A	7
10	8	C	07/02/14 11:21	10/02/14 16:07	7	533402	7438454	A	8
10	9	C	10/02/14 13:34	10/02/14 16:26	6	538079	7437438	A	9
10	10	C	10/02/14 15:09	10/02/14 17:00	20	535162	7436378	A	10
10	11	C	30/01/14 13:46	10/02/14 10:54	9	535974	7436368	B	1
10	12	C	07/02/14 09:16	10/02/14 11:06	3	533397	7438390	B	2
10	13	C	07/02/14 10:51	10/02/14 11:19	6	533906	7436256	B	3
10	14	C	10/02/14 11:05	10/02/14 14:04	4	535494	7436324	B	4
10	15	C	10/02/14 13:36	10/02/14 14:23	4	535772	7436443	B	5
10	16	C	10/02/14 11:05	10/02/14 14:55	12	534753	7437011	B	6
10	17	C	10/02/14 13:36	10/02/14 15:14	4	534900	7437267	B	7
10	18	E	10/02/14 15:16	10/02/14 15:52	27	536877	7435271	B	8
10	19	C	10/02/14 15:06	10/02/14 16:16	5	534363	7435892	B	9
10	20	C	10/02/14 16:07	10/02/14 16:36	4	533965	7436376	B	10
10	21	C	10/02/14 14:22	10/02/14 16:57	4	533777	7436404	B	11
10	22	C	10/02/14 08:52	10/02/14 17:34	16	534843	7435504	B	12
10	23	C	07/02/14 09:58	10/02/14 10:00	30	538776	7437255	C	1
10	24	C	10/02/14 08:06	10/02/14 11:45	5	535196	7437546	C	2
10	25	E	10/02/14 12:39	10/02/14 13:46	36	536886	7435262	C	3
10	26	C	07/02/14 09:58	10/02/14 16:20	10	536154	7435452	C	4
10	27	E	10/02/14 16:28	10/02/14 16:55	10	538362	7437502	C	5
10	28	C	10/02/14 14:22	10/02/14 16:59	2	538455	7437540	C	6
10	29	C	10/02/14 13:38	10/02/14 17:04	3	538250	7437660	C	7
10	30	C	10/02/14 16:09	10/02/14 17:15	5	536272	7437168	C	8
10	31	C	10/02/14 16:27	10/02/14 17:25	5	536146	7437065	C	9
10	32	C	10/02/14 16:54	10/02/14 18:00	25	536299	7436356	C	10
10	33	C	10/02/14 16:07	10/02/14 18:20	5	536467	7435531	C	11
10	34	C	10/02/14 14:22	10/02/14 18:35	5	536594	7435305	C	12
10	35	C	10/02/14 13:34	10/02/14 18:45	5	536805	7435137	C	13
10	36	C	07/02/14 10:32	10/02/14 19:08	18	537669	7436877	C	14
10	37	C	10/02/14 10:53	10/02/14 19:43	18	536683	7436984	C	15
11	1	C	07/02/14 14:43	11/02/14 09:40	60	537459	7437533	A	1

**Tabela 18 – Dados reais dos 17 dias de trabalho analisados** (continuação)

Dia	Id	Tipo	Data/hora de	Data/hora de	Tempo	Coord.	Coord.	Equipe	Rotas
			despacho	término da		exec.	UTM		
				execução	(min)	X	Y	reais	
11	2	C	07/02/14 14:14	11/02/14 10:50	6	536003	7436790	A	2
11	3	C	10/02/14 13:36	11/02/14 11:06	6	536489	7436359	A	3
11	4	C	11/02/14 10:03	11/02/14 15:50	110	537802	7436874	A	4
11	5	C	07/02/14 17:55	11/02/14 16:45	45	537776	7436963	A	5
11	6	C	11/02/14 14:35	11/02/14 17:40	23	535319	7435641	A	6
11	7	C	11/02/14 07:55	11/02/14 09:00	16	534216	7435515	B	1
11	8	C	11/02/14 09:15	11/02/14 09:23	6	533478	7438270	B	2
11	9	C	11/02/14 07:55	11/02/14 09:34	4	533392	7438331	B	3
11	10	C	11/02/14 07:55	11/02/14 09:44	4	533496	7438401	B	4
11	11	C	11/02/14 08:32	11/02/14 10:20	19	534331	7437746	B	5
11	12	E	11/02/14 10:15	11/02/14 10:42	7	535429	7435372	B	6
11	13	C	11/02/14 08:32	11/02/14 11:08	13	534833	7437094	B	7
11	14	C	11/02/14 09:49	11/02/14 11:17	3	534886	7437100	B	8
11	15	C	10/02/14 08:53	11/02/14 09:50	30	536845	7437007	C	1
11	16	C	10/02/14 16:54	11/02/14 10:15	15	537935	7438084	C	2
11	17	C	10/02/14 20:02	11/02/14 10:44	24	538235	7437978	C	3
11	18	C	10/02/14 16:28	11/02/14 11:10	20	536160	7436688	C	4
11	19	C	10/02/14 16:54	11/02/14 15:45	15	538154	7438128	C	5
11	20	C	11/02/14 14:41	11/02/14 16:58	38	536215	7436379	C	6
11	21	E	11/02/14 16:45	11/02/14 17:25	15	536440	7436435	C	7
11	22	C	11/02/14 09:54	11/02/14 17:43	6	533475	7438236	C	8
11	23	C	10/02/14 10:46	11/02/14 08:45	5	536185	7436860	D	1
11	24	C	11/02/14 10:03	11/02/14 14:14	14	535507	7436207	D	2
11	25	C	11/02/14 10:03	11/02/14 14:31	14	535623	7434775	D	3
11	26	C	11/02/14 10:42	11/02/14 15:19	5	535820	7436838	D	4
11	27	C	11/02/14 15:06	11/02/14 15:44	9	536683	7436984	D	5
12	1	C	07/02/14 13:53	12/02/14 08:51	5	536549	7435163	A	1
12	2	C	10/02/14 08:06	12/02/14 09:13	6	537588	7436963	A	2
12	3	C	10/02/14 13:38	12/02/14 10:01	33	533707	7438245	A	3
12	4	C	10/02/14 10:00	12/02/14 10:15	5	534125	7438019	A	4
12	5	C	10/02/14 15:09	12/02/14 10:30	5	535058	7435352	A	5
12	6	C	11/02/14 07:55	12/02/14 10:39	2	534216	7435515	A	6
12	7	C	11/02/14 15:31	12/02/14 10:54	4	535627	7436654	A	7
12	8	C	12/02/14 08:20	12/02/14 11:15	6	534407	7436933	A	8
12	9	C	10/02/14 15:09	12/02/14 14:24	6	537932	7436687	A	9
12	10	C	11/02/14 11:22	12/02/14 15:30	50	536003	7436790	A	10
12	11	C	10/02/14 16:54	12/02/14 17:08	32	536572	7436800	A	11
12	12	C	12/02/14 09:24	12/02/14 17:36	6	535844	7437035	A	12
12	13	C	05/02/14 09:22	12/02/14 10:00	10	536175	7436748	B	1
12	14	C	10/02/14 13:36	12/02/14 10:17	5	534823	7437183	B	2
12	15	C	07/02/14 13:15	12/02/14 10:31	5	534663	7437186	B	3
12	16	E	12/02/14 10:16	12/02/14 10:47	9	537386	7436751	B	4
12	17	E	12/02/14 10:49	12/02/14 11:15	10	534714	7435523	B	5
12	18	E	12/02/14 11:06	12/02/14 11:42	0	534577	7435407	B	6
12	19	E	12/02/14 10:33	12/02/14 11:56	61	534354	7435693	B	7
12	20	C	03/02/14 13:55	12/02/14 14:57	32	535720	7435938	B	8
12	21	C	12/02/14 14:05	12/02/14 15:10	3	534429	7435368	B	9
12	22	C	10/02/14 16:27	12/02/14 15:25	10	534392	7435321	B	10
12	23	C	10/02/14 16:27	12/02/14 15:47	15	533872	7436633	B	11

Tabela 18 – Dados reais dos 17 dias de trabalho analisados

(continuação)

Dia	Id	Tipo	Data/hora de despacho	Data/hora de término da execução	Tempo exec. (min)	Coord. UTM X	Coord. UTM Y	Equipe	Rotas reais
12	24	C	12/02/14 15:45	12/02/14 16:18	22	534148	7435624	B	12
12	25	C	11/02/14 15:07	12/02/14 16:42	14	536128	7436636	B	13
12	26	E	12/02/14 16:30	12/02/14 17:22	37	536877	7435271	B	14
12	27	E	12/02/14 09:24	12/02/14 09:55	10	525686	7447558	C	1
12	28	E	12/02/14 09:55	12/02/14 11:00	30	523419	7445774	C	2
12	29	E	12/02/14 09:19	12/02/14 11:43	13	518550	7456470	C	3
12	30	E	12/02/14 11:52	12/02/14 12:34	14	519093	7450903	C	4
12	31	C	12/02/14 10:21	12/02/14 12:55	15	523419	7445774	C	5
12	32	C	12/02/14 13:53	12/02/14 16:20	5	536784	7435162	C	6
12	33	C	12/02/14 13:58	12/02/14 16:30	5	536805	7435137	C	7
12	34	C	12/02/14 09:49	12/02/14 17:00	20	537019	7435347	C	8
12	35	C	12/02/14 10:40	12/02/14 17:09	4	536344	7435984	C	9
12	36	C	05/02/14 14:10	12/02/14 17:48	28	537732	7437332	C	10
12	37	C	05/02/14 14:10	12/02/14 18:06	11	537436	7437652	C	11
12	38	C	05/02/14 14:00	12/02/14 18:28	12	537922	7437234	C	12
12	39	C	12/02/14 14:05	12/02/14 18:40	5	536974	7436600	C	13
12	40	E	12/02/14 18:28	12/02/14 20:26	81	536085	7432955	C	14
12	41	C	11/02/14 08:46	12/02/14 08:37	7	534383	7435978	D	1
12	42	C	11/02/14 11:35	12/02/14 09:22	7	535952	7436091	D	2
12	43	C	12/02/14 08:17	12/02/14 09:30	5	535720	7435938	D	3
12	44	E	12/02/14 09:45	12/02/14 11:20	6	534280	7424640	D	4
12	45	E	12/02/14 13:45	12/02/14 14:19	4	523506	7407492	D	5
12	46	C	12/02/14 10:56	12/02/14 14:55	5	534337	7436009	D	6
12	47	C	11/02/14 10:50	12/02/14 15:15	10	535578	7437018	D	7
12	48	C	12/02/14 14:37	12/02/14 15:25	5	534353	7436086	D	8
12	49	C	12/02/14 14:05	12/02/14 15:40	5	534723	7435979	D	9
12	50	C	12/02/14 14:27	12/02/14 16:05	5	534868	7436450	D	10
12	51	E	12/02/14 16:29	12/02/14 17:12	5	536877	7435271	D	11
12	52	C	12/02/14 13:12	12/02/14 17:23	8	535501	7435916	D	12
12	53	C	12/02/14 09:03	12/02/14 17:38	11	535507	7436207	D	13
13	1	C	11/02/14 09:58	13/02/14 10:20	30	535042	7436038	A	1
13	2	C	11/02/14 16:59	13/02/14 14:35	35	537075	7436941	A	2
13	3	C	12/02/14 08:20	13/02/14 15:40	24	536836	7435005	A	3
13	4	C	12/02/14 08:21	13/02/14 17:30	40	535623	7434775	A	4
13	5	C	10/02/14 16:27	13/02/14 08:57	14	535841	7435816	B	1
13	6	C	10/02/14 16:27	13/02/14 09:19	10	535286	7435717	B	2
13	7	C	10/02/14 16:37	13/02/14 10:03	14	535199	7435494	B	3
13	8	C	10/02/14 16:27	13/02/14 10:48	13	534469	7435586	B	4
13	9	C	10/02/14 13:36	13/02/14 11:11	8	535648	7435411	B	5
13	10	C	22/01/14 15:20	13/02/14 14:58	59	536636	7435331	B	6
13	11	C	10/02/14 15:39	13/02/14 15:30	7	536725	7436714	B	7
13	12	C	13/02/14 10:47	13/02/14 15:52	12	535704	7437040	B	8
13	13	C	14/01/14 15:07	13/02/14 16:09	5	535403	7436953	B	9
13	14	C	12/02/14 09:24	13/02/14 10:22	62	536723	7435928	C	1
13	15	E	13/02/14 10:54	13/02/14 11:52	32	534760	7435279	C	2
13	16	C	12/02/14 17:05	13/02/14 12:06	5	536720	7435085	C	3
13	17	C	05/02/14 14:27	13/02/14 12:55	35	536376	7435388	C	4
13	18	C	13/02/14 15:13	13/02/14 15:20	5	536192	7435516	C	5
13	19	C	13/02/14 13:49	13/02/14 16:10	10	536756	7435610	C	6

**Tabela 18 – Dados reais dos 17 dias de trabalho analisados** (continuação)

Dia	Id	Tipo	Data/hora de	Data/hora de	Tempo	Coord.	Coord.	Equipe	Rotas
			despacho	término da		exec.	UTM		
				execução	(min)	X	Y	reais	
13	20	C	12/02/14 17:01	13/02/14 16:40	5	537386	7436751	C	7
13	21	C	13/02/14 08:58	13/02/14 17:44	44	537557	7436451	C	8
13	22	C	13/02/14 14:29	13/02/14 18:20	30	538154	7438128	C	9
13	23	E	13/02/14 08:10	13/02/14 09:02	7	537020	7439790	D	1
13	24	C	11/02/14 17:05	13/02/14 09:55	10	536062	7435488	D	2
13	25	C	12/02/14 17:25	13/02/14 10:40	10	535476	7436170	D	3
13	26	C	13/02/14 08:10	13/02/14 13:20	5	535440	7437082	D	4
13	27	C	13/02/14 10:47	13/02/14 13:34	5	534308	7435927	D	5
13	28	C	13/02/14 08:22	13/02/14 13:47	7	534653	7435275	D	6
13	29	E	13/02/14 14:20	13/02/14 14:40	5	535313	7436495	D	7
13	30	C	13/02/14 09:38	13/02/14 14:57	7	535982	7436284	D	8
13	31	C	13/02/14 08:10	13/02/14 15:20	10	535422	7437326	D	9
13	32	C	13/02/14 15:15	13/02/14 15:47	7	536273	7436781	D	10
13	33	C	13/02/14 12:46	13/02/14 16:08	8	536227	7436617	D	11
13	34	C	05/02/14 13:50	13/02/14 16:55	10	538072	7437503	D	12
13	35	C	05/02/14 14:02	13/02/14 17:25	10	538052	7437322	D	13
14	1	C	12/02/14 13:45	14/02/14 10:50	120	535627	7436654	A	1
14	2	C	12/02/14 08:50	14/02/14 14:30	30	534331	7438086	A	2
14	3	C	13/02/14 18:31	14/02/14 16:11	17	534125	7438019	A	3
14	4	C	12/02/14 09:37	14/02/14 16:27	4	535844	7437035	A	4
14	5	C	14/02/14 13:10	14/02/14 17:10	32	537932	7436687	A	5
14	6	C	12/02/14 18:15	14/02/14 17:22	2	535844	7437035	A	6
14	7	C	13/02/14 14:52	14/02/14 17:36	6	538079	7437438	A	7
14	8	C	12/02/14 16:55	14/02/14 08:58	7	536395	7435814	B	1
14	9	C	13/02/14 16:54	14/02/14 09:25	12	536133	7437380	B	2
14	10	C	13/02/14 11:22	14/02/14 10:25	43	536450	7436494	B	3
14	11	C	14/02/14 08:15	14/02/14 10:42	6	534510	7436986	B	4
14	12	C	13/02/14 12:46	14/02/14 11:09	11	536128	7436636	B	5
14	13	C	14/02/14 08:15	14/02/14 14:17	13	534856	7435370	B	6
14	14	C	14/02/14 10:56	14/02/14 14:52	12	535240	7436699	B	7
14	15	E	14/02/14 14:47	14/02/14 15:18	9	537157	7437301	B	8
14	16	C	14/02/14 08:28	14/02/14 15:48	11	538413	7437571	B	9
14	17	C	14/02/14 15:16	14/02/14 16:23	13	534236	7436231	B	10
14	18	C	14/02/14 10:11	14/02/14 16:45	5	533922	7436582	B	11
14	19	C	14/02/14 08:22	14/02/14 17:25	8	533994	7438474	B	12
14	20	E	14/02/14 12:34	14/02/14 13:15	25	538256	7438014	C	1
14	21	C	13/02/14 18:01	14/02/14 15:35	5	536192	7435516	C	2
14	22	C	14/02/14 10:33	14/02/14 16:40	40	536376	7435388	C	3
14	23	C	14/02/14 14:47	14/02/14 17:24	34	537634	7437044	C	4
14	24	C	14/02/14 11:25	14/02/14 17:50	20	537765	7436711	C	5
14	25	C	14/02/14 08:30	14/02/14 18:12	6	537623	7437381	C	6
14	26	E	14/02/14 19:02	14/02/14 19:32	12	537634	7437044	C	7
14	27	E	14/02/14 19:44	14/02/14 20:26	1	536882	7435266	C	8
14	28	C	05/02/14 14:00	14/02/14 08:31	11	536693	7435518	D	1
14	29	C	13/02/14 17:45	14/02/14 08:53	8	535197	7437659	D	2
14	30	C	14/02/14 09:45	14/02/14 10:10	10	535772	7436443	D	3
14	31	C	14/02/14 11:25	14/02/14 15:37	7	535948	7435663	D	4
14	32	C	14/02/14 14:30	14/02/14 15:50	5	535135	7436066	D	5
14	33	E	14/02/14 16:51	14/02/14 17:27	7	535319	7435641	D	6

Tabela 18 – Dados reais dos 17 dias de trabalho analisados

(continuação)

Dia	Id	Tipo	Data/hora de despacho	Data/hora de término da execução	Tempo exec. (min)	Coord. UTM X	Coord. UTM Y	Equipe	Rotas reais
15	1	C	15/02/14 10:18	15/02/14 11:11	21	536273	7436781	A	1
15	2	C	15/02/14 10:18	15/02/14 11:23	10	536216	7436851	A	2
15	3	C	15/02/14 11:38	15/02/14 13:34	107	536194	7436817	A	3
15	4	E	15/02/14 13:31	15/02/14 14:02	17	533687	7436122	A	4
15	5	E	15/02/14 13:31	15/02/14 14:34	21	534812	7436419	A	5
15	6	E	15/02/14 05:00	15/02/14 07:40	70	546492	7396463	B	1
15	7	E	15/02/14 08:03	15/02/14 10:31	91	546497	7396479	B	2
15	8	E	15/02/14 08:36	15/02/14 14:30	90	554965	7401870	B	3
15	9	E	15/02/14 08:07	15/02/14 15:04	9	550646	7399658	B	4
15	10	E	15/02/14 14:53	15/02/14 16:06	36	544253	7408910	B	5
15	11	E	15/02/14 14:50	15/02/14 16:40	15	544970	7413070	B	6
15	12	E	15/02/14 19:53	15/02/14 21:42	22	534601	7394118	B	7
17	1	C	12/02/14 13:13	17/02/14 09:52	47	537588	7436963	A	1
17	2	C	12/02/14 13:13	17/02/14 10:55	46	537922	7437234	A	2
17	3	C	13/02/14 14:36	17/02/14 11:12	2	535310	7436220	A	3
17	4	C	12/02/14 10:19	17/02/14 15:13	44	533275	7438092	A	4
17	5	C	13/02/14 11:22	17/02/14 15:35	6	534216	7435515	A	5
17	6	C	17/02/14 08:14	17/02/14 16:24	43	534277	7435558	A	6
17	7	C	17/02/14 08:14	17/02/14 16:45	7	535092	7436131	A	7
17	8	C	13/02/14 10:36	17/02/14 17:09	7	537892	7436707	A	8
17	9	C	13/02/14 10:05	17/02/14 17:34	5	535802	7435041	A	9
17	10	C	14/02/14 14:31	17/02/14 17:51	6	536472	7435998	A	10
17	11	E	17/02/14 08:55	17/02/14 09:16	6	535958	7436219	B	1
17	12	E	17/02/14 09:06	17/02/14 09:28	8	535748	7436676	B	2
17	13	C	17/02/14 10:25	17/02/14 10:37	5	536018	7436461	B	3
17	14	C	17/02/14 10:32	17/02/14 11:14	4	536352	7435460	B	4
17	15	E	17/02/14 11:19	17/02/14 11:59	19	535611	7436127	B	5
17	16	C	17/02/14 10:43	17/02/14 12:10	5	535392	7435486	B	6
17	17	C	17/02/14 10:33	17/02/14 12:19	4	535345	7435497	B	7
17	18	E	17/02/14 12:16	17/02/14 12:39	9	534856	7435370	B	8
17	19	E	17/02/14 15:02	17/02/14 15:23	8	534269	7436968	B	9
17	20	C	17/02/14 13:54	17/02/14 15:45	5	536059	7436380	B	10
17	21	C	05/02/14 14:00	17/02/14 16:50	40	538402	7437466	B	11
17	22	C	17/02/14 08:14	17/02/14 17:23	23	537634	7437044	B	12
17	23	C	17/02/14 09:47	17/02/14 17:35	4	537044	7436735	B	13
17	24	C	14/02/14 19:49	17/02/14 17:50	5	535310	7436220	B	14
17	25	C	17/02/14 16:57	17/02/14 18:41	26	535627	7436639	B	15
17	26	C	14/02/14 15:16	17/02/14 19:10	10	534708	7435290	B	16
18	1	C	14/02/14 18:10	18/02/14 09:00	39	538079	7437438	A	1
18	2	C	18/02/14 09:33	18/02/14 10:16	76	538010	7437200	A	2
18	3	C	17/02/14 14:58	18/02/14 10:27	5	537940	7437775	A	3
18	4	C	13/02/14 15:41	18/02/14 10:45	7	536557	7436879	A	4
18	5	C	18/02/14 10:45	18/02/14 11:32	41	537935	7438084	A	5
18	6	C	18/02/14 08:18	18/02/14 14:31	23	535324	7436084	A	6
18	7	C	17/02/14 09:10	18/02/14 15:20	43	535844	7437035	A	7
18	8	C	17/02/14 08:14	18/02/14 16:07	7	537935	7438084	A	8
18	9	C	14/02/14 09:46	18/02/14 16:20	7	535586	7436913	A	9
18	10	C	18/02/14 14:51	18/02/14 17:12	46	535844	7437035	A	10
18	11	C	14/02/14 11:33	18/02/14 17:30	7	536061	7436893	A	11

**Tabela 18 – Dados reais dos 17 dias de trabalho analisados** (continuação)

Dia	Id	Tipo	Data/hora de	Data/hora de	Tempo	Coord.	Coord.	Equipe	Rotas
			despacho	término da		exec.	UTM		
				execução	(min)	X	Y	reais	
18	12	C	15/02/14 10:07	18/02/14 09:00	37	534694	7436683	B	1
18	13	C	17/02/14 09:10	18/02/14 09:39	30	533906	7436256	B	2
18	14	C	13/02/14 17:07	18/02/14 09:56	3	535302	7436306	B	3
18	15	C	13/02/14 17:07	18/02/14 10:01	3	535313	7436495	B	4
18	16	C	13/02/14 17:07	18/02/14 10:05	3	535345	7436498	B	5
18	17	C	13/02/14 17:07	18/02/14 10:11	3	535385	7436466	B	6
18	18	C	13/02/14 17:07	18/02/14 10:15	3	535504	7436515	B	7
18	19	C	13/02/14 17:07	18/02/14 10:18	2	535399	7436332	B	8
18	20	C	13/02/14 17:07	18/02/14 10:24	3	535385	7436466	B	9
18	21	C	13/02/14 17:07	18/02/14 10:28	3	535494	7436324	B	10
18	22	C	13/02/14 17:07	18/02/14 10:32	3	535504	7436237	B	11
18	23	C	13/02/14 17:07	18/02/14 10:38	3	535494	7436324	B	12
18	24	C	13/02/14 17:07	18/02/14 10:45	2	535476	7436170	B	13
18	25	C	13/02/14 17:07	18/02/14 10:51	3	535537	7436176	B	14
18	26	C	13/02/14 17:07	18/02/14 10:55	3	535556	7436295	B	15
18	27	C	13/02/14 17:07	18/02/14 11:06	3	535394	7436375	B	16
18	28	C	13/02/14 17:07	18/02/14 11:10	3	535506	7436356	B	17
18	29	C	13/02/14 17:07	18/02/14 11:14	3	535452	7436406	B	18
18	30	C	11/02/14 11:22	18/02/14 14:35	32	537935	7438084	B	19
18	31	C	17/02/14 09:47	18/02/14 15:03	15	536194	7436817	B	20
18	32	C	17/02/14 09:10	18/02/14 15:37	15	536185	7436786	B	21
18	33	C	17/02/14 09:10	18/02/14 15:56	16	536175	7436748	B	22
18	34	C	17/02/14 13:54	18/02/14 16:23	15	533679	7437984	B	23
18	35	C	14/02/14 15:16	18/02/14 16:40	8	535483	7436445	B	24
18	36	C	18/02/14 15:26	18/02/14 17:51	65	534995	7436121	B	25
18	37	C	17/02/14 09:10	18/02/14 09:40	20	535239	7436265	C	1
18	38	C	17/02/14 11:08	18/02/14 10:00	15	535265	7436267	C	2
18	39	C	17/02/14 09:10	18/02/14 10:15	10	535239	7436265	C	3
18	40	E	18/02/14 10:27	18/02/14 11:02	7	535988	7436458	C	4
18	41	C	15/02/14 11:12	18/02/14 11:33	18	534515	7435792	C	5
18	42	C	18/02/14 09:33	18/02/14 12:08	23	535313	7437266	C	6
18	43	E	18/02/14 11:57	18/02/14 12:43	23	537338	7436963	C	7
18	44	C	18/02/14 10:46	18/02/14 16:10	20	536031	7437299	C	8
18	45	C	13/02/14 11:22	18/02/14 17:03	33	536128	7436636	C	9
18	46	C	17/02/14 17:09	18/02/14 17:20	5	536227	7436617	C	10
18	47	C	18/02/14 14:16	18/02/14 17:44	19	536034	7436286	C	11
18	48	C	17/02/14 09:10	18/02/14 18:07	17	535678	7436404	C	12
18	49	C	17/02/14 14:58	18/02/14 19:00	30	535870	7436452	C	13
18	50	C	18/02/14 08:16	18/02/14 08:30	5	536104	7435699	D	1
18	51	E	18/02/14 08:31	18/02/14 09:14	9	533742	7438484	D	2
18	52	C	18/02/14 08:16	18/02/14 09:30	5	536050	7436281	D	3
18	53	C	14/02/14 09:52	18/02/14 10:00	10	536504	7436547	D	4
18	54	C	18/02/14 08:47	18/02/14 10:25	5	537044	7436735	D	5
18	55	C	18/02/14 08:19	18/02/14 10:53	3	538414	7436766	D	6
18	56	C	17/02/14 19:20	18/02/14 13:27	7	537634	7437044	D	7
18	57	C	17/02/14 14:58	18/02/14 13:37	2	537455	7436765	D	8
18	58	C	17/02/14 16:11	18/02/14 14:10	10	536139	7436287	D	9
18	59	C	11/02/14 11:22	18/02/14 14:33	3	536723	7435928	D	10
18	60	C	14/02/14 16:48	18/02/14 14:58	3	535205	7434291	D	11

Tabela 18 – Dados reais dos 17 dias de trabalho analisados

(continuação)

Dia	Id	Tipo	Data/hora de despacho	Data/hora de término da execução	Tempo exec. (min)	Coord. UTM X	Coord. UTM Y	Equipe	Rotas reais
18	61	C	17/02/14 16:11	18/02/14 15:20	10	535044	7434453	D	12
18	62	C	17/02/14 10:25	18/02/14 16:09	9	536050	7436281	D	13
18	63	C	17/02/14 15:32	18/02/14 17:02	12	536569	7436405	D	14
18	64	C	18/02/14 16:57	18/02/14 18:20	40	537935	7438084	D	15
19	1	C	17/02/14 18:04	19/02/14 09:18	58	536472	7435998	A	1
19	2	C	18/02/14 08:18	19/02/14 11:16	43	534216	7435515	A	2
19	3	C	19/02/14 08:48	19/02/14 15:10	82	536061	7436893	A	3
19	4	C	14/02/14 13:10	19/02/14 16:53	7	534185	7438105	A	4
19	5	C	17/02/14 16:54	19/02/14 17:51	45	535092	7436131	A	5
19	6	E	19/02/14 07:30	19/02/14 09:20	42	533934	7436435	B	1
19	7	C	18/02/14 17:18	19/02/14 10:28	9	534694	7436683	B	2
19	8	C	19/02/14 08:32	19/02/14 10:48	3	533296	7438311	B	3
19	9	C	18/02/14 17:44	19/02/14 10:56	6	534394	7437020	B	4
19	10	C	19/02/14 09:50	19/02/14 11:17	1	533881	7437569	B	5
19	11	C	19/02/14 11:22	19/02/14 14:57	7	533679	7437984	B	6
19	12	C	19/02/14 13:22	19/02/14 15:17	10	533881	7437569	B	7
19	13	C	19/02/14 10:52	19/02/14 15:43	4	533478	7438270	B	8
19	14	C	19/02/14 15:52	19/02/14 16:00	5	533803	7437761	B	9
19	15	C	14/02/14 15:16	19/02/14 09:29	19	535164	7435342	C	1
19	16	C	18/02/14 16:53	19/02/14 09:52	17	534708	7435290	C	2
19	17	E	19/02/14 09:52	19/02/14 10:21	21	535740	7435115	C	3
19	18	C	19/02/14 08:33	19/02/14 10:49	19	535982	7435344	C	4
19	19	C	17/02/14 08:14	19/02/14 12:02	62	536090	7437222	C	5
19	20	C	19/02/14 10:53	19/02/14 12:26	16	535870	7436452	C	6
19	21	C	17/02/14 09:10	19/02/14 12:49	14	535772	7436443	C	7
19	22	C	19/02/14 08:33	19/02/14 15:20	15	535815	7435487	C	8
19	23	C	19/02/14 08:33	19/02/14 15:35	10	535655	7435673	C	9
19	24	C	14/02/14 15:16	19/02/14 16:02	22	535391	7435764	C	10
19	25	C	18/02/14 09:32	19/02/14 16:26	16	535305	7435897	C	11
19	26	C	17/02/14 08:14	19/02/14 16:50	5	535578	7436453	C	12
19	27	C	19/02/14 13:22	19/02/14 17:00	5	535867	7436480	C	13
19	28	E	19/02/14 17:14	19/02/14 18:06	21	537004	7435778	C	14
19	29	E	19/02/14 17:28	19/02/14 18:50	20	536056	7441217	C	15
19	30	E	19/02/14 18:37	19/02/14 20:45	81	533608	7438380	C	16
19	31	E	19/02/14 09:15	19/02/14 10:09	19	536992	7437039	D	1
19	32	C	19/02/14 08:02	19/02/14 13:45	5	536693	7435406	D	2
19	33	E	19/02/14 13:47	19/02/14 14:35	10	536036	7435909	D	3
19	34	C	19/02/14 08:32	19/02/14 15:53	8	538234	7437761	D	4
19	35	C	19/02/14 16:56	19/02/14 17:20	5	536559	7436480	D	5
20	1	C	17/02/14 08:14	20/02/14 08:26	10	535878	7435503	A	1
20	2	C	19/02/14 08:48	20/02/14 10:23	72	535092	7436131	A	2
20	3	C	18/02/14 10:01	20/02/14 10:40	9	534987	7436886	A	3
20	4	C	18/02/14 08:18	20/02/14 11:30	42	534230	7438115	A	4
20	5	C	18/02/14 15:37	20/02/14 14:48	45	535058	7435352	A	5
20	6	C	20/02/14 13:42	20/02/14 15:57	7	535139	7435328	A	6
20	7	C	20/02/14 10:06	20/02/14 17:01	48	533923	7436390	A	7
20	8	E	20/02/14 08:12	20/02/14 09:33	60	535379	7435621	B	1
20	9	C	19/02/14 17:54	20/02/14 09:46	3	534711	7436793	B	2
20	10	C	19/02/14 08:49	20/02/14 10:40	5	537892	7436707	B	3

**Tabela 18 – Dados reais dos 17 dias de trabalho analisados** (continuação)

Dia	Id	Tipo	Data/hora de	Data/hora de	Tempo	Coord.	Coord.	Equipe	Rotas
			despacho	término da		exec.	UTM		
				execução	(min)	X	Y	reais	
20	11	C	20/02/14 10:23	20/02/14 11:06	2	535395	7434400	B	4
20	12	C	20/02/14 10:57	20/02/14 14:38	11	533478	7438270	B	5
20	13	C	20/02/14 14:37	20/02/14 15:07	9	534152	7438321	B	6
20	14	C	20/02/14 14:53	20/02/14 15:29	2	534851	7437225	B	7
20	15	C	20/02/14 16:39	20/02/14 17:41	61	534356	7436029	B	8
20	16	E	20/02/14 20:27	20/02/14 21:14	14	533942	7436357	B	9
20	17	E	20/02/14 19:43	20/02/14 21:48	18	538079	7437438	B	10
20	18	C	19/02/14 08:02	20/02/14 11:05	20	535952	7436091	C	1
20	19	E	20/02/14 11:06	20/02/14 11:27	11	537144	7436285	C	2
20	20	E	20/02/14 11:26	20/02/14 11:52	17	538735	7435809	C	3
20	21	C	12/02/14 14:07	20/02/14 13:04	59	534635	7435968	C	4
20	22	C	14/02/14 13:10	20/02/14 17:29	119	534353	7436086	C	5
20	23	C	20/02/14 16:27	20/02/14 17:47	2	536313	7436826	C	6
20	24	C	20/02/14 16:26	20/02/14 18:09	16	536227	7436617	C	7
20	25	E	20/02/14 18:01	20/02/14 19:32	70	534366	7435837	C	8
20	26	E	20/02/14 07:24	20/02/14 08:35	8	537144	7436285	D	1
20	27	E	20/02/14 07:17	20/02/14 09:20	15	537338	7436963	D	2
20	28	C	19/02/14 10:22	20/02/14 10:22	12	536154	7435452	D	3
20	29	C	20/02/14 14:15	20/02/14 14:54	9	536134	7435697	D	4
20	30	C	20/02/14 14:54	20/02/14 15:16	5	536761	7436783	D	5
21	1	C	18/02/14 15:29	21/02/14 09:09	36	533402	7438454	A	1
21	2	C	19/02/14 14:07	21/02/14 10:46	40	535586	7436913	A	2
21	3	C	19/02/14 13:39	21/02/14 14:25	11	538414	7436766	A	3
21	4	C	19/02/14 09:49	21/02/14 15:15	5	537019	7435347	A	4
21	5	C	19/02/14 13:22	21/02/14 17:20	10	535042	7436038	A	5
21	6	C	20/02/14 16:07	21/02/14 17:50	18	535483	7436445	A	6
21	7	C	19/02/14 11:02	21/02/14 08:58	8	534718	7436690	B	1
21	8	C	19/02/14 11:05	21/02/14 09:08	6	534665	7436674	B	2
21	9	C	19/02/14 11:04	21/02/14 09:27	11	534755	7436671	B	3
21	10	C	19/02/14 10:53	21/02/14 09:40	7	534513	7436627	B	4
21	11	C	20/02/14 13:42	21/02/14 09:57	5	535395	7434400	B	5
21	12	C	21/02/14 09:54	21/02/14 10:26	6	534681	7436835	B	6
21	13	C	20/02/14 14:37	21/02/14 16:40	112	536090	7437222	B	7
21	14	C	21/02/14 16:34	21/02/14 17:36	17	533634	7438014	B	8
21	15	C	21/02/14 10:30	21/02/14 11:50	5	536371	7437149	C	1
21	16	C	19/02/14 15:19	21/02/14 12:30	25	535726	7436195	C	2
21	17	C	19/02/14 10:01	21/02/14 12:47	8	536034	7436286	C	3
21	18	C	21/02/14 11:12	21/02/14 15:59	39	535345	7435497	C	4
21	19	E	21/02/14 15:16	21/02/14 16:30	27	536594	7435305	C	5
21	20	E	21/02/14 16:45	21/02/14 17:04	14	536877	7435271	C	6
21	21	C	21/02/14 13:02	21/02/14 17:13	5	536313	7436826	C	7
21	22	C	21/02/14 13:44	21/02/14 17:22	4	535225	7437577	C	8
21	23	C	20/02/14 16:39	21/02/14 17:39	4	535486	7436412	C	9
21	24	C	18/02/14 11:41	21/02/14 18:02	12	535817	7437263	C	10
21	25	C	21/02/14 08:08	21/02/14 09:03	5	537806	7436813	D	1
21	26	C	21/02/14 09:49	21/02/14 10:15	15	534777	7436099	D	2
21	27	C	20/02/14 14:53	21/02/14 10:36	11	534041	7436715	D	3
21	28	C	21/02/14 08:41	21/02/14 14:20	10	537455	7436765	D	4
21	29	C	20/02/14 18:35	21/02/14 15:25	10	538131	7438074	D	5

**Tabela 18 – Dados reais dos 17 dias de trabalho analisados** **(continuação)**

<b>Dia</b>	<b>Id</b>	<b>Tipo</b>	<b>Data/hora de despacho</b>	<b>Data/hora de término da execução</b>	<b>Tempo exec. (min)</b>	<b>Coord. UTM X</b>	<b>Coord. UTM Y</b>	<b>Equipe</b>	<b>Rotas reais</b>
21	30	C	21/02/14 11:31	21/02/14 16:45	5	536826	7435583	D	6
21	31	C	21/02/14 13:37	21/02/14 17:00	5	537131	7435145	D	7
21	32	C	21/02/14 13:02	21/02/14 17:15	5	537848	7437125	D	8
21	33	C	21/02/14 14:51	21/02/14 17:25	5	536792	7437023	D	9
21	34	C	21/02/14 13:44	21/02/14 17:35	5	534041	7436715	D	10
21	35	C	21/02/14 10:59	21/02/14 17:46	6	537390	7437524	D	11
21	36	C	21/02/14 11:31	21/02/14 17:59	8	538331	7437205	D	12
22	1	E	22/02/14 07:56	22/02/14 09:24	74	535544	7436414	A	1
22	2	E	22/02/14 08:54	22/02/14 10:47	7	525807	7445340	A	2
22	3	E	22/02/14 10:56	22/02/14 12:06	36	535732	7452063	A	3
22	4	E	22/02/14 15:39	22/02/14 18:49	42	518578	7452393	A	4
22	5	E	22/02/14 18:12	22/02/14 20:01	1	515316	7472076	A	5
22	6	E	22/02/14 20:06	22/02/14 22:05	63	518231	7451620	A	6
22	7	E	22/02/14 19:12	22/02/14 23:08	35	518403	7451907	A	7
22	8	E	22/02/14 08:01	22/02/14 14:22	265	521887	7435843	B	1
22	9	E	22/02/14 14:26	22/02/14 16:06	81	520854	7433942	B	2

**Fonte: COPEL Distribuição.**