LUIZ CACCALANO

**ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS PARA O
ABASTECIMENTO DE LINHAS DE PRODUÇÃO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

São Paulo
2012

LUIZ CACCALANO

**ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS PARA O
ABASTECIMENTO DE LINHAS DE PRODUÇÃO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia de Sistemas Logísticos

Orientador:
Prof. Dr. Cláudio Barbieri da Cunha

São Paulo
2012

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 15 de junho de 2012.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Cacalano, Luiz

**Roteirização de veículos para o abastecimento de linhas de produção / L. Cacalano. -- ed.rev. -- São Paulo, 2012.
151 p.**

Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. Sistemas Logísticos.

**1. Roteirização 2. Logística 3. Sistema de abastecimento
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes. Sistemas Logísticos II.t.**

Aos meus pais, Savério e Beatriz.

À minha filha, Ana Luiza.

*A eles, pelo estímulo constante, apoio incondicional e por tudo
que me ensinaram e ensinam.*

*A ela, pela realização de ser pai e por tudo que podemos
aprender juntos.*

AGRADECIMENTOS

Ao professor Cláudio Barbieri da Cunha, pelas orientações seguras durante todo o desenvolvimento da pesquisa, pelo incentivo, pelas sugestões e críticas valiosas e que foram determinantes na execução deste trabalho.

À professora Vitória Maria Miranda de Pureza e ao professor Miguel César Santoro, pelos importantes comentários ao final do exame de qualificação que muito contribuíram para a continuidade da pesquisa e finalização do trabalho.

Aos professores e colegas do Programa de Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos, pelo aprendizado e rica troca de ideias e experiências durante as aulas e todo o tempo em que estivemos juntos.

Aos colegas da empresa em que trabalho, pelas longas conversas sobre o tema, pelo auxílio no levantamento de dados e análise de resultados, por suas sugestões e críticas, colaborações que se tornaram essenciais para a definição das soluções desenvolvidas no trabalho.

Aos meus pais, Savério e Beatriz, por tudo que me propiciaram e pelo quanto apoiaram meu desenvolvimento educacional e profissional.

À minha filha Ana Luiza, pela paciência e compreensão durante o desenvolvimento deste trabalho, que nos privou de horas de lazer e convívio, mas que agora nos traz a satisfação de sua realização.

RESUMO

Este trabalho trata do problema de roteirização de veículos para o abastecimento de linhas de produção, o qual pode ser entendido como uma particularização do problema clássico de roteirização de veículos (VRP – *Vehicle Routing Problem*). Neste problema, peças estão armazenadas em um estoque central, chamado de supermercado, de onde são transferidas para pontos de uso localizados ao longo da linha de produção. O ritmo de fabricação na linha de produção é suposto constante, o que torna periódica a necessidade de reposição das embalagens com peças. Uma frota de rebocadores transporta as embalagens, dispostas sobre plataformas com rodas puxadas pelo mesmo e configurando um comboio. O objetivo do problema é roteirizar a frota de rebocadores, maximizando sua utilização e garantindo o atendimento da demanda gerada pela linha de produção.

O problema é comum a muitas empresas de manufatura de bens de consumo e possui impacto direto nos custos operacionais. A literatura sobre o tema é escassa e as soluções empregadas na indústria habitualmente se baseiam na experiência prática de operadores ou responsáveis pela movimentação de materiais.

Este trabalho propõe uma heurística para obtenção de uma solução para o problema, baseada em métodos de inserção. A heurística proposta foi aplicada a um caso na indústria automobilística e a comparação entre a solução obtida e aquela formulada por operadores demonstrou ganho no número de rotas.

Palavras chaves: roteirização, logística, sistema de abastecimento, heurística.

ABSTRACT

This work studies the routing of vehicles for material delivery to assembly lines, which consists of a generalization of the classic Vehicle Routing Problem (VRP). In this problem, parts are stored in central depot called supermarket and from where they are distributed to points of use placed along the production line. Production rate in the assembly line is considered constant, which means that parts are delivered to points of use periodically. A fleet of tow cars transfers the boxes or containers of parts using wheeled towed carts. The objective of this problem is to route the fleet of the tow cars maximizing their utilization and fulfilling the assembly line demand for parts.

This problem is common to several companies and has direct impacts in material handling costs. The theme is poorly explored in routing studies and many companies use operator experience to configure tow cars routes.

This work proposes a heuristic based on insertion methods to find a solution for the problem. The heuristic was applied to a real problem and resulted in the reduction of the number of routes when compared to former operator solution.

Keywords: vehicle routing, logistics, line feeding, heuristic.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Apresentação	1
1.2	Relevância do Problema e Motivação.....	2
1.3	Objetivo e Organização do Trabalho	6
2	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	8
2.1	Descrição do Problema	8
2.2	Objetivos e Restrições Operacionais	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1	O Problema da Roteirização de Veículos.....	20
3.1.1	O Problema Clássico de Roteirização de Veículos	24
3.1.2	Abordagens e Estratégias de Solução	27
3.1.3	Heurísticas clássicas.....	28
3.1.4	Metaheurísticas	32
3.2	Trabalhos sobre Roteirização de Veículos em Ambientes Industriais.....	32
3.2.1	O Trabalho de Vaidyanathan <i>et al.</i> (1999).....	32
3.2.2	O Trabalho de Choi e Lee (2002).....	35
3.2.3	O Trabalho de Golz <i>et al.</i> (2010)	37
3.2.4	Análise dos Trabalhos Revisados	39
3.3	O Problema do Caminho Mínimo	40
4	MÉTODO DE SOLUÇÃO	46
4.1	Determinação da Matriz de Caminhos Mínimos	46
4.1.1	Descrição do método	46
4.1.2	Exemplo de aplicação.....	51
4.1.3	Comentários sobre o método.....	54
4.2	Determinação das Rotas de Abastecimento	55
4.2.1	Introdução	55
4.2.2	Heurística de solução	56
4.2.3	Melhoria da Solução	67
5	IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DO ALGORITMO	72

5.1	Testes para a validação do algoritmo.....	76
5.1.1	Inclusão gradativa de pontos.....	77
5.1.2	Alteração da capacidade – rede 1	81
5.1.3	Rotas simétricas – rede 1	82
5.1.4	Alteração da rede de corredores – rede 2	83
5.1.5	Alteração da frequência de abastecimento – rede 2	86
5.2	Conclusões do capítulo	88
6	APLICAÇÃO DO MÉTODO DE SOLUÇÃO	90
6.1	Estudo de caso.....	90
6.1.1	Escopo e parâmetros do caso	90
6.1.2	Solução manual.....	94
6.1.3	Aplicação do algoritmo	99
6.1.4	Comparação entre as soluções	105
6.2	Considerações finais do capítulo	110
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	112
8	REFERÊNCIAS.....	117
ANEXO A -	DADOS DO ESTUDO DE CASO	120
ANEXO B -	MATRIZ DE CAMINHOS MÍNIMOS	124
ANEXO C -	ROTAS DA SOLUÇÃO MANUAL.....	128
ANEXO D -	ROTAS DA SOLUÇÃO BALANCEADA.....	131
ANEXO E -	ROTAS DA SOLUÇÃO CONCENTRADA.....	134

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: Objetivos operacionais do sistema de abastecimento.....	16
Quadro 2.2: Restrições operacionais do sistema de abastecimento.....	17
Quadro 3.1: Principais pontos do estudo de Vaidyanathan <i>et al.</i> (1999).....	35
Quadro 3.2: Principais pontos do estudo de Choi e Lee (2002).....	37
Quadro 3.3: Principais pontos do estudo de Golz <i>et al.</i> (2010).....	39
Quadro 4.1: Indicadores de qualidade visual da solução, cf. Poot <i>et al.</i> (2002).....	68
Quadro 6.1: Dados e parâmetros do caso real	95
Quadro 6.2: Solução manual – detalhamento.....	97
Quadro 6.3: Evolução da solução balanceada	101
Quadro 6.4: Evolução da solução concentrada.....	103
Quadro 6.5: Solução de balanceada – detalhamentos de resultados.....	104
Quadro 6.6: Solução concentrada – detalhamentos de resultados.....	104
Quadro 6.7: Resultados comparativos entre soluções.....	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Meios de transporte para o abastecimento de linhas (Baudin, 2004).....	5
Figura 2.1: Exemplos de linhas de produção contínua.	9
Figura 2.2: Exemplos de célula de trabalho.	9
Figura 2.3: Exemplo da combinação entre linhas de produção e células de trabalho.....	10
Figura 2.4: Exemplo de rota de abastecimento.....	10
Figura 2.5: Exemplo de composição dotada de rebocador.....	11
Figura 2.6: Ciclo de atividades de um rebocador em sua rota.....	12
Figura 2.7: Exemplo de PFEP e intervalos de abastecimento.	15
Figura 2.8: Atendimento do ponto de uso pelo lado direito do corredor.	18
Figura 2.9: Atendimento do ponto de uso pelo lado direito do corredor e itinerários.	18
Figura 2.10: Curvas da rota preferencialmente para a direita.....	19
Figura 3.1: Exemplo de solução do VRP.	25
Figura 3.2: Método das economias – algoritmo Clarke-Wright.	29
Figura 3.3: Algoritmo de varredura.	31
Figura 3.4: Problema do caminho mínimo.	42
Figura 3.5: Tamanho da rede e a influência de curvas e sentido de deslocamento.	43
Figura 3.6: Transformação da rede para a consideração de curvas.	43
Figura 3.7: Simplificação da transformação da rede.....	44
Figura 3.8: Formação de ciclos no itinerário.....	45
Figura 4.1: Grafo da rede de corredores de movimentação – 1º passo.	47
Figura 4.2: Grafo da rede de corredores de movimentação – 2º passo.	48
Figura 4.3: Algoritmo para determinação da matriz de caminhos mínimos.	49
Figura 4.4: Algoritmo para cálculo do caminho mínimo.	50
Figura 4.5: Sequência de cálculo do caminho mínimo.	52
Figura 4.6: Percurso do caminho mínimo.	54
Figura 4.7: Caminhos e subcaminhos.	54
Figura 4.8: Método sequencial.....	57
Figura 4.9: Itens, pontos de uso e intervalos entre abastecimento.....	58
Figura 4.10: Método sequencial – algoritmo para estimava do número de rotas.	59
Figura 4.11: Método paralelo.	62

Figura 4.12: Método paralelo aprimorado.....	64
Figura 4.13: Algoritmo para a geração de soluções alternativas.	65
Figura 4.14: Algoritmo para a determinação das rotas de abastecimento.....	66
Figura 4.15: Método de trocas com busca de itinerários comuns.....	70
Figura 4.16: Algoritmo para a melhoria da solução: trocas em itinerários comuns.	71
Figura 5.1: Tabelas de configuração: grafo de corredores e posicionamento de PDUs.	72
Figura 5.2: Tabela com o consumo de peças nos PDUs, correspondente ao PFEP.....	73
Figura 5.3: Tabela de resultados com botões de acionamento de macros.....	74
Figura 5.4: Tabela com o consumo de peças nos PDUs utilizada nos testes.	76
Figura 5.5: Rede 1 – corredores para os testes de verificação.....	77
Figura 5.6: Rede 1 – nós, arcos e posicionamento de POUs.	77
Figura 5.7: Rede 1 – matriz de caminhos mínimos – distâncias (parcial).	78
Figura 5.8: Rede 1 – matriz de caminhos mínimos – itinerários (parcial).	78
Figura 5.9: Duas rotas necessárias para o atendimento dos PDUs A1, A2 e A3.....	79
Figura 5.10: Duas rotas necessárias para o atendimento dos PDUs A1, A2, A3 e B1.	80
Figura 5.11: Rotas para o atendimento dos PDUs A1, A2, A3 e C1.	81
Figura 5.12: Rotas para o atendimento A1, A2, A3 e C1; capacidade 3 embalagens.	82
Figura 5.13: Rotas simétricas; rebocadores com capacidade de 4 embalagens.....	82
Figura 5.14: Rede 2 de corredores para os testes de verificação.	83
Figura 5.15: Rede 2 – nós, arcos e posicionamento de POUs.	84
Figura 5.16: Rede 2 – matriz de caminhos mínimos – distâncias.....	84
Figura 5.17: Rede 2 – matriz de caminhos mínimos – itinerários.	85
Figura 5.18: Rotas para atendimento de 4 PDUs; capacidade 3 embalagens.....	85
Figura 5.19: Remoção de um primeiro corredor da rede.	86
Figura 5.20: Remoção de um segundo corredor da rede.....	86
Figura 5.21: Rota de abastecimento com alteração de frequência.....	87
Figura 5.22: Solução quando da introdução do quarto ponto de uso.....	88
Figura 5.23: Solução para 4 pontos de uso e rebocador capacidade 3.....	89
Figura 6.1: Rede de corredores e pontos de uso do estudo de caso.....	91
Figura 6.2: Estudo de caso – rede de corredores e localização de PDUs.....	92
Figura 6.3: Estudo de caso – nós, arcos e posicionamento de POUs (parcial).....	93
Figura 6.4: Estudo de caso – PFEP (parcial).	93
Figura 6.5: Pontos de uso, número de itens e intervalo entre abastecimentos.	94

Figura 6.6: Procedimento manual para a determinação de rotas.....	96
Figura 6.7: Matriz de caminhos mínimos entre os pontos de uso (parcial).....	100
Figura 6.8: Evolução da solução balanceada – indicadores D_t e F_m	102
Figura 6.9: Solução balanceada – utilização das rotas.....	107
Figura 6.10: Solução concentrada – utilização das rotas	108
Figura 6.11: Variação da produção – efeito sobre número de rotas e distância.	109
Figura 6.12: Variação da produção – efeito sobre ocupação e utilização.	110
Figura A.1: Estudo de caso – nós, arcos e pontos de uso.....	120
Figura A.2: Estudo de caso – PFEP (parte 1).....	121
Figura A.3: Estudo de caso – PFEP (parte 2 – continuação).....	122
Figura A.4: Estudo de caso – PFEP (parte 3 – final).....	123
Figura B-1: Estudo de caso – Matriz de caminhos mínimos (parte 1).....	124
Figura B-1: Estudo de caso – Matriz de caminhos mínimos (parte 2).....	125
Figura B-1: Estudo de caso – Matriz de caminhos mínimos (parte 3).....	126
Figura B-1: Estudo de caso – Matriz de caminhos mínimos (parte 4 – final).....	127
Figura C-1: Solução manual – rotas 1 a 4.....	128
Figura C-1: Solução manual – rotas 5 a 8.....	129
Figura C-2: Solução manual – rotas 9 a 12.....	130
Figura D-1: Solução balanceada – rotas 1 a 4.....	131
Figura D-2: Solução balanceada – rotas 5 a 8.....	132
Figura D-3: Solução balanceada – rotas 9 a 11.....	133
Figura E-1: Solução concentrada – rotas 1 a 4.....	134
Figura E-2: Solução concentrada – rotas 5 a 8.....	135
Figura E-1: Solução concentrada – rotas 9 e 10.....	136

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGV	<i>Automated Guided Vehicle</i> – veículo autônomo de transporte, capaz de se deslocar ao longo de itinerários pré-definidos e executar funções de movimentação.
BOM	<i>Bill of Materials</i> – Lista de materiais do produto: indica a quantidade de peças que compõe um determinado produto.
C_{emb}	Capacidade da embalagem onde a peça está acondicionada, descrita em peças/embalagem.
D_t	A distância total percorrida na solução, incluindo todas as rotas.
F_m	O indicador de forma da solução, equivalente a soma das distâncias entre os pontos de uso e o centroide da rota, conforme proposto por Kim <i>et al.</i> (2006).
IRP	<i>Inventory Routing Problem</i> – Problema de Estoque e Roteirização.
JIT	<i>Just-In-Time</i> – filosofia japonesa de produção em que todo o canal de suprimentos é sincronizado para reagir às necessidades das operações dos clientes (Ballou, 2006).
MIX	Proporção de produção de determinado produto em relação ao total produzido.
PFEP	<i>Plan-For-Every-Part</i> – plano para cada peça. Planejamento realizado no primeiro passo de implantação do <i>Lean Materials Handling</i> ; detalha as características de peças e componentes e suas necessidades quanto a armazenagem, manuseio e transporte.
PDU	Ponto de uso – local ou estação de trabalho ao longo de uma linha de produção onde são consumidas peças e componentes. Ponto de destino dos meios de transporte responsáveis pelo abastecimento da linha.

PRVALP	Problema de roteirização de veículos para o abastecimento de linhas de produção, objeto desta pesquisa.
S_b	Solução balanceada gerada pelo algoritmo proposta neste trabalho.
S_c	Solução concentrada gerada pelo algoritmo proposta neste trabalho.
S_m	Solução manual tomada como referência para a comparação de resultados. A solução corresponde a rotas definidas pelo processo manual.
T_{reab}	Intervalo teórico entre reabastecimentos de embalagens de um item, descrito em minutos.
TP	<i>Throughput</i> – quantidade de material ou número de peças processadas por unidade de tempo.
TSP	<i>Traveling Salesman Problem</i> – Problema do Caixeiro Viajante.
TT	<i>Takt-Time</i> – tempo de tacto. Tempo necessário para a execução de uma peça, ou seja, o tempo transcorrido entre a repetição do início ao fim da operação.
VRP	<i>Vehicle Routing Problem</i> - Problema da roteirização de veículos.
VRPTW	<i>Vehicle Routing Problem with Time Windows</i> – Problema de roteirização de veículos com janelas de tempo.
WIP	<i>Work in process</i> – Estoque em processo

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

Este trabalho trata do problema de roteirização de veículos para o abastecimento de linhas de produção (PRVALP) em um ambiente industrial, o qual pode ser entendido como uma particularização do problema básico de roteirização de veículos (do inglês VRP – *Vehicle Routing Problem*). Christofides (1985) define o problema básico de roteirização de veículos como aquele em que veículos localizados em um depósito central devem ser programados para visitar clientes geograficamente dispersos, de modo a atender a suas demandas conhecidas. A restrição mais comumente imposta ao problema está relacionada à capacidade de transporte dos veículos e o objetivo do problema é minimizar o número de veículos empregados.

Entretanto, diversas são as situações reais em que as restrições se apresentam com maior grau de complexidade. Frota de veículos heterogênea ou limitada, presença de janelas de atendimento, periodicidade de atendimento, jornada máxima de trabalho são alguns dos exemplos de restrições adicionais presentes nos problemas práticos. Também quanto ao seu objetivo, o problema pode ser alterado. Minimizar custos globais, incluindo custos fixos e variáveis, minimizar a distância percorrida, maximizar o nível de atendimento são exemplos de objetivos buscados em casos reais.

O objetivo do PRVALP é roteirizar uma frota de rebocadores necessários para o transporte de embalagens com componentes entre uma área de estoque e os diversos pontos de uso (PDU) distribuídos ao longo de uma linha de produção. As embalagens devem ser disponibilizadas no PDU segundo uma frequência conhecida e sempre por um mesmo rebocador designado. Os rebocadores possuem uma capacidade de transporte conhecida, de modo que o número de embalagens movimentadas a cada viagem é restrito. Restrições adicionais ao problema incluem a movimentação dos rebocadores na correta mão de direção dos corredores e o comprimento máximo da composição resultante do agrupamento entre rebocadores e os carros rebocados que levam as embalagens. Além de procurar a menor frota necessária, objetivos adicionais do problema incluem homogeneizar a carga de trabalho entre os rebocadores alocados na movimentação e reduzir a distância total percorrida.

1.2 Relevância do Problema e Motivação

Um dos fatores mais importantes no projeto de uma nova planta industrial é a forma como será realizada a movimentação interna de materiais. Em uma fábrica típica, a movimentação de materiais pode representar até 25% da mão de obra empregada e cerca de 50% da área ocupada (Tompkins *et al.*, 2003).

De acordo com Sule (2009), esta atividade pode representar entre 30% e 75% dos custos operacionais totais de uma planta de manufatura. Trata-se certamente de uma faixa ampla, porém, de certa maneira, ela sinaliza o potencial impacto que a movimentação pode ter nos custos operacionais totais. Reafirma-se assim a importância que deve ser dada a esta atividade, tradicionalmente considerada como uma atividade que não adiciona valor ao processo produtivo. Segundo este autor, a forma de movimentação e manuseio tem impacto direto sobre o arranjo físico da fábrica, definindo necessidades de área, corredores, ruas, posicionamento relativo entre áreas de trabalho, entre outros aspectos. Estudos e levantamentos demonstram que economias da ordem de 15% a 20% podem ser alcançadas mediante uma revisão dos processos envolvidos na atividade de movimentação (Sule, 2009). Tompkins *et al.* (2003) tem a mesma opinião, comentando que o arranjo físico de uma fábrica e a movimentação de materiais são inseparáveis e que a integração entre estes planejamentos é particularmente crítica no projeto de uma nova instalação.

Outros autores também concordam que a movimentação de materiais é um componente essencial de um sistema de manufatura. Bozer e Yen (1996) afirmam que um sistema de movimentação de materiais incapaz de disponibilizar peças e componentes nas áreas de fabricação no momento certo e nas quantidades corretas pode levar a sérias discontinuidades e perdas no processo de produção, como ociosidade de equipamentos ou equipes de produção, além da elevação dos estoques em processo (WIP – *work in process*) ou mesmo a perda de prazos de entrega.

Nos últimos anos, o advento dos conceitos de Manufatura Enxuta (*Lean Manufacturing* ou simplesmente, *lean*) e das filosofias japonesas de gestão da manufatura redefiniu a atividade entre aquelas complementares ao processo de produção. Particularmente, a introdução do *Just-In-Time* (JIT) reforçou a necessidade de se configurar sistemas ainda mais robustos e eficientes para o transporte, distribuição e localização de materiais nos locais de produção (Bozer e Yen, 1996).

Corrêa *et al.* (2001) descrevem o JIT como uma filosofia que inclui aspectos de administração de materiais, gestão da qualidade, arranjo físico, projeto do produto, organização do trabalho e gestão de recursos humanos, entre outros, voltados para a contínua melhoria e aprimoramento dos processos necessários ao processo produtivo. Fundamentalmente o JIT tem como objetivos a qualidade e a flexibilidade, perseguidos por meio de uma substancial redução de estoques e lotes de movimentação, os quais, quando presentes, tendem a mascarar eventuais problemas do processo de produção. Do ponto de vista prático, esta mudança de paradigma na disponibilização de estoques, exige mudanças significativas dos processos auxiliares à manufatura, dentre os quais a movimentação de materiais. Abastecer linhas ou células de produção adequadamente no que se refere à quantidade, local de abastecimento e momento de abastecimento passou a ser condição essencial para o bom desempenho da manufatura. Esta adequação da atividade de movimentação de materiais foi em grande parte revisada sob os princípios da manufatura enxuta. Esta filosofia de gestão foca a redução de sete tipos de reconhecidos desperdícios presentes nos ambientes de manufatura: superprodução, tempo de espera, transporte, excesso de processamento, inventário, movimentos e defeitos. Como a prática tem demonstrado, a redução sistemática desses desperdícios tem efeitos diretos na melhoria de qualidade dos produtos e diminuição do tempo e custo de produção.

À aplicação dos conceitos de manufatura enxuta à movimentação de materiais, Harris *et al.* (2003) deram o nome de *Lean Materials Handling*, ou movimentação enxuta de materiais. Os autores destacam os 5 passos necessários para a configuração de um sistema enxuto de movimentação de materiais:

1. Elaborar o plano para cada peça (do inglês, *Plan For Every Part* – PFEP). Trata-se de uma relação exaustiva de todos os componentes e peças que serão movimentados e transportados no ambiente de produção, apresentando características como identificação, fornecedor, embalagem, quantidade na embalagem, pontos de uso, frequências de consumo, localização no estoque, níveis de reposição, entre outras.
2. Organizar uma área central de estoque, o chamado supermercado de peças. Nesta área as peças são armazenadas mediante a utilização de um sistema de controle e localização, capaz de informar com precisão as quantidades presentes no estoque. Também devem ser estabelecidas as políticas de reposição dos estoques, bem como os métodos de separação para o abastecimento das linhas de produção.

3. Estabelecer rotas de abastecimento. Por princípio, um sistema enxuto de movimentação de materiais deve ser capaz de entregar peças e componentes nas áreas de trabalho com precisão. Para tanto, meios de transporte devem ser selecionados, rotas de movimentação estabelecidas com a identificação de itinerários e pontos de visitação, assim como a frequência das visitas a estes pontos e quais as embalagens a serem entregues ou recolhidas. As embalagens a serem utilizadas, sua localização no ponto de uso, a forma de apresentação das peças e o encaminhamento e destino das embalagens vazias também devem ser definidas.
4. Implantar mecanismos de sinalização de necessidade de abastecimento ou reposição de embalagens. Cartões kanban ou embalagens vazias são as formas visuais tradicionais de sinalização. Modernamente, através da automação, sistemas eletrônicos têm substituído àquelas alternativas.
5. Buscar continuamente melhorias no sistema. A princípio, monitorar o sistema através de indicadores de desempenho e produtividade, procurando estabelecer métricas comparativas e históricas. Um processo de melhoria contínua deve ser estabelecido, buscando o aprimoramento dos indicadores e do sistema.

Neste processo, a definição dos meios de transporte e o estabelecimento das rotas de abastecimento guardam especial importância e se alinham ao objetivo desta pesquisa.

Conforme enfatizam Tompkins *et al.* (2003), normalmente existe mais de uma solução para a definição do sistema de movimentação, sendo esta uma combinação dos seguintes fatores:

- a) Material a ser transportado e suas características físicas, como forma, tamanho, composição, fragilidade, etc.
- b) Movimentos, caracterizados pelo ponto de origem da movimentação, ponto de destino e intensidade ou frequência da movimentação.
- c) Método, ou forma de transporte.
- d) Tecnologia disponível, custos de aquisição, segurança e confiabilidade operacional.

Para um ambiente de manufatura ou linha de produção, onde dezenas ou mesmo centenas de diferentes embalagens, em diversos tamanhos, capacidades e configurações, podem fazer parte do universo de peças e componentes a serem transportados e disponibilizados em seus respectivos pontos de uso, estes fatores por si só podem determinar múltiplas alternativas. Como sugerem Tompkins *et al.* (2003), a alternativa final escolhida compreende uma solução de compromisso e ganho total viável, porém sujeita a restrições diversas. Uma

solução para um grupo de peças pode não ser a mais conveniente para outro grupo e, por vezes, alternativas ou sistemas complementares podem ou devem ser implantados.

Figura 1.1: Meios de transporte para o abastecimento de linhas (Baudin, 2004).
a) paleteira; b) carrinho manual; c) transportador contínuo; d) empilhadeira; e) composição com rebocador; f) AGV.

Em que pesem as considerações anteriores sobre a determinação de uma melhor alternativa para a movimentação de materiais, Baudin (2004) sintetizou os meios mais comumente utilizados no abastecimento de linhas de produção, particularmente aqueles empregados na indústria automobilística ou em indústrias de bens de consumo e produção em massa. Sua avaliação aponta paleteiras, carrinhos manuais, transportadores contínuos, empilhadeiras, composições dotadas de rebocadores e AGVs (*Automated Guided Vehicles*), como os meios tradicionalmente utilizados conforme mostra a Figura 1.1.

Baudin (2004) ressalta as vantagens e desvantagens, os usos e aplicações gerais destes meios de transporte. Compara empilhadeiras e composições com rebocadores, reconhecendo a flexibilidade das primeiras, porém afirmando que são inadequadas para entregas frequentes como aquelas necessárias em linhas de produção contínua. Sugere que as composições com rebocadores são meios mais adequados, ainda que o uso de AGVs tenha crescido nas últimas décadas.

As revisões bibliográficas realizadas por Co e Tanchoco (1991) e Qiu *et al.* (2002) mostram que os estudos sobre a movimentação de AGVs, desenho de redes e roteirização em ambientes industriais e não industriais, ainda que bastante extensos e abrangentes, foram intensamente investigados.

Por outro lado, o problema da roteirização de composições para o abastecimento de linha tem sido pouco explorado na literatura. Esta pesquisa identificou os trabalhos de Vaidyanathan *et al.* (1999), Choi e Lee (2002) e Golz *et al.* (2010) como os estudos mais aprofundados sobre o tema. Conforme os comentários apresentados na Revisão Bibliográfica, estes autores abordam o tema de maneira diversa entre si e daquela a ser tratada neste trabalho.

Pelo exposto acima, percebe-se uma relevante lacuna relativa à determinação estruturada de rotas para o abastecimento de linhas de produção realizado com composições dotadas de rebocadores. O tema ganha mais relevância quando são lembrados os aspectos econômicos relativos à movimentação de materiais descritos no início deste capítulo.

1.3 Objetivo e Organização do Trabalho

Este trabalho tem como objetivo propor uma heurística para a determinação dos roteiros a serem cumpridos por uma frota de rebocadores responsável pelo abastecimento de uma linha de produção. A solução do problema deve manter o atendimento da linha, sem discontinuidades no seu abastecimento e maximizar a utilização dos recursos envolvidos.

A solução deve trazer ganhos em relação àquelas habitualmente formuladas na indústria, normalmente executadas de forma manual e baseadas na experiência de operadores ou responsáveis pela movimentação de materiais. Sua implementação deve ser flexível e compatível com recursos computacionais comuns, de forma a possibilitar a rápida geração de soluções alternativas ou simulação de diferentes cenários de abastecimento.

Este último aspecto é bastante interessante visto que o ambiente de produção é caracteristicamente variável, sujeito a perturbações relacionadas ao ritmo de fabricação ou montagem, falta de componentes, mudanças na diversidade de produtos (*mix*), falhas e paradas de máquinas e sistemas automáticos, entre outras. Operacionalmente, estes fatores podem justificar uma reavaliação e redefinição periódica da programação de abastecimento ou rotas dos rebocadores, objetivando uma melhor utilização destes recursos e garantia do atendimento.

O texto que se segue está organizado da seguinte maneira:

No Capítulo 2 se caracteriza o problema real, procurando detalhar a operação de abastecimento de peças em linhas de produção realizada por meio de composições com rebocadores. São apresentados e justificados os objetivos de uma operação real e as restrições encontradas na prática.

O Capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica sobre temas relacionados ao problema e ao método de solução proposto.

O Capítulo 4 descreve a heurística aplicada ao problema, detalhando os algoritmos empregados. O Capítulo 5 apresenta comentários sobre a implementação do algoritmo e descreve os procedimentos utilizados para a sua validação.

O Capítulo 6 apresenta a aplicação da heurística a um problema prático e o compara sua solução com soluções obtidas pelos métodos convencionais.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões deste trabalho e recomendações para pesquisas futuras.

2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Este capítulo descreve o problema estudado, caracterizando os objetivos desejados e as restrições operacionais encontradas na prática.

2.1 Descrição do Problema

Diversos podem ser os arranjos físicos para a organização da produção de produtos de consumo em massa. Entre as alternativas, dois se destacam pela sua aplicabilidade recente nas empresas de manufatura:

1. Linhas de produção contínua, baseado no conceito de divisão sequencial do trabalho. Criadas por Ransom E. Olds em 1901 e aperfeiçoadas por Henry Ford a partir de 1913, as linhas de produção contínua se caracterizam pela disposição de diversas estações de trabalho interligadas por um transportador. O transportador movimenta os produtos de forma contínua, fazendo-os percorrer sequencialmente as estações de trabalho onde peças e componentes são agregados e montados manual ou automaticamente.

Neste arranjo, as estações de trabalho não possuem uma clara fronteira a menos daquelas impostas pela própria sequência de montagem ou pelo alcance de outros recursos de produção como ferramentas e dispositivos. A impossibilidade de se completar as operações planejadas para determinada estação de trabalho pode determinar a parada da linha, o que, em geral, se faz como um todo devido às características do transportador empregado.

O conceito de linha de produção ou montagem é largamente difundido nas indústrias, sendo tipicamente empregado naquelas de produção em massa. A Figura 2.1 mostra exemplos de linhas de produção contínua com transportador.

2. Células de trabalho, conceito difundido com o advento das técnicas japonesas de organização e gestão da produção. Nestas células, um grupo de pessoas é responsável pela fabricação ou montagem integral de um produto em uma área restrita. Internamente à célula se enfatiza o fluxo contínuo de materiais realizado preferencialmente de forma unitária. Conceitualmente, a célula recebe componentes

e entrega produtos prontos, em lotes de pequeno volume. A Figura 2.2 mostra um exemplo de células de trabalho.

Figura 2.1: Exemplos de linhas de produção contínua.

a) linha de montagem de embreagens na Ford Co; b) linha de montagem de motores estacionários; c) linha final de montagem na Toyota.

É comum a utilização combinada destes conceitos: linhas de produção são alimentadas por células de trabalho ou mesmo outras linhas contínuas, responsáveis pela montagem ou preparação de subconjuntos. A transferência de produtos entre células e linhas pode ser realizada tanto diretamente, célula para célula ou linha para linha, como via armazenagem em estoque de produtos semi-acabados. Diferenças de produtividade ou período de trabalho também podem justificar a utilização deste estoque intermediário. A Figura 2.3 mostra um exemplo da combinação entre estas diferentes configurações de linhas de produção para o caso de abastecimento direto, sem a utilização de estoque intermediário.

Figura 2.2: Exemplos de célula de trabalho.

Peças e componentes são posicionados na periferia externa da célula visando facilitar o abastecimento de materiais. Este posicionamento ainda deve garantir o fácil acesso e movimentação de operadores.

Em ambas as configurações, as peças e os componentes necessários para a montagem são acondicionados em embalagens dispostas de maneira planejada ao longo e ao lado da

estação ou na periferia da célula de trabalho. Além da disposição ergonômica necessária ao operador responsável pelo manuseio e montagem do produto, o correto posicionamento da embalagem visa facilitar o abastecimento da estação ou célula.

Figura 2.3: Exemplo da combinação entre linhas de produção e células de trabalho.

Conforme o passo 2 proposto por Harris *et al.* (2003) para a implantação do *Lean Materials Handling*, as peças estão armazenadas em um estoque central, chamado de supermercado, de onde são transferidas periodicamente para o seu correspondente ponto de uso (PDU) na linha. O passo 3 desta metodologia sugere que rotas de abastecimento sejam estabelecidas, prevendo-se a utilização de equipamentos adequados para tal. Um exemplo de rota de abastecimento é mostrado na Figura 2.4.

Figura 2.4: Exemplo de rota de abastecimento.

A rota mostrada passa pelos pontos de uso P1A1, P1A2, P2B2, P2B1, P2B3 e P1A4. Os pontos P3C1 e P3C4 não são abastecidos por esta rota por não estarem na correta mão de direção na movimentação do comboio.

Quanto ao equipamento a ser utilizado, este trabalho se concentra na aplicação de composições dotadas de rebocadores, cujos exemplos são mostrados na Figura 1.1e e na Figura 2.5. Estas composições, também chamadas de comboios, são constituídas de um rebocador e uma série de plataformas com rodas – estas plataformas também recebem o

nome de *dollies*. O número de plataformas em um comboio varia a cada viagem, limitada a um número máximo ou a um comprimento máximo do comboio. Restrições físicas da área ou das ruas de movimentação, a capacidade de tração do rebocador ou mesmo aspectos de segurança determinam esta limitação. Um operador conduz o rebocador seguindo a rota especificada; ele também é responsável pela troca de embalagens no ponto de uso, substituindo embalagens vazias por embalagens cheias.

Figura 2.5: Exemplo de composição dotada de rebocador.
Também chamado de comboio. O operador é responsável por dirigir o comboio pela rota definida e fazer a troca de embalagens vazias por cheias. O número de plataformas rebocadas é variável, porém limitado um máximo dadas restrições físicas do layout.

Embalagens vazias retornam ao supermercado para posterior uso. Operacionalmente, uma vez no depósito, as embalagens são identificadas e determinam a necessidade de reabastecimento, reproduzindo um sistema kanban, porém sem cartões. Em instalações mais recentes, sinais eletrônicos gerados pelos operadores da linha instruem a necessidade de abastecimento do ponto de uso. Desta forma, estabelece-se um ciclo periódico e repetitivo de atividades, conforme demonstrado na Figura 2.6. Na chegada do rebocador ao supermercado, a existência de embalagens vazias ou sinais eletrônicos para reabastecimento determina a saída da próxima viagem do rebocador. Duas estratégias são utilizadas para as saídas:

1. Saídas em intervalos fixos e regulares, de tal forma que o rebocador apenas iniciará uma nova viagem ao final de um período pré-estabelecido, como por exemplo, a

cada 1 hora ou a cada 30 minutos. Tal intervalo deverá ser superior ao maior tempo de viagem da rota, porém inferior ao intervalo entre abastecimentos do item mais frequente presente na rota. Duas consequências podem ser esperadas desta estratégia:

- a. Rebocador chega ao supermercado e já existem solicitações de abastecimento: neste caso poderá haver um atraso no atendimento, visto que o rebocador deverá esperar até que o intervalo pré-estabelecido seja cumprido e então iniciar nova viagem. Estoques locais no ponto de uso, configurados com maior número de embalagens ali posicionadas ou mesmo embalagens de maior capacidade, deverão compensar atrasos desta ordem.
- b. Rebocador chega ao supermercado, não existem solicitações e espera o intervalo pré-estabelecido. Para o caso de solicitações sinalizadas por embalagens vazias, o rebocador deverá sair mesmo que vazio, supondo que, durante a viagem, embalagens vazias sejam recolhidas para um próximo abastecimento; para o caso de solicitações sinalizadas eletronicamente, o rebocador pode aguardar um primeiro sinal, separar a embalagem solicitada, aguardar o intervalo de tempo pré-estabelecido e então iniciar sua viagem.

Figura 2.6: Ciclo de atividades de um rebocador em sua rota.

Cada ciclo corresponde a uma viagem do rebocador. A cada viagem a carga transportada varia, visto que a periodicidade de consumo das embalagens nos PDU é intrinsecamente diferente.

2. Saída imediata, desde que novos abastecimentos sejam necessários. Corresponde ao item b anterior, porém sem a necessidade de cumprir o intervalo pré-estabelecido.

Quanto ao tempo para se cumprir uma viagem do rebocador em sua rota especificada, ele se compõe de quatro parcelas:

1. Tempo de manuseio e preparação da carga da próxima viagem do rebocador realizado no supermercado e correspondendo às atividades:
 - a. Parar e descer do rebocador.
 - b. Identificar itens a serem separados.
 - c. Separar as embalagens correspondentes.
 - d. Montar o comboio.
 - e. Subir no rebocador e partir.
2. Tempo de deslocamento do rebocador para cumprir o trajeto proposto, que corresponde à razão entre a distância total da rota estabelecida e a velocidade do rebocador. Esta última pode ser considerada constante para fins de dimensionamento do sistema.
3. Tempo de manuseio das embalagens nos pontos de uso, correspondendo às atividades de:
 - a. Parar e descer do rebocador.
 - b. Transferir uma ou mais embalagens cheias do comboio para suas posições no ponto de uso.
 - c. Transferir uma ou mais embalagens vazias do ponto de uso para o comboio.
 - d. Subir no rebocador e partir.
4. Intercorrências diversas ocorridas no trajeto do rebocador, motivadas por cruzamentos entre corredores, obstruções ou congestionamentos provocados por outros veículos com trajeto similar, entre outras causas.

Quanto a parcela 1, duas estratégias comumente empregadas determinam diferentes produtividades. Na chamada estratégia “acoplada”, o operador do rebocador é também responsável pela separação e preparação da carga da próxima viagem. Na estratégia “desacoplada”, o operador do rebocador é auxiliado por outro operador nesta preparação. O emprego desta estratégia é tão mais efetivo quanto maior o uso de sinalização eletrônica para o abastecimento, dada que a preparação da carga pode ser executada antes mesmo do retorno do rebocador ao supermercado de peças.

A parcela 2 tem caráter praticamente determinístico, sendo afetada pela aleatoriedade presente na parcela 4. As parcelas 1 e 3 dependem do número de embalagens que compõe a carga de uma viagem. Percebe-se que o tempo para se cumprir uma viagem deve ser inferior tanto ao intervalo pré-estabelecido entre partidas do rebocador a partir do

supermercado como também ao menor intervalo entre abastecimentos de qualquer um dos itens pertencentes à rota.

Quatro fatores determinam o intervalo entre abastecimentos (T_{reab}) de uma embalagem no ponto de uso:

1. A taxa de produção da linha, o chamado *throughput* (TP), descrita em produtos/min. Corresponde ao inverso do ciclo de produção, o chamado *takt-time* (TT), descrito em min/produto.
2. Proporção de produção de determinado produto em relação ao total produzido, o chamado *mix* de produção (MIX), descrito como um percentual da produção total.
3. A quantidade de peças (Q) consumida a cada ciclo de produção de um produto. Este dado está descrito na lista de materiais do produto, também chamada de estrutura do produto ou ainda de *Bill of Materials* (BOM). Descrito em quantidade/produto ou unidades/produto.
4. Capacidade da embalagem (C_{emb}) onde a peça está acondicionada, descrita em quantidade/embalagem ou peças/embalagem.

Assim:

$$T_{reab} = TP \times MIX \times Q / C_{emb}, \text{ ou} \quad (2-1)$$

$$T_{reab} = 1 / TT \times MIX \times Q / C_{emb} \quad (2-2)$$

A Figura 2.7 mostra um exemplo parcial de PFEP com os valores calculados do intervalo entre reabastecimentos de embalagens em alguns pontos de uso. Como uma mesma rota é responsável por abastecer mais de um item, pode-se intuir que a cada viagem do ciclo mencionado anteriormente, os rebocadores levarão diferentes itens, sendo que os de menor intervalo entre abastecimentos estarão presentes em maior número de viagens e, inversamente, os de maior intervalo entre abastecimentos estarão presentes em menor número de viagens.

De outra forma, não se espera que os itens de um mesmo ponto de uso sejam consumidos em fase, ou melhor, de maneira sincronizada. Produtos diferentes em produção no mesmo ponto de uso e que façam uso de itens comuns, flutuações de mix e eventuais paradas de linha não permitem afirmar que o consumo de embalagens de itens diferentes será sincronizado. Outra percepção trazida pela análise dos intervalos entre abastecimentos é

que, de forma geral, eles não são múltiplos entre si. A combinação destas duas últimas observações eleva a complexidade de obtenção de uma solução viável para o problema de roteirização dos rebocadores.

Ainda durante a fase de planejamento do sistema, a capacidade das embalagens (C_{emb}) pode ser questionada e eventualmente revisada, procurando um melhor ajuste entre o número de rebocadores disponíveis, sua ocupação e o atendimento da demanda do ponto de uso. Entretanto, outros fatores além destes determinam a capacidade final da embalagem, dentre os quais os aspectos ergonômicos de acesso às peças ali acondicionadas, o tamanho físico da embalagem e sua ocupação no estoque, na plataforma rebocada e no transporte desde o fornecedor. Deste modo, durante a fase operacional do sistema, a capacidade das embalagens é considerada definida e constante.

Ponto de Uso	Produto	Throughput (un/h)	Código Peça	Descrição da Peça	Qtd/Prod (un/prod)	Qtd / Embal (un/embal)	Intervalo reabastec (min)
P1A1	prod_DC	12,6	A171265E	SUPT - PBOX OTR S/PNL CS STEP	1	20	95,2
P1A1	prod_DC	12,6	A1712651	REFORÇO CJ- PBOX PLTF #4 CS	1	20	95,2
P1A1	prod_SC	1,4	A1712655	REFORÇO CJ-PBOX PLTF CS	2	8	171,4
P1A1	prod_DC	12,6	A2101291	PAINEL PBOX LADO&W/H INT,LH	1	30	142,9
P1A1	prod_SC	1,4	A2101927	PAINEL PBOX LADO&W/H INT,LH	1	4	171,4
P1A2	prod_DC	12,6	A1722221	PAINEL CJ-PBOX W/H CS	1	30	142,9
P1A2	prod_DC	12,6	A171265E	SUPT - PBOX OTR S/PNL CS STEP	1	20	95,2
P1A2	prod_DC	12,6	A2101296	PAINEL PBOX LADO&W/H INT,RH	1	30	142,9
P1A2	prod_SC	1,4	A2101922	PAINEL PBOX LADO&W/H INT,RH	1	4	171,4
P1A3	prod_DC	12,6	A1711702	PAINEL-PBOX OTR SI-RH	1	9	42,9
P1A3	prod_DC	12,6	A1717791	PAINEL CJ PBOX CS LATERAL,RH	1	12	57,1
P1A3	prod_DC	12,6	A2101E79	PAINEL CJ PBOX CS LATERAL OTR,RH	1	80	381,0
P1A4	prod_DC	12,6	A1717792	PAINEL CJ PBOX CS LATERAL,LH	1	12	57,1
P1A4	prod_DC	12,6	A2101E72	PAINEL CJ PBOX CS LATERAL OTR,LH	1	80	381,0
P2B1	prod_SV	2,5	A1729211	LATERAL ESQ	1	12	288,0
P2B1	prod_DC	12,6	A17E9102	PAINEL DIANT TETO FRONTAL	1	34	161,9
P2B1	prod_DC	12,6	A17E9110	CJ. HABITACULO	1	8	38,1
P2B1	prod_DC	12,6	A17E9111	BOW CJ TETO CENTRAL	1	26	123,8

Figura 2.7: Exemplo de PFEP e intervalos de abastecimento.

PFEP mostrado parcialmente. Neste exemplo, a coluna *Throughput* mostra a quantidade horária de produção do produto. A coluna mais a direita representa o intervalo teórico entre abastecimentos da embalagem do item no PDU.

O ritmo e mix de produção procuram ser estáveis, porém estão sujeitos a flutuações e mudanças, motivadas principalmente pela falta de peças nos processos anteriores ou posteriores àqueles abastecidos pelo sistema, falhas e paradas em equipamentos automáticos, problemas de qualidade em peças ou mesmo descontinuidade de entregas por parte de fornecedores. Estas ocorrências, várias delas de caráter aleatório, podem motivar a alteração e nova definição e balanceamento das rotas de abastecimento.

2.2 Objetivos e Restrições Operacionais

A função do sistema de abastecimento é naturalmente atender as demandas da linha de produção sem provocar paradas por falta de peças. Entretanto, operacionalmente, procura-se otimizar o processo visando os objetivos adicionais listados no Quadro 2.1.

Quadro 2.1: Objetivos operacionais do sistema de abastecimento

Objetivo	Reflexos / Justificativa	Tipo
1. Reduzir o número de recursos necessários no sistema e maximizar sua utilização	Redução de custos fixos e investimentos em rebocadores e plataformas com rodas e custos recorrentes para sua manutenção.	Prioritário
2. Reduzir a distância total percorrida	Redução de custos variáveis relativos à utilização de equipamentos.	Objetivo de segunda ordem
3. Balancear carga de trabalho entre as rotas estabelecidas	Alinhado com boas práticas de gestão; perspectiva de maior flexibilidade do sistema em situações de exceção.	Objetivo de segunda ordem

Em contra partida, uma série de restrições se impõem à operação do sistema, conforme mostrado no Quadro 2.2. O quadro justifica as restrições impostas e qualifica seu tipo, especificando-as como obrigatórias ou desejadas. Estas últimas podem se confundir com os objetivos operacionais desejados e sua imposição reflete práticas correntes empregadas em sistemas reais e que, historicamente, demonstraram ser eficientes para o bom desempenho do processo.

As restrições 1 e 2 foram comentadas em item anterior. Como se verá no capítulo de revisão bibliográfica, a restrição 3 corresponde a principal diferença de abordagem desta pesquisa em relação ao que já foi publicado. Esta restrição corresponde à prática usual em empresas do setor industrial brasileiro, onde a atribuição dinâmica de rotas aos operadores, realizada a cada viagem do rebocador, não parece ter aceitação. Aparentemente, a flutuação ou a alteração de rotas a cada viagem do rebocador pode estabelecer um cenário não muito claro sobre a responsabilidade do operador em manter os pontos de uso adequadamente abastecidos com o consequente risco de falta de peças nas linhas.

A restrição 4 amplia a noção de responsabilidade pelo abastecimento já estabelecida pela restrição 3. Neste caso, todos os itens de um mesmo ponto de uso passam a ser responsabilidade de um mesmo operador. A adoção desta prática também auxilia na

minimização de congestionamentos, visto que apenas um comboio poderá parar em um mesmo ponto de uso. A restrição é tão somente desejada, visto que pontos de uso com muitos itens podem isoladamente exigir capacidade de abastecimento superior àquela oferecida por apenas uma rota; neste caso, forçosamente, 2 ou mais rotas serão necessárias. A restrição 5 procura segregar áreas de atendimento, com a perspectiva de manter rebocadores distantes uns dos outros e evitando, dentro do possível, a sobreposição de itinerários. Vista de outra forma, esta prática tenta minimizar interferências entre rotas.

Quadro 2.2: Restrições operacionais do sistema de abastecimento

Restrição	Justificativa	Tipo
1. Número máximo de plataformas rebocadas	Restrições físicas para a movimentação, capacidade de tração do rebocador, segurança.	Obrigatória
2. Comprimento máximo do comboio	Restrições físicas para a movimentação, segurança.	Obrigatória
3. Rotas fixas por rebocador	Atribuição de responsabilidade ao operador.	Obrigatória
4. Itens de um mesmo POU na mesma rota	Movimentação do rebocador em regiões concentradas da área de produção; congestionamentos podem ser evitados.	Desejada
5. Proximidade entre os POU de uma mesma rota	Movimentação do rebocador em regiões concentradas da área de produção; congestionamentos podem ser evitados.	Desejada
6. Atendimento de POU localizados do lado direito da mão de direção do corredor	Evitar carros na contramão; segurança; evitar congestionamentos.	Obrigatória
7. Rebocadores fazem curvas preferencialmente para a direita	Minimizar o cruzamento de rotas; segurança; evitar congestionamentos.	Desejada
8. Rebocadores não faz manobra de retorno no corredor	Inviabilidade técnica, segurança.	Obrigatória

A restrição 6 mostrada na Figura 2.8 se relaciona com a segurança da operação e tende a minimizar congestionamentos e trata do posicionamento de parada do comboio no momento de abastecimento do ponto de uso. Ao se manter o lado direito do corredor para esta atividade, garante-se passagem livre para outros comboios vindos em direção contrária. A prática é complementada com o adequado posicionamento dos pontos de abastecimento localizados em lados contrários de um mesmo corredor: o ideal é que exista um

afastamento entre tais pontos ao longo do corredor de forma que a parada simultânea de comboios ainda permita a passagem de outras composições.

Figura 2.8: Atendimento do ponto de uso pelo lado direito do corredor. Tal prática evita comboios em trânsito ou parados na contramão do corredor e contribui à segurança da operação; reduz a possibilidade de congestionamentos.

Figura 2.9: Atendimento do ponto de uso pelo lado direito do corredor e itinerários. A restrição de parada no lado direito do corredor resulta em itinerários e distâncias diferentes quando se movimenta em direções contrárias entre dois pontos de uso.

Conforme mostrado na Figura 2.9, a introdução da restrição 6 particulariza o problema tratado, visto que, do ponto de vista de itinerário e distância entre dois pontos de uso, o deslocamento entre o primeiro até o segundo pode ser diferente daquele entre o segundo e o primeiro. Assim, a matriz de distâncias, necessária para determinação do roteamento, será assimétrica.

As restrições 7 e 8 são mostradas na Figura 2.10 e se relacionam a segurança e limitação técnica do sistema. A restrição 7 constitui uma prática comum em áreas de manobras de veículos; o procedimento evita o cruzamento entre fluxos que podem causar esperas tanto pela rota que faz a curva como pela rota que cede a passagem ao cruzamento. Já restrição 8 traduz um procedimento impraticável nas instalações comuns, visto que o raio de curva do

comboio é relativamente grande, incompatível com a largura do corredor; a execução de retornos exige grandes áreas de manobra.

Figura 2.10: Curvas da rota preferencialmente para a direita.

Curvas executadas preferencialmente à direita; curvas de retorno no corredor são impraticáveis. Estas práticas são comuns em pátios de manobras; contribuem para a segurança da operação e reduzem a possibilidade de congestionamentos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura que trata do tema central desta pesquisa. Foram analisados trabalhos relacionados ao problema da roteirização de veículos e problema do caminho mínimo, os quais auxiliaram na formulação da estratégia de solução do problema. Também foram pesquisados trabalhos relacionados à roteirização de veículos para o abastecimento de linhas de produção.

3.1 O Problema da Roteirização de Veículos

O primeiro problema de roteirização a ser estudado foi o caixeiro viajante (*Traveling Salesman Problem* – TSP) e que consiste em encontrar o roteiro ou sequência de cidades a serem visitadas por um caixeiro viajante de tal forma a minimizar a distância total percorrida e assegure que cada cidade seja visitada exatamente uma vez. Não se tem datas precisas a respeito dos primeiros estudos e formulações, porém, ao longo do tempo, novas restrições vêm sendo incorporadas ao problema original, de modo a melhor representar os diferentes tipos de problemas que envolvem roteiros de pessoas e veículos, como entre outros:

- Retorno do caixeiro ao ponto inicial da rota após um máximo número de visitas.
- Demandas nas cidades ou clientes visitados.
- Capacidades dos veículos.
- Duração máxima dos roteiros dos veículos, especificadas em tempo ou distância.
- Restrições de horário de atendimento, conhecidas como janelas de tempo ou janelas horárias de atendimento.
- Restrições de tipos de veículos que podem atender determinados clientes.
- Frota composta de veículos de diferentes tamanhos.

Admite-se que Dantzig e Ramser (1959) tenham sido os primeiros autores a formular o problema da roteirização de veículos (*Vehicle Routing Problem* – VRP), quando estudaram uma aplicação real de distribuição de combustível a postos de venda. Em seu trabalho, os autores se referem ao VRP com o uma particularização do TSP quando demandas nos postos de vendas e capacidade dos veículos são impostas ao problema. O trabalho propõe a formulação matemática do problema e trata de um algoritmo aproximado de solução baseado em programação linear.

Desde este trabalho pioneiro, muitas variações do VRP foram apresentadas, procurando incorporar ao problema original os mais diversos aspectos presentes nas aplicações reais, tanto na forma de objetivos como na forma de restrições. Belfiore (2006) apresenta uma classificação dos 4 aspectos que caracterizam o VRP com transporte de carga: função objetivo, restrições do problema, variáveis de decisão e hipóteses ou características do problema.

1. Função objetivo

- a. Minimizar custos totais, incluindo custos fixos e custos variáveis.
- b. Minimizar a distância total percorrida.
- c. Minimizar a duração das rotas.
- d. Minimizar o número de veículos.
- e. Minimizar uma função utilidade, baseada no nível de serviço ou percepção de clientes.

2. Restrições, categorizadas como:

- a. Restrições relativas aos veículos: capacidade máxima, tipo de carga transportável, inclusão de operações de carga e descarga, número e tipos de veículos disponíveis.
- b. Restrições junto aos clientes: existência de janelas de atendimento, atendimento total ou parcial da demanda, prioridade no atendimento, tempo máximo para carga e descarga, dia específico de atendimento.
- c. Restrições relativas às rotas: horário de início e término, tempo máximo, distância máxima percorrida, locais de parada.

3. Variáveis de decisão:

- a. Roteiro a ser percorrido.
- b. Designação de veículos a clientes.
- c. Quantidade de carga transportada para o cliente da rota.

4. Hipóteses ou características do problema:

- a. Tipo de operação: coleta, entrega, coleta e entrega simultânea, coleta ou entrega com retorno.
- b. Tipo de carga: única ou carga de lotação, múltiplas cargas ou cargas fracionadas.
- c. Tipo de demanda: determinística ou estocástica.
- d. Localização da demanda: nos nós da malha, nos arcos da malha ou combinada.

- e. Quanto à frota de veículos utilizada: limitada ou ilimitada, homogênea ou heterogênea.
- f. Posicionamento de depósitos: um único depósito, vários depósitos, disponibilidade de produtos nos depósitos.
- g. Jornada de trabalho: duração fixa, disponibilidade de horas extras, pernoites, intervalos fixos.
- h. Estrutura da rede: direcionada, não direcionada, mista.
- i. Horizonte de planejamento: curto prazo ou longo prazo.
- j. Outros: cada veículo pode visitar um cliente somente uma vez, cliente pertence a uma única rota, cliente pertence a mais de uma rota.

Segundo Belfiore (2006), a grande quantidade de parâmetros que podem influenciar o problema de roteirização de veículos resulta em dificuldades na sua modelagem e obtenção da solução. Para a autora, uma visão sistêmica dos principais problemas e uma adequada classificação, identificando aspectos mais relevantes, permite a identificação de uma estratégia adequada para o desenvolvimento da solução.

Bodin *et al.* (1983) propõe uma estrutura que classifica os problemas em função das restrições de aspecto espacial ou temporal, identificando:

1. Problemas de roteirização pura, nos quais não existem restrições temporais relacionadas ao horário de atendimento dos clientes e tampouco relações de precedência entre os clientes.

Em geral, neste grupo estão os problemas derivados do clássico problema do caixeiro viajante. A introdução de fatores como a disponibilidade de um ou mais roteiros ou veículos, as demandas dos clientes e a capacidade de atendimento dos veículos, a presença de um ou mais depósitos geram a multiplicidade de problemas encontrados neste grupo. Uma particularização compreendida no grupo é o caso da demanda que ocorre nos arcos em lugar da demanda nos nós, como o problema do carteiro chinês. Problemas deste grupo consideram somente aspectos espaciais e, obedecidas as restrições impostas, o objetivo é construir um conjunto de roteiros com o menor custo possível.

2. Problemas de programação de veículos, nos quais existem restrições de horários pré-estabelecidas para cada atividade a ser executada, como o horário de chegada e

de saída das lojas, o horário de saída do depósito, parada para reabastecimento, entre outros.

Neste tipo de problema se consideram tanto os aspectos espaciais como os aspectos temporais. O objetivo passa a ser minimizar custos desde que existam soluções viáveis que atendam as restrições temporais.

3. Problemas combinados de roteirização e programação de veículos, nos quais existem restrições quanto à precedência entre atividades associadas a eventos no tempo.

Neste tipo de problema, a ordem ou sequência de algumas atividades ou visitas está pré-definida, aumentando o grau de complexidade da solução.

Por sua vez, Ronen (1988) propôs uma classificação dos diversos problemas de roteirização e programação de veículos baseada nos ambientes operacionais e objetivos a serem alcançados:

1. Problemas relativos ao transporte de passageiros: programação de linhas de ônibus; de sistemas de táxi; de sistemas de transporte de pessoas, em geral idosos e deficientes, conhecidos como “*dial-a-ride*”; de transporte de escolares por ônibus, entre outros.
2. Problemas de prestação de serviços: roteirização e programação de equipes de reparos ou de serviços públicos, tais como de coleta de lixo, entrega postal, varrição de ruas e leitura de parquímetros, entre outros.
3. Problemas relativos ao transporte de carga (coleta e distribuição).

Todos os tipos de problemas citados acima são de natureza essencialmente operacional, ou seja, fazem parte das tarefas rotineiras de programação da frota, realizadas regularmente com periodicidade de curto prazo, em geral diária ou semanal.

Segundo Cunha (2000), a literatura apresenta outros problemas de roteirização de natureza mais tática ou estratégica do que operacional, tais como:

- Problemas integrados de localização e roteirização.
- Problemas integrados de estoque e roteirização (do inglês, *Inventory Routing Problem* – IRP), nos quais a programação dos atendimentos deve levar em

consideração não só aspectos espaciais e os custos dos roteiros, como também questões como o nível de estoque.

- Problemas de faturamento e roteirização, nos quais é preciso definir simultaneamente quem vai ser atendido a cada dia de um período de tempo pré-determinado; entre outros.

3.1.1 O Problema Clássico de Roteirização de Veículos

A formulação que se segue se baseia em Bodin *et al.* (1983). Segundo os autores, o problema geral de roteirização de veículos deve definir um conjunto de rotas a partir de um depósito central e para um conjunto de pontos de demanda ou clientes, cada qual com uma demanda especificada por serviços ou entregas, o que é mostrado na Figura 3.1. O objetivo é minimizar a distância total percorrida por uma frota de veículos disponibilizada, conhecendo-se sua capacidade de transporte e o tempo máximo de rota possível. As rotas se iniciam e terminam em um mesmo depósito central. Se a restrição relativa ao máximo tempo de rota for eliminada da formulação, temos então o chamado problema clássico de roteirização de veículos. Deste modo, tem-se:

Dados:

N = conjuntos dos nós ou clientes;

A = conjuntos dos arcos que conectam os nós de N ;

Índices:

i, j = índices dos nós; $i \in N, j \in N$;

$i = j = 1$ representa o depósito;

k = índice do veículo;

Parâmetros:

n = número de nós em N ;

K = número de veículos;

c_{ij} = custo de deslocamento entre os nós i e j ;

t_{ijk} = tempo de deslocamento do veículo k entre os nós i e j ;

d_i = demanda do nó i ;

Q_k = capacidade de transporte por viagem do veículo k ;

l_{ik} = tempo estimado de manuseio de carga no nó i pelo veículo k ;

T_k = duração máxima da viagem do veículo k ;

Figura 3.1: Exemplo de solução do VRP.

Problema incluindo 18 clientes e 4 rotas. Rotas devem se iniciar e terminar no depósito; tempo de rota deve ser inferior a um tempo especificado; soma das demandas dos clientes de uma rota deve ser inferior à capacidade do veículo a ela atribuída.

Variáveis de decisão:

$X_{ijk} = 1$, se o arco entre os nós i e j é executado pelo veículo k ;
 $= 0$, caso contrário;

Minimizar:

$$Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^K c_{ij} X_{ijk} \quad (3-1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^K X_{ijk} = 1 \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (3-2)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^K X_{ijk} = 1 \quad j = 2, 3, \dots, n \quad (3-3)$$

$$\sum_{j=2}^n X_{1jk} \leq 1 \quad \forall k \quad (3-4)$$

$$\sum_{i=2}^n X_{i1k} \leq 1 \quad \forall k \quad (3-5)$$

$$\sum_{j=1}^n (X_{ijk} - X_{jik}) = 0 \quad \forall k, i \quad (3-6)$$

$$\sum_{i=1}^n d_i \sum_{j=1}^n X_{ijk} \leq Q_k \quad \forall k \quad (3-7)$$

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_{ik} X_{ijk} \right] + \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ijk} X_{ijk} \right] \leq T_k \quad \forall k \quad (3-8)$$

$$X = (X_{ijk}) \in S \quad \forall k \quad (3-9)$$

$$X_{ijk} = 0 \text{ ou } 1 \quad \forall i, j, k \quad (3-10)$$

Onde S pode ser qualquer conjunto de restrições que inibam subciclos. Uma das alternativas para esta formulação é a seguinte:

$$S = \{(X_{ijk}) : \sum_{i \in Q} \sum_{j \notin Q} X_{ijk} \geq 1, \forall Q \subseteq N, \forall k\}$$

A função objetivo (3-1) minimiza a distância total de viagem para todos os K veículos. Outras alternativas para c_{ij} podem levar a minimização de custos. As restrições (3-2) e (3-3) garantem que cada cliente seja atendido por apenas um veículo. As restrições (3-4) e (3-5) garantem que as rotas se iniciem e terminem no depósito. A restrição (3-6) corresponde ao balanceamento e continuidade de fluxo entre os nós atribuídos à rota do veículo k . As restrições (3-7) e (3-8) asseguram que a capacidade do veículo e o tempo máximo de rota do veículo k estejam abaixo de valores especificados. A restrição (3-9) inibe a formação de subciclos, enquanto (3-10) determina que as variáveis de decisão sejam inteiras e binárias. De modo claro, esta formulação somente se justifica para os casos em que $\max d_i \leq \min Q_k$.

Bodin *et al.* (1983) comentam sobre algumas generalizações quanto a formulação proposta:

1. Caso as restrições (3-7) e (3-8) sejam abandonadas, recaímos no problema dos múltiplos caixeiros viajantes.
2. Como $\sum_{j=2}^n X_{1jk} = 1$ ou 0 e depende se o veículo k é utilizado ou não, um custo fixo de aquisição do veículo pode ser incorporado na função objetivo, de forma a possibilitar a avaliação de investimentos em relação a custos operacionais.

O conjunto S representa 2^n restrições que inibem subciclos e dá uma noção da natureza combinatória do problema. Segundo Cunha (2000), os problemas de roteirização de veículos, incluindo o caso particular do caixeiro viajante, pertencem à categoria conhecida como NP-difícil (do inglês “*NP-hard*”), o que significa que possuem ordem de complexidade exponencial. Em outras palavras, o esforço computacional para a sua resolução cresce exponencialmente com o tamanho do problema, em linhas gerais determinado pelo número de pontos a serem atendidos.

3.1.2 Abordagens e Estratégias de Solução

Wu e Cunha (2008) afirmam que os problemas de roteirização de veículos são conhecidos pela sua complexidade e natureza combinatória. Assim sendo, é impraticável a utilização de métodos exatos para a resolução desses problemas para instâncias reais em tempos e esforços computacionais razoáveis. Da mesma forma, também não é possível solucionar as extensões do problema de roteirização de veículos utilizando algoritmos exatos sem algum tipo de relaxação ou simplificação da formulação matemática. Por vezes, é necessário utilizar métodos heurísticos, que não asseguram a obtenção de soluções ótimas, porém que exploram a região das possíveis soluções, de modo a obter uma boa solução viável, em tempos de processamento reduzidos. Belfiore (2006) comenta uma série de justificativas para o uso de heurísticas:

- Os métodos exatos são proibitivos do ponto de vista computacional.
- Os métodos heurísticos são mais simples, de fácil implantação e permitem uma melhor compreensão das variáveis e dos parâmetros do problema.
- Os dados disponíveis são inexatos ou limitados, de modo que existe um erro inerente na solução e que pode superar o erro da não otimalidade.
- Um modelo mais realista com solução aproximada pode se tornar mais vantajoso que um modelo menos realista com uma solução ótima.
- A necessidade de se resolver o problema de modo contínuo ou repetitivo pode tornar vantajosa a utilização de um modelo aproximado, porém de processamento mais rápido e de menor custo computacional.

Cordeau *et al.* (2007) afirmam que o problema de roteirização de veículos pode ser solucionado com algoritmos exatos ou com a aplicação de heurísticas. Os autores apresentam duas abordagens principais para os algoritmos exatos, comentando que os mesmos estão baseados em alguma forma de relaxação das restrições impostas ao problema. Os resultados não são animadores, visto que, conforme os autores, instâncias do problema com mais de 100 nós ainda são muito difíceis de serem resolvidas.

Quanto às heurísticas, Cordeau *et al.* (2007) comentam a respeito do número considerável de alternativas propostas para a solução do problema, dividindo-as em dois grupos: heurísticas clássicas e metaheurísticas.

3.1.3 Heurísticas clássicas

Ao apresentar este grupo, Cordeau *et al.* (2007) se reportam ao trabalho de Laporte e Semet (2002), que por sua vez detalham 2 abordagens: métodos construtivos e os métodos de duas fases. Ambas as abordagens são complementadas por métodos de melhoria da solução inicial.

Métodos construtivos

Os métodos construtivos constituem as primeiras heurísticas aplicadas na solução do problema de roteirização de veículos e ainda hoje formam a base de solução empregada em boa parte dos softwares comerciais dedicados ao assunto. Tipicamente, estes algoritmos iniciam a partir de uma solução vazia, ou rota sem clientes. Por um processo iterativo e mediante um critério de inserção, clientes são adicionados à rota.

Os métodos construtivos ainda podem ser divididos entre métodos sequenciais ou métodos paralelos, dependendo do número de rotas candidatas em que um novo cliente possa ser inserido em cada iteração. Três aspectos principais caracterizam estes métodos: o critério de inicialização da solução, o critério de seleção de clientes para a inserção e o critério para decidir onde inserir o cliente na solução corrente.

A primeira e mais consagrada heurística deste grupo certamente é a de Clarke e Wright (1964), também conhecida de como método das economias. Ballou (2006) afirma que o método das economias pode gerar soluções que são, em média, 2% mais caras que o ótimo conhecido. O método se baseia na economia possível de se obter ao se combinar diferentes roteiros, conforme mostrado na Figura 3.2. A inclusão do arco (i, j) elimina os arcos $(i, 0)$ e $(0, j)$. A economia resultante corresponde a $s_{ij} = c_{i,0} + c_{j,0} - c_{i,j}$, onde $c_{i,0}$, $c_{j,0}$ e $c_{i,j}$, correspondem respectivamente aos custos associados aos deslocamentos nos arco $(0, i)$, $(j, 0)$ e (i, j) . Como a combinação entre rotas resulta na eliminação de 1 veículo, mesmo na eventualidade da economia de custos resultar negativa a combinação entre rotas pode ser lucrativa.

Gendreau *et al.* (2002) descrevem o algoritmo da seguinte forma:

- 1º passo: criar n rotas $(0, i, 0)$ para $i = 1, 2, \dots, n$. Corresponde a termos um veículo alocado para cada cliente.

- 2º passo: calcular as economias $s_{ij} = c_{i,0} + c_{j,0} - c_{i,j}$ para $i, j = 1, 2, \dots, n$. Ordenar s_{ij} de forma decrescente.

Figura 3.2: Método das economias – algoritmo Clarke-Wright.

O método se baseia na economia possível de se obter ao se combinar diferentes roteiros. A inclusão do arco (i, j) elimina os arcos (i, 0) e (0, j). A economia resultante corresponde a $s_{ij} = c_{i,0} + c_{0,j} - c_{i,j}$.

- 3º passo, versão paralela (melhor combinação): a partir da lista ordenada, tomar o maior valor de s_{ij} . Determinar se existem duas rotas, sendo que uma possua o arco (0, j) e a outra o arco (i, 0), e cuja combinação seja viável. Se existir, combinar as rotas utilizando um novo arco (i, j) e removendo os arcos (0, j) e (i, 0).
- 3º passo, versão sequencial (extensão da rota): considerar cada rota (0, i, ..., j, 0). Determinar as economias s_{ki} e s_{jl} que possam ser combinadas com outra rota que contenha ou o arco (k, 0) ou o arco (0, l). Se existir, fazer a combinação. Se não houver, considerar uma próxima rota e repetir o passo. Repetir o processo até que se esgotem as combinações possíveis.

Outra heurística importante deste grupo é o algoritmo de inserção de Mole e Jameson (1976). Em síntese, o algoritmo avalia o custo adicional resultante quando da inserção de um novo cliente k entre dois outros clientes i e j já pertencentes a uma rota. Assim, a economia resultante corresponde a $\alpha_{ikj} = c_{ik} + c_{kj} - \lambda c_{i,j}$, onde c_{ik} , $c_{kj,0}$ e $c_{i,j}$, correspondem respectivamente aos custos associados aos deslocamentos nos arco (i, k), (k, j) e (i, j); λ é um escalar a ser ajustado.

Christofides *et al.* (1979) propõe um método de inserção em duas fases, mais geral e efetivo na opinião de Cordeau *et al.* (2007). Na primeira fase, um algoritmo de inserção convencional é utilizado para a determinação de rotas iniciais viáveis. A segunda fase é executada por um processo paralelo de inserção. Para cada uma das rotas da solução inicial,

um cliente representativo de cada uma das rotas iniciais é escolhido, correspondendo rotas-semente para o processo de inserção paralela. Os clientes restantes são ordenados por uma função de rejeição capaz de medir o efeito de sua alocação em cada uma das rotas-sementes. Os clientes são alocados as rotas na ordem da função de rejeição. Para os autores, um processo de melhoria complementar pode ser utilizado, optando-se geralmente pelo método de trocas. Neste, clientes pertencentes a diferentes rotas são trocados entre si, avaliando-se, sob algum critério objetivo, o efeito ou melhoria obtida pela troca. Sendo vantajosa, a troca é firmada.

Métodos de duas fases

Os métodos de duas fases se baseiam na decomposição do VRP em dois subproblemas:

1. Agrupamento: determinação de agrupamentos de clientes e que correspondam a rotas potenciais.
2. Roteirização: determinação da sequência de atendimento dos clientes pertencentes a cada grupo.

Como destacam Simchi-Levi *et al.* (1997) existem duas estratégias para a abordagem dos subproblemas:

- Agrupar-roterizar (do inglês, “*cluster first-route second*”), em que os clientes são primeiramente alocados em grupos viáveis para posterior roteirização. Uma vez que se tenha o grupo definido, a roteirização se reduz ao problema do caixeiro viajante.
- Roteirizar-agrupar (do inglês “*route first-cluster second*”), onde inicialmente se constrói um roteiro gigante e que comporte todos os clientes; tal roteiro será notadamente inviável do ponto de vista da capacidade dos veículos. Na segunda fase, o roteiro é dividido, observando-se as restrições dos problemas.
- Entre os algoritmos que utilizam a segunda estratégia, talvez o algoritmo mais conhecido deste grupo seja o de varredura (do inglês, *sweep method*), atribuído a Gillet e Miller (1974) e mostrado na Figura 3.3. Inicialmente associa-se um cliente arbitrário a um veículo. A seleção de outros clientes a serem atribuídos ao veículo se faz na ordem crescente do ângulo formado entre estes clientes, o depósito e o cliente inicial. À medida que a atribuição de um novo cliente se torna inviável em virtude das restrições do problema, uma nova rota é criada e o processo se repete. Ballou (2006) afirma que para uma variedade de problemas o erro médio estimado para esta heurística é cerca de 10%. Por outro lado, uma das vantagens do método é a sua

rapidez, podendo ser executado inclusive manualmente. Algumas implementações do algoritmo sugerem um processo aleatório para a definição do cliente semente, o que geraria diversas soluções. Um processo de comparação entre essas soluções buscaria a melhor alternativa.

Figura 3.3: Algoritmo de varredura.

A partir da associação entre um veículo e um cliente inicial escolhido ao acaso, outros clientes são selecionados na ordem crescente do ângulo entre eles, o depósito e o cliente inicial. Outras rotas são criadas à medida que uma nova inserção seja inviável.

Métodos de melhoria

São métodos associados a outras heurísticas, para as quais, uma vez gerada uma solução inicial, procuram uma melhoria. Muitas alternativas foram propostas, porém em geral se concentram em algoritmos de busca local, como o λ -opt de Lin (1965). Em suas versões clássicas, $\lambda = 2$ ou 3 , resultando nos chamados 2-opt e 3-opt. Tomando como exemplo o 2-opt, a proposta do método é remover 2 arcos (i, j) e (k, l) da solução e reconectar os nós por 2 novos arcos que tenham seus nós de origem trocados, ou seja, (i, l) e (k, j) . Os benefícios da troca devem ser avaliados, optando por trocas que melhorem a solução. Duas estratégias de troca podem ser estabelecidas:

- Intra-rotas, quando os arcos pertencem a uma mesma rota.
- Inter-rotas, quando os arcos pertencem a rotas diferentes.

O procedimento é interrompido quando não mais se conseguem melhorias. Muito certamente, este é um ótimo local da busca e não existem mecanismos para se garantir o ótimo absoluto.

3.1.4 Metaheurísticas

Cordeau *et al.* (2007) comentam que diversas metaheurísticas foram aplicadas na solução do VRP. Comparadas às heurísticas clássicas, as metaheurísticas conseguem ampliar o espaço de pesquisa de soluções do problema; seu emprego, de forma geral, evita ótimos locais. Três classes de metaheurísticas têm sido utilizadas e pesquisadas para o VRP:

1. Baseadas em métodos de busca, incluindo *simulated annealing*, *deterministic annealing* e *tabu search*.
2. Baseadas em métodos populacionais, como o algoritmo genético.
3. *Learning mechanisms*, como as redes neurais e a otimização por colônia de formigas.

Os autores comentam que os melhores algoritmos resultam da combinação de ideias e conceitos presentes em diferentes outras heurísticas. Gendreau *et al.* (2002) comentam que as metaheurísticas representam um grande avanço na substituição das heurísticas clássicas empregadas na solução do VRP. Segundo os autores, as metaheurísticas podem identificar melhores soluções, porém com maior custo computacional.

3.2 Trabalhos sobre Roteirização de Veículos em Ambientes Industriais

A literatura sobre o tema é escassa e a apenas três trabalhos foram considerados mais relevantes e com abordagens similares à proposta nesta pesquisa. Reforçando esta impressão, Golz *et al.* (2010) afirmam que o problema do abastecimento de peças em linhas de produção e o correspondente problema de transporte interno em fábricas tem sido negligenciados quando comparados à diversidade de estudos publicados relativos ao balanceamento de linhas e sequenciamento de produção. Em relação ao fluxo de materiais e sua movimentação, estes autores afirmam que a literatura publicada se concentrou tão somente no posicionamento de áreas de estoque, avaliação de políticas de abastecimento e escolha das unidades de transporte. Os três trabalhos são revisados a seguir.

3.2.1 O Trabalho de Vaidyanathan *et al.* (1999)

O trabalho de Vaidyanathan *et al.* (1999) se concentra na formulação de rotas para o transporte interno de peças em uma fábrica trabalhando sob o sistema JIT. O problema

central é o atendimento da demanda por peças exigida por pontos de produção espalhados no ambiente. A demanda por peças é constante ao longo do tempo e o atendimento é feito por uma frota homogênea de veículos a partir de um único depósito central onde as peças estão estocadas.

Duas hipóteses básicas são assumidas no trabalho destes autores: (i) a quantidade entregue a cada viagem do veículo de transporte deve ser exatamente suficiente para satisfazer a demanda por peças durante o tempo da viagem; (ii) não se admitem tempos ociosos dos veículos, ou seja, suas viagens são realizadas em regime contínuo, sem nenhuma espera no depósito.

Com estas hipóteses, os autores são capazes de modelar o problema com a inclusão de uma restrição adicional na modelagem do VRP. Entretanto esta restrição é de caráter não linear, como se percebe nas equações (3-18) da formulação a seguir.

Dados:

N = conjuntos dos nós;

A = conjuntos dos arcos que conectam os nós de N ;

Índices:

i, j = índices dos nós; $i \in N, j \in N$;

$i = j = 1$ representa o depósito;

k = índice do veículo;

Parâmetros:

n = número de nós em N ;

K = número de veículos;

t_{ij} = tempo de deslocamento entre os nós i e j ;

d_j = taxa de demanda do nó j ;

τ_k = capacidade de transporte por viagem do veículo k ;

l_j = tempo estimado de manuseio da carga no nó j ;

Variáveis de decisão:

$X_{ijk} = 1$, se o veículo k realiza o deslocamento entre os nós i e j ;
 $= 0$, caso contrário;

Minimizar:

$$Z = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [(t_{ij} + l_j) X_{ijk}] \quad (3-11)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^K X_{ijk} = 1 \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (3-12)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^K X_{ijk} = 1 \quad j = 2, 3, \dots, n \quad (3-13)$$

$$\sum_{j=2}^n X_{1jk} = 1 \quad \forall k \quad (3-14)$$

$$\sum_{i=2}^n X_{i1k} = 1 \quad \forall k \quad (3-15)$$

$$\sum_{j=1}^n (X_{ijk} - X_{jik}) = 0 \quad \forall k, i \quad (3-16)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_{ijk} \leq \tau_k + 1 \quad \forall k \quad (3-17)$$

$$[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (t_{ij} + l_j) X_{ijk}] * [\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_j X_{ijk}] \leq \tau_k \quad \forall k \quad (3-18)$$

$$X_k \in S \quad \forall k \quad (3-19)$$

$$X_k = 0 \text{ ou } 1 \quad \forall i, j, k \quad (3-20)$$

Onde:

$$S = \{X_{ijk} \mid \sum_{i \in Q} \sum_{j \in Q} X_{ijk} \leq |Q| - 1, \forall \text{ conjunto } Q \text{ de } \{2, 3, \dots, n\}, |Q| \geq 2\}$$

$$X_k = \{X_{ijk} \mid X_{ijk} > 0\}$$

A função objetivo (3-11) minimiza o tempo total de viagem para todos os K veículos. Diferente da formulação do VRP, a função objetivo neste caso considera a parcela de manuseio da carga no nó de demanda. As restrições (3-12) a (3-16) são as mesmas presentes na formulação do VRP e garantem o balanceamento e continuidade de fluxo entre os nós atribuídos à rota do veículo k , bem como que a rota se inicie e termine no depósito. A restrição (3-19) inibe a formação de subciclos, algo também presente na formulação do VRP.

Como apontado pelos autores, as restrições (3-17) e (3-18) são particulares do problema analisado no trabalho. A restrição (3-17) garante que o número de nós atribuídos à rota do veículo k não supere sua capacidade. Admite-se porém neste caso que pelo menos uma carga seja entregue em cada ponto de demanda e a cada viagem do veículo, o que pode ser

considerada uma limitação da modelagem. A restrição (3-18) relaciona o tempo de viagem e a demanda dos pontos atendidos pela rota do veículo k com a capacidade do veículo. Como se pode notar, esta restrição tem caráter não linear. As equações (3-20) determinam que as variáveis de decisão sejam inteiras e binárias.

Quadro 3.1: Principais pontos do estudo de Vaidyanathan *et al.* (1999)

Hipótese ou consideração	Comentário
1. Quantidade entregue a cada viagem deve ser exatamente suficiente para satisfazer a demanda durante o tempo da viagem da rota.	Restrições na capacidade das embalagens inviabilizam esta hipótese. O abastecimento tende a ser discreto e realizado em lotes correspondentes à capacidade das embalagens.
2. Viagens realizadas em regime contínuo sem espera ou tempo ocioso no depósito.	Hipótese se afasta da realidade prática e somente será válida para o caso da hipótese 1 se confirmar.
3. A formulação não garante que diferentes itens de um mesmo ponto de consumo sejam atendidos pela mesma rota.	Não se trata de hipótese, mas uma consequência da modelagem. Esse resultado se afasta da prática e compromete o sistema em termos de atribuição de responsabilidades.
4. Restrição (3-7) convencionada que pelo uma embalagem seja entregue no ponto de consumo a cada viagem.	A capacidade discreta das embalagens associada à demanda e aos tempos de viagem não necessariamente garantem que esta condição seja obedecida na prática.

Os autores comentam que esta formulação exige $n^2 * K$ variáveis de decisão e que o conjunto de restrições corresponde a $[2 * (n - 1) + 2^{n+1} * K]$ equações, das quais K são não lineares. O problema assim é de difícil solução e os autores propõem uma relaxação à modelagem, de forma a simplificar a obtenção do número mínimo de veículos necessários para o transporte de peças. Posteriormente, propõem uma heurística para a solução do problema, usando o número mínimo calculado pela formulação relaxada como referência para avaliação do resultado final.

A heurística de solução utiliza um algoritmo de inserção de vizinhos mais próximos para a formulação das rotas iniciais. Como algoritmo de melhoria da solução inicial, os autores empregam a heurística 3-opt.

Vaidyanathan *et al.* (1999) parecem ser pioneiros no estudo do problema do abastecimento de linhas de produção. Seu trabalho contribui significativamente ao tema, visto tê-lo

formulado matematicamente, ainda que de forma aproximada. O Quadro 3.1 comenta a respeito das hipóteses apresentadas no trabalho e utilizadas na formulação e seus desdobramentos.

O trabalho não apresenta resultados numéricos, mas traz avaliações qualitativas sobre as soluções encontradas para uma aplicação prática. Os autores comentam que a capacidade dos veículos tem impacto determinante na solução, ou pelo menos, no número de veículos necessário no sistema. Problemas que envolvam veículos de pequena capacidade, elevado número de pontos de consumo com demandas expressivas, tendem a ser mais complexos na solução. Isto se justifica pela dificuldade em se ocupar plenamente a capacidade dos veículos a partir da alocação discreta dos pontos de consumo às rotas.

3.2.2 O Trabalho de Choi e Lee (2002)

Choi e Lee (2002) propõem um modelo de roteirização dinâmico para a solução do problema do abastecimento de linhas de produção. Seu trabalho se concentra na análise do abastecimento de linhas de montagem automobilística que, devido às suas características, permitem a aplicação do método descrito a seguir.

1. Uma vez que entram na linha de montagem, os veículos são rastreados ao longo das estações de trabalho; esta informação é mantida em um sistema de apoio.
2. Sabe-se que uma determinada peça i é consumida na estação de trabalho j ; sabem-se quantos veículos que utilizam a peça i estão na linha; também se sabe a taxa de produção. Com estas informações é possível estimar o consumo futuro da peça i .
3. O estoque da peça i na estação de trabalho j é atualizado a cada passagem de um veículo que utiliza a peça e último abastecimento realizado. O mesmo sistema de informações é capaz de realizar este rastreamento e estimativa.
4. A comparação entre as estimativas de consumo e de estoque permite inferir o instante em que o estoque da peça i na estação de trabalho j atingirá um nível mínimo, determinando o reabastecimento. O tempo de transporte da peça i entre o depósito e a estação j é conhecido. Com estas informações se deduz o instante em que uma viagem para o transporte da peça i deverá ser iniciada, estabelecendo-se assim uma ordem de abastecimento desta peça.
5. As ordens de abastecimentos são alocadas aos veículos à medida que eles retornam ao depósito. Os autores propõem uma heurística para o processo de alocação de

ordens aos veículos disponíveis. A heurística leva em consideração o instante de necessidade de abastecimento, a disponibilidade de veículos e a capacidade de transporte ainda disponível no veículo.

6. Os autores definem um instante ideal para a entrega da embalagem na estação solicitante. Como o instante real de entrega pode variar devido à organização da viagem do veículo, entregas antecipadas ou atrasadas em relação ao instante ideal são penalizadas, procurando-se reduzir o WIP na estação, caso das entregas antecipadas, ou falta de peças, caso de entregas atrasadas. As penalidades para os atrasos são explicitamente maiores do que aquelas para antecipações.
7. Um processo de decisão baseado no tempo de transporte e nas penalidades mencionadas determina o melhor veículo para realizar a entrega. Nota-se que o processo aloca ordens dinamicamente e que a sequência de visitação dos pontos de consumo pode não resultar naquela de menor distância percorrida ou tempo de viagem total.

Quadro 3.2: Principais pontos do estudo de Choi e Lee (2002)

Hipótese ou consideração	Comentário
1. Rotas são definidas dinamicamente e pontos de uso podem ser atendidos por diferentes rotas ao longo do período de trabalho.	Esta premissa se afasta da prática e compromete o sistema de abastecimento em termos de atribuição de responsabilidades.
2. Método se concentra no atendimento e desconsidera a minimização dos recursos utilizados.	Esta hipótese se contrapõe com o objetivo apresentado no capítulo anterior e que expressa a necessidade de minimização de custos fixos e variáveis.
3. Método se baseia na projeção de demanda e consumos de estoque, realizados a partir de veículos na linha de montagem.	Necessidade de sistema de informações de apoio capaz de rastrear veículos na linha de montagem. As características das linhas automobilísticas garantem uma boa aplicação do método ao mesmo.

O objetivo do método apresentado por estes autores se concentra nitidamente no atendimento. O mecanismo de penalidades em relação ao ponto ideal de atendimento atua sobre o WIP, porém de forma indireta. Com o auxílio de um modelo de simulação de eventos discretos, os autores testaram o método e concluíram que, mediante a calibração dos parâmetros que orientam o processo de alocação das ordens aos veículos, uma redução do WIP pode ser obtida sem a ocorrência de faltas.

Ainda com o auxílio de simulação, os autores realizaram uma comparação entre um sistema real convencional e outro utilizando o método proposto. Concluíram que a utilização média de uma frota de 5 veículos pode ser reduzida de 96,3% para 86,7%. Nessa comparação, a utilização do veículo corresponde à parcela de tempo em que o mesmo está em movimento de transporte. O Quadro 3.2 traz comentários adicionais sobre o método proposto por Choi e Lee (2002).

O trabalho aborda o problema de abastecimento de maneira prática. Uma visão mais abrangente, incluindo a preocupação com a formação de WIP está presente no método apresentado por estes autores.

3.2.3 O Trabalho de Golz *et al.* (2010)

A abordagem Golz *et al.* (2010) também se fundamenta na projeção da demanda por peças e projeção dos estoques locais disponíveis nas estações de trabalho de um linha de montagem de automóveis. Os autores apresentam uma heurística para o estabelecimento das rotas de abastecimento que serão cumpridas a cada turno de trabalho. Os principais aspectos desta heurística são:

1. Toma-se o programa de produção do turno de trabalho e a posição do estoque de peças nas estações de trabalho no início deste período.
2. Considerando-se os estoques, a taxa de produção, a sequência de montagem e o consumo específico de peças de cada veículo em cada estação de trabalho, uma matriz de necessidades de abastecimento pode ser estabelecida. A cada necessidade de abastecimento corresponde uma ordem de transporte, definida como o item a ser abastecido, local e instante de atendimento.
3. As ordens de transporte são alocadas a rotas de abastecimento utilizando uma adaptação da heurística de economias proposta por Clark e Wright (1964). A adaptação é necessária, pois a combinação de rotas, além de resultar em economia de tempo, deve ser viável e atender critérios como:
 - a. Capacidade de carga dos veículos
 - b. Sequência de entregas
 - c. Capacidade de armazenagem de embalagens na estação de trabalho
 - d. Máxima duração da viagem

4. Em um último passo, o instante de início de cada viagem é verificado quanto à possibilidade de ser antecipado ou atrasado. Este procedimento visa reduzir o número máximo de viagens simultâneas dos veículos e resulta na redução de operadores.

Quadro 3.3: Principais pontos do estudo de Golz *et al.* (2010)

Hipótese ou consideração	Comentário
1. Abastecimentos necessários são definidos no início do turno, mediante a projeção de consumo e posição de estoque a partir da situação conhecida no início do período.	Diferentes abastecimentos de um mesmo item podem ser realizados por rotas diferentes. Esta premissa se afasta da prática e compromete a atribuição de responsabilidades.
2. Rotas de abastecimento são definidas no início do turno.	Rotas são fixas, porém um mesmo veículo pode executar rotas diferentes. Esta premissa se afasta da prática e compromete a atribuição de responsabilidades.
3. Método se baseia na projeção de demanda e consumos de estoque, realizados a partir do programa de produção da linha de montagem.	As características das linhas automobilísticas garantem uma boa aplicação do método ao mesmo.

O objetivo do método apresentado por estes autores se concentra na redução de recursos, particularmente na redução de operadores no sistema. O Quadro 3.3 trás comentários adicionais sobre o método descrito. O trabalho não apresenta resultados numéricos que possam comprovar a eficácia do método proposto.

3.2.4 Análise dos Trabalhos Revisados

O trabalho de Vaidyanathan *et al.* (1999) parece ser pioneiro e entre os revisados é o único que propõe uma modelagem matemática. Os trabalhos de Choi e Lee (2002) e Golz *et al.* (2010) possuem abordagem similares e de cunho bastante prático, porém com objetivos de otimização distintos.

Embora o modelo matemático proposto por Vaidyanathan *et al.* (1999) não torne explícito, estes autores demonstram preocupação com o estoque local nos pontos de uso, lembrando que a área disponível para a armazenagem de embalagens nestas condições é limitada. Sugerem a existência de uma relação entre o problema analisado e o Problema de Estoque e Roteirização (*Inventory Routing Problem – IRP*).

Todos supõem que os tempos de deslocamento entre o supermercado e os pontos de consumo sejam dados. Vaidyanathan *et al.* (1999) lembram que a matriz de-para é assimétrica, justificando o fato pela possibilidade dos corredores de movimentação poderem ter mão única.

De forma geral, os autores concordam que o problema abordado é uma extensão do VRP e propõem heurísticas construtivas de solução, utilizando algoritmos de inserção para a definição das rotas finais de abastecimento.

3.3 O Problema do Caminho Mínimo

As formulações apresentadas para a solução das diversas versões do VRP pressupõem que a matriz de custos de deslocamento c_{ij} seja fornecida (ver equação 3-1). Genericamente, c_{ij} representa o custo do deslocamento entre os nós i e j ou sobre o arco (i, j) , sendo que, neste caso, custo pode ser interpretado como custo monetário, tempo ou distância. Parece clara a dependência entre estas interpretações e que as duas primeiras podem ser inferidas uma vez que tenhamos a terceira. Determinar os coeficientes c_{ij} constitui assim encontrar o caminho mínimo entre todos os nós ou clientes da rede para a qual deseja estabelecer a roteirização de veículos.

Na literatura, particularmente naquela que trata da Teoria de Grafos, este problema se constitui no chamado Problema do Menor Caminho ou Problema do Caminho Mínimo (do inglês, *Shortest Path Problem* – SPP), o qual consiste em encontrar o caminho entre uma origem e um destino localizados em uma rede, cujo custo de travessia seja mínimo. O custo de travessia é dado pela soma dos pesos de cada aresta percorrida entre os nós de origem e destino.

Bradley *et al.* (1977), apresentam a seguinte formulação geral para o SPP:

Dados:

$G = (A, N)$, grafo que representa uma rede, onde:

N = conjunto dos nós, correspondendo a clientes ou locais dispersos;

A = conjunto dos arcos que conectam os nós de N ;

Índices:

i, j = índices dos nós; $i \in N, j \in N$;

Parâmetros:

n = número de nós em N ;

s = nó de origem do caminho, também chamado de “*source*”;

t = nó de destino do caminho, também chamado de “*sink*”;

c_{ij} = custo de deslocamento entre os nós i e j ;

Variáveis de decisão:

$X_{ij} = 1$, se o arco (i, j) pertence ao caminho mínimo entre s e t ;

$= 0$, caso contrário;

Minimizar:

$$Z = \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} X_{ij} \quad (3-21)$$

Sujeito a:

$$\sum_{(i,j) \in A} X_{ij} - \sum_{(k,i) \in A} X_{ki} = \begin{cases} +1, se i = s \\ 0, se i = N - \{s, t\} \\ -1, se i = t \end{cases} \quad (3-22)$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A \quad (3-23)$$

A função objetivo é descrita por (3-21), considerando a minimização do custo para o deslocamento entre s e t . As restrições (3-22) estabelecem o fluxo nos nós, especificando equilíbrio para os nós entre s e t e supondo um fluxo unitário para s e t , respectivamente representando uma entrada e uma saída da rede. As variáveis de decisão têm valor binário conforme (3-23), indicando os arcos que pertencem ao caminho mínimo.

A solução deste problema conta com um número diverso de algoritmos baseados no fato de o caminho mínimo entre dois nós quaisquer de uma rede ser composto por caminhos mínimos entre os nós ali contidos (Cormen *et al.*, 2001). Entre os algoritmos com esta finalidade, o que mais se destaca pela sua simplicidade é o algoritmo de Dijkstra. Dijkstra, (1959), foi um dos primeiros pesquisadores a tratar do problema ao apresentar um método para encontrar a menor distância entre dois pontos específicos numa rede. O algoritmo é como se segue:

1. Atribua valor zero à estimativa do custo mínimo do nó de origem s e infinito às estimativas dos demais nós. A partir de s , considere todos os vértices abertos, ou seja, ainda não visitados.

2. Atribua um valor qualquer aos precedentes de todos os nós em aberto. O precedente de um nó t é o nó que precede t no caminho de custo mínimo entre s para t .
3. Enquanto existirem nós abertos:
 - a. Seja k um nó ainda aberto cuja estimativa de custo seja a menor entre todos os vértices abertos. Feche o vértice k .
 - b. Para todo vértice j ainda aberto que seja sucessor de k faça:
 - i. Some a estimativa do vértice k com o custo do arco que une k a j .
 - ii. Caso esta soma seja menor que a estimativa anterior para o nó j , substitua-a e anote k como precedente de j .

Formulação e algoritmo assumem:

- A rede é direcionada, como mostra a Figura 3.4.
- Existe um arco de saída no nó s .
- Existe um arco incidente no nó t .
- Custos de deslocamento entre nós são positivos, o que não constitui um problema, visto que na grande maioria das vezes estamos lidando com distâncias de deslocamentos.

Figura 3.4: Problema do caminho mínimo.

a) rede é direcionada, s possui arco de saída, t possui arcos incidentes; b) caminho mínimo entre $s = 1$ e $t = 7$ é 12 unidades, correspondendo ao caminho 1, 4, 2, 3, 5, 6, 7.

Por sua aderência prática, este método encontra larga aplicação na determinação de caminhos mínimos entre clientes de uma rede para a qual se deseja formular roteiros de atendimento. Entretanto, uma das dificuldades destes algoritmos é que eles tendem a produzir roteiros com curvas desnecessárias ou mesmo indesejáveis (McBride, 1982). Particularmente no caso de roteirização de veículos em ambientes urbanos, os roteiros devem observar regras de tráfego, entre as quais aquelas relativas às curvas à esquerda ou retornos em via. Mesmo que elas não sejam proibidas, sua ocorrência pode ser indesejada

por questões de segurança ou mesmo por exigirem maior tempo de execução (Benavent e Soler, 1999). Em casos como o de coleta de lixo, entrega postal ou varrição, entre outros, os roteiros têm de levar em consideração esta restrição. A Figura 3.5 mostra esta influência quando consideramos o tamanho da rede.

Figura 3.5: Tamanho da rede e a influência de curvas e sentido de deslocamento.

a) em redes mais amplas o efeito das curvas pode ser desprezado; b) já para redes menores, o sentido e o número de curvas podem se tornar relevantes no cálculo do caminho mínimo e tempo de deslocamento final.

Caldwell (1961), Kirby e Potts (1969), McBride (1982), Bodin e Kursh (1979) e Benavent e Soler (1999) estudaram o problema e empregaram abordagens semelhantes para a sua solução, propondo penalizar a ocorrência de curvas nos itinerários do caminho mínimo. McBride (1982) propõe as penalidades de 0, 1, 5 e 11, respectivamente para a manutenção de direção, curva a direita, curva a esquerda e retorno. Bodin e Kursh (1979) propõem 0, 1, 4 e 8 como penalidades para as mesmas ocorrências.

Figura 3.6: Transformação da rede para a consideração de curvas.

a) rede original; b) os nós da rede são dobrados e a cada nó de entrada no cruzamento original correspondem 7 arcos fictícios dos quais 3 podem ser desprezados; c) rede transformada final: 16 arcos fictícios são necessários para a consideração das curvas e suas penalidades. Adaptado de Eiselt *et al.* (1995).

Na abordagem mais corrente, a implementação das penalidades se faz pela adição de arcos fictícios nos nós correspondentes aos cruzamentos da rede. Eiselt *et al.* (1995) demonstram

a transformação da rede em sua forma mais abrangente, conforme a Figura 3.6. A transformação consiste em: a) dobrar o número de nós da rede, fazendo com que o cruzamento seja representado por 8 nós, dos quais 4 correspondem a entradas no cruzamento e os outros 4 correspondem a saída do nó; b) criar arcos fictícios que liguem cada nó de entrada aos nós de saída. Os autores generalizam o procedimento, propondo que cada nó seja ligado aos outros 7 nós, sejam de entrada ou de saída. Porém, a ligação entre nós de entrada ou entre nós de saída não tem efeito sobre a rede final.

A Figura 3.7 mostra a abordagem de Benavent e Soler (1999) para a transformação da rede. Estes autores se diferenciam, pois propõem que a transformação se faça já considerando que alguns tipos de curvas não são permitidos. Esta estratégia resulta em uma simplificação da rede transformada.

Figura 3.7: Simplificação da transformação da rede.

a) rede original; b) inclusão de nó representando o cruzamento; c) nó de cruzamento com arcos representando os itinerários permitidos. Adaptado de Benavent e Soler (1999).

Ambas as abordagens aumentam a complexidade de solução do problema original, face ao aumento de nós e arcos da rede. Clossey *et al.* (2001) sugerem que as penalidades podem ser consideradas sem a transformação da rede. Em sua proposição, afirmam que, durante a busca pelo caminho mínimo, é possível selecionar um próximo arco a partir de um nó de maneira a considerar a menor penalidade incorrida. Apontam 6 estratégias testadas para esta proposição. Concluem que o interesse por esta abordagem reside em se evitar a transformação da rede em um grafo de grandes proporções.

Um aspecto levantado no estudo de Kirby e Potts (1969) é a possível formação de ciclos quando do cálculo do caminho mínimo considerando curvas e caso as penalidades sejam severas em relação às distâncias encontradas na rede. A Figura 3.8 demonstra esta ocorrência: sem a consideração de penalidades, o caminho mínimo entre os nós 6 e 5 corresponderia a 6-4-5, ou seja, uma distância de 5 unidades; com a consideração de

4 MÉTODO DE SOLUÇÃO

O problema descrito será tratado como uma particularização do problema básico de roteirização de veículos (VRP). Como apresentado no final do Capítulo 2, o VRP pressupõe que a matriz de distâncias entre os pontos de uso seja conhecida. Entretanto, nessa abordagem, admite-se que tal matriz não seja fornecida a priori e que sua determinação faça parte do método de solução a ser proposto.

Desta forma, os seguintes passos, detalhados ao longo deste capítulo, serão adotados para a obtenção da solução do problema:

1. Determinação da Matriz de Caminhos Mínimos
2. Determinação das Rotas de Abastecimento, obtida através uma heurística construtiva empregando métodos de inserção sequencial e paralela e complementada por um procedimento de melhoria.

4.1 Determinação da Matriz de Caminhos Mínimos

4.1.1 Descrição do método

Para a determinação da matriz de caminhos mínimos, utiliza-se uma variação do método de determinação da árvore geradora mínima do grafo que representa a rede de corredores do ambiente onde se fará o abastecimento de peças. O grafo desta rede é estabelecido com os seguintes passos:

1. Dado o layout da instalação, associam-se nós às esquinas e cruzamentos entre os corredores de movimentação. Os arcos devem ser direcionados e representar o sentido de movimentação no corredor. Assim dois arcos de sentidos opostos são necessários na conexão de cada par de nós do grafo. A Figura 4.1 mostra este primeiro passo na aproximação do grafo. A posição dos nós é conhecida por suas coordenadas no layout da área de manufatura; o comprimento dos arcos pode ser determinado a partir das coordenadas de seus nós.
2. O segundo passo consiste em associar cada ponto de uso a um arco, de forma que o alcance do ponto seja feito no sentido correto de movimentação do comboio de abastecimento no corredor. A Figura 4.2 mostra esta associação e valem as seguintes definições e comentários:

- Arco base: arco ao qual está associado o ponto de uso. Tomando como exemplo o ponto de uso P2B3 da Figura 4.2, o arco base deste ponto é (4, 3).
- Arco inverso: arco contrário ao arco base. Para o exemplo do ponto de uso P2B3, o arco inverso é (3, 4).
- A distância entre a origem do arco base (nó 4 para o exemplo) e o ponto de uso é conhecida.

Figura 4.1: Grafo da rede de corredores de movimentação – 1º passo.

Os nós são associados às esquinas e cruzamentos entre corredores; os arcos representam o sentido de movimentação no corredor.

- Ao supermercado de peças se associam 2 pontos de uso, $0e$ e $0d$. Desta maneira, admite-se que o supermercado possa ser alcançado por qualquer um dos sentidos de movimentação do corredor onde ele está localizado. As mesmas considerações e definições feitas para os demais pontos de uso e associação com arcos são válidas para $0e$ e $0d$.

Com o grafo assim definido, a distância $dist(O, D)$ entre dois pontos de uso O e D quaisquer pode ser calculada como:

$$dist(O, D) = dist(O, j_O) + dist(i_D, D) + \sum_{(l \in L)} c_l + \sum_{(l \in L)} p_l \quad (4-1)$$

Onde:

O = ponto de uso de origem do caminho que se deseja determinar.

D = ponto de uso de destino do caminho que se deseja determinar.

i_D = nó de origem do arco ao qual está associado o ponto de uso de destino.

j_O = nó de destino do arco ao qual está associado o ponto de uso de origem.

$dist(O, j_O)$ = distância entre o ponto de uso O e o nó j_O . Calculável, visto que se conhece a distância entre o ponto de uso e a origem do arco, bem como o comprimento do arco.

$dist(i_D, D)$ = distância entre o nó i_D e o ponto de uso D . Este valor é conhecido.

L = conjunto dos arcos que compõem o caminho entre j_O e i_D .

l = cada um dos arcos do conjunto L .

c_l = comprimento do arco l .

p_l = penalidade associada à curva realizada por um veículo que se movimenta entre o arco antecessor de l e o arco l .

Figura 4.2: Grafo da rede de corredores de movimentação – 2º passo.
O ponto de uso deve ser alcançado pelo lado direito do corredor.

A determinação da matriz de caminhos mínimos deve considerar todos os pontos de uso tanto como origens como destinos de eventuais deslocamentos. A Figura 4.3 mostra o algoritmo para o cálculo da matriz de caminhos mínimos. A linha 4 corresponde a captura das tabelas de dados mostradas anteriormente e que tratam dos dados relativos ao posicionamento dos nós da rede, definição de arcos e posicionamento dos pontos de consumo nos arcos. O procedimento da linha 5 trata os dados capturados, gerando:

1. Arcos inversos.
2. Comprimentos dos arcos.
3. Direção da curva entre cada arco e seus sucessores. Através das coordenadas de origem e destino de cada arco, determina-se um vetor que represente o arco no plano. A direção da curva entre um arco e seus sucessores é determinada pelo módulo do produto vetorial entre vetor do arco e o vetor do arco sucessor:
 - a. Valores positivos correspondem a curvas à esquerda.
 - b. Valores negativos a curvas à direita.
 - c. Vetores de mesma direção não possuem curva entre si.
 - d. O arco inverso de um arco qualquer é desconsiderado como seu sucessor.

Deste modo, retornos em via são evitados no cálculo do caminho mínimo.

4. Conforme o modelo proposto por McBride (1982), penalidades 1 e 5 são atribuídas respectivamente para curvas à direita e curvas à esquerda. Curvas em esquinas, como aquelas dos nós 1, 4 ou 9 da Figura 4.2 não sofrem penalidades, pois em sua execução não existe a possibilidade de cruzamento de fluxo entre comboios.

```

1. // Determinação da matriz de caminhos mínimos
2. mat_cam_min ()
3. início
4.     Le_Dados
5.     Prepara_Dados
6.
7.     // Para todos as origens
8.     para cada Origem em ( conjunto de POU )
9.
10.         // Para todos as origens
11.         para cada Destino em ( conjunto de POU ), faça
12.
13.             // calcula caminho entre Origem e Destino
14.             dist( Origem, Destino ) ← CaminhoMin( Origem, Destino )
15.         fim
16.     fim
17. fim

```

Figura 4.3: Algoritmo para determinação da matriz de caminhos mínimos.

Ainda na Figura 4.3, as linhas 8 e 11 percorrem a lista de pontos de uso, fazendo-os todos origens e destinos para o cálculo da caminho mínimo, realizado na linha 14 e detalhado na Figura 4.4. Neste procedimento, as linhas 5 e 6 identificam os arcos aos quais estão associados os pontos de uso de origem e o destino, respectivamente. A linha 8 trata dos seguintes casos especiais:

- Origem e destino coincidem: a distância entre estes pontos é nula.

- Origem e destino estão no mesmo arco, sendo que o destino está à frente da origem quando consideradas suas distâncias de posicionamento no arco. Neste caso, a distância entre os pontos corresponde à diferença entre suas distâncias de posicionamento no arco.

Continuando na Figura 4.4, as linhas 12 a 16 inicializam o algoritmo, estabelecendo a distância inicial como zero. O arco de origem é considerado visitado e a partir dele, ou melhor, a partir de seu nó de destino, todos os seus arcos sucessores são inseridos na árvore geradora.

```

1. // Calcula o caminho mínimo entre Origem e Destino
2. CaminhoMin ( Origem, Destino )
3. início
4.     // identifica arcos de origem e destino
5.     ArcoOrig ← Qual_o_arco_de( Origem )
6.     ArcoDest ← Qual_o_arco_de( Destino )
7.
8.     // trata casos especiais
9.     Trata_casos_especiais
10.
11.    // inicializa a árvore geradora (spanning tree)
12.    dist_min ← M           // valor inicial grande
13.    arco_min ← 0
14.    dist_nóDest( ArcoOrig ) ← 0
15.    Torna_arco_visitado( ArcoOrig )
16.    Inclui_arcos_sucessores_na_arvore( ArcoOrig )
17.
18.    // Busca na árvore de expansão
19.    enquanto ( ( arcos_nao_visitados ) ≠ ∅ ), faça
20.        // para cada um dos arcos ainda não visitados
21.        para cada arcoAval em ( arcos_nao_visitados ), faça
22.            // calcula distância até nó de destino do arco; inclui sucessores na árvore
23.            dist_nóDest( arcoAval ) ← dist_nóDest( arcoPred ) + compr( arcoAval )
24.            Torna_arco_visitado( arcoAval )
25.            Inclui_arcos_sucessores_na_arvore( ArcoOrig )
26.
27.            se É_arco_destino( arcoAval ), então
28.                se ( dist_nóDest( arcoAval ) < dist_min ), então
29.                    dist_min ← dist_nóDest( arcoAval )
30.                    arco_min ← arcoAval
31.            fim
32.        fim
33.    fim
34. fim
35.
36. // retorna a distância final
37. valor_de_retorno ← dist_min + dist(Origem, jO) – dist(Destino, jD)
38. fim

```

Figura 4.4: Algoritmo para cálculo do caminho mínimo.

O ciclo entre as linhas 19 e 34 expande a árvore, percorrendo paulatinamente os arcos ainda não visitados e incluindo seus sucessores na mesma. A cada arco visitado, as seguintes verificações são feitas:

- Cálculo da distância acumulada até o nó de destino do arco visitado, correspondendo à soma entre a distância acumulada até o nó de origem do arco e seu comprimento.
- Se o arco visitado corresponder ao arco de destino (linha 27), esta distância é comparada com o mínimo geral, sendo atualizada caso seja inferior. O arco que leva a esta distância mínima é guardado em variável. Note-se que, em um passo qualquer do algoritmo, esta condição de mínima distância não é suficiente para o seu encerramento, visto que a expansão da árvore geradora por outros arcos poderá levar a valores ainda mais inferiores em passos seguintes.
- O procedimento *Inclui_arco_sucessores_na_arvore()* presente nas linhas 15 e 24 trata da expansão da árvore a partir do arco corrente ou arco que é visitado. Internamente, as seguintes ações são executadas pelo procedimento:
 - a. Contabiliza a penalidade associada à curva realizada entre o arco visitado e seu sucessor, somando-a a distância acumulada até a origem do arco a ser inserido na árvore.
 - b. Verifica se o arco sucessor já foi visitado. Arcos não visitados são inseridos sem verificações adicionais; arcos já visitados somente serão inseridos caso a distância até sua origem somada ao seu comprimento for inferior ao valor de *dist_min* corrente. Esta condição para a inserção de arcos garante que a expansão da árvore geradora seja finita; também é a condição de esgotamento dos arcos visitados conforme previsto na linha 19.
- Uma vez que a expansão da árvore se esgote e todos os arcos sejam visitados, *arco_min* guardará a posição de *dist_min* e o cálculo da distância mínima será possível como mostrado na linha 37. Este é o valor de retorno do procedimento.

Alterações neste algoritmo básico permitem o rastreamento do caminho mínimo calculado a partir de *arco_min*. Desta forma, além da distância mínima entre os pontos de uso de origem e destino também se pode obter o roteiro do caminho.

4.1.2 Exemplo de aplicação

Como exemplo da aplicação do algoritmo descrito, Figura 4.5 apresenta a sequência de cálculo do caminho mínimo entre os pontos de uso P1A2 e P3C1. Tal exemplo é particularmente interessante, visto que estes pontos de uso estão localizados em lados opo-

Figura 4.5: Sequência de cálculo do caminho mínimo.

tos do corredor e próximos fisicamente. O passo 1 inicia o cálculo identificando o arco (10, 5) do ponto de uso de origem, destacado em cor mais escura; seus arco cos sucessores (5, 2) e (5, 6) são inseridos na árvore geradora e estão destacados em cor mais clara. O arco inverso (5, 10) não é considerado como sucessor do arco de origem e não será inserido na árvore. Ao final deste passo, as distâncias calculadas são:

- Entre o nó 10 e o nó 2: soma dos comprimentos dos arcos (10, 5) e (5, 2). Não existe penalidade, visto que os arcos estão alinhados.
- Entre o nó 10 e o nó 6: soma dos comprimentos dos arcos (10, 5) e (5, 6) mais a penalidade corresponde a uma curva a esquerda, executada no nó 5.

O passo 2 mostra a continuidade do cálculo, indicando os próximos arcos sucessores a serem inseridos na árvore geradora: (2, 1), (2, 3), (6, 3) e (6, 7). O passo 3 inclui os próximos arcos sucessores.

No passo 4 se nota que os arcos (2, 1) e (6, 7), sucessores respectivos de (3, 2) e (3, 6), não são destacados, visto que tais arcos já haviam sido visitados em passo anterior e a distância para alcançá-los foi inferior àquela deste passo.

No passo 5, o arco (5, 10) pode ser inserido duas vezes, sendo ele sucessor tanto de (2, 5) como (6, 5). Em termos de distância percorrida, a distância acumulada é a mesma. Porém a incidência de penalidades diferencia a distância total, prevalecendo o arco vindo de (2, 5). Se recuperarmos o percurso seguido até este ponto, ao itinerário de (2, 5) correspondem 1 curva a esquerda e 3 curvas a direita; já para o itinerário de (6, 5) correspondem 3 curvas esquerda e 1 a direita, resultando em maior penalidade. Ainda que tenhamos alcançado o arco de destino, o algoritmo não é terminado, supondo que itinerários ainda em aberto possam levar ao destino com distância menor que a alcançada até aqui. A distância alcançada é registrada em *dist_min*, assim como o itinerário correspondente.

O passo 6 mostra a última expansão da árvore geradora. Os arcos destacados em cor clara não serão inseridos na árvore, pois a distância para alcançá-los é superior àquela determinada no passo 5 quando o arco de destino foi alcançado; qualquer caminho que siga por este itinerário terá distância final superior àquela apurada até este passo. Não existindo expansão da árvore e tendo todos os seus arcos já visitados, o algoritmo se encerra. O valor de *dist_min* corresponde ao caminho mínimo entre a origem e o destino especificados. Para

este exemplo, o percurso do caminho mínimo é P1A2-5-6-3-2-5-P3C1, como mostrado na Figura 4.6.

Figura 4.6: Percurso do caminho mínimo.

Figura 4.7: Caminhos e subcaminhos.

O percurso entre P1A1 e P2B1 contém outros caminhos como P1A1-P1A2, P1A2-P2B2, entre outros.

4.1.3 Comentários sobre o método

Além de considerar penalidades sobre as curvas realizadas no percurso, os seguintes aspectos diferenciam o algoritmo proposto do algoritmo de Dijkstra:

1. Expansão da árvore geradora pela inserção de arcos sucessores aos já visitados.
2. Ausência de arcos não visitados determina a interrupção do algoritmo.

De modo a acelerar o processo de determinação da matriz de caminhos mínimos, o algoritmo principal é complementado pela avaliação dos caminhos gerados pela

combinação dos pontos de uso contidos em caminhos mínimos recém-calculados. Como mostrado na Figura 4.7, o caminho entre P1A1 e P2B1 contem outros dois pontos de uso, P1A2 e P2B2. Desta forma, os caminhos (P1A1, P1A2), (P1A1, P2B2), (P1A2, P2B2), (P2B2, P2B1) também podem ser calculados e inseridos na matriz.

4.2 Determinação das Rotas de Abastecimento

4.2.1 Introdução

O método para a determinação de uma solução viável para o problema foi inspirado na heurística construtiva proposta por Solomon (1987) em seu trabalho sobre o problema de roteirização de veículos com janelas de tempo (do inglês, *Vehicle Routing Problem with Time Windows – VRPTW*).

Segundo o autor, os algoritmos construtivos voltados à roteirização de veículos podem ser divididos em métodos sequenciais e métodos paralelos. Os métodos sequenciais constroem uma rota por vez, selecionando clientes ainda não roteirizados e os alocando à rota corrente. À medida que a rota se esgota, seja por capacidade, seja por alguma outra restrição imposta, uma nova rota é criada e o processo se repete até que não haja mais clientes a roteirizar. Métodos paralelos assumem que o número de rotas é conhecido e, mediante algum critério, clientes ainda não roteirizados são distribuídos pelas rotas em aberto.

Para ambas as estratégias, torna-se necessário estabelecer:

- Um cliente semente para cada nova rota que se crie. Os critérios para esta definição são vários e próprios do problema que se pretende resolver.
- Um critério que indique a cada iteração qual o melhor posicionamento de cada um dos clientes ainda não roteirizados em relação às rotas correntes. No caso do método sequencial, apenas uma das rotas é a corrente; para o método paralelo, todas as rotas são correntes.
- Um critério que selecione a partir do critério anterior o cliente que será inserido na iteração corrente.

Potvin e Rousseau (1993) mencionam que os métodos sequenciais tendem a alocar os últimos clientes ainda não roteirizados de maneira mais dispersa, gerando assim rotas de baixa qualidade. Os autores afirmam que esta fragilidade dos métodos sequenciais é bem

conhecida, fruto da estratégia gulosa e míope na seleção e alocação de clientes à rota corrente e apontam que a estratégia paralela minimiza tal efeito. Por outro lado, os mesmos autores mencionam que uma das dificuldades dos métodos paralelos é determinar o número inicial de rotas a serem utilizadas. Assim, sugerem a utilização do algoritmo sequencial de para a estimativa inicial de n_r rotas necessárias.

Em um segundo passo, o método paralelo é aplicado, utilizando-se os primeiros n_r clientes mais próximos do depósito como clientes sementes e os critérios de seleção e alocação comentados anteriormente. Caso o número de rotas inicialmente previsto se mostre superior ao necessário, o procedimento é repetido para $n_r - 1$ rotas, ou seja, elimina-se uma rota. Na implementação destes autores, assume-se que o número inicial de rotas estimado pelo algoritmo de Solomon seja conservador, gerando rotas em número igual ou superior ao finalmente necessário.

4.2.2 Heurística de solução

Com base nos procedimentos de Solomon (1987) e Potvin e Rousseau (1993) descritos na seção anterior, este trabalho propõe a seguinte alternativa para a determinação da solução inicial do problema:

1. Estimar o número inicial de rotas necessário para o abastecimento especificado, utilizando um método de inserção sequencial.
2. Aprimorar a solução, utilizando um método de inserção paralelo combinado com um algoritmo de melhoria.

Método sequencial – estimativa do número necessário de rotas

A Figura 4.8 mostra a estratégia de funcionamento do método sequencial. Pontos de uso ainda não alocados são tomados sequencialmente a partir de uma lista ordenada e alocados na rota corrente até que sua capacidade se esgote. A alocação deve ser possível, obedecendo às restrições de capacidade e comprimento do comboio; todos os pontos de uso da lista são testados até que um primeiro seja alocado, correspondendo ao chamado “*first-fit algorithm*”. Ao se esgotar a capacidade da rota e se ainda houver pontos de uso não alocados, uma nova rota é criada. O método não garante homogeneidade na ocupação das rotas, em geral onerando mais as primeiras em relação àquelas criadas por último. O

número de rotas criadas ao final do método serve de estimativa para procedimentos posteriores de melhoria da solução.

O critério para ordenação dos pontos de uso é importante para a implementação do método. Aplicações práticas de sistemas de abastecimento que utilizam rebocadores mostram que os pontos de uso contendo itens com a maior frequência de abastecimentos são determinantes na fixação das rotas, pois determinam o intervalo de tempo em que a rota responsável deverá cumprir seu itinerário. Na inicialização das rotas este é o critério utilizado. Por outro lado, uma vez que a rota já tenha um primeiro ponto, interessa que os demais pontos sejam os mais próximos possíveis, na tentativa de concentrar o atendimento. Assim, para as alocações posteriores, o critério de ordenação da lista de pontos de uso é alterado, procurando os mais próximos ou aqueles que, uma vez inseridos na rota, tenham o menor impacto sobre a mesma. Estes critérios são mais comentados no texto que se segue.

Figura 4.8: Método sequencial.

Utilizado para a estimativa inicial do número necessário de rotas. Segundo Potvin e Rousseau (1993), esta estimativa é conservadora.

Como descrito no Capítulo 2, o intervalo entre abastecimentos de embalagens é fornecido na forma do PFEP, mostrado na Figura 4.9. A implementação do algoritmo é mostrada na Figura 4.10, pressupondo que a matriz de caminhos mínimos entre os pontos de uso já esteja determinada.

A linha 4 inicializa o número de rotas criadas e a linha 5 atualiza o primeiro item a ser alocado em uma rota. A instrução *Seleciona_Item_Maior_Frequencia* identifica o item

ainda não alocado a nenhuma rota e que tenha o menor intervalo entre abastecimentos. Enquanto forem identificados itens ainda não alocados, o laço especificado entre as linhas 8 e 40 é repetido. Ao entrar no laço, temos um item novo e por isso, uma nova rota é criada na linha 10; *num_Rotas* é atualizada com o número de rotas criadas. A linha 11 identifica o ponto de uso ao qual pertence o item escolhido. A linha 14 procura alocar todos os itens deste ponto de uso à rota. Isto pode não ser possível, caso o ponto de uso possua mais itens que um rebocador possa comportar. Neste caso, a alocação dos itens do ponto de uso será parcial e os itens remanescentes serão alocados em outras rotas. Em verdade, somente na alocação do primeiro ponto de uso é que se permite a alocação parcial de itens. Como se verá, para os demais pontos de uso, a alocação de seus itens deverá ser completa.

Ponto de Uso	Produto	Throughput (un/h)	Código Peça	Descrição da Peça	Qtd/Prod (un/prod)	Qtd / Embal (un/embal)	Intervalo reabastec (min)
P1A1	prod_DC	12,6	A171265E	SUPT - PBOX OTR S/PNL CS STEP	1	20	95,2
P1A1	prod_DC	12,6	A1712651	REFORÇO CJ- PBOX PLTF #4 CS	1	20	95,2
P1A1	prod_SC	1,4	A1712655	REFORÇO CJ-PBOX PLTF CS	2	8	171,4
P1A1	prod_DC	12,6	A2101291	PAINEL PBOX LADO&W/H INT,LH	1	30	142,9
P1A1	prod_SC	1,4	A2101927	PAINEL PBOX LADO&W/H INT,LH	1	4	171,4
P1A2	prod_DC	12,6	A1722221	PAINEL CJ-PBOX W/H CS	1	30	142,9
P1A2	prod_DC	12,6	A171265E	SUPT - PBOX OTR S/PNL CS STEP	1	20	95,2
P1A2	prod_DC	12,6	A2101296	PAINEL PBOX LADO&W/H INT,RH	1	30	142,9
P1A2	prod_SC	1,4	A2101922	PAINEL PBOX LADO&W/H INT,RH	1	4	171,4
P1A3	prod_DC	12,6	A1711702	PAINEL-PBOX OTR SI-RH	1	9	42,9
P1A3	prod_DC	12,6	A1717791	PAINEL CJ PBOX CS LATERAL,RH	1	12	57,1
P1A3	prod_DC	12,6	A2101E79	PAINEL CJ PBOX CS LATERAL OTR,RH	1	80	381,0
P1A4	prod_DC	12,6	A1717792	PAINEL CJ PBOX CS LATERAL,LH	1	12	57,1
P1A4	prod_DC	12,6	A2101E72	PAINEL CJ PBOX CS LATERAL OTR,LH	1	80	381,0
P2B1	prod_SV	2,5	A1729211	LATERAL ESQ	1	12	288,0
P2B1	prod_DC	12,6	A17E9102	PAINEL DIANT TETO FRONTAL	1	34	161,9
P2B1	prod_DC	12,6	A17E9110	CJ. HABITACULO	1	8	38,1
P2B1	prod_DC	12,6	A17E9111	BOW CJ TETO CENTRAL	1	26	123,8

Figura 4.9: Itens, pontos de uso e intervalos entre abastecimento.

A coluna mais a direita trás o intervalo teórico entre abastecimentos da embalagem do item no PDU.

A instrução *POUs_em_Ordem_de_Impacto_sobre_Rota_Corrente* da linha 17 retorna o conjunto de pontos de uso que podem ser incluídos na rota, atualizando a variável *cj_POUs*. Utilizando o método de economias proposto por Clarke e Wright (1964), este procedimento avalia o impacto da inserção de cada um dos pontos de uso com itens ainda não alocados na rota, ordenando-os segundo este critério. O impacto de um novo ponto de uso sobre a rota corrente é composto das seguintes duas parcelas, ponderadas respectivamente em 1000 e 1 em sua soma:

1. Acréscimo de distância percorrida motivada pela inserção de pontos fora do itinerário original da rota. Pontos de uso que pertençam ao itinerário não afetam a

distância total percorrida quando de sua inserção; já pontos que não pertençam ao itinerário original motivarão um aumento do percurso e do tempo de deslocamento da rota. Este critério procura privilegiar a alocação de pontos de uso localizados no itinerário já estabelecido.

```

1.  // Procedimento Número Inicial de Rotas – sequencial
2.  proc_rotas_seq ()
3.  início
4.      num_Rotas ← 0
5.      prox_Item ← Selecciona_Item_Maior_Frequencia
6.
7.      // laço de busca de itens não alocados em rotas
8.      enquanto ( prox_Item ≠ nulo ), faça
9.          // cria uma rota
10.         num_Rotas ← Cria_Rota
11.         prox_POU ← POU_de_proxItem
12.
13.         // aloca itens de POU à rota corrente
14.         Aloca_Itens_de_POU_a_Rota(prox_POU)
15.
16.         // identifica conjunto de POUs possíveis de se alocar na rota
17.         cj_POUs ← POUs_em_Ordem_de_Impacto_sobre_Rota_Corrente
18.
19.         // testa e aloca pontos de cj_POUs a rota corrente
20.         enquanto (cj_POUs ≠ ∅ ), faça
21.             // testa cada um dos pontos do conjunto
22.             para cada POU em cj_POUs, faça
23.
24.                 // seleciona próximo POU a ser testado
25.                 prox_POU ← prox_POU_de_cj_POUs
26.
27.                 se ( É_possível_alocar_POU(prox_POU) ) então
28.                     // aloca itens de POU à rota corrente
29.                     Aloca_Itens_de_POU_a_Rota(prox_POU)
30.
31.                     // atualiza conjunto de POUs a alocar na rota
32.                     cj_POUs ← POUs_Ordem_de_Impacto_sobre_Rota_Corrente
33.                     Abandona_laço
34.             fim
35.         fim
36.     fim
37.
38.     // próximo item mais frequente
39.     prox_Item ← Selecciona_Item_Maior_Frequencia
40. fim
41.
42. // retorna o número de rotas
43. valor_de_retorno ← num_Rotas
44. fim

```

Figura 4.10: Método sequencial – algoritmo para estimava do número de rotas.

2. Distância entre o ponto de uso a ser inserido e o ponto de uso de referência para a inserção. Este último corresponde ao ponto de uso que estará imediatamente antes do ponto a ser inserido, uma vez que seja possível a inserção. Este critério privilegia pontos de uso mais próximos dos pontos já pertencentes à rota corrente.

O laço entre as linhas 20 e 36 testa e aloca os pontos de uso do conjunto *cj_POUs*. A linha 25 seleciona o próximo ponto e testa sua alocação conforme a linha 27. Neste caso, para que o ponto de uso seja associado à rota, é preciso que tal rota comporte o transporte de todos os seus itens. Se esta condição se comprovar, a alocação é feita e o conjunto de pontos que podem ser incluídos na rota deve ser atualizado, conforme as linhas 29 e 32. A instrução *Abandona_laço* na linha 33 força o abandono do laço iniciado na linha 22, de forma que as rotinas de teste e alocação se reiniciem. Caso o teste de alocação da linha 27 retorne falso, o laço busca os próximos pontos do conjunto *cj_POUs*.

A sequência do laço iniciado na linha 20 é repetida até que se esgotem os pontos de uso ou nenhum deles possa ser alocado à rota. Interrompido este laço, a linha 39 procura o próximo item ainda não alocado, reiniciando o processo. O procedimento se encerra quando não houver mais itens sem alocação e retorna o número de rotas necessárias conforme a instrução da linha 43.

A implementação do algoritmo apresentado considera as seguintes premissas:

1. A velocidade de transporte é conhecida e constante ao longo de qualquer corredor de movimentação ou mesmo em curvas. Uma vez conhecida a distância entre os pontos de uso da rota é possível determinar o tempo de deslocamento.
2. O tempo de manuseio dos itens, tanto no depósito como no ponto de uso é conhecido. A cada novo item associado à rota, os tempos de manuseio são somados ao tempo de execução da rota.
3. O tempo de execução da rota deve ser inferior ao tempo máximo admissível, sendo que este último corresponde, por definição, ao intervalo entre abastecimentos do item mais frequente da rota. Como descrito no algoritmo, a identificação deste item precede a criação de uma nova rota.
4. A capacidade de transporte do comboio é fornecida, informada como o número máximo de plataformas possíveis de serem rebocadas simultaneamente, desde que o comprimento máximo do comboio não supere uma dimensão também fornecida. As dimensões das plataformas com rodas necessárias para o cálculo do comprimento do comboio são fornecidas.
5. Para o cálculo da ocupação do rebocador, considera-se que a cada item transportado em uma determinada viagem do comboio corresponda uma unidade de capacidade.

Entende-se que o item mais frequente da rota e que determina seu tempo máximo de execução será transportado em todas as viagens e ocupará 1 unidade da capacidade de transporte do comboio. Um segundo item, cujo intervalo entre abastecimentos corresponda a exatamente o dobro do tempo máximo de execução da rota, será transportado em viagens alternadas, ocupando, a cada 2 viagens, 1 unidade da capacidade de transporte do comboio. Esta condição permite inferir que um terceiro item cujo intervalo entre abastecimentos também seja exatamente o dobro daquele tempo máximo possa ser transportado em viagens alternadas, porém não coincidentes com aquelas do segundo item. Como resultado, a ocupação do comboio a cada viagem resultará em dois, apesar de estar dando conta do transporte e abastecimento de 3 itens.

No caso geral, esta programação é mais complexa, pois os intervalos entre abastecimentos dos itens alocados na rota não são necessariamente múltiplos entre si ou em relação ao tempo máximo de sua execução. Torna-se assim necessário estimar a melhor sequência de viagens em que cada um dos itens será transportado de modo que não haja falta do item no período entre abastecimentos do ponto de uso. Isto é realizado pela instrução *É possível alocar_POU* do algoritmo, considerando:

- a. Ao se alocar o item inicial, ou seja, o mais frequente, uma sequência de viagens é estabelecida e para cada viagem, tal item ocupará 1 unidade da capacidade do comboio. O ciclo da viagem, ou seja, o intervalo entre partidas do rebocador a partir do supermercado corresponde ao intervalo entre reabastecimentos deste item mais frequente. É possível assim projetar o número de viagens a serem realizadas e os instantes de partida do rebocador a partir do estoque durante todo um turno de trabalho.
- b. A alocação de um segundo item se inicia pela viagem número 1. A cada viagem seguinte, estima-se o estoque residual do item no ponto de uso ao final da viagem posterior, verificando se o mesmo será superior ou inferior a zero. Para o primeiro caso, a viagem corrente não deve abastecer o item; no segundo caso contrário, a viagem corrente deve considerar o transporte de uma embalagem do item em análise. Uma unidade de capacidade do comboio será então ocupada na viagem corrente.

- c. O processo se repete para as demais viagens, estabelecendo-se as viagens em que o item será abastecido e ocupará 1 unidade de capacidade do comboio e as viagens em que o item não será abastecido, resultando em capacidade disponível no comboio.
 - d. Cada item do ponto de uso em análise é testado quanto a sua inserção na rota, buscando a melhor combinação de viagens para o abastecimento do item de forma que a ocupação da viagem de maior ocupação seja mínima.
6. O procedimento avalia a restrição referente ao comprimento máximo do comboio de forma análoga à restrição de capacidade.

Método paralelo – definição das rotas de abastecimento

Uma vez determinada a solução inicial através do método sequencial, o método paralelo permite homogeneizar a distribuição de carga entre as rotas definidas. Sua estratégia de funcionamento é mostrada na Figura 4.11.

Figura 4.11: Método paralelo.

Parte do número de rotas estimado pelo método sequencial e distribui os pontos de maneira mais homogênea; o método é repetido para $K-1$ rotas enquanto viável.

O método tem como ponto de partida o número de rotas estimado pelo método sequencial. Um ponto de uso candidato é tomado sequencialmente da lista ordenada e alocado em uma rota selecionada e que ainda disponha de capacidade suficiente para absorvê-lo. Como no método sequencial, todos os pontos de uso da lista são testados até que um primeiro seja alocado. A ocupação das rotas tende a ser mais homogênea quando o método é empregado.

O método é repetido diversas vezes reduzindo-se o número de rotas especificadas e até se atingir a inviabilidade da solução.

Assim como no método sequencial, a ordenação inicial da lista de pontos de uso não alocados também é feita pelo critério de frequência de abastecimentos. Entretanto, da maneira como estruturado, o método tem caráter meramente construtivo e não permite a geração de soluções alternativas. Pela descrição, supondo que se tenha K rotas especificadas para a aplicação do método, os primeiros K pontos de uso da lista ordenada serão distribuídos sequencialmente entre aquelas rotas; a presença de 2 ou mais dos K primeiros pontos da lista ordenada não acontecerá na solução. Entretanto, a possibilidade de tal combinação de pontos de uso deve ser considerada na busca da melhor solução para o problema.

Inspirado na metaheurística GRASP (do inglês *Greedy Randomized Adaptive Search Procedures*), proposta por Feo e Resende (1995), o método paralelo foi modificado conforme mostrado na Figura 4.12, incorporando os seguintes aprimoramentos:

1. O ponto de uso candidato à alocação é sorteado entre m pontos iniciais da lista ordenada. O número m de pontos deve ser igual ou superior ao número de rotas especificado. Nesta implementação, adotou-se $m = 2 * K$; outros valores de m foram testados, porém sem apresentar diferenças significativas nos resultados alcançados.
2. O método é repetido diversas vezes e gera soluções alternativas, fruto da combinação variada de pontos de uso em uma mesma rota. Um método complementar aplicado ao final do ciclo de geração da solução procura melhorá-la; as soluções inviáveis são descartadas. O método de melhoria e os critérios para sua avaliação estão descritos na próxima seção deste texto.

Quanto ao critério para a seleção da rota onde alocar o ponto de uso candidato, as seguintes duas estratégias podem ser utilizadas:

1. Selecionar a rota de menor utilização até o momento da seleção. A utilização da rota é definida como a razão entre o tempo de sua execução e o tempo máximo para sua execução, este último correspondendo ao intervalo entre abastecimentos do item mais frequente já alocado à rota. Este critério busca o equilíbrio de carga de trabalho entre as rotas consideradas, objetivo alinhado com o exposto no item 3 do Quadro 2.1 que cita os objetivos operacionais do sistema de abastecimento.

Figura 4.12: Método paralelo aprimorado.

Ponto de uso candidato é sorteado entre m pontos iniciais da lista ordenada; ao final de cada ciclo, um método de melhoria é aplicado à solução.

2. Selecionar a rota de maior utilização até o momento da seleção. Apesar de ser menos intuitivo, este critério se justifica, pois à concentração de carga em algumas rotas corresponde a diminuição de carga em outras rotas e estas últimas podem ser combinadas. Rebocadores podem então alternadamente se responsabilizar por diferentes rotas cujos tempos de execução quando somados sejam inferiores ao menor intervalo entre abastecimentos dos itens pertencentes a estas rotas. Em última análise, esta combinação corresponde à eliminação de rebocadores e operadores, o que se alinha ao objetivo exposto no item 1 do Quadro 2.1.

A Figura 4.13 mostra o algoritmo implementado a partir do descrito no método paralelo aprimorado. Na linha 5 são criadas *num_rotas* passadas como parâmetros; *cj_rotas* é atualizada com o conjunto de *num_rotas* inicialmente vazias. Na linha 8, o procedimento *Seleciona_Rota_Com_Capac_Dis* retorna a rota para a alocação do próximo ponto de uso candidato; esta seleção pode seguir um dos critérios anteriormente descritos e sua pesquisa se restringe somente às rotas que ainda disponham de capacidade.

O laço entre as linhas 11 e 37 será repetido enquanto rotas puderem ser selecionadas, percebido pela instrução na linha 36. Na linha 13 se identifica o conjunto *cj_POUs* de pontos de uso ainda não alocados ordenados pelo critério de impacto sobre a rota selecionada. Se todos os pontos já estiverem alocados, correspondendo a um conjunto

vazio, o laço é abandonado e o procedimento encerrado. Caso contrário, os primeiros m pontos de uso do terão sua ordem embaralhada (linha 20), de forma que a posterior seleção de pontos candidatos à alocação se realize de forma aleatória (laço entre as linhas 24 e 33). Isto corresponde ao descrito para o método paralelo aprimorado. Como no método sequencial, cada ponto de uso candidato é testado quanto à alocação (linha 28), a qual, se confirmada, é realizada na linha 30. Neste caso, o laço de seleção de pontos candidatos é abandonado, forçando a reavaliação do conjunto cj_POUs .

```

1.  // Procedimento Geração de Solução pelo método Paralelo
2.  proc_rotas_par ( num_rotas )
3.  início
4.      // cria o número de rotas especificado
5.      cj_rotas ← Cria_Rota( num_Rotas )
6.
7.      // identifica uma rota com capacidade disponível
8.      rota_Sel ← Seleciona_Rota_Com_Capac_Dis
9.
10.     // enquanto houver rotas com capacidade disponível, testa e aloca pontos
11.     enquanto ( rota_Sel ≠ nulo ), faça
12.         // identifica conjunto de POU's possíveis de se alocar na rota
13.         cj_POUs ← POU's_em_Ordem_de_Impacto_sobre_Rota_Corrente
14.
15.         // se não existirem pontos, abandona procedimento pois todos itens foram alocados
16.         // se existirem, embaralha m pontos iniciais e torna a sequencia de seleção aleatória
17.         se ( cj_POUs =  $\emptyset$  ), então
18.             Abandona_laço
19.         senão
20.             Embaralha_cj_POUs( m )
21.         fim
22.
23.         // tenta alocar cada um dos pontos
24.         para m POU's em cj_POUs, faça
25.             // seleciona próximo POU a ser testado
26.             prox_POU ← prox_POU_de_cj_POUs
27.
28.             se ( É_possível_alocar_POU(prox_POU) ) então
29.                 // aloca itens de POU à rota corrente
30.                 Aloca_Itens_de_POU_a_Rota( prox_POU )
31.                 Abandona_laço
32.             fim
33.         fim
34.
35.         // identifica uma rota com capacidade disponível
36.         rota_Sel ← Seleciona_Rota_Com_Capac_Dis
37.     fim
38.
39.     // retorna o número de rotas
40.     se ( cj_POUs ≠  $\emptyset$  ), então
41.         valor_de_retorno ← cj_rotas
42.     senão
43.         valor_de_retorno ←  $\emptyset$ 
44.     fim
45. fim

```

Figura 4.13: Algoritmo para a geração de soluções alternativas.

Entre as linhas 40 e 44 se avalia a viabilidade da solução obtida: havendo pontos não alocados no conjunto cj_POUs , a solução gerada é inviável e o procedimento é abandonado

pois a capacidade do número de rotas especificado foi esgotada. Neste caso, o valor de retorno é vazio. Na linha 40, se o conjunto *cj_POUs* estiver vazio, ou seja, não existem pontos não alocados, a solução gerada é viável e a linha 41 atualiza o valor de retorno do procedimento.

A implementação do método paralelo aprimorado se complementa com o algoritmo mostrado na Figura 4.14 e que inclui a aplicação do método de melhoria e a redução paulatina do número de rotas. Este é o principal algoritmo da implementação, recorrendo aos anteriormente descritos para a determinação das rotas necessárias.

```

1.  // Procedimento Determinação das Rotas de Abastecimento
2.  det_rotas_abast ()
3.  início
4.      // estima número de rotas pelo método sequencial
5.      num_rotas ← proc_rotas_seq
6.
7.      // inicializa variáveis de controle
8.      sol_melhor ← ∅      // conjunto com a melhor solução
9.      gerou_sol ← 1      // ≠ 1 somente para iniciar o laço
10.
11.     // repete enquanto o número de rotas gerar soluções viáveis
12.     enquanto ( gerou_sol > 0 ), faça
13.         gerou_sol ← 0
14.
15.         // gera p soluções alternativas
16.         repita este laço por p vezes
17.             sol_temp ← proc_rotas_par ( num_rotas )
18.
19.             // se encontrou solução viável, compara com a melhor
20.             se ( sol_temp ≠ ∅ ), então
21.                 gerou_sol ← gerou_sol + 1
22.
23.                 // tenta melhorar a solução
24.                 Melhora_Solucao ( sol_temp )
25.
26.                 // compara com a melhor solução
27.                 se ( sol_temp é melhor que sol_melhor ), então
28.                     sol_melhor ← sol_temp
29.             fim
30.         fim
31.     fim
32.
33.     // se pode gerar soluções, reduz número de rotas para nova tentativa
34.     se ( gerou_sol > 0 ), então
35.         num_rotas ← num_rotas – 1
36.     fim
37. fim
38.
39. // recupera o valor de retorno do procedimento
40. valor_de_retorno ← sol_melhor
41. fim

```

Figura 4.14: Algoritmo para a determinação das rotas de abastecimento.

A linha 5 aplica o método sequencial e atualiza a variável *num_rotas* com a estimativa inicial do número de rotas. As linhas 8 e 9 inicializam variáveis de controle, sendo que *sol_melhor* corresponde ao conjunto de rotas da melhor solução. O laço entre as linhas 12 e

37 testa a redução do número de rotas. Para cada valor proposto, iniciando por aquele estimado no método sequencial, o laço entre as linhas 16 e 31 gera p soluções alternativas, dentre as quais será selecionada a melhor. O valor de p deve ser ajustado no algoritmo. A linha 20 verifica se a solução gerada é viável; neste caso a solução é submetida ao método de melhoria na linha 24 e comparada a melhor solução até então encontrada; a linha 28 guarda a melhor solução.

Entre as linhas 34 e 36 avalia-se se é possível reduzir o número de rotas: se o número corrente foi capaz de gerar soluções viáveis, reduz-se o número de rotas e a geração de soluções alternativas é repetida. Caso contrário, o procedimento é interrompido, retornando a melhor solução encontrada até então, conforme a linha 40.

4.2.3 Melhoria da Solução

Os dois primeiros objetivos apresentados no Quadro 2.1 correspondem aos objetivos tradicionais do problema de roteirização de veículos: redução do número de veículos e minimização da distância total percorrida. Entretanto, alguns autores destacam a importância da aparência ou “desenho” da rota, cunhando este aspecto qualitativo da solução de “*visual attractiveness*”.

Lu e Dessouky (2006) comentam que, na prática, planejadores e operadores responsáveis por sistemas de entrega tendem a preferir rotas visualmente mais atraentes. Poot et al. (2002) citam sua experiência e afirmam que rotas visualmente atraentes parecem ser mais lógicas e próximas daquelas que poderiam ser criadas manualmente. Afirmam ainda que clientes e, particularmente os motoristas, tendem a não gostar de rotas cujos itinerários se cruzem, ainda que com prejuízo de algum dos indicadores tradicionais de desempenho, número de veículos ou distância total percorrida.

Tang e Miller-Hooks (2006) comentam a dificuldade de se traduzir matematicamente a noção de solução “visualmente atraente”. Afirmam que, embora nenhum algoritmo voltado para este fim seja tão eficaz quanto a percepção humana, sua inclusão na busca de solução para problemas de roteirização é bastante válida.

Promovendo a tradução matemática do aspecto qualitativo da aparência da solução, Poot *et al.* (2002) definem 4 grupos de indicadores, categorizados de acordo com os fatores considerados para o seu cálculo. A cada grupo podem corresponder diferentes indicadores,

como mostrado no Quadro 4.1. Os nomes dos indicadores sugeridos foram mantidos em inglês.

Quadro 4.1: Indicadores de qualidade visual da solução, cf. Poot *et al.* (2002)

Grupo	Indicador
1. Centro de gravidade	<i>Av not closest center</i> : média do número de clientes de uma rota que estão mais próximos do centro de gravidade de outra rota. O centro de gravidade corresponde ao baricentro das localizações dos clientes, desprezando o depósito. A rota será tão mais visualmente atraente quanto menor for o valor do indicador.
2. Circuito da rota	<i>Av in convex hull</i> : média do número de clientes de uma rota que estão localizados internamente ao circuito de outra rota. Poucas ocorrências de clientes nesta situação levam a soluções visualmente mais atraentes.
3. Distâncias médias	<i>Av dist to center</i> : média da distância entre clientes e o centro de gravidade da rota, definido pelo baricentro de suas localizações. Valores menores deste indicador correspondem a rotas mais compactas ou com clientes mais agrupados. <i>Av dist between</i> : média da distância da entre os clientes de uma rotas, tomados 2 a 2. Da mesma forma, valores menores correspondem a rotas mais compactas ou com clientes mais agrupados.
4. Cruzamentos	<i>Tot cross between trips</i> : soma do número de cruzamentos entre quaisquer das rotas definidas. Poucos cruzamentos correspondem a soluções de melhor qualidade. <i>Av cross within trip</i> : média do número de cruzamentos no itinerário de cada rota. Valores baixos correspondem a soluções de melhor aparência.

Poot *et al.* (2002) sugerem o uso de mais de um indicador para a avaliação; Lu e Dessouky (2006) utilizam uma variação da avaliação do número de cruzamentos em uma rota; Tang e Miller-Hooks (2006) e Kim *et al.* (2006) utilizam distâncias médias, porém sugerem a substituição do baricentro da rota por um cliente mediano. Nestes dois últimos trabalhos, o cliente mediano é tomado com aquele mais próximo do baricentro teórico da localização dos clientes.

Neste trabalho, a avaliação da qualidade da solução utiliza a abordagem de Kim *et al.* (2006), consagrada por seu uso em softwares comerciais voltados à roteirização de veículos para entregas em ambientes urbanos. Os autores propõem o cálculo do indicador de forma da solução, conforme a equação (4-7), para o qual um valor menor indica uma solução de

melhor qualidade e aparência. Na expressão, a nomenclatura foi adaptada ao problema aqui tratado.

$$F_m = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{n^k} dist(PDU_i^k, PDU_c^k) \quad (4-7)$$

Onde:

K = número de rotas da solução;

n^k = número de pontos de uso na rota k ;

PDU_i^k = i -ésimo ponto de uso da rota k ;

PDU_c^k = ponto de uso mediano da rota k , definido como o mais próximo do baricentro dos pontos de uso da rota;

$dist(PDU_i^k, PDU_c^k)$ = distância euclidiana entre os pontos de uso.

É possível se afirmar que F_m e o indicador *Av dist to center* mostrado no Quadro 4.1 são análogos, pois ambos são determinados pelas distâncias entre os pontos de uso e um centroide. Entretanto, *Av dist to center* avalia a qualidade da rota, ao passo que F_m avalia a qualidade de toda a solução, eventualmente admitindo que uma combinação entre rotas de menor e maior qualidade possam resultar em uma solução visualmente atraente.

Nesta implementação, uma vez que uma solução viável seja definida para um determinado número de rotas (linha 20 do algoritmo mostrado na Figura 4.14), o procedimento de melhoria busca a redução da distância total percorrida e do indicador de forma (linha 24 na mesma figura). Como lembrado por Poot *et al.* (2002), estes objetivos podem ser conflitantes; na implementação, ao final de cada uma das etapas do método de melhoria, a solução é dita “melhorada” quando houver:

- Redução da distância total percorrida, a partir de agora chamada de D_t .
- Redução do indicador de forma F_m , desde que o acréscimo na distância total D_t não supere um percentual fornecido como parâmetro. Inicialmente, este parâmetro foi fixado em 20%.

Empregando uma estratégia “*best-fit*”, o procedimento avalia a melhor alternativa de melhoria dos indicadores após pesquisar:

- A realocação de pontos de uso, transferindo-os de sua rota original para outra rota vizinha, de forma a promover uma redução de D_t ou F_m conforme descrito acima.

- O intercâmbio entre pontos de uso pertencentes a rotas distintas, também resultando em uma redução de D_t ou F_m .

Figura 4.15: Método de trocas com busca de itinerários comuns.

Procuram-se rotas com itinerários comuns e testam-se trocas entre os pontos de uso. Para ser efetivada, a troca deve gerar um ganho na soma entre os indicadores.

Como mostrado na Figura 4.15, o procedimento seleciona como primeira rota aquela que possua o maior valor para F_m ; também identifica o ponto de uso que, se removido da rota, produza o maior ganho no valor nesse indicador. A segunda rota selecionada pelo procedimento é aquela que possui o maior número de pontos de uso localizados no itinerário resultante na rota 1 após a remoção do ponto de uso citado. Dentre esses pontos, seleciona-se aquele cuja troca com o ponto removido da primeira rota gere o maior ganho no valor de F_m ; a troca deve ser naturalmente viável, face às restrições impostas ao problema e a capacidade disponível dos rebocadores. Nesta etapa, apenas intercâmbios entre pontos de uso são avaliados; a cada intercâmbio de pontos de uso, F_m deve ser recalculado permitindo a avaliação do benefício final. Se não houver intercâmbio viável ou se o intercâmbio entre os pontos não mostrar benefício, o procedimento é repetido para a próxima rota com o maior valor de F_m .

A implementação desta etapa do algoritmo de melhoria é mostrada na Figura 4.16. A linha 5 inicializa a variável *ordem*, utilizada na linha 11 como parâmetro da função *qual_pior_rota*. Esta função retorna a n -ésima rota com o maior valor para F_m , sendo que n corresponde ao valor de *ordem*. A linha 8 estabelece um laço de k repetições da avaliação

das trocas. Uma vez identificada a rota 1 como aquela de n -ésimo maior valor para o indicador de forma, as linhas 12 e 13 atualizam o ponto de uso que, se removido, proporcionará o maior benefício ao indicador, e a rota resultante desta remoção. Ela é necessária para a identificação da rota com pontos comuns, feita na linha 16.

```

1.  // Procedimento Melhoria da Solução – itinerários comuns
2.  Melhora_Solucao ( sol_temp )
3.  início
4.      // inicializa parâmetros
5.      ordem ← 1
6.
7.      // repete o procedimento diversas vezes, procurando trocas
8.      repita k vezes
9.          // identifica a rota com maior indicador, PDU para troca e rota resultante
10.         // avalia a rota resultante
11.         rota1 ← qual_pior_rota ( sol_temp , ordem )
12.         PDU_troca1 ← qual_PDU_para_troca ( rota1 )
13.         rota1_result ← qual_rota_result ( PDU_troca1 )
14.
15.         // identifica rota com PDU na rota resultante, PDUs candidatos
16.         rota2 ← qual_rota_comum( rota1_result )
17.         cj_PDU_troca2 ← quais_PDUs_candidatos ( rota2 )
18.
19.         // seleciona PDU de maior benefício
20.         PDU_troca2 ← avalia_melhor_troca ( cj_PDU_troca 2)
21.
22.         // se PDU foi identificado, faz a troca
23.         se ( PDU_troca2 ≠ ∅ ), então
24.             troca_PDUs (PDU_troca1, PDU_troca2 )
25.
26.         // reinicializa parâmetros
27.         ordem ← 1
28.         senão
29.             // próxima pior rota
30.             ordem ← ordem + 1
31.         fim
32.     fim
33. fim

```

Figura 4.16: Algoritmo para a melhoria da solução: trocas em itinerários comuns.

Na linha 17, avalia-se o conjunto de pontos candidatos da rota 2 e na linha 20, o procedimento *avalia_melhor_troca* verifica se a troca é possível, dadas as restrições do problema e disponibilidade de capacidade nos rebocadores envolvidos. Como valor de retorno, o procedimento apresenta o ponto de uso cuja troca satisfaça as restrições e ainda apresente o maior benefício em relação ao indicador.

A troca pode não ser possível ou mesmo não ser compensadora. Neste caso, o procedimento parte para um novo ciclo, identificando uma próxima rota de maior valor para F_m . Sendo compensadora, a troca é realizada na linha 24; o ciclo de repetições é então reinicializado.

5 IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DO ALGORITMO

A heurística descrita foi implementada em ambiente de planilha MS-Excel, utilizando a linguagem VBA. Planilhas são amplamente empregadas em empresas de manufatura e sua utilização para a implementação da heurística visa disponibilizar a usuários em geral um ambiente de fácil acesso e uma interface familiar, aumentando as perspectivas de uso da ferramenta.

coordenadas dos nós dos corredores				arcos dos corredores			POU - localização nos corredores				
	nó	coord_x	coord_y	ref	origem	destino	ref	POU	origem	destino	dist origem
1	1	1,6	-82,8	1	1	2	1	Od	1	19	14,6
2	2	24	-82,8	2	1	19	2	cRF01	2	1	6,4
3	3	24	-92,4	3	2	3	3	cFF01	3	2	5,6
4	4	38	-92,4	1	4	3	4	cFF02	6	3	19,6
5	5	42,4	-92,4	1	5	6	5	cUB03	17	6	2,8
6	6	53,2	-92,4	6	6	8	6	cBS02	17	18	22,8
7	7	55,6	-92,4	1	7	8	7	cBS04	17	18	28
8	8	61,2	-92,4	8	8	13	8	cBS03	17	18	34,8
9	9	61,2	-108,8	9	9	12	9	cFO4	18	17	11,6
10	10	72	-108,8	1	10	12	10	cFO1	18	17	36,8
11	11	76,4	-108,8	1	11	13	11	Oe	19	1	1
12	12	82,4	-108,8	12	14	16	12	cD01	19	20	6,8
13	13	82,4	-92,4	13	14	18	13	cMCO1	19	20	24,8
14	14	102,8	-92,4	14	16	27	14	cUB02	19	20	42,4
15	15	103,6	-94	1	15	17	15	cFO2	19	20	66,8
16	16	114,4	-92,4	16	18	21	16	cFO3	20	21	6,4
17	17	53,2	-81,6	17	19	20	17	cBP01	21	18	4
18	18	102,8	-81,6	18	19	22	18	cBSLHRC01	22	34	6
19	19	1,6	-67,2	19	20	21	19	cBSLHCC01	22	34	14,8
20	20	86	-67,2	20	20	25	20	cPBFP01	22	34	29,2
21	21	102,8	-67,2	21	21	26	21	cPBPO2	23	22	12,4
22	22	1,6	-46,8	22	22	23	22	cPBPO1	23	22	19,6
23	23	30	-46,8	23	22	34	23	cD1RLH01	24	29	4,4
24	24	42	-46,8	24	23	24	24	cD1FLH01	24	29	12,8
25	25	86	-46,8	25	23	28	25	cDA01	25	24	26,8

Figura 5.1: Tabelas de configuração: grafo de corredores e posicionamento de PDUs.

Para a configuração do problema na planilha, os dados estão organizados da seguinte maneira:

1. Dados relativos ao grafo da rede de corredores de movimentação, mostrado na Figura 5.1:
 - a. Na tabela à esquerda da figura são inseridos os nós do grafo e suas coordenadas. Como descrito anteriormente, os nós correspondem às esquinas ou cruzamentos entre corredores de movimentação da instalação.
 - b. Na tabela central são indicados os arcos do grafo, definidos pelo seu nó de origem e nó de destino. Os arcos não são direcionados; arcos correspondem aos corredores de movimentação da instalação.

2. Dados relativos ao posicionamento dos pontos de uso nos corredores de movimentação, mostrados tabela à direita da Figura 5.1. Devem ser indicados o nome do ponto de uso, o arco onde está posicionado e sua distância desde o nó de origem. Notar que, para indicação do arco, deve-se considerar o acesso correto do comboio ao ponto, ou seja, pela direita do corredor. Assim, ainda que na tabela de arcos se tenha indicado a existência do arco (3, 6), o arco de posicionamento do ponto de uso cFF02 está descrito com o (6, 3).

O posicionamento do supermercado de peças é feito pela especificação dos pontos de uso 0e e 0d localizados respectivamente do lado esquerdo e do lado direito do corredor onde se encontra o estoque. O algoritmo reconhece esta notação e garante que o percurso entre o supermercado e o primeiro ponto de uso da rota ou entre o último ponto de uso da rota e o supermercado seja o mais curto.

3. Dados relativos ao consumo de peças, incluindo seu ponto de uso, conforme mostrado na Figura 5.2, correspondendo ao PFEP.

pto uso	produto	prod/h	componente	descricao	qtd/prod	qtdNaEmbal	min/embal
cB01	SUV	2,5	c_SUV_LH	REAR_DOOR_STRUCTURE_LH	1	7	168,0
cB01	SUV	2,5	c_SUV_RH	REAR_DOOR_STRUCTURE_RH	1	7	168,0
cB06	SUV	2,5	c_SUV	ENDGATE (SUV)	1	8	192,0
cBP01	CC	12,6	c_98104116	PANEL BODY RR OUTER	1	40	190,5
cBS02	CC	12,6	c_98104793	REINF ASM ROCKER LH	1	16	76,2
cBS02	CC	12,6	c_94739381	PANEL ASM FRT PLR INR LH	1	16	76,2
cBS02	RC	1,4	c_98104504	REINFORCEMENT ROCKER RH	1	3	128,6
cBS03	CC	12,6	c_94727121	PANEL BODY SIDE OTR LH	1	10	47,6
cBS03	CC	12,6	c_98104786	PNL ASM RR PLR INR LWR LH	1	12	57,1
cBS03	RC	1,4	c_94727123	PANEL BODY SIDE OUTER LH	1	2	85,7
cBS04	CC	12,6	c_98104094	REINF ASM SIDE PLR INR LWR LH	1	11	52,4
cBS04	CC	12,6	c_98104095	REINF ASM SIDE PLR IONR LWR RH	1	11	52,4
cBSLH01	CC	12,6	c_94742654	REINF ASM PUBX PLTF #4 CR SILL	1	20	95,2
cBSLH01	CC	12,6	c_94742653	BRACKET - PUBX OTR S/PNL RR STEP	1	20	95,2
cBSLH01	CC	12,6	c_94728222	PANEL ASM PUBX W/H RR	1	30	142,9
cBSLH01	CC	12,6	c_98104294	PANEL PUBX SIDE W/H INR LH	1	30	142,9
cBSLH01	RC	1,4	c_94742655	REINF ASM PUBX PLTF SILL CR SILL	2	8	171,4
cBSIRH01	CC	12,6	c_94742654	REINF ASM PUBX PLTF #4 CR SILL	1	20	95,2
cBSIRH01	CC	12,6	c_94742653	BRACKET - PUBX OTR S/PNL RR STEP	1	20	95,2
cBSIRH01	CC	12,6	c_94728221	PANEL ASM PUBX W/H RR	1	30	142,9
cBSIRH01	CC	12,6	c_98104296	PANEL PUBX SIDE W/H INR RH	1	30	142,9
cBSIRH01	RC	1,4	c_94742655	REINF ASM PUBX PLTF SILL CR SILL	2	8	171,4
cBSLHCC01	CC	12,6	c_94714709	PANEL PUBX OTR SLRH	1	9	42,9
cBSLHCC01	CC	12,6	c_94747792	PANEL ASM PUBX RR CORNER LH	1	12	57,1
cBSLHCC01	CC	12,6	c_98104378	PANEL ASM PUBX RR CORNER OTR LH	1	80	381,0
cBSLHRC01	RC	1,4	c_94714713	PANEL PUBX OTR SLRH	1	4	17,4
cBSRHCC01	CC	12,6	c_94714708	PANEL PUBX OTR SLRH	1	9	42,9
cBSRHCC01	CC	12,6	c_94747791	PANEL ASM PUBX RR CORNER RH	1	12	57,1
cBSRHCC01	CC	12,6	c_98104379	PANEL ASM PUBX RR CORNER OTR RH	1	80	381,0
cBSRHRC01	RC	1,4	c_94714712	PANEL PUBX OTR SLRH	1	4	17,4
cd01	CC	12,6	c_94751615	PANEL DASH	1	20	95,2
cd01	CC	12,6	c_98104535	PNL ASM COWL UPPER	1	24	114,3
cd01	CC	12,6	c_98104446	REINF ASM PEDAL MTG LH	1	60	285,7
cd01	CC	12,6	c_98104428	REINF ASM PEDAL MTG RH	1	60	285,7
cd01	SUV	12,6	c_94751615	PANEL DASH	1	20	95,2

Figura 5.2: Tabela com o consumo de peças nos PDUs, correspondente ao PFEP.

Por conterem de dados originados do layout da instalação, as tabelas da Figura 5.1 não devem ser alteradas com frequência: mudanças em corredores ou reposicionamento de pontos de uso são esporádicos, fruto de readequações maiores da instalação, normalmente

- Tpo manuseio EMB (min): tempo de manuseio de cada embalagem no ponto de uso e no estoque. Corresponde ao tempo de retirar a embalagem cheia do comboio, posicioná-la no ponto de uso, remover a embalagem vazia e conectá-la ao comboio.

As rotinas de geração da solução são acionadas pelos botões localizados na parte inferior do lado esquerdo da Figura 5.3:

- Rotas iniciais (**COM** calc de matriz dist): aciona o cálculo das rotas incluindo a determinação da matriz de caminhos mínimos. Isto se faz necessário quando da alteração da rede de corredores, inclusão, remoção ou reposicionamento de algum ponto de uso.
- Rotas iniciais (**SEM** calc de matriz dist): aciona o cálculo das rotas, tomando a última geração da matriz de caminhos mínimos como válida. Isto se justifica pelo caráter mais estático da matriz de caminhos mínimos, somente alterada quando da alteração de corredores, inclusão, remoção ou reposicionamento de algum ponto de uso.
- Mostra rotas: para a demonstração visual de resultados foi criada uma interface gráfica acionada por este botão. Os resultados demonstrados neste trabalho fazem uso desta interface.

O restante da Figura 5.3 mostra os resultados de um processamento. Em forma de tabela, são mostrados diversos indicadores de cada uma das rotas obtidas; estes indicadores serão comentados mais a frente no texto. Cada uma das rotas está descrita na forma de uma cadeia de caracteres, indicando a sequência de nós e pontos de uso a serem percorridos; na figura, esta cadeia está mostrada parcialmente. Na parte superior esquerda da figura, além da data de processamento, estão indicados a distância total percorrida (D_t) e o indicador de forma da solução (F_m).

Internamente à implementação, os seguintes parâmetros podem ser ajustados:

- Tolerância de perda de distância total: durante o processo de melhoria da solução, admite-se que para o ganho no indicador de forma da solução da rota corresponda um aumento da distância total percorrida. Este parâmetro corresponde à tolerância aceitável para este aumento.
- Número de repetições para geração de soluções alternativas. A princípio, o número de repetições corresponde a 10 vezes o número de pontos de uso.

- Tipo de seleção de rota para alocação de pontos de uso durante a inserção paralela, podendo se optar pela rota mais ociosa ou pela mais utilizada.

5.1 Testes para a validação do algoritmo

Para o teste do algoritmo foram propostos problemas de baixa complexidade, cuja solução apresentasse facilidade de determinação manual ou que a mesma fosse intuitiva. Desta forma, torna-se possível comparar os resultados gerados pelo algoritmo com resultados determinados manualmente. Estes testes foram montados de forma a validar a lógica de heurística proposta e as fórmulas de cálculo de distâncias e tempos.

Os testes mostrados neste capítulo utilizam os dados de consumo mostrados na Figura 5.4. A princípio, todas as peças possuem o mesmo intervalo entre abastecimentos; para alguns testes, o intervalo foi modificado e isto está destacado no texto. Duas redes de corredores foram utilizadas e são descritas mais a frente no texto.

PDU	Produto	TP (un/h)	Código	Descrição da Peça	Qtd/Prod (un/prod)	Qtd / Embal (un/embal)	Intervalo reabastec (min)
A1	QQ	40,0	compA1	peca_compA1	1	20	30,0
A2	QQ	40,0	compA2	peca_compA2	1	20	30,0
A3	QQ	40,0	compA3	peca_compA3	1	20	30,0
B1	QQ	40,0	compB1	peca_compB1	1	20	30,0
B2	QQ	40,0	compB2	peca_compB2	1	20	30,0
B3	QQ	40,0	compB3	peca_compB3	1	20	30,0
C1	QQ	40,0	compC1	peca_compC1	1	20	30,0
C2	QQ	40,0	compC2	peca_compC2	1	20	30,0
C3	QQ	40,0	compC3	peca_compC3	1	20	30,0
D1	QQ	40,0	compD1	peca_compD1	1	20	30,0
D2	QQ	40,0	compD2	peca_compD2	1	20	30,0
D3	QQ	40,0	compD3	peca_compD3	1	20	30,0

Figura 5.4: Tabela com o consumo de peças nos PDUs utilizada nos testes.

Para todos os testes, considera-se:

- Velocidade de deslocamento: 100 m/min.
- Tempo de parada estoque: 0,5 min.
- Tempo de parada no PDU: 0,5min.
- Tempo de manuseio por embalagem: 1,0min.

5.1.1 Inclusão gradativa de pontos

Este teste utiliza a rede de corredores mostrada na Figura 5.5; os dados do grafo estão na Figura 5.6. A capacidade de transporte dos rebocadores é de 2 embalagens.

O teste avalia a consistência na determinação de rotas pelo algoritmo quando pontos de uso são gradativamente adicionados ao sistema. Intuitivamente, parece claro que o atendimento de até dois PDUs, independentemente de seu posicionamento, se faça com apenas uma rota, pois o rebocador possui capacidade suficiente e os tempos de viagens são inferiores ao intervalo entre abastecimentos. O lado esquerdo da Figura 5.9 mostra esta condição, onde, para o atendimento dos pontos de uso A1 e A2, temos:

Figura 5.5: Rede 1 – corredores para os testes de verificação.

coordenadas dos nós dos corredores			arcos dos corredores			POU - localização nos corredores				
nó	coord_x	coord_y	ref	origem	destino	ref	POU	origem	destino	dist origem
1	0	0	1	1	2	1	0d	1	4	25
2	100	0	2	2	3	2	0e	4	1	25
3	200	0	3	4	5	3	A1	7	8	70
4	0	50	4	5	6	4	B1	8	9	70
5	100	50	5	7	8	5	C1	4	5	70
6	200	50	6	8	9	6	D1	2	1	30
7	0	100	7	1	4	7	A2	7	8	90
8	100	100	8	4	7	8	B2	8	9	90
9	200	100	9	2	5	9	C2	4	5	90
			10	5	8	10	D2	2	1	10
			11	3	6	11	A3	8	5	20
			12	6	9	12	B3	9	6	20
						13	C3	5	2	20
						14	D3	5	2	30

Figura 5.6: Rede 1 – nós, arcos e posicionamento de POU.

- Rota definida: $0d + 4 + 7 + A1 + A2 + 8 + 5 + 4 + 0e$ (a notação indica a sequência de nós e pontos de uso visitados no itinerário da rota), totalizando uma distância de 350m e resultante dos percursos:
 - Entre o supermercado e A1: $0d + 4 + 7 + A1$, com distância de 145m.
 - Entre A1 e A2: $A1 + A2$, com distância de 20m.
 - Entre A2 e supermercado: $A2 + 8 + 5 + 4 + 0e$, com distância de 205m.
 - Estes percursos foram determinados no processamento inicial do algoritmo, gerando a matriz de caminhos mínimos, cujas distâncias e itinerários são mostrados parcialmente na Figura 5.7 e na Figura 5.8, respectivamente.

ref	orig	dest										
		0d	0e	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
1	0d	-	350,0	145,0	165,0	195,0	245,0	265,0	295,0	95,0	115,0	145,0
2	0e	550,0	-	395,0	415,0	445,0	295,0	315,0	345,0	445,0	465,0	395,0
3	A1	255,0	205,0	-	20,0	50,0	100,0	120,0	150,0	350,0	370,0	100,0
4	A2	235,0	185,0	280,0	-	30,0	80,0	100,0	130,0	330,0	350,0	80,0
5	A3	205,0	155,0	250,0	270,0	-	350,0	370,0	400,0	300,0	320,0	50,0
6	B1	355,0	305,0	400,0	420,0	450,0	-	20,0	50,0	450,0	470,0	200,0
7	B2	335,0	285,0	380,0	400,0	430,0	280,0	-	30,0	430,0	450,0	180,0
8	B3	305,0	255,0	350,0	370,0	400,0	250,0	270,0	-	400,0	420,0	150,0
9	C1	205,0	255,0	350,0	370,0	300,0	150,0	170,0	200,0	-	20,0	50,0
10	C2	185,0	235,0	330,0	350,0	280,0	130,0	150,0	180,0	280,0	-	30,0
11	C3	155,0	405,0	300,0	320,0	350,0	400,0	420,0	450,0	250,0	270,0	-

Figura 5.7: Rede 1 – matriz de caminhos mínimos – distâncias (parcial).

ref	orig	dest			
		0d	0e	A1	A2
1	0d	-	$0d + 4 + 7 + 8 + 5 + 4 + 0e$	$0d + 4 + 7 + A1$	$0d + 4 + 7 + A2$
2	0e	$0e + 1 + 2 + 5 + 6 + 3 + 2 + 1 + 0d$	-	$0e + 1 + 2 + 5 + 4 + 7 + A1$	$0e + 1 + 2 + 5 + 4 + 7 + A2$
3	A1	$A1 + 8 + 5 + 2 + 1 + 0d$	$A1 + 8 + 5 + 4 + 0e$	-	$A1 + A2$
4	A2	$A2 + 8 + 5 + 2 + 1 + 0d$	$A2 + 8 + 5 + 4 + 0e$	$A2 + 8 + 5 + 4 + 7 + A1$	-
5	A3	$A3 + 5 + 2 + 1 + 0d$	$A3 + 5 + 4 + 0e$	$A3 + 5 + 4 + 7 + A1$	$A3 + 5 + 4 + 7 + A2$
6	B1	$B1 + 9 + 6 + 3 + 2 + 1 + 0d$	$B1 + 9 + 6 + 5 + 4 + 0e$	$B1 + 9 + 6 + 5 + 4 + 7 + A1$	$B1 + 9 + 6 + 5 + 4 + 7 + A2$
7	B2	$B2 + 9 + 6 + 3 + 2 + 1 + 0d$	$B2 + 9 + 6 + 5 + 4 + 0e$	$B2 + 9 + 6 + 5 + 4 + 7 + A1$	$B2 + 9 + 6 + 5 + 4 + 7 + A2$
8	B3	$B3 + 6 + 3 + 2 + 1 + 0d$	$B3 + 6 + 5 + 4 + 0e$	$B3 + 6 + 5 + 4 + 7 + A1$	$B3 + 6 + 5 + 4 + 7 + A2$
9	C1	$C1 + 5 + 2 + 1 + 0d$	$C1 + 5 + 8 + 7 + 4 + 0e$	$C1 + 5 + 2 + 1 + 4 + 7 + A1$	$C1 + 5 + 2 + 1 + 4 + 7 + A2$
10	C2	$C2 + 5 + 2 + 1 + 0d$	$C2 + 5 + 8 + 7 + 4 + 0e$	$C2 + 5 + 2 + 1 + 4 + 7 + A1$	$C2 + 5 + 2 + 1 + 4 + 7 + A2$
11	C3	$C3 + 2 + 1 + 0d$	$C3 + 2 + 3 + 6 + 5 + 4 + 0e$	$C3 + 2 + 1 + 4 + 7 + A1$	$C3 + 2 + 1 + 4 + 7 + A2$

Figura 5.8: Rede 1 – matriz de caminhos mínimos – itinerários (parcial).

- Tempo máximo para a execução da viagem: 30min, equivalente ao intervalo entre abastecimentos tanto do item pertencente ao ponto A1 como do item pertencente ao ponto A2.
- Tempo de viagem: 9,0min, inferior ao tempo máximo de execução e resultado da soma das seguintes parcelas:
 - Tempo de deslocamento, calculado a partir da distância a ser percorrida pela rota e da velocidade média especificada:

$$\text{Tempo de deslocamento} = 350\text{m} / 100\text{m/min} = 3,5\text{min}$$

- Tempo de manuseio, calculado pela soma entre os tempos de manuseio de cada item associado à rota, os tempos de parada em cada ponto de uso e o tempo de parada no estoque. Para a rota em questão temos 2 itens, 2 POU's e uma parada no estoque, ou seja:

$$\text{Tempo de manuseio} = 2 * 2 * 1,0\text{min} + 2 * 0,5\text{min} + 0,5\text{min} = 5,5\text{min}$$

O fator 2 em negrito está na expressão, pois os itens são manuseados tanto no POU como no estoque.

Figura 5.9: Duas rotas necessárias para o atendimento dos PDUs A1, A2 e A3.

Já para o atendimento de um terceiro PDU, uma segunda rota é necessária devido à limitação de capacidade do rebocador, como mostrado na Figura 5.9, do seu lado direito. Nota-se que a rota 1 inclui dois pontos próximos, obedecendo a lógica do algoritmo que dita como objetivo a redução de F_m . Por atender apenas um PDU com apenas 1 item, a rota 2 apresenta ociosidade, uma vez que sua capacidade de transporte é de 2 embalagens.

A Figura 5.10 mostra como a introdução do ponto B1 altera as rotas especificadas. As rotas propostas pelo algoritmo são:

- Rota 1: 0d + 4 + 7 + A1 + 8 + A3 + 5 + 4 + 0e, distância 350m.
- Rota 2: 0d + 4 + 7 + A2 + 8 + B1 + 9 + 6 + 5 + 4 + 0e, distância 550m.

Percebe-se que, devido à disposição dos pontos de uso, o atendimento de B1 em conjunto com A1 ou A2, resulta em D_t mínimo. O atendimento de B1 com A3 exigiria um percurso mais longo, sem alteração no percurso de atendimento de A1 e A2. Por outro lado, o

atendimento de B1 com A2 no lugar de B1 com A1 é o que resulta no menor valor de F_m , pois, a partir da análise dos dados do grafo é possível observar que:

- $dist(A1, A3) + dist(A2, B1) < dist(A2, A3) + dist(A1, B1)$, o que em números, lembrando que as distâncias são euclidianas, corresponde $28,3 + 80 < 22,4 + 100$.

Figura 5.10: Duas rotas necessárias para o atendimento dos PDUs A1, A2, A3 e B1.

Percebe-se ainda que esta mesma solução se manteria para a introdução de qualquer um dos pontos B1, B2 ou B3.

A Figura 5.11 mostra a alteração das rotas quando da substituição do ponto B1 pelo ponto C1. Os itinerários anteriores são incompatíveis com o percurso necessário para se alcançar C1 no sentido correto do corredor. Deste modo, o algoritmo resulta na inversão do itinerário, atendendo primeiramente C1 e posteriormente A3. As rotas propostas pelo algoritmo são as seguintes:

- Rota 1: 0d + 4 + 7 + A1 + A2 + 8 + 5 + 4 + 0e, distância 350m.
- Rota 2: 0d + 4 + C1 + 5 + 6 + 9 + 8 + A3 + 5 + 4 + 0e, distância 550m.

A solução mantém A1 e A2 na rota 1 e A3 e C1 na rota 2, configuração que resulta em menor D_i e no menor valor para F_m . Outras combinações entre os pontos resultam em uma maior distância total percorrida, pois:

- O itinerário da rota 1 pode atender qualquer combinação entre A1, A2 e A3. Consequentemente, a alternativa final depende unicamente da menor distância entre C1 e o ponto a ser atendido em conjunto com ele.
- Conforme a matriz de caminhos mínimos da Figura 5.7, a distância entre C1 e A3 (300m) é menor que a distância entre C1 e A2 (370m) e entre C1 e A1 (350m). Em

sentido contrário temos que a distância entre A3 e C1 (300m) é menor que aquelas entre A2 e C1 (330m) ou entre A3 e C1 (350m).

Figura 5.11: Rotas para o atendimento dos PDUs A1, A2, A3 e C1.

- Atender C1 e posteriormente A3 é melhor opção do que atender A3 e posteriormente C1, pois, quando comparadas as distâncias necessárias para se alcançar estes pontos a partir do estoque e alcançar o estoque a partir destes pontos, temos que:

$$\circ \quad \text{dist}(0d, C1) + \text{dist}(A3, 0e) < \text{dist}(0d, A3) + \text{dist}(C1, 0d), \text{ em números,} \\ 95 + 155 < 195 + 205.$$

Neste teste, o algoritmo gerou soluções corretamente, tendo acrescentado rotas quando do esgotamento da capacidade de transporte do rebocador, optado pela menor distância total percorrida nos três testes e ainda escolhido a solução com menor valor para F_m quando se apresentaram soluções alternativas com mesmo D_r .

5.1.2 Alteração da capacidade – rede 1

Com o mesmo cenário de atendimento dos pontos A1, A2, A3 e C1 mostrado na Figura 5.11, a capacidade de transporte dos rebocadores foi alterada para 3 embalagens. A solução é mostrada na Figura 5.12, compondo-se de:

- Rota 1: 0d + 4 + 7 + A1 + A2 + 8 + A3 + 5 + 4 + 0e, distância 350m, atendendo os pontos A1, A2 e A3.
- Rota 2: 0d + 4 + C1 + 5 + 2 + 1 + 0d, distância 300m, atendo o ponto C1.

Visto que não existe a possibilidade na redução do número de rotas, a solução se justifica pela redução de D_r . Comparada à solução do teste anterior, a capacidade torna viável a

transferência do ponto A3 para a rota 1, sem alteração do percurso. A remoção de A3 da rota 2, reduz seu percurso e também a distância total. Este resultado mostra que o algoritmo gerou a solução corretamente.

Figura 5.12: Rotas para o atendimento A1, A2, A3 e C1; capacidade 3 embalagens.

Figura 5.13: Rotas simétricas; rebocadores com capacidade de 4 embalagens.

5.1.3 Rotas simétricas – rede 1

Neste teste, os pontos C1, C2 e C3 estão localizados de maneira simétrica aos pontos D1, D2 e D3 e os rebocadores podem transportar até 4 embalagens. Uma rota é insuficiente para o atendimento; por outro lado duas rotas permitem o atendimento, porém configuram um cenário com excesso de capacidade. A Figura 5.13 mostra que as rotas geradas são simétricas, apesar dos rebocadores apresentarem ociosidade:

- Rota 1: $0d + 4 + C1 + C2 + 5 + C3 + 2 + 1 + 0d$, distância 300m, ocupação média de 3 embalagens.
- Rota 2: $0d + 4 + 5 + D3 + 2 + D2 + D1 + 1 + 0d$, também com distância 300m, ocupação média também de 3 embalagens.

Diversas combinações de atendimento dos pontos são possíveis, porém todas com o mesmo itinerário, ou seja, a distância total percorrida não se altera. O algoritmo gera a solução conforme esperado, optando pelo o agrupamento dos pontos de uso e resultando no menor valor de F_m .

5.1.4 Alteração da rede de corredores – rede 2

Para este teste, uma segunda rede de corredores foi considerada, como mostrado na Figura 5.14; os nós, arcos e posicionamento de POUs estão mostrados na Figura 5.15. A Figura 5.16 e a Figura 5.17 mostram respectivamente as matrizes de distâncias e itinerários dos caminhos mínimos entre os POUS.

Figura 5.14: Rede 2 de corredores para os testes de verificação.

Os pontos a serem atendidos são A1, A2, B1 e B2 e a capacidade de transporte dos rebocadores foi fixada em 3 embalagens. Também neste caso, temos um cenário com excesso de capacidade e a intenção do teste é mostrar que o algoritmo procura manter a simetria da solução, optando por soluções com menor valor de F_m .

A Figura 5.18 mostra que duas rotas praticamente simétricas compõem a solução:

- Rota 1: 0e + 4 + 1 + B2 + 2 + 5 + 6 + 3 + 2 + B1 + 1 + 4 + 0d, distância 300m.
- Rota 2: 0d + 7 + 10 + A1 + 11 + 12 + 9 + 8 + 11 + A2 + 10 + 7 + 0e, também com distância 300m.

- O algoritmo busca o alcance dos pontos de uso respeitando o lado correto do corredor, exigindo que o rebocador faça um retorno na rede de corredores: a rota 1 faz o retorno utilizando os nós 2, 5, 6, 3 e 2, enquanto a rota 2 faz o retorno utilizando os nós 11, 12, 9, 8 e 11, respeitando a preferência de curvas a direita. Os retornos são realizados respectivamente no sentido horário e anti-horário da figura, tendo igual distância percorrida, porém não sendo simétricos.

coordenadas dos nós dos corredores			arcos dos corredores			POU - localização nos corredores				
nó	coord_x	coord_y	ref	origem	destino	ref	POU	origem	destino	dist origem
1	0	0	1	1	2	1	B2	1	2	20
2	60	0	2	2	3	2	B1	2	1	55
3	80	0	3	4	5	3	Od	4	7	10
4	0	30	4	5	6	4	Oe	7	4	10
5	60	30	5	7	8	5	A1	10	11	5
6	80	30	6	8	9	6	A2	11	10	40
7	0	50	7	10	11					
8	60	50	8	11	12					
9	80	50	9	1	4					
10	0	80	10	4	7					
11	60	80	11	7	10					
12	80	80	12	2	5					
13	100	0	13	5	8					
14	100	30	14	8	11					
15	100	50	15	3	13					
16	100	80	16	6	14					
			17	9	15					
			18	12	16					
			19	13	14					
			20	14	15					
			21	15	16					
			22	6	9					

Figura 5.15: Rede 2 – nós, arcos e posicionamento de POUs.

ref	orig	dest		A1	A2	B1	B2
		Od	Oe				
1	Od	-	200,0	45,0	140,0	175,0	200,0
2	Oe	200,0	-	185,0	160,0	155,0	60,0
3	A1	175,0	155,0	-	195,0	190,0	215,0
4	A2	200,0	60,0	245,0	-	215,0	120,0
5	B1	45,0	185,0	90,0	185,0	-	245,0
6	B2	140,0	160,0	185,0	160,0	195,0	-

Figura 5.16: Rede 2 – matriz de caminhos mínimos – distâncias.

A Figura 5.19 mostra a rede com a remoção do corredor ou arco entre os nós 3 e 6, o que provoca uma alteração no percurso na rota 1. Com uma verificação da tabela de nós da rede de corredores, é fácil perceber que a distância mínima entre os pontos B2 e B1 aumenta de 40m, distância equivalente ao percurso adicional necessário entre os nós 6 e 14 e 13 e 3, este último não mostrado na figura. A Figura 5.20 mostra a retirada do corredor ou arco

reduza. Assim, para os casos citados, admite-se que a solução tenha até 672m de percurso total (correspondente a 20% de tolerância sobre a distância total mínima de 560m) desde que F_m se reduza e isto é o que ocorre nos dois primeiros casos. Para o terceiro caso, a eventual manutenção da rota 1 do caso 2 e criação de uma rota 2 simétrica a ela, levariam a uma distância total de 680m, superior à tolerância. Assim, o algoritmo aponta para a solução de menor D_t .

Figura 5.19: Remoção de um primeiro corredor da rede.

Figura 5.20: Remoção de um segundo corredor da rede.

5.1.5 Alteração da frequência de abastecimento – rede 2

Tomando a rede da Figura 5.14, faz-se uma alteração no intervalo entre abastecimentos do item do ponto A1, reduzindo-o para 15min, ou seja, metade do anteriormente mostrado, exigindo viagens mais frequentes para este ponto. Outros pontos que compartilhem a rota poderão ser abastecidos de maneira alternada, ou seja, mesmo que o rebocador possua uma capacidade de transporte de duas embalagens, ele pode ser responsável pelo abastecimento de até 3 pontos.

Esta é a situação mostrada na Figura 5.21, onde a capacidade do rebocador foi fixada em 2 embalagens e se faz o atendimento de 3 pontos: A1 é abastecido a cada 15min e determina o tempo entre viagens; A2 e B1 são abastecidos a cada 30min, utilizando viagens alternadas da rota. A ocupação média do rebocador é 2, correspondente a sua capacidade. A rota única da solução tem o itinerário $0d + 7 + 10 + A1 + 11 + 8 + 5 + 2 + B1 + 1 + 4 + 5 + 8 + 11 + A2 + 10 + 7 + 0e$, $D_t = 480m$ e $F_m = 95,0m$.

Figura 5.21: Rota de abastecimento com alteração de frequência.
O ponto A1 possui frequência de abastecimento de 15min e os demais 30min; a capacidade do rebocador é 2 embalagens.

A solução para um cenário com a introdução de um quarto ponto de abastecimento é mostrada na Figura 5.22. Duas rotas são necessárias, pois a capacidade dos rebocadores é insuficiente. A rota 1, com intervalo entre viagens de 30min, tem ocupação média de 2 embalagens: itens de B1 e B2 são transportados em todas as viagens. A rota 2 é mais frequente, obedecendo a frequência de abastecimento do ponto A1, que é de 15min; sua ocupação média é de 1,5 embalagens: itens de A1 em todas as viagens e itens de A2 em viagens alternadas. A solução corresponde à solução já anteriormente apresentada na Figura 5.18.

A Figura 5.23 apresenta a solução quando a capacidade do rebocador é alterada para 3 embalagens. Uma única rota é suficiente para o atendimento; o intervalo entre suas viagens é de 15min, compatível com o intervalo entre abastecimentos do ponto A1. A cada viagem, os demais itens se alternam no transporte, permitindo seu abastecimento a cada 30min. A ocupação média do rebocador é 2,5 embalagens.

Para a alteração da frequência entre abastecimentos, o algoritmo gerou soluções como esperado, optando primeiramente pela redução do número de rotas e combinando itens entre viagens de modo a reduzir a ocupação dos rebocadores. Nos casos mostrados neste teste, as ocupações médias das rotas corresponderão àquelas que podem ser calculadas manualmente.

Figura 5.22: Solução quando da introdução do quarto ponto de uso.

A rota 2 é mais frequente, pois o ponto A1 é abastecido a cada 15min. Com não existe capacidade suficiente nos rebocadores, recai-se em solução com duas rotas.

5.2 Conclusões do capítulo

Para cada um dos testes propostos, o algoritmo implementado gerou as soluções esperadas, observando os objetivos de distância total percorrida D_t mínima e redução no valor do indicador de forma F_m . Por se tratarem de testes simples, envolvendo um número reduzido de pontos de uso e itens para abastecimento, além de uma geometria conveniente, vários resultados puderam ser calculados manualmente e confrontados com aqueles gerados pelo algoritmo.

Pode-se observar a alteração das soluções do algoritmo à medida que foram alterados os parâmetros dos testes como o número e a posição de pontos de uso, a capacidade dos rebocadores e o intervalo entre abastecimentos de um item. As rotas propostas para cada uma dessas alterações corresponderam ao determinado manualmente e evidenciaram que o algoritmo funciona corretamente e pode ser aplicado na obtenção da solução do problema de roteirização.

O capítulo a seguir trata da aplicação do algoritmo a um estudo de caso real.

Figura 5.23: Solução para 4 pontos de uso e rebocador capacidade 3.
 Uma única rota é necessária e sua frequência corresponde à do ponto A1. Os 3 demais itens se alternam nas viagens, permitindo o abastecimento dos 4 pontos.

6 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE SOLUÇÃO

6.1 Estudo de caso

6.1.1 Escopo e parâmetros do caso

O algoritmo proposto foi aplicado em um caso real para a roteirização de rebocadores de abastecimento de uma linha de montagem de carrocerias de caminhonetes, cujo layout é mostrado na Figura 6.1. A rede de corredores equivalente é mostrada na Figura 6.2; as coordenadas dos nós, a especificação dos arcos e posicionamento dos pontos de uso são mostrados parcialmente na Figura 6.3; a listagem completa de nós, arcos e posicionamento de POUs está no Anexo A.

Três diferentes modelos de caminhonetes são montadas nesta linha, produzidos em diferentes proporções e exigindo o abastecimento de 360 peças. Os pontos de uso relativos a cada um dos modelos são mostrados na Figura 6.1: alguns são exclusivos para determinado modelo e outros comuns a mais de um modelo. A figura ainda destaca o posicionamento do supermercado de peças.

De acordo com seu tamanho, peso ou forma, tais peças são acondicionadas em dois tipos de embalagens:

- Embalagens pequenas, também chamadas de KLT (do alemão, *Kleinladungsträger*, ou “embalagem para cargas pequenas”), de formato e tamanho modular conforme padronização da indústria automobilística. Porcas, parafusos, ferragens e itens de pequeno porte são exemplos de peças acondicionadas neste tipo de embalagem.
- Embalagens grandes, destinadas a peças de grande porte, em tamanho ou peso, ou cujo formato seja especial e tenham manuseio complexo. Estas embalagens são transportadas como descrito neste trabalho, posicionadas sobre plataformas com rodas e rebocadas em comboio.

Este trabalho se concentrou na avaliação de rotas necessárias para o abastecimento das 141 peças acondicionadas em embalagens grandes. Trata-se do problema mais complexo, pois, dadas as limitações de capacidade de tais embalagens, elas são reabastecidas com maior frequência e seu transporte exige o uso de plataformas com rodas e o compartilhamento de

Figura 6.1: Rede de corredores e pontos de uso do estudo de caso.

rebocadores. Os tempos de manuseio destas embalagens também são mais ponderáveis no ciclo de trabalho do rebocador, pois exigem que o operador execute atividades como a localização do item no estoque, preparação do comboio, posicionamento da embalagem nos pontos de uso e reorganização do comboio ao longo da viagem. Onera-se assim o tempo de execução da viagem, o qual deve ser compatível com o intervalo entre abastecimentos do item mais frequente pertencente à rota.

Figura 6.2: Estudo de caso – rede de corredores e localização de PDUs.

Já as embalagens KLT comportam um número mais elevado de peças, por vezes superando a ordem de centenas, como no caso de parafusos, porcas e arruelas. Seu abastecimento é menos frequente e o intervalo entre abastecimentos pode chegar a dias. O meio de transporte utilizado também é específico e comporta um número elevado de embalagens simultaneamente; os tempos de manuseio são menores e não oneram significativamente o tempo de viagem do veículo de transporte das KLTs.

A Figura 6.4 mostra parcialmente a relação de peças a serem abastecidas, apresentada no formato de PFEP (*Plan For Every Part*), já comentado anteriormente. Esta tabela apresenta os pontos de uso, códigos e descrições das peças, além dos intervalos entre abastecimentos

de embalagens; a relação completa das peças está Anexo A. A Figura 6.5 mostra graficamente o número de itens pertencentes a cada ponto de uso e também o intervalo mínimo e máximo entre abastecimentos dos itens mais e menos frequentes do ponto. Ao longo do eixo horizontal do diagrama estão dispostos os pontos de uso, ordenados segundo o intervalo entre abastecimentos de seu item mais frequente. No diagrama podemos observar:

- O número de itens por ponto de uso varia entre 1 e 11. A média de itens por ponto de uso é $141 \text{ itens} / 36 \text{ PDU} = 3,9$.
- O item mais frequente deve ser abastecimento a cada 33,3min (ponto 1); o item menos frequente deve ser reabastecido a cada 494,5min (pontos 27 e 28).
- Pontos de uso com intervalo entre abastecimentos inferior a 100min somam 90 itens, ou seja, 64% deles.
- Os pontos 8 e 9, respectivamente com 4 e 7 itens apresentam a maior dispersão entre os tempos mínimo e máximo de abastecimento, igual a 410,4min.

coordenadas dos nós dos corredores			arcos dos corredores			POU - localização nos corredores				
nó	coord_x	coord_y	ref	origem	destino	ref	POU	origem	destino	dist origem
1	0	26	1	1	2	1	Od	1	19	14,6
2	22,4	26	2	1	19	2	cR01	2	1	6,4
3	22,4	16,4	3	2	3	3	cF06	3	2	5,6
4	36,4	16,4	4	3	6	4	cF07	6	3	19,6
5	40,8	16,4	5	6	17	5	cU02	17	6	2,8
6	51,6	16,4	6	6	8	6	cB04	17	18	22,8
7	54	16,4	7	8	9	7	cB06	17	18	28
8	59,6	16,4	8	8	13	8	cB05	17	18	34,8
9	59,6	0	9	9	12	9	cF04	18	17	11,6

Figura 6.3: Estudo de caso – nós, arcos e posicionamento de POU's (parcial)

PDU	nPDU	Produto	TP (un/h)	Código	Descrição da Peça	Qtd/Prod (un/prod)	Qtd / Embal (un/embal)	Intervalo reabastec (min)
cB01	26	SV	2,5	cSUVL	ESTRUTURA INT PORTA TRAS LE	1	7	168,0
cB01	26	SV	2,5	cSUVR	ESTRUTURA INT PORTA TRAS LD	1	7	168,0
cB02	33	SV	2,5	cSUV	PAINEL TRAS (SV)	1	8	192,0
cB03	30	CD	12,6	A4116	PAINEL FRONTAL CS EXT	1	40	190,5
cB04	13	CD	12,6	A44793	REFORCO CJ PARALAMA, LE	1	16	76,2
cB04	13	CD	12,6	A44794	REFORCO CJ PARALAMA, LD	1	16	76,2
cB04	13	CD	12,6	B739381	PAINEL INTERNO CONJ, LE	1	16	76,2
cB04	13	CS	1,4	B739381	PAINEL EXTERNO CJ, LE	1	16	381,0
cB05	6	CS	1,4	B727123	PAINEL LATERAL TRAS EXT LE	1	10	47,6
cB05	6	CD	12,6	A44786	PAINEL INTERNO TRAS INF, LE	1	12	57,1

Figura 6.4: Estudo de caso – PFEP (parcial).

A coluna nPDU trás o número do ponto de uso utilizado no diagrama da Figura 6.5.

Figura 6.5: Pontos de uso, número de itens e intervalo entre abastecimentos.

Dados gerais e parâmetros deste estudo de caso são mostrados no Quadro 6.1. A duração do turno de trabalho é fornecida pela empresa onde se encontra a linha de produção. O número de abastecimento durante o turno é calculado a partir da duração do turno e intervalos entre abastecimentos de cada um dos itens presentes no PFEP. Tempos de ciclo associados às operações de manuseio de embalagem e paradas nos pontos de uso ou estoque são fornecidos pela empresa, fruto de um trabalho de cronoanálise destas atividades.

Os dados dos rebocadores também são fornecidos pela empresa. A capacidade de transporte é de 5 embalagens e o comprimento máximo do comboio é de 7m, ambos fornecidos pela empresa. Para esse caso em particular, o comprimento máximo nunca é atingido, mesmo em situações de transporte do número máximo de embalagens, visto que o comprimento de nenhuma das embalagens movimentadas supera 1,4m.

6.1.2 Solução manual

De forma a avaliar a solução gerada pelo algoritmo proposto, este estudo de caso a comparou com a solução implementada no ambiente descrito. Como comentado anteriormente no texto, os procedimentos para a roteirização dos veículos de abastecimento muito se baseiam na experiência dos operadores ou responsáveis pela movimentação de materiais na empresa. Aparentemente, a experiência passada e analogia com outras

implementações, permite a estes profissionais determinar com relativa precisão, a quantidade de veículos necessários e as rotas de atendimentos dos pontos de uso da instalação.

Quadro 6.1: Dados e parâmetros do caso real

Dado / parâmetro	Valor
Características da rede de corredores¹	
Número de nós	36
Número de corredores	40
Características de produção e abastecimento²	
Número de pontos de uso	36
Número de peças	141
Intervalo mínimo entre abastecimentos	33,3 min
Intervalo máximo entre abastecimentos	494,5 min
Número de abastecimentos necessários durante o turno	460
Turno de trabalho	8 h
Tempos de trabalho do operador³	
Tempo de movimentação do operador no estoque	0,51 min
Tempo de movimentação do operador no PDU	0,51 min
Tempo de manuseio por embalagem no estoque	0,97 min
Tempo de manuseio por embalagem no PDU	0,97 min
Dados dos rebocadores⁴	
Capacidade de transporte	5 emb
Comprimento máximo do comboio	7 m
Velocidade média de deslocamento	6 km/h

Notas: 1 – Obtidas a partir do layout da instalação fornecido pela empresa.

2 – Obtidos no PFEP fornecido pela empresa responsável pelo projeto.

3 – Fornecidos pelo departamento de engenharia industrial da empresa.

4 – Fornecidos pelo fabricante do rebocador.

Estes profissionais adotam um procedimento prático, procurando dividir o problema geral em problemas menores e de solução mais imediata. A Figura 6.6 ilustra o procedimento o adotado, cujos passos são descritos a seguir.

1. Identificam-se no layout áreas ou “ilhas” que agrupem pontos de uso.
2. Propõem-se rotas capazes de atender aos pontos de uso de cada uma das ilhas, observando a restrição de acesso ao ponto pelo lado correto do corredor.

3. Iniciando pelo ponto de uso com o item mais frequente, alocam-se sequencialmente os pontos de uso da ilha à rota proposta, observando as restrições de capacidade, comprimento do comboio e tempo máximo de viagem.
4. À medida que capacidade das rotas se esgota uma nova rota, de itinerário igual à anterior, é proposta. A utilização da capacidade de transporte do rebocador é avaliada pela carga média imposta pelo item alocado. Este valor é calculado pela razão entre o intervalo entre abastecimentos do item e o tempo máximo de viagem da rota (tempo entre abastecimentos do item mais frequente). Assim, um item abastecido a cada 60 min alocado em uma rota com tempo máximo de viagem de 20 min, ocupa, em média, 33,3% da capacidade de transporte do rebocador.
5. Em um passo final, após a finalização das alocações, avalia-se a utilização das rotas. Rotas ociosas podem absorver pontos de outras ilhas ou serem combinadas entre si.

Figura 6.6: Procedimento manual para a determinação de rotas.

a) identificam-se ilhas com pontos de uso; b) define-se uma rota capaz de atender a ilha; c) alocam-se PDUs sequencialmente, obedecendo as restrições.

Conceitualmente, esse procedimento manual pode ser visto como um método de inserção sequencial, em que rotas são montadas sequencialmente, uma a uma, e como tal, trás as limitações comentadas por Potvin e Rousseau (1993): tende a alocar os últimos clientes ainda não roteirizados de maneira mais dispersa, gerando assim rotas de baixa qualidade. Nota-se que a avaliação da ocupação da capacidade de transporte do rebocador é

aproximada, desprezando a distribuição de itens entre as viagens das rotas e não fazendo qualquer menção aos estoques de peças nos pontos de uso. Essa avaliação determina uma ocupação média, repercutindo nos tempos de manuseio, estimados de modo aproximado, pois não se tem qualquer percepção de viagens de maior ou menor ocupação. A ocupação variável das viagens provocada pela composição entre intervalos de abastecimento de itens e o tempo máximo de viagem da rota é assim desprezada e fatores de aproveitamento da capacidade são utilizados. Como exemplo, admite-se que apenas 80% da capacidade de transporte seja efetivamente utilizável, o que torna a estimativa da ocupação conservadora e pode afetar o número estimado de rotas.

Certamente a opção em se adotar esta forma de cálculo da ocupação reside na facilidade de cálculo, visto que a consideração de viagens e estoques seria bastante onerosa para uma execução manual. Também onerosa é a avaliação de alternativas para a solução: a menos da eventual combinação entre rotas sugerida no último passo da descrição do procedimento, nenhuma estratégia de melhoria é considerada.

A solução manual determinada pela área de movimentação de materiais da empresa utiliza 12 rotas para o abastecimento da linha de produção; o Quadro 6.2 detalha as rotas utilizadas.

Quadro 6.2: Solução manual – detalhamento

rota	Ocup máx	Ocup méd	Util	Tviag* (min)	Tviag (min)	Tdeloc (min)	nPOU/ nItem	F_m (m)	D_t (km)
1.	3,0	1,3	0,15	47,6	7,1	2,5	1/3	-	2,55
2.	5,0	3,8	0,26	66,7	17,4	4,0	5/11	205,2	2,90
3.	5,0	2,9	0,41	33,3	13,7	2,5	2/10	18,1	3,64
4.	5,0	3,1	0,23	57,1	13,1	2,5	4/8	93,7	2,12
5.	5,0	3,1	0,33	38,1	12,6	2,5	3/7	48,4	3,19
6.	5,0	5,7	0,26	76,2	20,1	2,5	2/12	58,6	1,59
7.	5,0	5,9	0,44	42,9	19,0	2,5	3/9	12,0	2,83
8.	5,0	5,8	0,54	42,9	23,2	3,4	4/16	69,1	3,78
9.	5,0	6,7	0,37	76,2	28,3	1,9	3/18	56,8	1,18
10.	5,0	5,7	0,48	57,1	27,3	6,2	5/19	134,1	5,16
11.	5,0	6,6	0,16	142,9	22,7	2,2	2/14	8,40	0,75
12.	5,0	6,6	0,16	142,9	22,9	2,5	2/14	7,20	0,84

Notas 1 – Ocup méd em negrito indica rotas com viagens adicionais.

As colunas do referido quadro apresentam os seguintes valores:

- Ocup máx: a ocupação máxima da rota em qualquer uma de suas viagens; corresponde ao número máximo de embalagens transportadas em qualquer uma das viagens da rota, o qual não deve superar a capacidade do rebocador.
- Ocup méd: a média da ocupação das viagens da rota, ou o número médio de embalagens transportadas em suas viagens. Para esta solução manual, este valor é calculado como a soma das razões entre o tempo máximo de execução da rota e o tempo entre abastecimentos dos itens a ela associados. Os valores de ocupação média destacados em negrito revelam que o procedimento manual não respeita integralmente esta restrição de capacidade de transporte do rebocador imposta ao problema. Esta situação é contornada das seguintes maneiras:
 - Uma próxima viagem da rota é iniciada antes do intervalo especificado, ou seja, antes do intervalo entre abastecimentos de seu item mais frequente.
 - Viagens adicionais são realizadas esporadicamente, à medida que a falta de itens nos pontos de uso seja sinalizada. Neste caso, opta-se por se aguardar a demanda de itens com abastecimento menos frequente.
 - Uma rota menos carregada se responsabiliza pelo abastecimento dos itens menos frequentes das rotas sobrecarregadas.

Estas três alternativas oneram o sistema, gerando viagens adicionais e resultando em maior distância percorrida. Na pesquisa realizada não se conseguiu avaliar a número ou a frequência destas viagens adicionais.

- Util: a utilização da rota, definida como a razão entre o tempo de duração da mais longa viagem da rota e seu tempo admissível de execução, ou seja, a razão entre T_{viag} e T_{viag}^* .
- T_{viag}^* : o máximo tempo para a execução da rota, igual ao tempo entre abastecimentos de seu item mais frequente.
- T_{viag} : o tempo de execução da viagem mais longa da rota, resultado da soma dos tempos de deslocamento propriamente dito do rebocador pelo itinerário definido, tempos de manuseio de embalagens no estoque e nos pontos de uso e tempos de parada no estoque e nos pontos de uso, necessários para o operador descer e subir do veículo e iniciar suas atividades. A viagem mais longa é aquela que combina o maior número de paradas em pontos de uso e o abastecimento do maior número de itens.

- T_{desloc} : o tempo de deslocamento do rebocador no itinerário percorrido pela rota. Corresponde a razão entre a distância percorrida pela rota e a velocidade média de deslocamento do comboio.
- $nPOU/nItem$: número de pontos de uso e número de itens atendidos pela rota.
- F_m : o indicador de forma da rota, em metros, correspondendo a soma das distâncias entre os PDUs e o centroide da rota.
- D_t : a distância total percorrida pela rota durante o turno de trabalho, em km.

No Anexo C são apresentadas graficamente as rotas manuais utilizadas na instalação e correspondentes àquelas do Quadro 6.2. No texto que se segue, os valores relativos à solução manual são comparados com aqueles da solução obtida pelo algoritmo proposto.

6.1.3 Aplicação do algoritmo

Os dados do problema descrito foram alimentados na planilha com a implementação do algoritmo. Para o processamento da solução, utilizou-se um computador com processador Intel Core 2 Duo, velocidade de 2GHz e 3Gb de memória RAM, sistema operacional Microsoft Windows Vista Home Premium – SP2; a versão 2010 do software MS-Excel foi utilizada.

Os parâmetros internos da implementação, comentados no capítulo anterior, foram assim configurados:

- Tolerância de perda de distância total: 20%. Este parâmetro corresponde à tolerância aceitável para aumento da distância total percorrida quando do ganho no indicador de forma durante o processo de melhoria da solução.
- Seleção de rota mais ociosa para alocação de pontos de uso durante a inserção paralela. Este critério busca o equilíbrio de carga de trabalho entre as rotas da solução e alinha-se a um dos objetivos deste problema de roteirização.

No texto a seguir, esta solução é chamada de balanceada.

Na primeira etapa do processamento, foi determinada a matriz de caminhos mínimos entre os pontos de uso, mostrada parcialmente na Figura 6.7. Trata-se de uma matriz (38 x 38), referindo-se aos 36 pontos de uso do problema descrito mais 2 pontos representando o

supermercado; a matriz não é simétrica, como comentado anteriormente. O Anexo B apresenta a matriz de caminhos mínimos completa.

orig \ dest		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		0d	cR01	cF06	cF07	cU02	cB04	cB06	cB05	cF04	cF01
1	0d	-	222,2	211,8	196,6	169,0	210,6	215,8	222,6	128,2	153,4
2	cR01	30,6	-	242,4	227,2	199,6	241,2	246,4	253,2	158,8	184,0
3	cF06	41,0	10,4	-	237,6	210,0	251,6	256,8	263,6	169,2	194,4
4	cF07	56,2	25,6	15,2	-	225,2	266,8	272,0	278,8	184,4	209,6
5	cU02	83,8	53,2	42,8	27,6	-	132,8	138,0	144,8	80,0	105,2
6	cB04	163,0	132,4	122,0	106,8	182,4	-	5,2	12,0	141,6	166,8
7	cB06	157,8	127,2	116,8	101,6	177,2	115,6	-	6,8	136,4	161,6
8	cB05	151,0	120,4	110,0	94,8	170,4	108,8	114,0	-	129,6	154,8
9	cF04	124,6	94,0	83,6	68,4	40,8	173,6	178,8	185,6	-	25,2
10	cF01	99,4	68,8	58,4	43,2	15,6	148,4	153,6	160,4	95,6	-
11	0e	242,8	212,2	201,8	186,6	188,6	109,4	114,6	121,4	147,8	173,0
12	cD01	245,0	214,4	204,0	188,8	161,2	202,8	208,0	214,8	120,4	145,6
13	cM01	227,0	196,4	186,0	170,8	143,2	184,8	190,0	196,8	102,4	127,6
14	cU01	209,4	178,8	168,4	153,2	125,6	167,2	172,4	179,2	84,8	110,0
15	cF02	185,0	154,4	144,0	128,8	101,2	142,8	148,0	154,8	60,4	85,6
16	cF03	161,0	130,4	120,0	104,8	77,2	118,8	124,0	130,8	36,4	61,6

Figura 6.7: Matriz de caminhos mínimos entre os pontos de uso (parcial).

A evolução da solução foi acompanhada ao longo de seu processamento e o Quadro 6.3 mostra os valores dos indicadores das rotas geradas em cada uma das etapas do algoritmo.

Ao final da inserção sequencial, as rotas estão desbalanceadas: a numeração das rotas reflete a ordem de sua criação pelo algoritmo e se nota com clareza a redução da utilização de cada uma delas; a dispersão das utilizações das capacidades é elevada, como mostra o valor de *dif Util*. Isso se deve à estratégia gulosa do método, o qual considera prioritariamente pontos com itens de abastecimento mais frequente. A influência desse critério também pode ser notada nos valores mostrados na coluna do tempo máximo de viagem, em clara ordem crescente. Por outro lado, a ocupação se mantém elevada, mostrando que o algoritmo busca a combinação de viagens que assegura o máximo aproveitamento da capacidade disponível.

Ao final da inserção paralela, porém, a utilização entre as rotas é mais equilibrada: *dif Util* apresenta baixa dispersão dos valores, não se alterando significativamente. O critério de seleção de rotas para a alocação de novos pontos de uso auxilia na distribuição mais balanceada da carga de trabalho entre as rotas: a cada nova alocação, seleciona-se a rota mais ociosa.

Ainda no Quadro 6.3, observa-se clara redução dos tempos máximos de viagem: o método de inserção paralela seleciona pontos de uso na ordem de seus itens mais frequentes alocando-os às rotas mais ociosas. Assim, para as 12 rotas estimadas no processo sequencial, os 12 pontos de uso com os itens mais frequentes são inicialmente alocados, justificando os tempos máximos de viagem mais curtos; itens de outros pontos de uso são então distribuídos entre as rotas, optando pelas mais ociosas e respeitando a capacidade de transporte. Tempos de viagem mais curtos provocam o aumento a utilização das rotas, como observado no quadro. Também equivalem a viagens mais frequentes, refletindo de duas maneiras sobre a solução parcial: aumento da distância total percorrida D_t e redução de $méd\ Ocup$. O rearranjo de alocação dos pontos entre as rotas reduz o valor do indicador de forma F_m .

Quadro 6.3: Evolução da solução balanceada

rota	Inserção sequencial			Inserção paralela			Método melhoria		
	Ocup méd	Util	Tviag* (min)	Ocup méd	Util	Tviag* (min)	Ocup méd	Util	Tviag* (min)
1.	4,9	0,47	33,3	1,9	0,29	33,3	5,0	0,34	47,6
2.	5,0	0,42	38,1	4,5	0,33	38,1	4,8	0,39	38,1
3.	4,8	0,36	42,9	3,3	0,30	42,9	4,8	0,32	42,9
4.	4,6	0,39	42,9	4,3	0,34	42,9	3,4	0,26	42,9
5.	5,0	0,32	42,9	4,7	0,34	42,9	3,8	0,27	42,9
6.	4,5	0,33	47,6	4,0	0,29	47,6	4,8	0,28	57,1
7.	4,7	0,32	47,6	4,7	0,32	47,6	5,0	0,51	33,3
8.	4,1	0,22	57,1	4,7	0,34	47,6	4,4	0,31	47,6
9.	3,4	0,20	57,1	4,4	0,29	57,1	5,0	0,14	114,3
10.	4,3	0,12	95,2	3,7	0,25	57,1	4,9	0,20	76,2
11.	5,0	0,08	190,5	4,6	0,22	66,7	4,7	0,19	76,2
12.	2,0	0,02	320,0	4,3	0,22	76,2			
D_t (km)		33,2			36,2			32,9	
F_m (m)		921,4			790,8			536,3	
méd Ocup ¹		4,4			4,1			4,6	
méd Util ²		0,27			0,29			0,29	
dif Util ³		0,45			0,12			0,37	

Notas: 1 – méd Ocup: média das ocupações médias das rotas.

2 – méd Util: média das utilizações das rotas.

3 – dif Util: diferença entre as utilizações máxima e mínima.

Na terceira etapa é aplicado o método de melhoria, o qual procura reduzir o número de rotas, a distância total percorrida e melhorar o indicador de forma, nesta ordem de preferência. Durante sua execução, o processo de realocação ou intercâmbio de pontos de uso entre rotas não observa a utilização das mesmas para as pesquisa de pontos candidatos. Isto justifica o aumento da dispersão da utilização das rotas após o método de melhoria observado no Quadro 6.3. Por outro lado, a combinação entre os métodos paralelo e de melhoria obtêm a redução do número de rotas para 11, o que, por sua vez, aumenta sua ocupação média. A distância percorrida se reduz, assim como o valor do indicador de forma.

Figura 6.8: Evolução da solução balanceada – indicadores D_t e F_m .

Na Figura 6.8 mostra a evolução da solução balanceada ao longo dos ciclos de melhoria. No diagrama estão plotados os valores da distância total percorrida D_t e indicador de forma F_m , referindo-se respectivamente aos eixos verticais da esquerda e da direita da figura. A linha vertical tracejada mostra que a redução de 12 para 11 rotas ocorreu no ciclo 160. Os valores finais dos indicadores estão anotados a direita do diagrama, sobre as linhas plotadas. Observa-se que, tanto para D_t como F_m , valores inferiores àqueles da solução final foram encontrados durante o processo de melhoria, obtidos ainda na fase com 12 rotas. Porém, o objetivo dominante do algoritmo é a redução de rotas, mesmo que onerando a distância percorrida ou a qualidade das rotas.

Alternativamente, reconfigurou-se o parâmetro relativo à seleção da rota para alocação de pontos de uso durante o método de inserção paralelo, optando-se por aquela mais utilizada no momento da seleção. Como comentado anteriormente, este critério visa à máxima concentração de carga de trabalho em algumas rotas e correspondente redução em outras, com a perspectiva de combinação destas últimas, atribuindo-as a um mesmo rebocador. Esta solução é chamada de concentrada e o Quadro 6.4 mostra a evolução da solução com os valores dos indicadores das rotas geradas em cada uma das etapas algoritmo.

Quadro 6.4: Evolução da solução concentrada

rota	Inserção sequencial			Inserção paralela			Método melhoria		
	Ocup méd	Util	Tviag* (min)	Ocup méd	Util	Tviag* (min)	Ocup méd	Util	Tviag* (min)
1.	4,9	0,47	33,3	4,9	0,47	33,3	4,7	0,44	33,3
2.	5,0	0,42	38,1	4,7	0,42	38,1	5,0	0,40	38,1
3.	4,8	0,36	42,9	4,8	0,37	42,9	4,2	0,27	42,9
4.	4,6	0,39	42,9	4,7	0,37	42,9	4,7	0,35	42,9
5.	5,0	0,32	42,9	4,7	0,36	42,9	4,9	0,36	42,9
6.	4,5	0,33	47,6	4,7	0,36	47,6	3,0	0,17	66,7
7.	4,7	0,32	47,6	4,7	0,33	47,6	4,8	0,34	47,6
8.	4,1	0,22	57,1	4,0	0,30	47,6	4,7	0,33	47,6
9.	3,4	0,20	57,1	1,8	0,13	57,1	4,1	0,28	47,6
10.	4,3	0,12	95,2	4,3	0,29	57,1	5,0	0,30	57,1
11.	5,0	0,08	190,5	1,6	0,10	66,7			
12.	2,0	0,02	320,0						
D_t (km)		33,2			37,3			37,0	
F_m (m)		921,4			973,1			675,1	
méd Ocup ¹		4,4			4,1			4,6	
méd Util ²		0,27			0,32			0,33	
dif Util ³		0,45			0,37			0,27	

Notas: 1 – méd Ocup: média das ocupações médias das rotas.

2 – méd Util: média das utilizações das rotas.

3 – dif Util: diferença entre as utilizações máxima e mínima.

A reconfiguração do critério de seleção somente tem efeito ao final da etapa de inserção paralela; a inserção sequencial é feita de mesma maneira que aquela executada para a solução balanceada e se presta a estimativa do número inicial de rotas. Observa-se que a inserção paralela já obtém uma redução do número de rotas, passando para 11. Percebe-se a variação acentuada na utilização das rotas, denotada pelo valor do indicador *dif Util* e

determinada pelo critério de seleção; a utilização média cresce, em vista da redução do número de rotas e consequente aumento tanto do número de itens como do número de POUs por rota.

Quadro 6.5: Solução de balanceada – detalhamentos de resultados

rota	Ocup máx	Ocup méd	Util	Tviag [*] (min)	Tviag (min)	Tdeloc (min)	nPOU/ nItem	F_m (m)	D_t (km)
1.	5,0	5,0	0,34	47,6	16,1	3,9	4/15	54,4	3,91
2.	5,0	4,8	0,39	38,1	14,7	2,5	3/15	44,1	3,19
3.	5,0	4,8	0,32	42,9	13,8	1,6	4/19	37,2	1,81
4.	4,0	3,4	0,26	42,9	11,1	3,8	2/6	15,2	4,21
5.	4,0	3,8	0,27	42,9	11,6	1,9	4/12	40,4	2,10
6.	5,0	4,8	0,28	57,1	16,2	4,0	3/18	42,1	3,39
7.	5,0	5,0	0,51	33,3	16,9	4,6	6/14	176,4	6,69
8.	5,0	4,4	0,31	47,6	14,7	2,5	4/16	64,9	2,51
9.	5,0	5,0	0,14	114,3	16,2	4,0	2/7	18,9	1,67
10.	5,0	4,9	0,20	76,2	15,2	3,0	2/10	25,2	1,89
11.	5,0	4,7	0,19	76,2	14,7	2,5	2/7	17,5	1,57

A ocupação se mantém elevada, mostrando o aproveitamento das viagens das rotas, como na solução balanceada. Os tempos máximos de viagem também se reduziram devido à seleção prioritária de itens mais frequentes: aumenta-se a frequência de viagens e, consequentemente a distância total percorrida D_t .

Quadro 6.6: Solução concentrada – detalhamentos de resultados

rota	Ocup máx	Ocup méd	Util	Tviag [*] (min)	Tviag (min)	Tdeloc (min)	nPOU/ nItem	F_m (m)	D_t (km)
1.	5,0	4,7	0,44	33,3	14,6	2,4	3/16	18,7	3,50
2.	5,0	5,0	0,40	38,1	15,2	2,5	4/23	104,7	3,14
3.	5,0	4,2	0,27	42,9	11,8	4,5	4/8	40,8	4,99
4.	5,0	4,7	0,35	42,9	15,2	3,0	3/14	55,7	3,36
5.	5,0	4,9	0,36	42,9	15,6	3,4	5/16	86,6	3,78
6.	3,0	3,0	0,17	66,7	11,3	3,9	3/5	58,8	2,84
7.	5,0	4,8	0,34	47,6	16,0	3,8	4/15	76,1	3,83
8.	5,0	4,7	0,33	47,6	15,6	3,4	4/20	106,8	3,42
9.	5,0	4,1	0,28	47,6	13,5	3,8	2/7	22,0	3,79
10.	5,0	5,0	0,30	57,1	17,4	5,2	4/17	105,1	4,33

O método de melhoria ainda reduz o número de rotas para 10, o que é bastante representativo quando comparado com a solução manual e, mais uma vez, evidencia a efetividade do algoritmo proposto. A distância total percorrida se reduz em relação à etapa anterior, assim com o indicador de forma. A ocupação média se eleva, assim como a utilização das rotas, consequência do menor número de rotas.

O Quadro 6.5 e o Quadro 6.6 mostram respectivamente os resultados detalhados das soluções balanceada e concentrada. No Anexo D e no Anexo E são apresentadas de forma gráfica as rotas destas soluções.

6.1.4 Comparação entre as soluções

O Quadro 6.7 apresenta os indicadores para a solução manual e os resultados destes indicadores obtidos com o algoritmo configurado para solução balanceada e solução concentrada. No texto que se segue, as 3 soluções são referenciadas respectivamente com S_m , S_b e S_c .

O quadro mostra os seguintes indicadores ainda não definidos:

- Média de T_{viag}^* : a média dos tempos máximos de execução de cada uma das rotas da solução, em minutos.
- Tempo processamento da solução c/ matriz de caminhos: o tempo de processamento da solução no equipamento descrito anteriormente, em segundos. Neste caso, inclui o cálculo da matriz de caminhos mínimos.
- Tempo processamento da solução s/ matriz de caminhos: o tempo de processamento da solução no equipamento descrito anteriormente, em segundos. Neste caso, não inclui o cálculo da matriz de caminhos mínimos.

As soluções S_b e S_c resultam em um menor número de rotas, o que é o principal objetivo do problema. A distância total percorrida aumenta em relação à S_m , resultado de viagens mais frequentes, constatada pela redução da média de T_{viag}^* . Entretanto, é preciso lembrar que no valor da distância total percorrida em S_m não estão consideradas as viagens extras necessárias para o atendimento de pontos nas rotas com excesso de ocupação, como comentado no início desta análise. Em relação à S_m , S_b e S_c também possuem um menor valor de F_m , correspondendo assim a uma melhor qualidade de rotas, traduzida na forma de uma maior proximidade dos pontos de uso da rota, conforme a definição do indicador.

A comparação entre as médias das utilizações (*méd Util*) mostra uma elevação do indicador para *Sc*, certamente influenciada pela redução do número de rotas. Quanto à comparação entre as diferenças de utilização máxima e mínima (*dif Util*), *Sm* demonstra maior dispersão, ou seja, uma maior diferença de carga entre as rotas. Para *Sb* e *Sc*, os valores também mostram dispersão; *Sc* inclusive apresenta um valor inferior a *Sb*, o que parece conflitante quando se considera a motivação do nome destas soluções: balanceada ou concentrada.

Quadro 6.7: Resultados comparativos entre soluções

Resultado	Manual <i>Sm</i>	Balanceada <i>Sb</i>	Concentrada <i>Sc</i>
Número de rotas (-)	12	11	10
D_t (km)	30,5	32,9	37,0
F_m (m)	711,6	536,3	675,1
média Ocup (-)	4,8	4,6	4,6
méd Util (-)	0,32	0,29	0,33
dif Util (-)	0,39	0,37	0,27
média de Tviag* (min)	68,7	56,3	46,7
Tempo processamento da solução c/ matriz de caminhos (s)	-	107,0	92,0
Tempo processamento da solução s/ matriz de caminhos (s)	-	90,0	73,0

Em verdade, o método de melhoria utilizado não considera a utilização da rota em seu processamento e este indicador tende a se deteriorar em relação aos valores obtidos no final da etapa de inserção paralela. Como observado no Quadro 6.5 e no Quadro 6.6, não se pode identificar qualquer tendência nos valores de utilização das rotas. Apesar dos nomes adotados para as soluções, suas configurações finais nada mais tem de “balanceado” ou “concentrado” em relação à utilização das rotas.

Por outro lado, a opção pelo critério de seleção da rota mais carregada para *Sc* permitiu a redução do número de rotas. Entende-se assim, que o critério possa ser utilizado como uma forma adicional de geração de soluções alternativas a serem submetidas ao método de melhoria.

O Quadro 6.7 mostra ainda que a média da ocupação média das rotas é elevada, atingindo 4,6 embalagens tanto para *Sb* como para *Sc*, ambas próximas da capacidade de transporte

dos rebocadores que de 5 embalagens. Nos detalhamentos do Quadro 6.5 e do Quadro 6.6 se observa que poucas são as rotas em que a ocupação máxima é inferior à capacidade do rebocador, ocorrendo para as rotas 4 e 5 de *Sb* e rota 6 de *Sc*. Neste aspecto, o algoritmo demonstra consistência, procurando distribuir o abastecimento com o máximo de ocupação das viagens dos rebocadores.

A baixa utilização das rotas, com valores não superiores 51% (caso da rota 7 em *Sb*) e a alta ocupação dos rebocadores, com médias próximas a sua capacidade, sugere que esta restrição seja dominante frente às demais impostas ao problema. De fato, percebe-se que também a utilização das rotas está indiretamente vinculada à capacidade de transporte dos rebocadores, pois:

- A utilização corresponde à razão entre o tempo de viagem da rota (T_{viag}) e seu máximo tempo de execução (T_{viag}^*); o tempo de viagem é a soma entre os tempos de deslocamento e manuseio.

Figura 6.9: Solução balanceada – utilização das rotas

- O tempo de deslocamento (T_{desloc}) é determinado pela razão entre a distância percorrida na rota e a velocidade média do rebocador. A distância percorrida depende tão somente dos pontos de uso alocados: uma maior capacidade de transporte permite a alocação de um maior número de pontos e tende a aumentar a distância percorrida pela rota.

- O tempo de manuseio (T_{manu}) é diretamente proporcional tanto ao número de itens alocados a rota como ao número de pontos de uso atendidos por ela, ambos limitados pela capacidade de transporte do rebocador.

A partir dos valores de T_{viag}^* , T_{viag} e T_{desloc} apresentados no Quadro 6.5 e no Quadro 6.6 é possível inferir o valor de T_{manu} . A Figura 6.9 e a Figura 6.10 mostram a utilização percentual das rotas das soluções S_b e S_c ; os diagramas destacam as parcelas referentes ao tempo de deslocamento, tempo de manuseio e tempo ocioso. Constatase que os tempos de deslocamento representam parcela não superior a 14% do tempo máximo de execução da rota 7 em S_b e 10% do tempo máximo de execução da rota 3 em S_c . O tempo de manuseio corresponde a uma parcela mais ponderável, representando 37% do tempo máximo de execução, casos das rota 7 em S_b e rota 1 em S_c .

Figura 6.10: Solução concentrada – utilização das rotas

Por se tratarem de atividades realizadas pelos operadores dos rebocadores, os tempos de manuseio também estão sujeitos a incertezas e variabilidade inerentes aos processos manuais. Entretanto, observa-se nos diagramas que a ociosidade das rotas é relativamente alta, o que permite acomodar variações consideráveis tanto dos tempos de manuseio como dos tempos de deslocamento. Para o pior caso encontrado, referente à rota 7 em S_b , onde a utilização é de 51%, os tempos de manuseio e deslocamento poderiam praticamente dobrar sem ocorrer qualquer perturbação na organização da rota.

Por outro lado, T_{viag}^* é inversamente proporcional à taxa de produção: um aumento da taxa corresponde a uma redução do intervalo entre abastecimentos de embalagens, o qual determina T_{viag}^* . O mesmo pode ocorrer quando da variação do mix de produção: peças destinadas a determinados modelos ou produtos terão sua frequência de abastecimento alterada, o que pode afetar a organização das rotas. A Figura 6.11 mostra o efeito da variação da taxa de produção sobre o número de rotas e distância total percorrida nas soluções, cujas escalas estão respectivamente nos eixos verticais do lado esquerdo e lado direito do diagrama. A Figura 6.12 mostra o efeito desta variação sobre a média da ocupação média (eixo vertical esquerdo do diagrama) e média da utilização das rotas (eixo vertical direito do diagrama). A partir do cenário descrito no início do capítulo, um fator multiplicador foi aplicado à taxa de produção, criando as diferentes instâncias mostradas no eixo horizontal dos diagramas.

Figura 6.11: Variação da produção – efeito sobre número de rotas e distância.

Na Figura 6.11 se nota que já com um fator de 1,5, o número de rotas em S_c tem de ser aumentado. Para S_b , o número de rotas é estável até se dobrar a produção. A partir de um fator igual ou superior a 2,5, o tempo disponível para o manuseio dos itens alocados é insuficiente e o número de rotas tem de ser aumentado. O aumento da distância percorrida é esperado, visto que o abastecimento é cada vez mais frequente e mais viagens são necessárias.

Na Figura 6.12 se percebe que a média da ocupação média é decrescente com o aumento da taxa de produção, consequência de uma melhor distribuição e combinação de itens abastecidos entre as viagens do rebocador que passam a ser mais frequentes. Correspondentemente, a média da utilização aumenta gradativamente, resultado da redução do tempo máximo de execução das rotas. O efeito é mais acentuado até o fator 2,5 e pode ser percebido pela alteração das declividades das linhas do diagrama; isto se explica pela manutenção no número de rotas e esgotamento progressivo do tempo disponível para manuseio. A partir do fator 2,5, a utilização ainda cresce, porém de maneira menos acentuada, devido à inclusão de novas rotas, o que resulta na diminuição do número médio de itens e pontos de uso por rota e consequente redução do tempo de manuseio.

Figura 6.12: Variação da produção – efeito sobre ocupação e utilização.

6.2 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foi mostrada a aplicação da heurística proposta para a solução de um caso real de roteirização de veículos de abastecimento. O algoritmo implementado gerou duas soluções com menor número de rotas que a solução manual então implantada na empresa e que contava com 12 rotas. A distância total percorrida para a solução manual foi estimada em 30,5 km e o indicador de forma era 711,6 m.

- Em uma solução dita balanceada, o algoritmo gerou 11 rotas (redução de 8,3%). Houve aumento na distância total percorrida para 32,9 km (7,9%), porém o indicador de forma resultou melhor, 536,3 m (24,6%).
- Na solução dita concentrada, o algoritmo gerou 10 rotas (redução de 16,7%). Houve aumento na distância total percorrida para 37,0 km (21,3%), porém o indicador de forma se manteve melhor que o da solução manual com o valor de 675,1 m (5,1%).

As soluções foram obtidas em tempos de processamento bastante compatíveis com as atividades de planejamento ou operacionais de área responsável pela movimentação de materiais. Em um pior caso, incluindo a determinação da matriz de caminhos mínimos entre os pontos de uso do layout, o tempo de processamento foi de 107,0 s. O tempo de execução de uma solução manual para um problema como o descrito, combinando 141 itens distribuídos por 36 pontos de uso, não é preciso, porém pode levar horas, conforme relato de operadores da empresa onde está implantada a linha analisada. Esta diferença de ordem de grandeza no tempo de processamento da solução aliada à implementação do algoritmo em ambiente MS-Excel demonstram ser vantajosos, visto a possibilidade de execução de testes mais extensos quando do projeto de sistema de abastecimento ou mesmo de sua revisão diária, necessária pela mudança de mix ou taxa de produção.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho abordou o problema da roteirização de veículos para o abastecimento de peças a linhas de produção. Trata-se de um problema comum a muitas empresas de manufatura de bens de consumo, particularmente aquelas com linhas contínuas de montagem ou fabricação, sejam automatizadas ou dispostas em células, como no caso da indústria automobilística, autopeças e eletrodomésticos da linha branca. Nestes ambientes, uma ampla gama de peças, de diferentes tamanhos e formatos e com exigências de manuseio, devem ser transportadas periodicamente desde um estoque até pontos de uso localizados ao lado das linhas ou próximos a células de fabricação. O problema é particularmente mais complexo para as peças de maior tamanho que, para seu transporte, necessitam de plataformas com rodas, as quais são rebocadas por um veículo especial.

Os custos operacionais dessa atividade de abastecimento são ponderáveis. Conforme Sule (2009), as atividades de movimentação de materiais podem superar 30% dos custos operacionais totais de uma planta de manufatura e economias da ordem de 15% a 20% podem ser alcançadas mediante uma revisão desse processo.

Além dos custos envolvidos, o abastecimento de peças é parte essencial de um sistema de manufatura. Segundo Bozer e Yen (1996), um sistema de movimentação de materiais incapaz de disponibilizar peças no momento certo e nas quantidades corretas pode levar a sérias discontinuidades e perdas no processo de produção, ociosidade de equipamentos ou equipes, elevação dos estoques em processo ou a perda de prazos de entrega.

Apesar de sua relevância em custos e importância operacional, o problema tem sido pouco explorado na literatura sobre roteirização. Nesta pesquisa, apenas 3 trabalhos mais aprofundados sobre o tema foram identificados: Vaidyanathan *et al.* (1999), Choi e Lee (2002) e Golz *et al.* (2010). Confirmando a aparente lacuna em relação ao estudo do tema, Golz *et al.* (2010) afirmam que o problema do abastecimento de peças em linhas de produção e o correspondente problema de transporte interno em fábricas têm sido negligenciados, dando-se maior importância a estudos relativos ao balanceamento de linhas ou sequenciamento de produção, temas com um número expressivo de publicações.

Na prática, as empresas se utilizam de procedimentos manuais para a determinação de rotas, muitas vezes calcados na experiência de operadores e responsáveis pela movimentação de materiais. As soluções obtidas por esses procedimentos são aproximadas

e, por vezes, superestimam o número necessário de rotas, além de apresentarem rotas desbalanceadas quanto à carga de trabalho dos rebocadores.

Estes aspectos motivaram este trabalho, que teve como objetivo propor uma heurística para a solução do problema. Segundo Cunha (2000), os problemas de roteirização de veículos pertencem à categoria NP-difícil (do inglês “*NP-hard*”), o que significa que possuem ordem de complexidade exponencial e exigem grande esforço computacional para a sua resolução. Ainda segundo o autor, essa complexidade matemática justifica o emprego de uma heurística para a roteirização, explorando de forma inteligente a estrutura particular do problema para a obtenção de uma solução.

A heurística proposta se baseia em métodos de inserção sequencial e paralela para a obtenção de uma solução de boa qualidade, seguida de método de melhoria com busca em vizinhança. Apesar do procedimento relativamente convencional empregado, entende-se que a heurística possui algumas características que a diferenciam daquelas utilizadas nos trabalhos publicados a respeito do tema.

Dentre essas características, citam-se inicialmente a consideração de viagens periódicas para os comboios, executadas segundo a frequência entre abastecimentos de seu item mais frequente, e a priorização de alocação de todos os itens de um ponto de uso a uma mesma rota. Outro aspecto se refere à ocupação dos comboios de transporte que pode ser limitada tanto pela capacidade de transporte dos rebocadores como por um comprimento máximo. Para a avaliação da ocupação, a heurística analisa a melhor distribuição dos itens entre suas viagens periódicas, identificando a combinação que resulte na menor ocupação máxima. Também foi introduzido um indicador de forma das soluções, baseado na proposta de Kim *et al.* (2006). Assim, a heurística busca a otimização do número de rotas e distância total percorrida na solução, porém submetida aos aspectos qualitativos da mesma.

De forma complementar, o algoritmo incorpora a determinação da matriz de caminhos mínimos entre os pontos de uso considerando a minimização do número de curvas para o lado esquerdo e também o correto acesso aos pontos, o qual deve ser feito sempre pelo lado direito do corredor; o acesso ao ponto assim realizado é uma restrição imposta ao problema, não presente nos trabalhos citados acima.

Utilizando a linguagem de programação VBA, a heurística foi implementada em planilha MS-Excel e aplicada a um problema real. Quando comparados com a solução implantada,

os resultados obtidos se demonstraram bastante satisfatórios, compreendendo tanto a redução do número de rotas (16,7%) e como a melhoria da qualidade da roteirização (5,1%), embora com um aceitável aumento da distância percorrida total (21,3%).

O tempo processamento do algoritmo, inferior a 2 min, se mostrou bastante compatível com as atividades de planejamento e operacionais de áreas responsáveis pela movimentação de materiais. Entende-se que este fato, aliado à implementação do algoritmo em software de uso corrente e interface familiar, permite torná-lo ferramenta habitual dos planejadores, possibilitando a execução de testes mais extensos quando do projeto do sistema de abastecimento ou mesmo de sua revisão diária, necessária pela mudança de mix ou taxa de produção.

De fato, durante a pesquisa, identificou-se a taxa de produção como o fator mais relevante na necessidade de readequação das rotas de abastecimento, alterando o intervalo entre viagens das rotas e reduzindo o tempo disponível para o deslocamento e manuseio dos itens alocados. Por outro lado, taxas de produção ainda estão sujeitas a perturbações relacionadas ao ritmo de fabricação ou montagem, eventual falta de componentes, mudanças na diversidade de produtos (*mix*), falhas e paradas de máquinas e sistemas automáticos, gerando descontinuidades e flutuações no ritmo de abastecimento que justificam a revisão de rotas.

Outro aspecto melhor compreendido através da pesquisa refere-se à utilização das rotas, definida pela razão entre o tempo de viagem e intervalo entre viagens, e os fatores que nela influenciam. Pôde-se perceber que os tempos de deslocamento são pouco relevantes na utilização rota quando comparados com os intervalos entre viagens. Tempos de manuseio são mais relevantes, porém, assim como os tempos de deslocamento, estão associados ao número de itens alocados as rotas, que por sua vez depende da capacidade dos rebocadores.

Nestes dois aspectos residem as limitações da heurística proposta e oportunidades para estudos complementares futuros:

- Sua abordagem é essencialmente determinística, desprezando as flutuações comentadas sobre as taxas de produção. Também os tempos de manuseio estão sujeitos a flutuações, por se tratarem de atividades realizadas pelos operadores dos rebocadores, sujeitas a incertezas e variabilidade inerentes aos processos manuais. Em menor grau, tempos de deslocamento também podem sofrer variações,

motivadas por reduções de velocidade nas manobras em curva, acesso aos pontos de uso ou cruzamentos com outros comboios.

A consideração dos aspectos estocásticos destes fatores poderia ser contemplada com a integração da heurística proposta com ferramentas de simulação de eventos discretos. Numa abordagem simplificada, a frota dimensionada pela heurística poderia ser submetida a um modelo de simulação e testada em condições de variabilidade de taxas de produção, tempos de manuseio e velocidades.

- A heurística não contempla a combinação de rotas com baixa utilização. Rotas cuja soma entre seus tempos de execução não supere o intervalo entre abastecimento do item mais frequente de qualquer uma delas, poderiam ser atribuídas a um mesmo rebocador.

Na verdade, esta proposição corresponde a uma alteração do objetivo do problema, que passa ser a redução do número de veículos. O problema de como atribuir rotas a um mesmo veículo é similar ao problema da mochila (do inglês, *bin-packing problem*).

Por outro lado, face ao estágio de desenvolvimento alcançado e o aprendizado obtido durante a pesquisa, entende-se que a heurística proposta possa ser aprimorada de forma a ampliar a gama de situações encontradas em ambientes reais. Observando uma relação entre esforço de implantação e benefício, os seguintes aprimoramentos podem inicialmente apontados para a revisão da heurística:

- A consideração de capacidade variável dos rebocadores, configurando uma frota heterogênea. A situação pode ocorrer em ambientes com rebocadores com características diferentes, seja por terem sido adquiridos de fornecedores diferentes ou mesmo em datas diferentes.
- Um maior detalhamento dos tempos de manuseio, especificando-os por tipo de embalagem ou mesmo em função dos recursos necessários para seu posicionamento no ponto de uso ou para o seu manuseio no supermercado. Esta situação se evidencia em casos onde é necessária a utilização de um dispositivo, seja uma talha, ponte rolante ou equivalente, para o correto posicionamento ou manuseio da embalagem. De mesma forma, embalagens menores podem necessitar de tempos menores para o seu manuseio.

- A consideração de embalagens de tamanho modular, passíveis de serem transportadas sobre as plataformas com rodas em número superior a 1 dependendo da combinação com outras embalagens na viagem.

A aplicação da heurística proposta em outros casos reais certamente é bem-vinda e trará oportunidades de aprimoramento da mesma.

8 REFERÊNCIAS

- BALLOU, R.H. (2006) *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos / Logística Empresarial*, 5ª edição, Porto Alegre, Editora Bookman.
- BAUDIN, M. (2004) *Lean Logistics: The Nuts and Bolts of Delivering Materials and Goods*, New York, Productivity Press.
- BELFIORE, P.P. (2006) Scatter Search para problemas de roteirização de veículos com frota heterogênea, janelas de tempo e entregas fracionadas, *Tese de Doutorado em Engenharia de Produção* – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, SP.
- BENAVENT, E.; SOLER, D. (1999) The Directed Rural Postman Problem with Turn Penalties, *Transportation Science*, v. 33 (4), pp. 408-418.
- BODIN, L.D.; GOLDEN, B.; BALL, M. (1983) Routing Scheduling of vehicles and crews: the state of art. *Computers & Operations Research*, n. 9, pp. 63-212.
- BODIN, L.D.; KURSH, S. J. (1979) A detailed description of a computer system for the routing and scheduling of street sweepers, *Computer & Operations Research*, v. 6; pp. 181-198.
- BOZER, Y.A.; YEN, C. (1996) Intelligent dispatching rules for trip-based material handling systems, *Journal of Manufacturing Systems*, v. 15(4), pp. 226-239.
- BRADLEY, G.; HAX, A.; MAGNANTI, T.L. (1977) *Applied Mathematical Programming*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- CALDWELL, T. (1961) On Finding Minimal Routes in a Network with Turn Penalties, *Communications of ACM*, pp. 107-108.
- CHOI, W.; LEE, Y. (2002) A dynamic part-feeding system for an automotive assembly line, *Computers and Industrial Engineering*, v. 43, pp. 123-134.
- CHRISTOFIDES, N. (1985) Vehicle Routing. In: Lawler, E. L.; Lenstra, J. K.; Kan, A. H. G. R.; Shmoys, D. B. (eds). *The Traveling Salesman Problem: A Guided Tour of Combinatorial Optimization*, John Wiley & Sons, pp. 431-448.
- CHRISTOFIDES, N.; MINGOZZI, A.; TOTH, P. (1979) The vehicle routing problem. In: Christofides, N.; Mingozzi, A.; Toth, P.; Sandi, C. (eds), *Combinatorial Optimization*, Chichester, Wiley, pp. 315-338.
- CLARKE, G.; WRIGHT, J. W. (1964) Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points, *Operations Research*, v. 12, pp. 568-581.
- CLOSSEY, J.; LAPORTE, G.; SORIANO, P. ((2001) Solving arc routing problems with turn penalties, *Journal of the Operational Research Society*, v. 52, pp. 433-439.
- CO, C.G.; TANCHOCO, J.M.A. (1991) A review of research on AGVS vehicle management. *Engineering Costs and Production Economics*, v. 21(1), pp. 35-42.

- CORRÊA, H.; GIANESI, I.; CAON, M. (2001) *Planejamento, Programação e Controle da Produção / MRP II/ERP: conceitos, uso e implantação*, 4ª edição, São Paulo, Editora Atlas.
- CORDEAU, J.-F.; LAPORTE, G.; SAVELSBERGH, M.W.P.; VIGO, D. (2007) Vehicle Routing. In: Barnhart, C. and Laporte, G. (eds), *Handbooks in Operations Research and Management Science*, v. 14, ch. 6, Elsevier.
- CORMEN, T.; LEISERSON, C.; RIVEST, R. L.; STEIN, C. (2001) *Introduction to Algorithms*, 2nd Edition, Cambridge, MIT Press.
- CUNHA, C.B. (2000) Aspectos práticos da aplicação de modelos de roteirização de veículos a problemas reais, *Revista Transportes da ANPET – Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes*, v. 8, n.2, pp.51-74.
- DANTZIG, G.B.; RAMSER, R.H. (1959) The Truck Dispatching Problem, *Management Science*, v. 6, pp. 80-91.
- DIJKSTRA, E. (1959) A note on two problems in connection with graphs, *Numerical Mathematics*, v. 1, pp. 395–412.
- EISELT, H.; GENDREAU, M.; LAPORTE, G. (1995) Arc Routing Problems, Part II: The Rural Postman Problem, *Operations Research*, v. 43, pp. 399-414.
- FEO, T.; RESENDE, M.G.C. (1995), Greedy randomized adaptive search procedures, *Journal of Global Optimization*, v. 6, pp. 109-133.
- GENDREAU, M.; LAPORTE, G.; POTVIN, J.-Y. (2002) Metaheuristics for the capacitated VRP. In: Toth, P. and Vigo, D. (eds), *The Vehicle Routing Problem. SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications*, Philadelphia, SIAM, pp. 129-154.
- GILLET, B.E., MILLER, L.R. (1974). A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem. *Operations Research*, v. 21, pp. 340–349.
- GOLZ, J.; GUJJULA, R.; GÜNTHER, H.-O. (2010) Part feeding at high-variant mixed-model assembly lines. *Proceedings of the 17th International Annual EurOMA Conference*, Porto, Portugal.
- HARRIS, R.; HARRIS, C.; WILSON, E. (2003) *Making Materials Flow: A Lean Material-Handling Guide for Operations, Production-Control, and Engineering Professionals*, Cambridge, The Lean Enterprise Institute.
- KIM, B.I.; KIM, S.; SAHOO, S. (2006) Waste collection vehicle routing problem with time windows, *Computers & Operations Research*, 33, pp. 3624–3642.
- KIRBY, R.F.; POTTS, R.B. (1969) The Minimum Route Problem for Networks with Turn Penalties and Prohibitions, *Transportation Research*, v. 3, pp. 397-408.
- LAPORTE, G.; SEMET, F. (2002) Classical heuristics for the capacitated VRP. In: Toth, P. and Vigo, D. (eds) *The Vehicle Routing Problem. SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications*, Philadelphia, SIAM, pp. 109-128.

- LIN, S. (1965) Computer solutions of the traveling salesman problem, *Bell System Technical Journal*, v. 44, pp. 2245-2269.
- LU, Q.; DESSOUKY, M.M. (2006) A new insertion-based construction heuristic for solving the pickup and delivery problem with hard time windows, *European Journal of Operational Research*, v. 175, pp. 672-687.
- MCBRIDE, R. (1982) Controlling left and U-turns in the routing of refuse collection vehicles, *Computer Operation Research*, v. 9, pp. 145-152.
- MOLE, R.H.; JAMESON, S.R. (1976) A sequential route-building algorithm employing a generalized savings criterion, *Operational Research Quarterly*, v. 27, pp. 503-511.
- POOT, A.; KANT, G.; WAGELMANS, A.P.M. (2002) A savings based method for real-life vehicle routing problems, *Journal of the Operational Research Society*, v. 53, pp. 57-68.
- POTVIN, J-Y.; ROUSSEAU, J-M. (1993) A parallel route building algorithms for the vehicle routing and scheduling problem with time windows, *European Journal of Operational Research*, v. 66, pp. 331-340.
- QIU, L.; HSU, W.-J.; HUANG, S.-Y.; WANG, H. (2002) Scheduling and routing algorithms for AGVs: a survey, *International Journal of Production Research*, v. 40, pp. 745-760.
- RONEN, D. (1988) Perspectives on practical aspects of truck routing and scheduling, *European Journal of Operational Research*, v. 35(2), pp. 137-145.
- SIMCHI-LEVI, D.; CHEN, X.; BRAMEL, J. (1997) *Logic of Logistics: Theory, Algorithms and Applications for Logistics Management*, 2nd Edition, Springer-Verlag.
- SOLOMON, M.M. (1987) Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints, *Operations Research*, v. 35, pp. 254-265
- SULE, D.R. (2009) *Manufacturing facilities – location, planning, and design*, 3rd edition, Boca Raton, CRC Press.
- TANG, H.; MILLER-HOOKS, E. (2006) Interactive heuristic for practical vehicle routing problem with solution shape constraints, *Transportation Research Record*, v. 1964, pp. 9-18.
- TOMPKINS, J.A.; WHITE, J.A.; BOZER, Y.A.; TANCHOCO, J.M.A. (2003) *Facilities Planning*, 3rd edition, John Wiley & Sons, NJ, USA.
- VAIDYANATHAN, B.S.; MATSON, J.O.; MILLER, D. AND MATSON, J.E. (1999) A capacitated vehicle routing problem for just-in-time delivery. *IIE Transactions*, v. 31, pp. 1083-1092.
- WU, L.; CUNHA, C.B. (2008) O problema da roteirização periódica de veículos. *Transportes*, Rio de Janeiro, v. 16, n. 1, pp. 5-16.

ANEXO A - DADOS DO ESTUDO DE CASO

Tabela de nós, arcos e localização de pontos de uso

Neste anexo são apresentadas as tabelas completas de configuração da rede de corredores do estudo de caso.

coordenadas dos nós dos corredores			arcos dos corredores			POU - localização nos corredores				
nó	coord_x	coord_y	ref	origem	destino	ref	POU	origem	destino	dist origem
1	0	26	1	1	2	1	Od	1	19	14,6
2	22,4	26	2	1	19	2	cR01	2	1	6,4
3	22,4	16,4	3	2	3	3	cF06	3	2	5,6
4	36,4	16,4	4	3	6	4	cF07	6	3	19,6
5	40,8	16,4	5	6	17	5	cU02	17	6	2,8
6	51,6	16,4	6	6	8	6	cB04	17	18	22,8
7	54	16,4	7	8	9	7	cB06	17	18	28
8	59,6	16,4	8	8	13	8	cB05	17	18	34,8
9	59,6	0	9	9	12	9	cF04	18	17	11,6
10	70,4	0	10	12	13	10	cF01	18	17	36,8
11	74,8	0	11	13	14	11	Oe	19	1	1
12	80,8	0	12	14	16	12	cD01	19	20	6,8
13	80,8	16,4	13	14	18	13	cM01	19	20	24,8
14	101,2	16,4	14	16	27	14	cU01	19	20	42,4
15	102	14,8	15	17	18	15	cF02	19	20	66,8
16	112,8	16,4	16	18	21	16	cF03	20	21	6,4
17	51,6	27,2	17	19	20	17	cB03	21	18	4
18	101,2	27,2	18	19	22	18	cB10	22	34	6
19	0	41,6	19	20	21	19	cB09	22	34	14,8
20	84,4	41,6	20	20	25	20	cP01	22	34	29,2
21	101,2	41,6	21	21	26	21	cP03	23	22	12,4
22	0	62	22	22	23	22	cP02	23	22	19,6
23	28,4	62	23	22	34	23	cD05	24	29	4,4
24	40,4	62	24	23	24	24	cD03	24	29	12,8
25	84,4	62	25	23	28	25	cD02	25	24	26,8
26	101,2	62	26	24	25	26	cF05	26	21	6,8
27	112,8	62	27	24	29	27	cE03	26	21	9,6
28	28,4	80,8	28	25	26	28	cB11	28	23	3,2
29	40,4	80,8	29	25	30	29	cB12	28	23	12,8
30	84,4	80,8	30	26	27	30	cE02	28	35	7,2
31	112,8	80,8	31	27	31	31	cE01	29	28	4,8
32	133,2	80,8	32	28	29	32	cD04	30	25	6,4
33	137,6	85,2	33	28	35	33	cD06	30	25	13,6
34	0	106	34	29	30	34	cB02	30	29	28,4
35	28,4	106	35	30	31	35	cB01	31	30	16,8
36	137,6	106	36	31	32	36	cB07	34	35	10,8
			37	32	33	37	cB08	35	28	9,2
			38	33	36	38	cH01	35	36	53,6
			39	34	35					
			40	35	36					

Figura A-1: Estudo de caso – nós, arcos e pontos de uso

PFEP – *Plan-for-every-part*

Neste anexo é apresentada tabela completa do PFEP do estudo de caso. As colunas indicam:

- PDU: ponto de uso.
- nPDU: número do ponto de uso utilizado no diagrama da Figura 6.5.
- Produto: o produto ao qual pertence a peça.
- TP (un/h): *throughput* ou taxa horária de produção.
- Código: código da peça.
- Descrição: nome ou descrição da peça.
- Qtd/Prod: número de peças utilizadas no produto.
- Qtd/Emb: a capacidade da embalagem em unidades.
- Intervalo reabastec: o intervalo entre abastecimentos da embalagem, em minutos.

PDU	nPDU	Produto	TP (un/h)	Código	Descrição da Peça	Qtd/Prod (un/prod)	Qtd / Embal (un/embal)	Intervalo reabastec (min)
cB01	26	SV	2,5	cSUVL	ESTRUTURA INT PORTA TRAS LE	1	7	168,0
cB01	26	SV	2,5	cSUVR	ESTRUTURA INT PORTA TRAS LD	1	7	168,0
cB02	33	SV	2,5	cSUV	PAINEL TRAS (SV)	1	8	192,0
cB03	30	CD	12,6	A4116	PAINEL FRONTAL CS EXT	1	40	190,5
cB04	13	CD	12,6	A44793	REFORCO CJ PARALAMA, LE	1	16	76,2
cB04	13	CD	12,6	A44794	REFORCO CJ PARALAMA, LD	1	16	76,2
cB04	13	CD	12,6	B739381	PAINEL INTERNO CONJ, LE	1	16	76,2
cB04	13	CS	1,4	B739381	PAINEL EXTERNO CJ, LE	1	16	381,0
cB05	6	CS	1,4	B727123	PAINEL LATERAL TRAS EXT LE	1	10	47,6
cB05	6	CD	12,6	A44786	PAINEL INTERNO TRAS INF, LE	1	12	57,1
cB05	6	CD	12,6	B727121	PAINEL EXTERNO TRAS, LE	1	2	85,7
cB06	4	CD	12,6	A44766	PAINEL TORRE CENTRAL, LE	1	9	42,9
cB06	4	CD	12,6	A44767	PAINEL TORRE CENTRAL, LD	1	9	42,9
cB07	19	CS	1,4	B742655	REFORCO PLATAF #4 CR	1	20	95,2
cB07	19	CD	12,6	B742654	SUPORTE PBOX EXT S/PAINEL CS ST	1	20	95,2
cB07	19	CD	12,6	B742653	PAINEL CJ PBOX W/H RR	1	30	142,9
cB07	19	CD	12,6	B728222	PAINEL PBOX LATERAL W/H INT, LE	1	30	142,9
cB07	19	CD	12,6	A44294	REFORCO PBOX PLTF CR	2	8	171,4
cB07	19	CS	1,4	B742654	REFORCO PBOX PLTF #4 CR	1	20	428,6
cB07	19	CS	1,4	B742653	SUPORTE PBOX EXT S/PAINEL CS ST	1	20	428,6
cB08	20	CS	1,4	B742655	REFORCO PBOX PLTF #4 CR	1	20	95,2
cB08	20	CD	12,6	B742654	SUPORTE PBOX EXT S/PAINEL CS ST	1	20	95,2
cB08	20	CD	12,6	B742653	PAINEL PBOX W/H RR	1	30	142,9
cB08	20	CD	12,6	B728221	PAINEL PBOX LATERAL W/H INT, LD	1	30	142,9
cB08	20	CD	12,6	A44296	REFORCO PBOX PLTF CR	2	8	171,4
cB08	20	CS	1,4	B742654	REFORCO PBOX PLTF #4 CR	1	20	428,6
cB08	20	CS	1,4	B742653	SUPORTE PBOX EXT S/PAINEL CS ST	1	20	428,6
cB09	3	CD	12,6	B714709	PAINEL PBOX EXT SI LE	1	9	42,9
cB09	3	CD	12,6	B747792	PAINEL PBOX CS CORNER, LE	1	12	57,1
cB09	3	CD	12,6	A4478	PAINEL PBOX CS CORNER EXT, LE	1	80	381,0
cB09	3	CD	12,6	B714804	REFORCO PBOX S/PAINEL FRT LE	1	180	389,6

Figura A-2: Estudo de caso – PFEP (parte 1)

PDU	nPDU	Produto	TP (un/h)	Código	Descrição da Peça	Qtd/Prod (un/prod)	Qtd / Embal (un/embal)	Intervalo reabastec (min)
cB10	27	CS	1,4	B714713	PAINEL PBOX EXT SI LE	1	4	171,4
cB10	27	CS	1,4	B749595	PAINEL PBOX CS CORNER, LE	1	15	494,5
cB11	5	CD	12,6	B714708	PAINEL PBOX EXT SI LD	1	9	42,9
cB11	5	CD	12,6	B747791	PAINEL PBOX CS CORNER, LD	1	12	57,1
cB11	5	CD	12,6	A4479	PAINEL PBOX CS CORNER EXT, LD	1	80	381,0
cB11	5	CD	12,6	B714803	REFORCO PBOX S/PAINEL FRT LD	1	180	389,6
cB12	28	CS	1,4	B714712	PAINEL PBOX EXT SI LD	1	4	171,4
cB12	28	CS	1,4	B749597	PAINEL , PBOX CS CORNER, LD	1	15	494,5
cD01	17	CD	12,6	B751615	PAINEL CORTA FOGO	1	20	95,2
cD01	17	CD	12,6	A44535	PAINEL SUPERIOR DA PLATAFORMA	1	24	114,3
cD01	17	CD	12,6	A44446	REFORCO PEDAL MTG, LE	1	60	285,7
cD01	17	CD	12,6	A44428	REFORCO PEDAL MTG, LD	1	60	285,7
cD01	17	SV	2,5	B751615	PAINEL CORTA FOGO, REF LAT LE	1	20	389,6
cD01	17	SV	2,5	A44535	PAINEL CORTA FOGO, REF LAT LD	1	20	436,4
cD01	17	CS	1,4	B751615	PAINEL , PBOX CS CORNER, LE	1	24	443,1
cD02	23	CD	12,6	B722453	PAINEL FRT S/D EXT LE	1	24	114,3
cD02	23	CD	12,6	B722452	PAINEL FRT S/D EXT LD	1	24	114,3
cD02	23	CD	12,6	B722445	PAINEL CS S/D EXT LE	1	24	114,3
cD02	23	CD	12,6	B722444	PAINEL CS S/D EXT LD	1	24	114,3
cD02	23	SV	2,5	B722453	PAINEL FRT S/D EXT LE	1	24	443,1
cD02	23	SV	2,5	B722452	PAINEL FRT S/D EXT LD	1	24	443,1
cD03	31	CD	12,6	B722451	PAINEL FRT S/D INT LE	1	40	190,5
cD03	31	CD	12,6	A100790	CANAL FRT S/D WDO FRTLE	1	40	190,5
cD03	31	CD	12,6	A100788	CANAL FRT S/D WDO RR, LE	1	40	190,5
cD03	31	CD	12,6	B752085	BAR FRT S/D INTLE	1	50	238,1
cD03	31	CD	12,6	A136985	PAINEL ANTIRUIDO FRT S/D, LE	1	200	432,9
cD03	31	CD	12,6	A114521	PAINEL FRT S/D INT LE	1	40	436,4
cD03	31	SV	2,5	B722451	CANAL FRT S/D WDO FRTLE	1	40	436,4
cD03	31	SV	2,5	A100790	CANAL FRT S/D WDO RR, LE	1	40	436,4
cD03	31	SV	2,5	A100788	REFORCO INTERNO FRT S/D LE	1	150	446,4
cD04	29	CD	12,6	B722450	PAINEL CS S/D INT LD	1	40	190,5
cD04	29	CD	12,6	A100789	CANAL FRT S/D WDO FRTLE	1	40	190,5
cD04	29	CD	12,6	A100787	CANAL FRT S/D WDO RR, LD	1	40	190,5
cD04	29	CD	12,6	B752084	BAR FRT S/D INTLD	1	50	238,1
cD04	29	CD	12,6	A136989	CANAL CS S/D WDO UPR RR	1	200	432,9
cD04	29	CD	12,6	A114520	PAINEL CS S/D INT LD	1	40	436,4
cD04	29	SV	2,5	B722450	CANAL FRT S/D WDO FRTLE	1	40	436,4
cD04	29	SV	2,5	A100789	CANAL FRT S/D WDO RR, LD	1	40	436,4
cD04	29	SV	2,5	A100787	REFORCO WAIST FRT S/D LE	1	150	446,4
cD05	25	CD	12,6	B736199	REFORCO DOBRAD CJ LE	1	30	142,9
cD05	25	CD	12,6	B722443	PAINEL CS S/D INT LE	1	40	190,5
cD05	25	CD	12,6	A105630	LATERAL IMPACT CS S/D	1	50	238,1
cD05	25	CD	12,6	A100797	CANAL CS S/D WDO SUP FRT	1	60	285,7
cD05	25	CD	12,6	A44390	REFORCO WAIST FRT S/D LE	1	200	432,9
cD06	24	CD	12,6	B736200	REFORCO DOBRAD CJ LD	1	30	142,9
cD06	24	CD	12,6	B722442	PAINEL CS S/D INT LD	1	40	190,5
cD06	24	CD	12,6	A105629	LATERAL IMPACT CS S/D	1	50	238,1
cD06	24	CD	12,6	A100796	CANAL CS S/D WDO SUP FRT	1	60	285,7
cD06	24	CD	12,6	A44389	REFORCO WAIST FRT S/D LD	1	200	432,9
cE01	16	CD	12,6	B711105	PAINEL PBOX E/ GATE	1	16	76,2
cE01	16	CS	1,4	B711331	PAINEL PBOX E/GATE MK	1	16	381,0
cE02	12	CD	12,6	A44338	PANEL PBOX ENDGATE INT	1	16	76,2
cE02	12	CD	12,6	A151244	TRAVESSA INTERNA LE	1	84	363,6
cE02	12	CD	12,6	A44351	REFORCO PBOX ENDGATE	1	175	416,7
cE03	35	CS	1,4	A44284	PAINEL PBOX ENDGATE INT	1	16	381,0

Figura A-3: Estudo de caso – PFEP (parte 2 – continuação)

PDU	nPDU	Produto	TP (un/h)	Código	Descrição da Peça	Qtd/Prod (un/prod)	Qtd / Embal (un/embal)	Intervalo reabastec (min)
cF01	9	CD	12,6	B73912	PAINEL CONJ CS INT INF	1	12	57,1
cF01	9	SV	2,5	B729216	ARCO DE REFORCO DO PAINEL TRAS	1	26	123,8
cF01	9	CD	12,6	B73975	TRAVESSA DIANT	1	12	288,0
cF01	9	CS	1,4	B73972	PAINEL CONJ CS INT INF	1	12	467,5
cF02	2	CD	12,6	B73911	TRAVESSA INFERIOR	1	8	38,1
cF02	2	SV	2,5	B729211	BOW TETO CENTER	1	26	123,8
cF02	2	CD	12,6	B73910	TRAVESSA SUP	1	12	288,0
cF03	8	CD	12,6	A103960	PAINEL TETO	1	10	47,6
cF03	8	SV	2,5	B729207	PAINEL TETO SV	1	5	120,0
cF03	8	CS	1,4	B746639	PAINEL TETO	1	5	214,3
cF04	36	CS	1,4	B739368	BACK PAINEL RC	1	11	428,6
cF05	18	CD	12,6	B710999	P-LAMA INF REFORCO FRT LE	1	20	95,2
cF05	18	CD	12,6	B711000	P-LAMA INF REFORCO FRT LD	1	20	95,2
cF05	18	SV	2,5	B710999	P-LAMA INF REFORCO FRT LE	1	20	389,6
cF05	18	SV	2,5	B711000	P-LAMA INF REFORCO FRT LD	1	20	389,6
cF05	18	CS	1,4	B710999	P-LAMA INF REFORCO FRT LE	1	20	436,4
cF05	18	CS	1,4	B711000	P-LAMA INF REFORCO FRT LD	1	20	436,4
cF06	32	CD	12,6	B72678	PAINEL F/ FLR	1	40	190,5
cF06	32	CS	1,4	B72677	PAINEL F/ PISO	1	7	300,0
cF07	14	CD	12,6	B728476	REFORCO TUNEL FRT	1	16	76,2
cF07	14	CD	12,6	A103925	REFORCO ASSENTO RR	1	18	85,7
cF07	14	CD	12,6	B748070	REFORCO U/B #2 CR LE	1	20	95,2
cF07	14	CD	12,6	B748071	REFORCO U/B #2 CR LD	1	20	95,2
cF07	14	SV	2,5	B727799	REFORCO FRT FLR TUNEL INF SV	1	4	96,0
cF07	14	CD	12,6	A100938	REINF PISO UNDER	2	50	119,0
cF07	14	SV	2,5	A103925	FRT ASSENTO RR	1	18	385,7
cF07	14	SV	2,5	A100938	REFORCO U/B #2 CR LE	1	20	389,6
cF07	14	CS	1,4	A103925	REFORCO U/B #2 CR LD	1	20	389,6
cF07	14	CS	1,4	B748070	FRT ASSENTO RR	1	18	392,7
cF07	14	CS	1,4	B748071	REFORCO DO PISO - TRAV INF	2	50	461,5
ch01	10	CD	12,6	B713467	CAPO PAINEL EXT	1	12	57,1
ch01	10	CD	12,6	B713462	TRAVESSA DO ARCO INFERIOR	1	30	142,9
ch01	10	CD	12,6	B713458	CAPO PAINEL INT	1	45	214,3
ch01	10	SV	2,5	B713467	REFORCO LAT DO CAPO SV	1	12	288,0
ch01	10	CD	12,6	B713464	REFORCO LAT DO CAPO CD	1	70	333,3
ch01	10	CS	1,4	B713467	TRAVESSA DO ARCO SUPERIOR	1	30	450,0
ch01	10	SV	2,5	B713463	CAPO PAINEL EXT SV	1	12	467,5
cM01	7	CD	12,6	B726860	CANTON F/COMPT FRT PNL 52 MM	1	10	47,6
cM01	7	SV	2,5	B726861	CANTON F/COMPT FRT PNL 52 MM	1	10	240,0
cM01	7	CS	1,4	B726862	CANTON F/COMPT FRT PNL 52 MM	1	10	389,6
cP01	34	CS	1,4	B724717	FRT ASSENTO RR	1	6	257,1
cP01	34	CD	12,6	B724716	PAINEL PBOX FRT CD	1	70	333,3
cP01	34	CD	12,6	A44396	BARRA INFERIO FRONTAL PBOX	1	120	439,6
cP02	11	CD	12,6	A4194	PBOX #4 TRAVESSA	1	14	66,7
cP02	11	CD	12,6	A4191	PBOX #2 TRAVESSA	1	48	228,6
cP02	11	CS	1,4	A4150	PAINEL PBOX PLATAFORMA	1	6	257,1
cP03	15	CD	12,6	A139247	CJ PBOX CS TRAVESSA	1	16	76,2
cP03	15	CD	12,6	A44258	PICKUP BOX FRT TRAVESSA	1	28	133,3
cP03	15	CD	12,6	A4159	PAINEL PBOX PLATAFORMA	1	40	190,5
cP03	15	CS	1,4	A139247	CJ PBOX CS TRAVESSA	1	16	381,0
cR01	1	CD	12,6	A116648	PAINEL CJ ASSENTO ELEVADO	1	7	33,3
cR01	1	CD	12,6	A44056	CJ PISO RR	1	12	57,1
cR01	1	CD	12,6	A44015	PAINEL PISO TRASEIRO	1	28	133,3
cU01	21	CD	12,6	A103894	PAINEL PARALAMA INT, LD	1	22	104,8
cU02	22	CD	12,6	A103912	PAINEL PARALAMA INT, LE	1	22	104,8

Figura A-4: Estudo de caso – PFEP (parte 3 – final)

ANEXO B - MATRIZ DE CAMINHOS MÍNIMOS

Neste anexo é apresentada a matriz de caminhos mínimos determinada para o problema do estudo de caso e cujo layout se encontra na Figura 6.1. A rede propriamente dita e os dados da rede de corredores se encontram na Figura 6.2 e no Anexo A.

orig \ dest		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		0d	cR01	cF06	cF07	cU02	cB04	cB06	cB05	cF04	cF01
1	0d	-	222,2	211,8	196,6	169,0	210,6	215,8	222,6	128,2	153,4
2	cR01	30,6	-	242,4	227,2	199,6	241,2	246,4	253,2	158,8	184,0
3	cF06	41,0	10,4	-	237,6	210,0	251,6	256,8	263,6	169,2	194,4
4	cF07	56,2	25,6	15,2	-	225,2	266,8	272,0	278,8	184,4	209,6
5	cU02	83,8	53,2	42,8	27,6	-	132,8	138,0	144,8	80,0	105,2
6	cB04	163,0	132,4	122,0	106,8	182,4	-	5,2	12,0	141,6	166,8
7	cB06	157,8	127,2	116,8	101,6	177,2	115,6	-	6,8	136,4	161,6
8	cB05	151,0	120,4	110,0	94,8	170,4	108,8	114,0	-	129,6	154,8
9	cF04	124,6	94,0	83,6	68,4	40,8	173,6	178,8	185,6	-	25,2
10	cF01	99,4	68,8	58,4	43,2	15,6	148,4	153,6	160,4	95,6	-
11	0e	242,8	212,2	201,8	186,6	188,6	109,4	114,6	121,4	147,8	173,0
12	cD01	245,0	214,4	204,0	188,8	161,2	202,8	208,0	214,8	120,4	145,6
13	cM01	227,0	196,4	186,0	170,8	143,2	184,8	190,0	196,8	102,4	127,6
14	cU01	209,4	178,8	168,4	153,2	125,6	167,2	172,4	179,2	84,8	110,0
15	cF02	185,0	154,4	144,0	128,8	101,2	142,8	148,0	154,8	60,4	85,6
16	cF03	161,0	130,4	120,0	104,8	77,2	118,8	124,0	130,8	36,4	61,6
17	cB03	146,6	116,0	105,6	90,4	62,8	104,4	109,6	116,4	22,0	47,2
18	cB10	354,2	323,6	313,2	298,0	270,4	269,6	274,8	281,6	229,6	254,8
19	cB09	345,4	314,8	304,4	289,2	261,6	260,8	266,0	272,8	220,8	246,0
20	cP01	331,0	300,4	290,0	274,8	247,2	246,4	251,6	258,4	206,4	231,6
21	cP03	280,2	249,6	239,2	224,0	204,4	146,8	152,0	158,8	163,6	188,8
22	cP02	273,0	242,4	232,0	216,8	197,2	139,6	144,8	151,6	156,4	181,6
23	cD05	265,0	234,4	224,0	208,8	181,2	204,4	209,6	216,4	140,4	165,6
24	cD03	256,6	226,0	215,6	200,4	172,8	196,0	201,2	208,0	132,0	157,2
25	cD02	286,6	256,0	245,6	230,4	202,8	188,4	193,6	200,4	162,0	187,2
26	cF05	164,2	133,6	123,2	108,0	80,4	122,0	127,2	134,0	39,6	64,8
27	cE03	161,4	130,8	120,4	105,2	77,6	119,2	124,4	131,2	36,8	62,0
28	cB11	259,4	228,8	218,4	203,2	175,6	174,8	180,0	186,8	134,8	160,0
29	cB12	249,8	219,2	208,8	193,6	166,0	165,2	170,4	177,2	125,2	150,4
30	cE02	354,6	324,0	313,6	298,4	278,8	221,2	226,4	233,2	238,0	263,2
31	cE01	269,8	239,2	228,8	213,6	186,0	185,2	190,4	197,2	145,2	170,4
32	cD04	200,2	169,6	159,2	144,0	116,4	158,0	163,2	170,0	75,6	100,8
33	cD06	193,0	162,4	152,0	136,8	109,2	150,8	156,0	162,8	68,4	93,6
34	cB02	266,2	235,6	225,2	210,0	182,4	205,6	210,8	217,6	141,6	166,8
35	cB01	218,2	187,6	177,2	162,0	134,4	176,0	181,2	188,0	93,6	118,8
36	cB07	305,4	274,8	264,4	249,2	221,6	220,8	226,0	232,8	180,8	206,0
37	cB08	278,6	248,0	237,6	222,4	194,8	194,0	199,2	206,0	154,0	179,2
38	cH01	304,4	273,8	263,4	248,2	220,6	262,2	267,4	274,2	179,8	205,0

Figura B-1: Estudo de caso – Matriz de caminhos mínimos (parte 1)

orig \ dest		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
		0e	cD01	cM01	cU01	cF02	cF03	cB03	cB10	cB09	cP01
1	0d	161,2	7,8	25,8	43,4	67,8	91,8	106,2	27,4	36,2	50,6
2	cR01	191,8	38,4	56,4	74,0	98,4	122,4	136,8	58,0	66,8	81,2
3	cF06	202,2	48,8	66,8	84,4	108,8	132,8	147,2	68,4	77,2	91,6
4	cF07	217,4	64,0	82,0	99,6	124,0	148,0	162,4	83,6	92,4	106,8
5	cU02	185,0	91,6	109,6	127,2	151,6	146,8	150,8	111,2	120,0	134,4
6	cB04	143,4	170,8	188,8	206,4	230,8	105,2	119,6	168,8	177,6	192,0
7	cB06	138,2	165,6	183,6	201,2	225,6	100,0	114,4	163,6	172,4	186,8
8	cB05	131,4	158,8	176,8	194,4	218,8	93,2	107,6	156,8	165,6	180,0
9	cF04	225,8	132,4	150,4	168,0	192,4	187,6	191,6	152,0	160,8	175,2
10	cF01	200,6	107,2	125,2	142,8	167,2	162,4	166,4	126,8	135,6	150,0
11	0e	-	250,6	268,6	286,2	310,6	214,6	218,6	270,2	279,0	293,4
12	cD01	203,8	-	18,0	35,6	60,0	84,0	98,4	188,4	197,2	211,6
13	cM01	185,8	191,6	-	17,6	42,0	66,0	80,4	170,4	179,2	193,6
14	cU01	168,2	174,0	192,0	-	24,4	48,4	62,8	152,8	161,6	176,0
15	cF02	143,8	149,6	167,6	185,2	-	24,0	38,4	128,4	137,2	151,6
16	cF03	153,4	159,2	177,2	194,8	219,2	-	14,4	138,0	146,8	161,2
17	cB03	212,6	154,4	172,4	190,0	214,4	133,6	-	174,0	182,8	197,2
18	cB10	160,2	166,0	184,0	201,6	226,0	193,2	207,6	-	8,8	23,2
19	cB09	151,4	157,2	175,2	192,8	217,2	184,4	198,8	136,0	-	14,4
20	cP01	137,0	142,8	160,8	178,4	202,8	170,0	184,4	121,6	130,4	-
21	cP03	37,4	43,2	61,2	78,8	103,2	127,2	141,6	22,0	30,8	45,2
22	cP02	30,2	36,0	54,0	71,6	96,0	120,0	134,4	14,8	23,6	38,0
23	cD05	95,0	100,8	118,8	136,4	160,8	104,0	118,4	79,6	88,4	102,8
24	cD03	86,6	92,4	110,4	128,0	152,4	95,6	110,0	71,2	80,0	94,4
25	cD02	79,0	84,8	102,8	120,4	144,8	125,6	140,0	63,6	72,4	86,8
26	cF05	115,8	162,4	180,4	198,0	222,4	151,2	17,6	141,2	150,0	164,4
27	cE03	113,0	159,6	177,6	195,2	219,6	148,4	14,8	138,4	147,2	161,6
28	cB11	65,4	71,2	89,2	106,8	131,2	98,4	112,8	50,0	58,8	73,2
29	cB12	55,8	61,6	79,6	97,2	121,6	88,8	103,2	40,4	49,2	63,6
30	cE02	111,8	117,6	135,6	153,2	177,6	201,6	216,0	214,8	223,6	238,0
31	cE01	75,8	81,6	99,6	117,2	141,6	108,8	123,2	60,4	69,2	83,6
32	cD04	118,2	124,0	142,0	159,6	184,0	39,2	53,6	102,8	111,6	126,0
33	cD06	111,0	116,8	134,8	152,4	176,8	32,0	46,4	95,6	104,4	118,8
34	cB02	96,2	102,0	120,0	137,6	162,0	105,2	119,6	80,8	89,6	104,0
35	cB01	136,2	142,0	160,0	177,6	202,0	57,2	71,6	120,8	129,6	144,0
36	cB07	111,4	117,2	135,2	152,8	177,2	144,4	158,8	96,0	104,8	119,2
37	cB08	84,6	90,4	108,4	126,0	150,4	117,6	132,0	69,2	78,0	92,4
38	cH01	256,0	261,8	279,8	297,4	321,8	177,0	157,8	240,6	249,4	263,8

Figura B-1: Estudo de caso – Matriz de caminhos mínimos (parte 2)

orig \ dest		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
		cP03	cP02	cD05	cD03	cD02	cF05	cE03	cB11	cB12	cE02
1	Od	123,8	131,0	66,2	74,6	132,6	129,4	132,2	95,8	105,4	75,8
2	cR01	154,4	161,6	96,8	105,2	163,2	160,0	162,8	126,4	136,0	106,4
3	cF06	164,8	172,0	107,2	115,6	173,6	170,4	173,2	136,8	146,4	116,8
4	cF07	180,0	187,2	122,4	130,8	188,8	185,6	188,4	152,0	161,6	132,0
5	cU02	188,4	195,6	150,0	158,4	146,8	133,2	136,0	179,6	189,2	159,6
6	cB04	146,8	154,0	126,8	135,2	105,2	102,0	104,8	156,4	166,0	160,4
7	cB06	141,6	148,8	121,6	130,0	100,0	96,8	99,6	151,2	160,8	155,2
8	cB05	134,8	142,0	114,8	123,2	93,2	90,0	92,8	144,4	154,0	148,4
9	cF04	229,2	236,4	190,8	199,2	187,6	174,0	176,8	220,4	230,0	200,4
10	cF01	204,0	211,2	165,6	174,0	162,4	148,8	151,6	195,2	204,8	175,2
11	Oe	256,2	263,4	236,2	244,6	214,6	201,0	203,8	265,8	275,4	269,8
12	cD01	166,4	173,6	146,4	154,8	124,8	121,6	124,4	176,0	185,6	180,0
13	cM01	148,4	155,6	128,4	136,8	106,8	103,6	106,4	158,0	167,6	162,0
14	cU01	130,8	138,0	110,8	119,2	89,2	86,0	88,8	140,4	150,0	144,4
15	cF02	106,4	113,6	86,4	94,8	64,8	61,6	64,4	116,0	125,6	120,0
16	cF03	116,0	123,2	96,0	104,4	74,4	111,2	114,0	125,6	135,2	129,6
17	cB03	175,2	182,4	155,2	163,6	133,6	96,8	99,6	184,8	194,4	188,8
18	cB10	122,8	130,0	126,8	135,2	193,2	190,0	192,8	94,8	104,4	160,4
19	cB09	114,0	121,2	118,0	126,4	184,4	181,2	184,0	86,0	95,6	151,6
20	cP01	99,6	106,8	103,6	112,0	170,0	166,8	169,6	71,6	81,2	137,2
21	cP03	-	7,2	148,8	157,2	168,0	164,8	167,6	116,8	126,4	182,4
22	cP02	137,6	-	141,6	150,0	160,8	157,6	160,4	109,6	119,2	175,2
23	cD05	57,6	64,8	-	8,4	104,0	100,8	103,6	29,6	39,2	33,6
24	cD03	49,2	56,4	53,2	-	95,6	92,4	95,2	21,2	30,8	25,2
25	cD02	41,6	48,8	21,6	30,0	-	122,4	125,2	51,2	60,8	55,2
26	cF05	119,2	126,4	99,2	107,6	77,6	-	2,8	128,8	138,4	132,8
27	cE03	116,4	123,6	96,4	104,8	74,8	71,6	-	126,0	135,6	130,0
28	cB11	28,0	35,2	32,0	40,4	136,0	95,2	98,0	-	9,6	65,6
29	cB12	18,4	25,6	22,4	30,8	126,4	85,6	88,4	52,0	-	56,0
30	cE02	192,8	200,0	135,2	143,6	239,2	198,4	201,2	164,8	174,4	-
31	cE01	38,4	45,6	42,4	50,8	146,4	105,6	108,4	10,4	20,0	14,4
32	cD04	80,8	88,0	60,8	69,2	39,2	36,0	38,8	90,4	100,0	94,4
33	cD06	73,6	80,8	53,6	62,0	32,0	28,8	31,6	83,2	92,8	87,2
34	cB02	58,8	66,0	62,8	71,2	166,8	102,0	104,8	30,8	40,4	34,8
35	cB01	98,8	106,0	78,8	87,2	57,2	54,0	56,8	70,8	80,4	74,8
36	cB07	74,0	81,2	78,0	86,4	144,4	141,2	144,0	46,0	55,6	111,6
37	cB08	47,2	54,4	51,2	59,6	117,6	114,4	117,2	19,2	28,8	84,8
38	cH01	218,6	225,8	198,6	207,0	177,0	140,2	143,0	190,6	200,2	194,6

Figura B-1: Estudo de caso – Matriz de caminhos mínimos (parte 3)

orig \ dest		31	32	33	34	35	36	37	38
		cE01	cD04	cD06	cB02	cB01	cB07	cB08	cH01
1	Od	85,4	131,0	138,2	153,0	169,8	76,2	103,0	147,4
2	cR01	116,0	161,6	168,8	183,6	200,4	106,8	133,6	178,0
3	cF06	126,4	172,0	179,2	194,0	210,8	117,2	144,0	188,4
4	cF07	141,6	187,2	194,4	209,2	226,0	132,4	159,2	203,6
5	cU02	169,2	168,4	175,6	167,2	150,4	160,0	186,8	231,2
6	cB04	146,0	126,8	134,0	125,6	108,8	217,6	244,4	232,0
7	cB06	140,8	121,6	128,8	120,4	103,6	212,4	239,2	226,8
8	cB05	134,0	114,8	122,0	113,6	96,8	205,6	232,4	220,0
9	cF04	210,0	209,2	216,4	208,0	191,2	200,8	227,6	272,0
10	cF01	184,8	184,0	191,2	182,8	166,0	175,6	202,4	246,8
11	Oe	255,4	236,2	243,4	235,0	218,2	319,0	345,8	341,4
12	cD01	165,6	180,0	187,2	145,2	162,0	237,2	264,0	251,6
13	cM01	147,6	162,0	169,2	127,2	144,0	219,2	246,0	233,6
14	cU01	130,0	144,4	151,6	109,6	126,4	201,6	228,4	216,0
15	cF02	105,6	120,0	127,2	85,2	102,0	177,2	204,0	191,6
16	cF03	115,2	96,0	103,2	94,8	78,0	186,8	213,6	201,2
17	cB03	174,4	132,0	139,2	154,0	114,0	222,8	249,6	260,4
18	cB10	146,0	154,0	161,2	213,6	239,8	48,8	75,6	120,0
19	cB09	137,2	145,2	152,4	204,8	231,0	40,0	66,8	111,2
20	cP01	122,8	130,8	138,0	190,4	216,6	25,6	52,4	96,8
21	cP03	168,0	176,0	183,2	188,4	205,2	70,8	97,6	142,0
22	cP02	160,8	168,8	176,0	181,2	198,0	63,6	90,4	134,8
23	cD05	19,2	64,8	72,0	148,4	141,2	128,4	155,2	105,2
24	cD03	10,8	56,4	63,6	140,0	132,8	120,0	146,8	96,8
25	cD02	40,8	86,4	93,6	170,0	162,8	112,4	139,2	126,8
26	cF05	118,4	132,8	140,0	98,0	114,8	190,0	216,8	204,4
27	cE03	115,6	130,0	137,2	95,2	112,0	187,2	214,0	201,6
28	cB11	51,2	96,8	104,0	118,8	135,6	98,8	125,6	137,2
29	cB12	41,6	87,2	94,4	109,2	126,0	89,2	116,0	127,6
30	cE02	154,4	200,0	207,2	231,4	191,4	263,6	290,4	71,6
31	cE01	-	107,2	114,4	129,2	146,0	109,2	136,0	86,0
32	cD04	80,0	-	7,2	116,4	76,4	151,6	178,4	166,0
33	cD06	72,8	87,2	-	109,2	69,2	144,4	171,2	158,8
34	cB02	20,4	127,6	134,8	-	142,4	129,6	156,4	106,4
35	cB01	60,4	18,0	25,2	40,0	-	169,6	196,4	146,4
36	cB07	97,2	105,2	112,4	164,8	191,0	-	26,8	71,2
37	cB08	70,4	78,4	85,6	138,0	154,8	118,0	-	156,4
38	cH01	180,2	137,8	145,0	159,8	119,8	289,4	316,2	-

Figura B-1: Estudo de caso – Matriz de caminhos mínimos (parte 4 – final)

Figura C-1: Solução manual – rotas 5 a 8

Figura C-2: Solução manual – rotas 9 a 12

ANEXO D - ROTAS DA SOLUÇÃO BALANCEADA

Neste anexo são apresentadas as rotas definidas pela solução balanceado mostradas no Quadro 6.5.

Figura D-1: Solução balanceada – rotas 1 a 4

Figura D-2: Solução balanceada – rotas 5 a 8

Figura E-2: Solução concentrada – rotas 5 a 8

Figura E-1: Solução concentrada – rotas 9 e 10