ANTONIO CARLOS BONASSA

**O PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DA SEPARAÇÃO MANUAL DE
PEÇAS EM ARMAZÉM**

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

São Paulo
2009

ANTONIO CARLOS BONASSA

**O PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DA SEPARAÇÃO MANUAL DE
PEÇAS EM ARMAZÉM**

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
2009

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, 16 de agosto de 2009.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Bonassa, Antonio Carlos
O problema da roteirização da separação manual de peças
em armazém / A.C. Bonassa. -- ed.rev. -- São Paulo, 2009.
162 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1. Logística 2. Roteirização 3. Armazéns (Separação) I. Uni -
versidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia de Transportes II. t.

DEDICATÓRIA

Ao meu pai (*in memoriam*) e à minha mãe

AGRADECIMENTOS

É muito difícil lembrar de todos aqueles que me apoiaram neste trabalho. Entretanto, muito antes de ele começar, duas pessoas se destacaram por acreditar e me incentivar a seguir esse caminho: meu cunhado Maurício Brun Bucker e meu orientador Cláudio Barbieri da Cunha.

Outras pessoas me ajudaram durante este processo, dentre elas destaca-se minha irmã Fátima, pela constante motivação para sempre seguir adiante.

Destaque merece minha ex-namorada Renata que sempre entendeu meus momentos de dedicação a esta dissertação. Sempre me dando todo o suporte sentimental necessário para esta jornada. Uma semana antes da qualificação, tornou-se minha esposa.

Agradeço ainda ter encontrado em minha vida profissional meu amigo Miguel Pinto Caldas. Fui assistente de pesquisa de sua dissertação de mestrado, e, a partir dessa experiência, sempre levei comigo a idéia de me desenvolver academicamente.

Minha mãe Alzira Ferrari Bonassa e meu pai Jorge Bonassa recebem o agradecimento incondicional por terem me mostrado o caminho para que eu pudesse chegar até aqui.

Finalmente, a todos os professores e amigos que fiz durante este curso de mestrado na POLI; Prof. Dr. Hugo Tsugunobu Y. Yoshizaki, Prof. Dr. Rui C. Botter e Prof. Dr. Nicolau D. F. Gualda e amigos Marcelo Aragão e João Umbiruçu.

Meu muito obrigado a todos!

Antonio Carlos Bonassa

RESUMO

O presente trabalho trata da determinação de um roteiro ótimo de separação manual de peças em armazéns, buscando a minimização da distância total percorrida. São considerados armazéns com dois corredores transversais localizados em suas extremidades, os quais conectam todos os corredores de separação, perpendiculares aos corredores transversais e paralelos entre si.

O problema abordado é prático e comum a várias empresas, com impacto nos custos operacionais e relevância para a assertividade em relação aos itens coletados. Ainda assim, o tema é pouco explorado nos estudos de roteirização disponíveis em língua portuguesa e muitas empresas optam por confiar a criação das rotas aos próprios separadores.

O método escolhido é baseado em programação dinâmica e foi aplicado na roteirização de listas de separação relacionadas a subconjuntos do produto final, na roteirização de grupos aleatórios de peças, e no estudo do impacto do número de corredores de separação no comprimento das rotas, totalizando 184 experimentos.

A forma de avaliação do algoritmo foi comparar as rotas por ele criadas com aquelas criadas pelos separadores. Conclui-se que quanto mais complexa for a rota, maiores serão os ganhos da seqüência de coletas proposta pelo sistema em comparação com aquelas criadas por processos subjetivos. Concluiu-se também que o número de corredores a ser visitado é o fator que mais influencia no comprimento da rota a ser percorrida.

Ainda, o algoritmo é flexível e genérico para ser utilizado em qualquer armazém com dois corredores transversais, independente da política de localização ou separação adotada e, por sua facilidade de implementação e utilização, representa uma alternativa de roteirização eficiente e de baixo custo para pequenas e médias empresas. Finalmente, tem-se um algoritmo que pode ser utilizado também como ferramenta gerencial e de simulação visto que pode ser configurado para diferentes leiautes e diferentes tamanhos listas de separação.

ABSTRACT

The present work deals with the shortest route creation for a low-level pickers-to-part warehouse, intending to minimize the total traveled distance. The considered warehouse has two traversing aisles, located in its extremities, connecting all of the picking aisles and perpendicularly set in relation to them.

The proposed problem is practical and common to several companies, impacting their operational costs and important for mis picking reduction. Nevertheless, that theme is little explored among routing studies in Portuguese language and several companies still opt to trust the routes to be subjectively prepared by their own pickers.

The proposed solution method is based on dynamic programming and it was applied in the routing of picking lists related to subsets of final products, random groups of items, and in the study of the impact that picking aisle quantity has on the total length of the routes, totaling 184 experiments.

The proposed algorithm was evaluated comparing the routes prepared by it with those created by the pickers. Results show that the more complex the route is, the higher the earnings of the algorithm utilization in relation to the subjective processes will be. Besides it shows that the number of corridors to be visited is the main influence to the length of the route.

Still, the algorithm is flexible and generic to be used at any warehouse with two traverse corridors, independent of the locating police or separation strategy adopted. Furthermore the algorithm implementation easiness and use support it to be an efficient low cost routing alternative for small and average size companies.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	O problema abordado	3
1.2.	Objetivo do trabalho	3
1.3.	Organização do trabalho	4
2.	DEFINIÇÕES E CONCEITOS BÁSICOS	6
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1.	Introdução	14
3.2.	Revisão bibliográfica	16
3.2.1.	O trabalho de Ratliff e Rosenthal (1983)	16
3.2.2.	O trabalho de Petersen (1997)	24
3.2.3.	O trabalho de De Koster e Poort (1998)	29
3.2.4.	O trabalho de Petersen (1999)	32
3.2.5.	O trabalho de Caron et al. (2000a)	35
3.2.6.	O trabalho de Roodbergen (2001)	38
3.2.7.	O trabalho de Petersen e aase (2003)	41
3.2.8.	O trabalho de Hwang et al. (2004)	43
3.2.9.	O trabalho de Theys et al. (2009)	45
3.3.	A influência de outros fatores na decisão de roteirização	48
3.3.1.	O trabalho de Caron et al. (1998)	48
3.3.2.	O trabalho de Vaughan e Petersen (1999)	50
3.3.3.	O trabalho de De Koster et al. (1999)	52
3.4.	Outros trabalhos correlatos	54
3.5.	Conclusões da revisão bibliográfica	57
4.	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA / ESTUDO DE CASO	62
4.1.	Introdução	62
4.2.	Objetivo operacional do armazém	68
4.3.	Políticas de separação	69
4.4.	Políticas de roteirização	69
4.5.	Estrutura do armazém	70
4.5.1.	A relação largura-profundidade do armazém	70
4.5.2.	Os corredores de separação	71
4.5.3.	Número de corredores transversais	73
4.5.4.	Localização do ponto de início/término	74
4.5.5.	Equipamento de armazenamento e separação	75
4.6.	Políticas de armazenamento	76
4.7.	Família e estrutura de produtos	77
4.8.	Considerações finais do capítulo	85

5.	ALGORITMO DE SOLUÇÃO	90
5.1.	Escolha do algoritmo de solução	90
5.2.	Notações utilizadas no algoritmo de solução	98
5.2.1.	Detalhamento da lógica de resolução e programação	103
5.3.	Desenvolvimento do sistema	112
5.4.	Considerações finais do capítulo	113
6.	DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO, EXPERIMENTOS E TESTES	114
6.1.	Introdução ao sistema - premissas	114
6.2.	Configuração dos dados de entrada	116
6.3.	Testes de funcionalidade e de validação	122
6.4.	Testes adicionais	124
6.5.	Considerações finais do capítulo	127
7.	AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DO ALGORITMO ATRAVÉS DE ESTUDO DE CASO	128
7.1.	Proposta de avaliação dos resultados	129
7.2.	Resultados e análises	130
7.3.	Utilização do algoritmo em leiautes e listas de separação de abrangência ainda mais genérica	141
7.3.1.	Aplicação do algoritmo para listas de separação aleatórias	141
7.3.1.1.	Resultados e análises	142
7.3.2.	Aplicação do algoritmo para mudança de leiautes	147
7.3.2.1.	Resultados e análises	148
7.4.	Considerações finais do capítulo	153
8.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	156
9.	BIBLIOGRAFIA	162
10.	ANEXOS	171
10.1.	Listas de separação/estrutura do produto la257 – parte 1	171
10.2.	Listas de separação/estrutura do produto la257 – parte 2	172
10.3.	Listas de separação/estrutura do produto la257 – parte 3	173
10.4.	Listas de separação/estrutura do produto la257 – parte 4	174
10.5.	Listas de separação/estrutura do produto la257 – parte 5	175
10.6.	Listas de separação/estrutura do produto la257 – parte 6	176
10.7.	Listas de separação/estrutura do produto la257 – parte 7	177

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 – Estrutura de produto
- Figura 2.2 – Exemplo de endereçamento em armazém
- Figura 2.3 – Fluxo esquemático do processo de criação da lista de separação
- Figura 2.4 – Localização central do ponto de início e término da rota de separação
- Figura 2.5 – Exemplo esquemático de corredores de separação estreitos
- Figura 3.1 – Representações de um centro de distribuição: corredores e grafo
- Figura 3.2 – Representação gráfica de armazém (adaptação de Roodbergen, 2001)
- Figura 3.3 – Sub-grafos equivalentes para separação dentro de um corredor
- Figura 3.4 – Possíveis conexões entre corredores de separação
- Figura 3.5 – Políticas de roteirização de Passagem (Petersen, 1997)
- Figura 3.6 – Políticas de roteirização de Retorno (Petersen, 1997)
- Figura 3.7 – Políticas de roteirização de ponto médio (Petersen, 1997)
- Figura 3.8 – Políticas de roteirização de maior distância (Petersen, 1997)
- Figura 3.9 – Políticas de roteirização de composta (Petersen, 1997)
- Figura 3.10 – Conexão de corredores paralelos segundo De Koster e Poort (1998)
- Figura 3.11 – Estratégias para armazenamento espaço/ordens (Hwang et al., 2004)
- Figura 3.12 – Regiões de armazenagem espaço/ordens - adaptação de Petersen (1999)
- Figura 3.13 – Armazém com alinhamento paralelo entre I/T e corredores de separação
- Figura 3.14 – Ponto de início/término da rota localizado na extremidade da área frontal
- Figura 3.15 – Possíveis transições utilizadas pelo algoritmo de Roodbergen, (2001)
- Figura 3.16 – Leiaute e alocação para política de Retorno (Caron et al., 1998)
- Figura 3.17 – Leiaute e alocação para política de Passagem (Caron et al., 1998)
- Figura 3.18 – Posicionamento dos pontos de início e término (Hsieh e Tsai, 2006)
- Figura 4.1 – Fluxo esquemático de materiais do processo produtivo
- Figura 4.10 – Fluxo de montagem do produto
- Figura 4.2 – Exemplo de estrutura de produto, lista de materiais
- Figura 4.3 – Exemplo de estrutura de produto
- Figura 4.4 – Exemplo esquemático de corredores de separação estreitos
- Figura 4.5 – Leiaute do armazém
- Figura 4.6 – Exemplo da lógica de endereçamento para a prateleira K

- Figura 4.7 – Detalhe frontal do armazém
- Figura 4.8 – Comprimento da rota em relação a localização do ponto início/término
- Figura 4.9 – Prateleiras de armazenamento
- Figura 5.1 – Lógica da programação dinâmica
- Figura 5.2 – Exemplo de armazém com três localizações de coleta a serem visitadas
- Figura 5.3 – Exemplo de rota para coleta no primeiro corredor
- Figura 5.4 – Exemplo de rota para coletas no segundo corredor
- Figura 5.5 – Lógica da programação dinâmica
- Figura 5.6 – Representação de armazém com localizações de armazenamento a serem visitadas
- Figura 5.7 – Exemplo de rota criada utilizando-se das conexões apresentadas por Roodbergen (2001)
- Figura 5.8 – Leiaute de armazém para exemplo numérico
- Figura 5.9 – Possíveis rotas L_1^a e L_1^b , para o corredor $j=1$
- Figura 5.10 – Possíveis rotas para separações com apenas 1 corredor visitado
- Figura 5.11 – Possíveis rotas L_2^a para o corredor $j=2$
- Figura 5.12 – Possíveis rotas L_2^b para o corredor $j=2$
- Figura 5.13 – Rotas escolhidas para o corredor $j=2$
- Figura 5.14 – Lógica de roteirização para corredores intermediários
- Figura 5.15 – Possíveis rotas L_n^b para o corredor $j=n$
- Figura 5.16 – Lógica de roteirização para o último corredor
- Figura 6.1 – Tela de entrada de dados – corredores e faces
- Figura 6.2 – Tela de entrada de dados – prateleiras por corredor
- Figura 6.3 – Tela de entrada de dados – comprimento das prateleiras
- Figura 6.4 – Estrutura de produtos ou listas de separação a roteirizar
- Figura 6.5 – Tela de endereçamento
- Figura 6.6 – O Impacto feito na rota pela adição de localizações a visitar
- Figura 6.7 – O Impacto feito na rota pela exclusão de localizações a visitar
- Figura 6.8 – Representações de um centro de distribuição: corredores e grafo
- Figura 6.9 – Rota solução para o problema de Ratliff e Rosenthal (1983)
- Figura 7.1 – Exemplo de rotas traçadas pelos separadores A e B
- Figura 7.2 – Comparativo de rotas LA24300607 – algoritmo e separador
- Figura 7.3 – Comparativo de rotas LA24300300 – algoritmo e separador

- Figura 7.4 – Comprimento da rota em relação à quantidade de pontos de coleta
- Figura 7.5 – Comprimento da rota em relação ao número de corredores visitados
- Figura 7.6 – Comprimento da rota em relação à distância entre vértices visitados - subconjuntos
- Figura 7.7 – Comprimento da rota em relação à distância entre vértices visitados
- Figura 7.8 – Correlações entre comprimento das rotas e corredores visitados
- Figura 7.9 – Tempo de processamento em relação aos pontos de coletas
- Figura 7.10 – Tempo de processamento em relação aos corredores visitados
- Figura 7.11 – Comprimento da rota em relação à quantidade de corredores visitados
- Figura 7.12 – Relação entre corredores visitados e o comprimento da rota
- Figura 7.13 – Correlação entre comprimento da rota e distância entre vértices visitados
- Figura 7.14 – Relação entre tempo de processamento e corredores visitados
- Figura 7.15 – Comprimento da rota em relação ao número de corredores visitados – problema original
- Figura 7.16– Comprimento da rota em relação à quantidade de corredores visitados - sorteio listas
- Figura 7.17 – Relação número de coletas com comprimento da rota – seqüência rotas
- Figura 7.18 – Relação número de coletas com comprimento da rota – seqüência comprimento
- Figura 7.19 – Correlação das variáveis corredores visitados e dispersão das coletas
- Figura 7.20 – Paralelismo entre número de corredores e dispersão das coletas e comprimento de rota
- Figura 7.21 – Tempo de processamento em relação as localizações de coleta visitadas
- Figura 7.22 – Tempo de processamento em relação aos corredores visitados
- Figura 7.23 – Comprimento da rota em relação ao número de corredores visitados – problema original
- Figura 7.24 – Comprimento da rota em relação ao número de corredores visitados – mudança de leiaute

LISTA DE TABELAS

- Tabela 3.1 – Tempo médio de viagem para armazém com I/T centralizado.
- Tabela 3.2 – Comprimento ótimo de corredor
- Tabela 3.3 – Comparativo dos objetivos e parâmetros das principais obras sobre roteirização da separação manual de itens
- Tabela 4.1 – Participação dos produtos nas vendas anuais – 2006 e 2007
- Tabela 4.2 – Estrutura de produtos, diferentes peças utilizadas por produto
- Tabela 4.3 – Estrutura de produtos, utilização partes em subsistemas
- Tabela 4.4 – Estrutura de produtos – partes consideradas com repetição
- Tabela 4.5 – Participação dos produtos nas visitas de separação
- Tabela 4.6 – Número de peças a separar em subsistemas do produto LA257
- Tabela 4.7 – Exemplo da estrutura de um PIs do produto LA257
- Tabela 6.1 – Tabela de testes e resultados para a validação do algoritmo
- Tabela 7.1 – Comparação das rotas traçadas pelo roteirizador e pelos separadores
- Tabela 7.2 – Comparação dos grupos de rotas traçadas pelo roteirizador e pelos separadores

LISTA DE QUADROS

- Quadro 3.1 – Principais obras analisadas
- Quadro 3.2 – Cenários estudados por Petersen (1997)
- Quadro 3.3 – Cenários estudados por Petersen (1999)
- Quadro 3.4 – Cenários estudados por Petersen e Aase (2003)
- Quadro 3.5 – Combinações estudadas por Hwang et al. (2004)
- Quadro 3.6 – Fatores e níveis do estudo de Hwang et al. (2004)
- Quadro 3.7 – Cenários estudados por Theys et al. (2009)
- Quadro 3.8 – Cenários estudados por Caron et al. (1998),
- Quadro 3.9 – Parâmetros, e características utilizadas por Vaughan e Petersen (1999)
- Quadro 3.10 – Bibliografia de assuntos correlatos complementar
- Quadro 4.1 – Configuração do problema proposto
- Quadro 4.2 – Vantagens do algoritmo de Roodbergen (2001)
- Quadro 4.3 – Análise da adequação do algoritmo ao problema proposto
- Quadro 6.1 – Configuração do algoritmo proposto
- Quadro 6.2 – Determinação das variáveis relacionadas aos dados de entrada
- Quadro 6.3 – Lista das tabelas de dados criadas pelo sistema
- Quadro 7.1 – Sumário dos parâmetros do problema original
- Quadro 7.2 – Comparativo de desempenho dos separadores em relação ao algoritmo
- Quadro 7.3 – Sumário da configuração do problema
- Quadro 7.4 – Sumário de configurações dos experimentos

1. INTRODUÇÃO

Em 1913, buscando aumentar a produtividade das linhas de produção dos veículos Modelo T, padronizados e unicamente oferecidos na cor preta, Henry Ford introduziu na indústria automobilística os processos de montagem onde os produtos se movem através das estações de trabalho, indo ao encontro de cada montador (Corrêa e Corrêa, 2007). Segundo os autores, por volta de 1920, os executivos da General Motors já acreditavam que os consumidores se tornariam mais exigentes, demandando produtos cada vez mais customizados e mais próximos de suas necessidades específicas. Aumentar a produtividade nos processos de montagem e, ao mesmo tempo, oferecer produtos adaptados às necessidades específicas dos clientes é, até hoje, um desafio para os processos produtivos.

O desafio representado pela busca simultânea do aumento da produtividade e da customização dos produtos de acordo com os pedidos dos clientes requer melhorias nos processos produtivos e na organização do fluxo de materiais.

Apresentar ao montador somente as peças que serão utilizadas na próxima unidade a ser montada foi um dos avanços na organização do fluxo de materiais. Esta mudança pode aumentar sua produtividade, pois retira de suas responsabilidades a tarefa de selecionar as peças necessárias dentre todas aquelas recebidas do almoxarifado. Ao mesmo tempo, esse fluxo de materiais fornece ao montador todos os componentes necessários para a montagem de unidades totalmente personalizadas.

Para atender à demanda de matérias-primas e componentes gerada pelas ordens de produção, os funcionários do almoxarifado devem receber as listas de necessidades e separar, conferir e embalar os componentes para então liberá-los à produção.

O processo de separação de peças pode representar até 65% do custo total relacionado às tarefas de operacionalização do almoxarifado (Hwang et al. (2004). A

representatividade do custo da separação de peças no custo total de um armazém foi uma das características deste problema que direcionou a linha de pesquisa dessa dissertação: a definição do roteiro de separação manual de peças.

Outra característica deste problema específico que chamou a atenção para o tema é sua singularidade em relação às coletas e agrupamento das peças, que devem seguir a estrutura do produto. Esta característica do processo de separação interage com as características do armazém, como, por exemplo, o número de corredores, e com as políticas operacionais, tais como a lógica de endereçamento, criando um ambiente específico para que as rotas de coleta sejam traçadas.

O número reduzido de obras publicadas no Brasil sobre o tema mostrou a necessidade de se estudar e difundir o assunto que é impactante na lucratividade e na qualidade das operações empresa. Aliás, este problema é comum em empresas de menor porte, que, sem recursos para investir em sofisticados sistemas de roteirização acabam por não abordar objetivamente o impacto da roteirização das listas de separação em seus custos operacionais e na qualidade do processo de separação, optando por confiar na experiência dos separadores, os quais roteirizam subjetivamente as listas de separação que recebem.

A importância e a representatividade dos custos de separação pressupõem a existência de um almoxarifado onde as peças permanecem armazenadas até sua separação e envio à produção. Entretanto, existem fluxos de materiais que não exigem o armazenamento das peças antes de seu envio às linhas de montagem. Não se pode aplicar a roteirização da separação de peças em armazéns em sistemas de produção que não incorporam a atividade de armazenamento.

O processo de roteirização da separação manual é diferente dos processos onde esteiras elétricas ou empilhadeiras são utilizadas para a coleta e movimentação de materiais. Estas situações não fazem parte do escopo desta dissertação, a qual se refere apenas a coleta manual de peças sem qualquer auxílio mecânico.

1.1. O problema abordado

Mais especificamente, neste trabalho é abordado um problema real de roteirização da separação manual de peças em armazém destinado à estocagem de partes para suprir as necessidades das linhas de produção. O armazém em questão tem dois corredores transversais localizados em suas extremidades, os quais conectam todos os corredores de separação, perpendiculares aos corredores transversais e paralelos entre si. Ainda, o problema trata de situações quando diferentes agrupamentos das peças separadas para a montagem do produto impactam diferentemente na produtividade das linhas de produção.

No problema abordado, as peças necessárias à montagem de cada um dos diferentes subsistemas do produto final devem ser coletadas de suas localizações de armazenamento, agrupadas e entregues separadamente à linha de produção. Não pode haver mistura de peças pertencentes a diferentes subsistemas.

Além das características da lista de separação, como, por exemplo, o número de peças a ser coletado, o problema da determinação da melhor seqüência de coletas a fazer também sofre interferência do leiaute do armazém e das políticas operacionais adotadas.

Para a solução do problema é necessário a análise dos três grupos de fatores que impactam na determinação da melhor rota (leiaute do armazém, políticas de endereçamento e políticas de roteirização) e a escolha de um algoritmo capaz de criar rotas considerando as características específicas do problema a ser resolvido.

1.2. Objetivo do trabalho

O presente trabalho tem como objetivo resolver um problema real e comum dentre várias organizações: o problema da roteirização da separação manual de peças. A solução tem por finalidade diminuir o tempo necessário à coleta de um pedido de separação via redução do comprimento das rotas de separação percorridas pelos

separadores. O decréscimo no comprimento da rota pode, significativamente, reduzir o tempo gasto no processo de separação (De Koster et al., 2002).

Além de buscar a solução de um problema real e específico de roteirização, esse trabalho também deseja agregar conhecimentos sobre o tema roteirização da separação de peças em armazéns de matéria-prima, mais especificamente para problemas nos quais existe agrupamento obrigatório de peças coletadas.

Pela possibilidade de aplicação dos resultados deste trabalho a outras situações de separação manual em armazém e pela escassez de obras disponíveis em língua portuguesa, esse trabalho pode contribuir para disseminar o tema no Brasil, incentivando novos estudos.

1.3. Organização do trabalho

No Capítulo 2 se apresenta o detalhamento do problema real que se busca resolver, a roteirização da separação manual de peças, detalhando a operação desta tarefa no armazém de uma manufatura.

A revisão bibliográfica, apresentada no Capítulo 3, abrange alguns dos autores que abordaram o problema da roteirização da separação manual de partes, produtos ou peças em armazém de matéria-prima. Nesse capítulo também serão apresentados os conceitos mais importantes para o entendimento do problema e da solução proposta.

No Capítulo 4, o problema proposto é então caracterizado utilizando os conceitos apresentados durante a revisão bibliográfica para então, no Capítulo 5 discutir sobre a formulação matemática escolhida como solução, detalhando a lógica de resolução e cálculo baseada em programação dinâmica.

No Capítulo 6 será apresentado o sistema criado em VBA para funcionar como roteirizador da separação manual de peças. Este sistema foi criado a partir do algoritmo de solução apresentado no Capítulo 5. Destaque para a seção de testes e

validações feitas para garantir que a lógica do algoritmo trabalhe corretamente, de acordo com a lógica estabelecida.

No Capítulo 7 os resultados obtidos a partir da aplicação do algoritmo em três diferentes situações; problema original, problemas com variação no tamanho das listas de coleta e problemas com variação no número de corredores do armazém serão apresentados e discutidos. Conclusões sobre sua eficácia nestas situações serão apresentadas.

O Capítulo 8 tem como o objetivo discutir e propor, a partir dos resultados obtidos na utilização do sistema, uma resposta para determinar a validade de se utilizar tal algoritmo na operação de separação manual em armazéns com dois corredores transversais.

Após as conclusões, apresentar-se-á a bibliografia utilizada neste trabalho e os anexos.

2. DEFINIÇÕES E CONCEITOS BÁSICOS

Este trabalho aborda um problema real de roteirização da separação manual de peças em uma manufatura de produtos médico-hospitalares. O almoxarifado da empresa é destinado ao armazenamento e à separação de componentes para suprir as necessidades das linhas de produção.

Os produtos montados na manufatura da empresa chegam a ter mais de 500 diferentes componentes, os quais são, em sua maioria, pequenos (vários componentes tem volume menor que 10 cm³), frágeis (muitos deles são feitos de alumínio), com alta precisão de encaixe e alguns utilizados em diferentes partes do mesmo produto final, o qual segue rígida seqüência de montagem. Assim, existem matérias-primas que são utilizadas em mais de um nível de montagem ou em vários subconjuntos da estrutura do produto.

Essa complexidade no manuseio dos componentes, na quantidade e na seqüência de montagem - seqüência resumidamente apresentada na Figura 2.1 - faz com que o agrupamento das peças separadas pelo almoxarifado influencie na produtividade das linhas de produção. A estrutura de um dos produtos da empresa, apresentada na Figura 2.1, mostra seus diversos níveis de montagem e as repetições de matérias-primas em diferentes subconjuntos do produto final.

Para evitar que os montadores tenham que reorganizar as peças recebidas do almoxarifado de acordo com produto intermediário (PI) que irão formar, tarefa que adicionaria manuseio e oportunidades de quebras, os separadores do almoxarifado coletam as peças já seguindo a estrutura do produto, formando conjuntos de acordo com os produtos intermediários ao qual as peças pertencem. O produto do processo de separação é composto de vários conjuntos de peças, cada um referente a um subconjunto, produto intermediário do produto final.

Assim, as peças necessárias à montagem de cada um dos diferentes subsistemas do produto final devem ser coletadas de suas localizações de armazenamento,

agrupadas e entregues separadamente à linha de produção. Não pode haver mistura de peças pertencentes a diferentes subsistemas.

Figura 2.1- Estrutura de produto

Este requisito apresentado ao almoxarifado desta manufatura de equipamentos médicos pode ser encontrado em outras indústrias, principalmente naquelas onde existem subsistemas complexos na estrutura do produto, como por exemplo, na montagem dos subsistemas de um avião. Outras indústrias, como a farmacêutica, podem ser obrigadas a utilizar a coleta por pedido de cliente, criando uma situação análoga à separação por subsistemas.

Cada conjunto de peças separadas para a produção de um determinado produto é apenas uma fração do conjunto total de peças estocadas no armazém. Dentro do armazém estão estocadas todas as peças que são utilizadas em todos os produtos fabricados pela empresa. No processo de coleta destas peças, o separador deve visitar somente as localizações de armazenamento para as quais existe demanda.

A localização de armazenamento é o espaço físico destinado à estocagem de matérias-primas, componentes, peças, produtos em processo ou mesmo produtos acabados. A demanda por um determinado componente pode ser atendida por separações de peças armazenadas em uma única localização de armazenamento ou por quantidades estocadas em mais de uma delas, dependendo da estratégia de armazenamento adotada pela empresa.

Todas as localizações de armazenamento de um armazém recebem um endereço, geralmente uma representação de sua localização geográfica. Por exemplo, uma peça armazenada no endereço C2-03 estaria localizada no lado esquerdo do segundo corredor (delimitado pelas faces C e D de coleta) na segunda estante e na terceira prateleira, conforme exemplifica a Figura 2.2.

Neste trabalho as expressões “componente(s)” e “peça(s)” serão utilizadas como sinônimos. As expressões “almoxarifado”, “armazém” e “centro de distribuição” serão utilizadas de forma intercambiável. A expressão “estoque” será utilizada quando o contexto se referir a uma quantidade física de material armazenado.

Ainda, serão considerados sinônimos as expressões “produto intermediário” e “subconjunto”. Abreviadamente, poderá se utilizar termo “PI” para a expressão “produto intermediário” e “PA” para a expressão “produto final” ou “produto acabado”.

Figura 2.2 - Exemplo de endereçamento em armazém

A coleta dos materiais nas localizações de armazenamento é realizada por um profissional chamado separador. O deslocamento do separador, passando por todas as localizações de armazenamento com itens a serem coletados, transforma-se em uma viagem de separação ou coleta de peças.

De acordo com Vaughan e Petersen (1999), o tempo de viagem gasto no deslocamento entre as localizações de armazenamento representa aproximadamente 50% do tempo total gasto na separação de uma lista de peças.

Determinar a seqüência de localizações de armazenamento de peças a ser visitada e qual é o caminho que o separador deve percorrer para que a separação seja feita com o menor deslocamento possível, é um procedimento chamado de planejamento de rotas de separação, ou roteirização. A seqüência de localizações a serem visitadas é então chamada de rota (Caron et al., 1998).

A roteirização das coletas de componentes em almoxarifados que alimentam linhas de produção é de extrema importância para o desenvolvimento de práticas operacionais que resultem em maior produtividade, menor tempo de coleta e menores custos.

O termo roteirização, embora não encontrado no dicionário da língua portuguesa, será utilizado como o equivalente do inglês “routing”, o qual descreve o processo de seqüências de paradas determinadas que um veículo deve percorrer, com o objetivo de atender pontos dispersos geograficamente (Cunha, 2000). Na roteirização da separação manual de peças, substitui-se na definição de Cunha (2000) o termo veículo pelo termo separador.

Considerando-se que o separador de componentes caminha com velocidade constante através dos corredores do armazém, o objetivo de minimizar o tempo da viagem de separação é equivalente a minimizar a distância percorrida ou o comprimento da rota, como destacaram Ratliff e Rosenthal (1983) e Hall (1993).

Para a resolução do problema da roteirização é necessário o entendimento do processo de separação e a análise das interferências entre os vários fatores que influenciam a formação das rotas. O primeiro fator é representado pelas estruturas do armazém, como por exemplo, o número de corredores de armazenamento e o número de corredores transversais; grupo que é genericamente chamado de “leiaute do armazém”. O segundo fator está relacionado às políticas operacionais que interferem na roteirização, como por exemplo, as regras de movimentação do separador. Finalmente têm-se os fatores relacionados à lista de separação propriamente dita, como por exemplo, o tamanho e a regra de agrupamento das peças a separar.

O processo de separação de peças em armazém de estocagem de matéria-prima tem início com o cálculo das necessidades de peças a serem utilizadas pela manufatura para a montagem dos produtos acabados.

A quantidade de cada peça a ser utilizada pela manufatura, a ser separada pelo almoxarifado, será igual à quantidade necessária para a produção de uma unidade do produto (de acordo com a estrutura do produto) multiplicada pelo número de unidades a serem produzidas.

Tome-se como exemplo a estrutura de subproduto de quarto nível, PAINEL INTERN. A estrutura determina que a peça LA25100203, por exemplo, seja utilizada quatro

vezes em sua montagem e, de acordo com o plano de produção, duas unidades deste subproduto devem ser produzidas. Desta forma, a lista de separação demandará 8 unidades desta peça - como mostra esquematicamente a Figura 2.3.

Figura 2.3 - Fluxo esquemático do processo de criação da lista de separação

Na mesma Figura 2.3 pode-se notar que cada lista de separação é formada por um conjunto de peças pertencentes a um mesmo produto intermediário, a qual já apresenta as localizações de armazenamento onde as peças estão endereçadas (como anteriormente apresentado, a localização de armazenamento é uma representação lógica do espaço geográfico do armazém).

O separador pode receber a lista de peças a separar num ponto fixo de início de rotas – neste caso chamado de ponto de início centralizado, ou receber as

informações, eletronicamente, em aparelhos de rádio-freqüência, sem que haja a necessidade da existência do ponto fixo de início – neste caso chamado de ponto de início descentralizado. Independentemente da forma com que a lista de separação é apresentada ao separador, ele deve visitar todas as localizações, na ordem a ele determinada, coletando as quantidades necessárias para então depositá-las no ponto de término de rota.

Na operação abordada por esse estudo, o ponto de início e o ponto de término da rota são um só, localizado no centro da região frontal aos corredores de separação. Um único ponto para o início e o término da rota torna mais rápido o início de uma nova viagem de coleta após o separador finalizar e entregar as peças coletadas na viagem anterior. Na Figura 2.4 pode-se observar um exemplo esquemático da localização central do ponto de início e término da rota.

Figura 2.4 – Localização central do ponto de início e término da rota de separação

Sumarizando a operação real do processo de separação objeto de estudo desta dissertação, trata-se de um almoxarifado de matéria-prima, estocando componentes leves e pequenos, os quais estão armazenados em prateleiras. Os corredores do armazém sob análise nesta dissertação são estreitos, sua largura permite que o separador, caminhando pela linha formada pelos pontos médios de sua largura, possa alcançar as duas faces de armazenamento, sem que haja a necessidade de movimentação lateral dentro desse corredor. A coleta de peças com baixo peso e volume pode ser feita manualmente, sem o auxílio de equipamentos motorizados. Os componentes estão acondicionados em caixas de papelão, as quais são

estocadas em prateleira, cuja altura admite que o separador alcance, sem a ajuda de equipamentos, qualquer material nelas armazenado, conforme apresentou Roodbergen (2001) e exemplifica a Figura 2.5. A caracterização descrita é a mesma adotada por autores com Hwang et al. (2004) e Caron et al. (1998) em seus estudos sobre roteirização em armazéns com separação manual de peças.

Figura 2.5 - Exemplo esquemático de corredores de separação estreitos

Sabendo-se das necessidades de peças a serem coletadas e de suas respectivas localizações de armazenamento, o problema da roteirização pode ser entendido como sendo a busca do caminho mais curto para que todas as localizações com peças a coletar sejam visitadas. Porém, é preciso assumir que cada separador trabalha em apenas uma ordem de separação por vez, como fizeram De Koster et al. (1999) e que, para cada viagem, o separador é capaz de carregar todo o material coletado (Ratliff e Rosenthal, 1983; De Koster et al., 1999).

Para a resolução do problema de roteirização da separação manual de peças abordado nesta dissertação será utilizado um algoritmo baseado em programação dinâmica apresentado por Roodbergen (2001), que representa uma extensão dos trabalhos de Ratliff e Rosenthal (1983). Roodbergen (2001) aplicou esse algoritmo em armazéns com as mesmas características do armazém objeto deste estudo, as quais serão detalhadas ao longo deste trabalho.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Introdução

Neste capítulo serão analisados os trabalhos identificados como mais relevantes dos autores que trataram o problema da roteirização da separação de materiais em armazém. Foram consultados trabalhos relacionados ao tema da separação manual de peças executada sem o auxílio de nenhum equipamento motorizado de coleta ou transporte, tais como empilhadeiras e carrinhos elétricos.

A grande maioria dos trabalhos utilizados como referência bibliográfica nesta dissertação veio das pesquisas a bancos de dados eletrônicos tais como o Portal de Periódicos da Capes e a biblioteca eletrônica EBSCO¹. Dentre os trabalhos encontrados sobre o tema, poucas foram as publicações nacionais. Assim, neste estudo, é clara a concentração de referências bibliográficas a trabalhos internacionais, principalmente europeus.

Um estudo bibliográfico inicial (feito a partir de 40 referências) indicou que o trabalho de Ratliff e Rosenthal (1983) é citado em 58% desses artigos (23 das 40 obras inicialmente pesquisadas). A alta frequência de citações está baseada no fato destes autores serem os pioneiros no estudo da roteirização da separação em armazém, distanciando este tipo de problema do clássico problema do caixeiro-viajante, como até então ele era resolvido.

O problema do caixeiro-viajante pode ser definido como o problema de encontrar o roteiro de menor distância ou custo que passa por um conjunto de cidades, sendo cada cidade visitada exatamente uma vez (Cunha, 2002). Devido à explosão combinatória inerente ao problema, ele faz parte de uma classe que se acredita ser insolúvel em tempo polinomial (Goldberg, 1989). A resolução de Ratliff e Rosenthal

¹ A EBSCO Information Services é líder no serviço de fornecimento de periódicos e livros eletrônicos, pacotes de periódicos eletrônicos e assinaturas de impressos, ferramentas de gerenciamento de recursos eletrônicos, bases de dados em texto completo e secundárias, e serviços relacionados para todos os tipos de bibliotecas, corporações e organizações de pesquisa.

(1983), baseada em programação dinâmica, subdivide o problema de roteirização em partes menores, diminuindo a complexidade do método de solução.

O estudo bibliográfico também mostra a alta frequência que o algoritmo descrito por esses autores foi tomado como base para outros estudos, como, por exemplo, De Koster e Poort (1998), Petersen (1999), Roodbergen (2001), Petersen e Aase (2003) e Hwang et al. (2004).

O Quadro 3.1 apresenta um resumo dos objetivos das obras dos principais autores que escreveram sobre a roteirização da separação manual em armazéns.

Quadro 3.1 – Principais obras analisadas

Trabalhos	Característica
Ratliff e Rosenthal (1983)	Determina algoritmo de solução do problema da roteirização da coleta manual de peças em armazém dissociando-o do problema do caixeiro viajante
Petersen (1997)	Avalia o impacto do leiaute e da localização do ponto de início e término das rotas nas políticas de roteirização
De Koster e Poort (1998)	Compara o desempenho das políticas de roteirização em armazéns com ponto de início sendo diferente do ponto de término das rotas
Petersen (1999)	Compara o desempenho de diferentes políticas de roteirização em relação aos armazenamentos randômico e segundo frequência de pedidos
Caron et al. (2000a)	Avalia o melhor leiaute para políticas de localização baseadas em espaço/ordens
Roodbergen (2001)	Desenvolve a heurística proposta por Ratliff e Rosenthal (1983) para armazéns com até três corredores transversais.
Petersen e Aase (2003)	Estuda a interação das políticas de roteirização, armazenamento e separação
Hwang et al. (2004)	Estuda o impacto das interações das políticas de roteirização associadas às políticas de armazenagem espaço/ordens.

Pode-se notar no Quadro 3.1 que os trabalhos mais recentes apresentam maior complexidade no objetivo dos estudos, os quais consideram maior número de variáveis, como por exemplo, as políticas operacionais e os leiautes.

Pelo fato de o trabalho apresentado por Ratliff e Rosenthal (1983) ter sido utilizado como base para muitos outros estudos, é por ele que essa dissertação inicia a revisão bibliográfica.

3.2. Revisão Bibliográfica

3.2.1. O trabalho de Ratliff e Rosenthal (1983)

Baseando-se nos conceitos relacionados à resolução do problema do caixeiro viajante, Ratliff e Rosenthal (1983) desenvolveram um algoritmo otimizador destinado a minimizar as distâncias percorridas ou o tempo gasto nas viagens de separação de peças em armazém retangular.

O armazém utilizado pelos autores é esquematicamente apresentado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Representações de um centro de distribuição: corredores e grafo
Fonte: Ratliff e Rosenthal (1983)

O lado esquerdo da Figura 3.1 mostra uma representação de um armazém com seis corredores de separação e dois corredores transversais, um frontal e outro traseiro. As localizações marcadas em preto representam localizações que devem ser

visitadas pelo separador para a coleta de peças, sendo então chamadas de vértices ou nós.

O lado direito da Figura 3.1 mostra o mesmo subconjunto de localizações a serem visitadas, agora na forma de um sub-grafo. Neste sub-grafo, cada linha conectando dois nós representa um arco, uma ligação, um possível caminho a ser feito pelo separador conectando estes dois pontos de coleta (Ratliff e Rosenthal, 1983). Na separação de peças em armazém, o sub-grafo deve sempre incluir o nó de início e término das rotas, também chamado de I/T . No esquema apresentado por Ratliff e Rosenthal (1983), I/T é apresentado como vértice v_0 , forma como foi apresentado na Figura 3.1.

Cunha (2000) aponta que nas formulações matemáticas de problemas de roteirização de veículos pressupõe-se ser conhecido um grafo ou rede $G=(N, A)$ composto de um conjunto de nós N , que representa um conjunto de pontos a serem atendidos e a base onde se localizam os veículos, e um conjunto de arcos A , representando as ligações entre todos os pares de nós em N , para os quais são conhecidas as distâncias.

Utilizando-se da descrição de Cunha (2000) para o problema da separação manual de peças em armazém tem-se que o termo “nó” denomina, genericamente, uma localização de armazenamento ou o ponto de início/término da rota. Mais especificamente, quando existir um único ponto tanto para o início quanto para o término da rota, esse é denominado I/T . Quando o ponto de início for diferente do ponto de término, existirão dois vértices diferentes, o vértice I e o vértice T , separados.

A existência de a_j e b_j , como mostra a Figura 3.1, se dá pelo fato da distância entre o final do corredor de separação e o meio do corredor transversal ser admitida como pertencente ao corredor de separação (Roodbergen, 2001).

A Figura 3.2 apresenta, esquematicamente, onde estes vértices imaginários se localizariam. Estas distâncias devem ser consideradas no cálculo de comprimento

da rota, pois impactam na distância total percorrida, no tempo de separação e no cálculo da capacidade de separação do sistema.

Neste estudo a seguinte notação é utilizada:

- a_j representa o extremo final do corredor j ($j = 1, 2, 3, \dots, n$)
- b_j representa o extremo frontal do corredor j ($j = 1, 2, 3, \dots, n$)
- v_i representa a localização a ser visitada i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)

Figura 3.2 - Representação gráfica de armazém (adaptação de Roodbergen, 2001)

Todos os corredores do armazém são numerados da esquerda para a direita. A construção da rota inicia-se pela formação dos sub-grafos parciais equivalentes à rota para o corredor 1. A seguir, se constrói os sub-grafos equivalentes do corredor 2 conectando-os com os sub-grafos do corredor anterior. Seleciona-se o melhor conjunto contendo os dois sub-grafos dos corredores n e $n-1$, ou, analogamente, formando a melhor rota.

Os próximos corredores são adicionados à rota utilizando-se da mesma lógica: criação de sub-grafos, adição e seleção da melhor rota parcial. O processo termina quando o sub-grafo referente ao último corredor com itens a serem coletados é conectado ao sub-grafo parcial $n-1$. Forma-se neste momento o sub-grafo contendo todos os vértices a serem visitados, originando a rota completa do separador.

Para se determinar um sub-grafo deve-se primeiro determinar que N é um conjunto finito dos vértices de G [$G=(N, A)$ de acordo com definição de Cunha (2000)], e E como a coleção de pares de vértice (i, j) ; tem-se que cada par $(i, j) \in E$ é denominado de aresta ou arco de ligação.

Chamando-se de $Adj(i)$ o conjunto de adjacências de (i) , tem-se

$$(i, j) \in E \text{ se e somente se } j \in Adj(i)$$

Assim, um sub-grafo de G é simplesmente um grafo tal que todos os seus vértices pertencem a $V(G)$ e todas suas arestas pertencem a $E(G)$, como explicou Carvalho (2001).

Os sub-grafos de separação de peças não admitem laços, mas admitem arestas múltiplas. Ainda, seus vértices são orientados, caracterizando suas arestas como arcos de ligação (Carvalho, 2001).

Estes sub-grafos formam as rotas de separação de tal forma que o número de chegadas a cada vértice (localização de coleta ou I/T) é igual ao número de partidas. Ainda, uma rota de separação é um ciclo no grafo G contendo todos os vértices da rota e cada arco de ligação ou aresta é utilizada no máximo uma vez (Ratliff e Rosenthal, 1983).

Utilizando-se dos teoremas dos gráficos Eulerianos apresentados a seguir, Ratliff e Rosenthal (1983) criaram os possíveis grafos equivalentes para coletas de itens em um corredor de separação, o qual chamaram de sub-grafo L_j para $j= 1, 2, \dots, n$, com j representando o número do corredor.

Teorema 1 – Um subgrafo $T \subset G$ será um sub-grafo se e somente se (a) todos os vértices v_i para $i = 1, 2, \dots, m$, forem positivos em T (b) excluindo-se vértices de grau zero, T continua conectado e (c) cada vértice em T_j têm grau zero ou par (Ratliff e Rosenthal, 1983). O grau (ou valência) de um vértice v_i de G é o número de arestas incidentes em v_i (Carvalho, 2001).

Corolário 1.1 – Uma rota mínima (sub-grafo de mínimo comprimento) não contém mais de dois arcos entre qualquer dos pares de vértices adjacentes.

Corolário 1.2 - Se (P, P') forem os nós criados pela partição de um sub-grafo, existe número par de arcos terminando P e número par de arcos terminando em P' .

Teorema 2 – As condições necessárias e suficientes para o sub-grafo $T_j \subset L_j$ ser uma rota parcial de L_j são:

- (i) Para todo vértice de $v_i \in$ em L_j o grau de v_i é positivo em T_j ;
- (ii) Todo vértice em T_j , com possível exceção para os extremos a_j e b_j , têm grau par ou zero
- (iii) Excluindo-se os vértices com grau zero, T_j pode não ter vértice conectado, ter um único vértice conectado no mínimo a um dos extremos do corredor, ou ter dois vértices conectados, sendo um vértice conectado ao extremo a_j e outro ao extremo b_j

Teorema 3 – Duas rotas parciais de L_j , T_j^1 e T_j^2 , serão equivalentes se

- (i) a_j e b_j têm mesmo grau de paridade nas duas rotas parciais T_j^1 e T_j^2
- (ii) Excluindo-se os vértices de grau zero, ambos, T_j^1 e T_j^2 , não têm nenhum vértice conectado, ambos têm um único vértice contendo no mínimo um dos extremos do corredor, ou ambos têm dois vértices conectados um ao extremo a_j e outro ao extremo b_j

Corolário 3.1 – os únicos sete possíveis sub-grafos equivalentes para um sub-grafo L_j , são (ímpar, ímpar, 1 ciclo), (zero, par, 2 ciclos), (par, zero, 2 ciclos), (par, par, 1 ciclo), (par, par, 2 ciclos), (zero, zero, zero ciclos) e (zero, zero, 1 ciclo). Considerando que na notação (a, b, c) , a

representa o grau do vértice a_j , b representa o grau do vértice b_j , e, c é o número de ciclos contidos no sub-grafo.

- a. (zero, zero, zero ciclos) só é possível se não existir corredores com itens a serem coletados
- b. (zero, zero, 1 ciclo) só é possível se o item estiver à esquerda de a_j e de b_j e o sub-grafo não contiver nenhum deles

Corolário 3.2 – se $T_j = L_j$, for o sub-grafos equivalente de menor distância para um corredor e C_j o tour complementar de T_j de menor distância, o sub-grafo $T_j \cup C_j$ será a rota de menor distância para G

A partir das teorias dos gráficos Eulerianos, existem seis sub-grafos equivalentes para a coleta de itens num determinado corredor pertencente a um grafo com vértices a visitar, como mostra a Figura 3.3.

Figura 3.3 – Sub-grafos equivalentes para separação dentro de um corredor
Fonte: Ratliff e Rosenthal, 1983

Os seis sub-grafos representam diferentes rotas de coleta passando por todos os vértices do corredor e se utilizando apenas uma vez de cada arco de ligação. A rota

final será traçada pela união dos sub-grafos de menor distância utilizados para cada corredor.

No sub-grafo tipo (I) o separador entra no corredor com itens a separar e sai pelo extremo oposto pelo qual entrou. Nos sub-grafos tipo (II) e (III) o separador entra no corredor com itens a separar, caminha até o item mais distante deste extremo, e retorna para deixar o corredor pelo mesmo extremo pelo qual chegou. No sub-grafo tipo (IV) o separador visita duas vezes o mesmo corredor, entrando e saindo, uma vez por cada uma de suas extremidades. O sub-grafo tipo (V) representa o separador caminhando duas vezes todo comprimento do corredor enquanto o sub-grafo tipo (VI) representa um corredor sem itens a serem coletados.

Como apresentado por Ratliff e Rosenthal (1983) no Teorema 1, para um sub-grafo $T_j \subset G$ ser um sub-grafo de G , todos os vértices em T_j têm grau zero ou par. Para unir dois sub-grafos representando a coleta nos corredores, a mesma regra deve ser seguida. Logo as conexões entre corredores de separação apresentadas na Figura 3.4 tornam-se as únicas possíveis.

Na conexão do tipo (i) o separador muda de corredor de separação utilizando-se de um dos corredores de transição e retorna pelo corredor de transição oposto aquele anteriormente utilizado. Nas conexões do tipo (I) e (III) o separador muda de corredor de separação e retorna até ele utilizando-se do mesmo corredor de transição pelo qual já passou. A conexão do tipo (IV) representa rotas onde o separador precisou caminhar duas vezes por cada extremo de um corredor j , utilizando, em cada uma delas, do mesmo corredor de transição para a ida e a volta. A conexão do tipo (V) mostra corredores, ou sub-grafos, que não precisaram ser conectados.

O algoritmo apresentado pelos autores reduz a dificuldade computacional para a solução do problema de roteirização de coleta manual de peças em armazém, o qual apresenta dificuldade polinomial (*NP-difícil*) em relação às localizações de armazenamento e corredores a serem visitados (Roodenberg, 2001). Está provado em Cornuéjols et al. (1985) que a solução de Ratliff e Rosenthal (1983) resolve o

problema da roteirização da separação para a classe de problemas em armazéns retangulares com apenas dois corredores de transição, um frontal e outro traseiro.

Figura 3.4 – Possíveis conexões entre corredores de separação
Fonte: Ratliff e Rosenthal (1983)

Para armazéns com um único bloco de corredores de separação, corredores transversais frontais e traseiros e vértice *I/T* no centro do corredor transversal frontal, o algoritmo apresentado por Ratliff e Rosenthal (1983) é considerado otimizante por todos os autores pesquisados, como por exemplo, De Koster e Poort (1998) e Roodenberg (2001).

Para a resolução do problema, autores como Ratliff e Rosenthal (1983) e Roodbergen (2001) assumiram que o separador caminha em velocidade constante e a largura do corredor é considerada desprezível, desta forma o separador pode alcançar os itens armazenados nas prateleiras opostas do corredor, sem a necessidade de deslocamentos laterais. Consideraram ainda que o volume a coletar é sempre menor que a capacidade de transporte do separador.

Ratliff e Rosenthal (1983) apresentaram uma nova abordagem para a resolução do problema da roteirização das coletas em armazém. Entretanto, tal resolução só se

aplica a armazéns com dois corredores transversais, o que limita sua aplicação em situações reais.

3.2.2. O trabalho de Petersen (1997)

Petersen (1997) estruturou seu estudo para avaliar os resultados de cinco políticas de roteirização em relação ao resultado do algoritmo desenvolvido por Ratliff e Rosenthal (1983). Assim, seis diferentes algoritmos de roteirização foram aplicados em leiautes com diferentes localizações do ponto de início e término da rota e com diferentes tamanhos de listas de separação.

Em cada rota de separação apenas uma ordem foi coletada, evitando qualquer benefício da consolidação de ordens numa mesma viagem de coleta, o que poderia aumentar a concentração de itens em determinados corredores. Tal concentração criaria uma tendência para a rota cruzar totalmente um corredor, favorecendo, neste caso, a política de Passagem, caracterizada mais adiante.

As cinco políticas de roteirização podem ser entendidas como padrões ou regras pré-determinadas de direção de movimentação. Esses padrões determinam, por exemplo, o ponto do corredor até onde o separador pode se deslocar ou o extremo pelo qual ele deve deixar um corredor de separação.

Petersen (1997) aplica esses padrões de movimentação como regras nas cinco formulações matemáticas que buscam desenvolver a melhor rota de separação seguindo políticas fixas para o deslocamento do separador. O algoritmo de Ratliff e Rosenthal (1983) é o mesmo apresentado na seção 3.2.1 desta dissertação.

As cinco políticas de roteirização utilizadas por Petersen (1997) estão descritas a seguir; nas figuras apresentadas, as localizações de armazenamento assinaladas com a letra P representam posições de armazenamento para as quais existe um pedido de coleta e as setas representam o traçado das rotas.

1. Passagem – quando o separador entra por um extremo do corredor e sai pelo extremo oposto do mesmo corredor com peças coletadas. Não é permitido ao

separador, sair pelo mesmo extremo do corredor pelo qual entrou, como evidencia a Figura 3.5.

Figura 3.5 - Políticas de roteirização de Passagem (Petersen, 1997)

2. Retorno – o separador entra e sai pelo mesmo extremo de um corredor contendo componentes a serem separados, independentemente da distância destes itens até o extremo pelo qual ele entrou, como mostra a Figura 3.6.

Figura 3.6 - Políticas de roteirização de Retorno (Petersen, 1997)

3. Ponto Médio – o separador entra em um corredor com peças a serem separadas, caminha até, no máximo, o ponto médio entre as extremidades e retorna para sair desse corredor pela mesma extremidade pela qual entrou, conforme Figura 3.7.

Figura 3.7 - Políticas de roteirização de ponto médio (Petersen, 1997)

4. **Maior Distância** – o separador entra num corredor com peças a separar e caminha até a localização de maior distância em relação ao próximo vértice de coleta ou ao vértice do extremo oposto do corredor. Depois da coleta, o separador, retorna para sair pelo mesmo extremo pelo qual entrou. Caso a maior distância seja entre itens a coletar, o corredor será visitado duas vezes, uma vez por cada extremo. A maior distância se refere à porção não percorrida do corredor, como ilustra a Figura 3.8.

Figura 3.8 - Políticas de roteirização de maior distância (Petersen, 1997)

5. **Composta** – combina a estratégia de Passagem e a estratégia de Retorno, minimizando a distância entre o último item coletado em um corredor e o primeiro a ser separado no próximo, conforme esquema da Figura 3.9.

Figura 3.9 - Políticas de roteirização de composta (Petersen, 1997)

O autor também considerou em seu experimento duas possibilidades para a localização do ponto de início/término da rota, 5 tamanhos de listas de separação e 4 diferentes leiautes de armazém (diferentes relações largura x profundidade), como mostra o Quadro 3.2. A utilização dos diferentes leiautes de armazém busca estudar o impacto do comprimento e do número de corredores de armazenamento no comprimento total da rota.

Os armazéns experimentalmente criados utilizam-se da separação manual de itens e largura de corredor desprezível quanto ao deslocamento lateral para a coleta em faces opostas. A velocidade de deslocamento do separador foi assumida como constante; a política de endereçamento utilizada foi a randômica.

Na estratégia de localização aleatória, a determinação da localização que um item irá ocupar no armazém é aleatória, quando um novo item deve ser localizado, ele é direcionado a qualquer uma das posições de armazenamento desocupadas, independentemente de sua localização no armazém.

O autor conclui que a utilização da estratégia de roteirização Composta gera rotas, em média, 8,9% maiores que aquelas obtidas pelo algoritmo de Ratliff e Rosenthal (1983) e, quando a estratégia de Retorno é utilizada, tais rotas são 41,1% maiores que o algoritmo considerado como base de comparação.

Quadro 3.2 – Cenários estudados por Petersen (1997)

Característica	Opções
Lógica de roteirização	Política Composta, Maior Distância, Ponto Médio, Retorno, Passagem e o algoritmo desenvolvido por Ratliff e Rosenthal (1983)
Localização do ponto de I/T	Centro da região frontal da área de armazenamento Extremo da região frontal da área de armazenamento
Proporção largura x profundidade	3 x 1, 2 x 1, 1 x 1, 1 x 2
Tamanho da lista de separação	5, 15, 25, 35 e 45

O estudo também mostrou que, mantendo-se o leiaute do armazém, quanto maior o número de itens a serem coletados numa mesma rota de separação, melhor será o desempenho das heurísticas que utilizam a política de roteirização de Passagem. Nesta situação, o desempenho das políticas Composta, Maior Distância, Ponto Médio e Retorno são similares ao desempenho do algoritmo desenvolvido por Ratliff e Rosenthal (1983).

A variação do posicionamento do ponto de início/término (no centro ou no extremo da região frontal da área de armazenamento) teve pouco impacto no comprimento das rotas. O posicionamento central resultou em rotas, em média, 0,9% mais curtas.

Para todas as políticas de roteirização utilizadas e também para o algoritmo de Ratliff e Rosenthal (1983), armazéns mais profundos que largos apresentam rotas mais curtas que armazéns mais largos que profundos.

A importância desta obra está no fato de o autor estudar as interações entre os leiautes de armazém, políticas de roteirização e tamanhos de listas de separação, podendo afirmar que mesmo o melhor conjunto analisado em seu experimento apresenta rotas, em média, 5% mais compridas que aquelas geradas pelo algoritmo desenvolvido por Ratliff e Rosenthal (1983).

Entretanto as rotas formadas pelas políticas de roteirização são mais fáceis de serem entendidas. Rotas difíceis de serem entendidas podem fazer com que o

separador não as siga, se perca, ou mesmo se esqueça de localizações que deveriam ser visitadas.

Correlacionando este estudo com o trabalho de Ratliff e Rosenthal (1983) nota-se que o algoritmo demonstrou melhores resultados em relação às políticas de roteirização, mesmo quando o ponto de I/T esteve descentralizado no corredor transversal frontal.

Pelos resultados encontrados por Petersen (1997), conclui-se que, caso não exista uma política definida de alocação de itens, isto é, a alocação é aleatória, o algoritmo de Ratliff e Rosenthal (1983) retorna melhores resultados que as políticas de roteirização, cujos resultados dependem de determinadas políticas de localização.

3.2.3. O trabalho de De Koster e Poort (1998)

O objetivo do trabalho de De Koster e Poort (1998) é avaliar o desempenho de uma variante do algoritmo de Ratliff e Rosenthal (1983). Para testar o desempenho do algoritmo modificado, os autores compararam seus resultados com os resultados da política de roteirização de Passagem em três diferentes cenários:

- a. coleta de itens armazenados em paletes e I/T centralizado
- b. coleta de itens armazenados em prateleiras e I/T descentralizado
- c. coleta de itens armazenados em prateleiras e I/T centralizado

Dentre os cenários utilizados, apenas a opção c - coleta de itens armazenados em prateleiras e I/T centralizado - têm relevância para esta dissertação, pois apresenta as mesmas características do problema real objeto desta pesquisa.

A variante do algoritmo desenvolvido por Ratliff e Rosenthal (1983) criou novas opções de conexão entre dois corredores, sempre mantendo as características necessárias e suficientes para a formação de sub-grafos equivalentes. As conexões estudadas por De Koster e Poort (1998) são apresentadas na Figura 3.10.

Nas opções de conexão entre corredores paralelos de separação apresentadas na Figura 3.10, vértices conectados por apenas uma aresta representam uma única passagem do separador por esta parte do armazém. Vértices conectados por dois arcos paralelos caracterizam que o separador passa duas vezes por este trecho do corredor de transição, enquanto vértices sem conexões representam que o separador não se utilizou desta possibilidade de transição.

Figura 3.10 – Conexão de corredores paralelos segundo De Koster e Poort (1998)

Comparando essas opções com aquelas apresentadas por Ratliff e Rosenthal (1983), observa-se que as conexões (1), (2), (3) e (4) são adições ao algoritmo original. Tais adições representam novas possibilidades para a formação de rotas.

Os autores consideraram o deslocamento do separador sendo feito em velocidade constante, a largura do corredor sendo desprezível em relação a movimentos laterais para a coleta de itens em prateleiras opostas e apenas uma ordem sendo separada em cada viagem de coleta – não existe nenhum tipo de consolidação de ordens de separação para melhorar o desempenho da rota.

Para o leiaute c, quatro cenários foram propostos e, para um deles, a média de itens por corredor pôde ser calculada. Independente desta média (concentração) que varia de 1,0 a 1,87 itens por corredor, as rotas formadas pela extensão do algoritmo de Ratliff e Rosenthal (1983) obtiveram melhores resultados, como mostra a Tabela 3.1.

Os resultados mostram que o aumento na concentração de itens por corredor diminui a vantagem da utilização do algoritmo estendido de Ratliff e Rosenthal (1983) sobre o algoritmo de Passagem. Tal situação se dá pelo fato de que maiores concentrações de itens em um mesmo corredor aumentam o benefício de atravessá-lo totalmente.

Tabela 3.1 - Tempo médio de viagem para armazém com I/T centralizado.

		<u>Configuração</u>		<u>Tempo Médio de Viagem (em minutos)</u>			<i>Média de Itens por Corredor</i>
		Corredores	Itens	Extensão de Ratliff e Rosenthal (1983)	Passagem	Diferença %	
Cenários	1	8	10	4,87	6,45	32,4	1,25
	2	8	15	5,87	7,43	26,6	1,87
	3	10	10	5,46	7,33	34,2	1,00
	4	10	15	6,64	8,63	30,0	1,50

Fonte: De Koster e Poort (1998)

Os autores também concluem que podem existir vantagens na utilização da política de Passagem quando o tempo para se entrar e sair de um corredor for alto. Tal situação tem maior aplicação para viagens de coletas que utilizam veículos motorizados, os quais devem desacelerar nas entradas e saídas dos corredores, aumentando o tempo da rota. Assim, a vantagem é proveniente do fato da política de Passagem entrar e sair apenas uma vez de cada corredor visitado enquanto o algoritmo pode determinar mais de uma entrada num mesmo corredor de separação.

O algoritmo de De Koster e Poort (1998) é eficiente para problemas de coleta manual de itens em armazéns com apenas dois corredores transversais e I/T centralizado.

Após a análise do trabalho apresentado por De Koster e Poort (1998) conclui-se que a concentração de coletas por corredor pode ser fator decisivo na determinação do melhor algoritmo de roteirização para uma determinada situação. Assim, é importante que este fator seja analisado durante os estudos do problema real que esta dissertação tem com objetivo resolver.

3.2.4. O trabalho de Petersen (1999)

Diferentemente dos outros autores que se utilizaram somente da alocação randômica dos itens nas localizações de armazenamento, Petersen (1999) utiliza também a alocação baseada no quociente espaço/ordens. O autor tem como objetivo comparar o impacto das duas estratégias de armazenamento no processo de roteirização da coleta.

Hwang et al. (2004) afirmam que a relação espaço/ordens representa o quociente do espaço de armazenamento necessário para o atendimento da demanda de um determinado item, dividido pela frequência de ordens que recebe. Os itens com menores valores para este quociente devem ser armazenados nas regiões específicas a eles, de acordo com a estratégia adotada. (Hwang et al., 2004);

Três diferentes estratégias para se localizar os itens de baixo quociente espaço/ordens foram apresentadas por Caron et al. (1998):

- a. Estratégia Frontal – itens são endereçados nas localizações mais próximas do extremo inicial dos corredores de separação, aquele mais próximo do ponto de início/término
- b. Central – itens são endereçados nas localizações pertencentes aos corredores centrais do armazém
- c. Extremo – itens são endereçados nas localizações próximas aos dois extremos dos corredores de separação

Exemplos esquemáticos das estratégias de localização espaço/ordens se encontram na Figura 3.11. Na Figura 3.11 as regiões assinaladas com a letra A são destinadas à alocação de itens com baixo quociente espaço/ordens, as regiões demarcadas com a letra B correspondem àquelas reservadas aos itens de valor mediano no quociente espaço/ordens, e as regiões demarcadas com a letra C são destinadas aos itens com alto quociente espaço/ordens.

Em seu estudo, Petersen (1999) optou por situar diagonalmente as regiões de alocação dos itens em relação ao quociente espaço/ordens, como mostra o esquema do lado esquerdo da Figura 3.12. O lado direito da mesma figura mostra a

abordagem Central, utilizada por autores como Caron et al. (1998), De Koster et al. (2006) e Hwang et al. (2004). Para ressaltar as distâncias médias dos itens de baixo quociente espaço/ordens nas duas opções, linhas pontilhadas foram acrescentadas às figuras apresentadas por Petersen (1999).

Figura 3.11 – Estratégias para armazenamento espaço/ordens (Hwang et al., 2004)

Figura 3.12 - Regiões de armazenagem espaço/ordens - adaptação de Petersen (1999)

Utilizando-se da alocação diagonal para armazém com I/T central, espera-se uma redução na distância média entre I/T e os itens com baixo quociente espaço/ordens em relação à alocação central desses itens.

Para avaliar o impacto da mudança na política de armazenamento, Petersen (1999) utiliza-se de um armazém com características semelhantes aos utilizados por outros autores. O armazém é composto por 10 corredores paralelos e dois corredores transversais (um na região frontal e outro nos fundos da área de armazenagem). A coleta das peças é feita com o separador caminhando pela linha formada pelos

pontos médio da largura do corredor e o ponto de início/término da rota é localizado no centro da região frontal da área de armazenamento. A velocidade de deslocamento do separador é constante e igual a 47,7 metros por minuto (2,8 km/h).

O experimento de Petersen (1999) analisou 588 cenários (4 tipos de roteirização, vezes 3 estratégias de localização, vezes 49 tamanhos de lista de separação) para os quais foram geradas 500 listas de separação com itens aleatoriamente selecionados, totalizaram-se 294.000 experimentos. Os cenários estudados por Petersen (1999) estão sumariamente apresentados no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Cenários estudados por Petersen (1999)

Característica	Opções
Lógica de roteirização	Política Composta, Maior Distância, Passagem e o algoritmo desenvolvido por Ratliff e Rosenthal (1983)
Localização do ponto de I/T	Central
Políticas de armazenagem	Diagonal, Central e Randômica
Número de itens a separação	De 2 até 50 itens com incrementos unitários

Diferentemente de outros autores que consideravam somente o tempo de viagem nos estudos sobre roteirização, Petersen (1999) também considera para a função objetivo o tempo necessário para o separador identificar o item requisitado e coletá-lo da prateleira, tempo que assumiu ser igual a 0,25 minutos por localização, independentemente da quantidade ou das características físicas desse item a separar. Tal determinação impossibilita a comparação direta dos resultados desse experimento com outros já desenvolvidos.

O autor conclui que, utilizando-se da alocação diagonal dos itens, as políticas de roteirização Composta e Maior Distância têm resultados apenas 1,5% inferiores ao algoritmo de Ratliff e Rosenthal (1983).

Quando o número de localizações a visitar chega a 50, a diferença entre as políticas de Passagem e Ratliff e Rosenthal (1983) chegou a 1%, como ressaltado pelo autor.

Pode-se concluir pelos experimentos do autor que existem vantagens associadas à alocação baseada no quociente espaço/ordens, mais especificamente, na alocação diagonal. Entretanto tal vantagem só é traduzida em resultados quando a política de roteirização for compatível com a política de localização. Assim, para armazéns com alocação randômica de itens, o algoritmo de Ratliff e Rosenthal (1983) ou seus derivados, apresentam melhores resultados.

3.2.5. O Trabalho de Caron et al. (2000a)

Caron et al. (2000a) apresentam um modelo analítico para estudar o impacto do número e da extensão dos corredores de separação em operações utilizando-se da estratégia de roteirização de Passagem.

Quanto à consolidação de ordens, o estudo apresenta situações de consolidação de várias ordens em uma única lista de separação e situações onde não há consolidação alguma de ordens. Em relação à política de armazenamento, os autores utilizaram-se tanto da randômica quanto daquela baseada no quociente espaço/ordens.

O objetivo desses autores é determinar o melhor número e comprimento dos corredores de separação. Três diferentes leiautes de armazém foram apresentados, sendo o primeiro caracterizado por corredores de separação paralelamente alinhados em relação à lateral do armazém que contém o ponto de início/término da rota (I/T), como mostra a Figura 3.13.

Figura 3.13 – Armazém com alinhamento paralelo entre I/T e corredores de separação

O segundo leiaute apresentado é similar àquele que é objeto de pesquisa desta dissertação, com corredores de separação perpendiculares à lateral do armazém contendo o ponto de início e término da rota, o qual está posicionado no centro da região frontal aos corredores de separação.

O terceiro leiaute apresentado difere do segundo em relação à localização do ponto de início e término da rota, o qual, neste terceiro leiaute, está localizado em um dos extremos da região frontal, como apresentado na Figura 3.14. Os autores afirmam que as conclusões por eles alcançadas podem ser aplicadas aos três leiautes descritos.

Figura 3.14 - Ponto de início/término da rota localizado na extremidade da área frontal

Os resultados dos estudos realizados pelos autores mostram que o melhor leiaute para uma determinada situação sofre forte influência das políticas operacionais escolhidas e da frequência de separação dos itens. Concluem que o número ótimo de corredores de separação para um armazém será sempre dependente das políticas operacionais, principalmente da consolidação de ordens e políticas de armazenamento.

Entretanto, como regra geral, o menor número possível de corredores de separação parece ser a melhor opção (Caron et al., 2000a) quando a distância média entre duas localizações adjacentes (comprimento total de corredores de separação dividido pelo número de localizações a serem visitadas em cada rota) for pequena,

ou quando existir alta concentração de visitas a poucas localizações de armazenamento.

Na Tabela 3.2 pode-se observar qual é o comprimento ótimo de corredor de separação (em metros) em função do número de localizações pertencentes à rota (N), assumindo que todas as localizações têm a mesma probabilidade de serem visitadas (não existe concentração de demanda em determinados itens).

Tabela 3.2 – Comprimento ótimo de corredor

		Soma dos comprimentos dos corredores (metros)									
N		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Número de itens a coletar	5	8,3	10	11	13	14	15	16	17	17	19,2
	10	8,3	8,3	9,4	11	11	13	13	14	15	15,6
	15	13	10	9,4	10	11	12	13	13	13	13,9
	20	25	10	9,4	10	10	11	12	12	13	13,9
	25	25	13	11	10	10	11	11	11	12	12,5
	30	25	13	11	10	10	11	11	11	11	11,9
	35	25	50	11	10	10	11	10	11	11	11,4
	40	25	50	13	11	10	11	10	11	11	11,4
	45	25	50	75	11	10	11	10	11	11	10,9
	50	25	50	75	13	11	11	10	11	11	10,9
	55	25	50	75	14	11	11	11	11	11	10,9
	60	25	50	75	100	13	12	11	11	11	10,9
	65	25	50	75	100	13	12	11	11	11	10,9
	70	25	50	75	100	125	13	12	11	11	10,9
	75	25	50	75	100	125	13	12	11	11	10,9
	80	25	50	75	100	125	14	13	12	11	10,9
85	25	50	75	100	125	150	13	12	11	10,9	
90	25	50	75	100	125	150	13	12	11	11,4	
95	25	50	75	100	125	150	175	13	12	11,4	
100	25	50	75	100	125	150	175	13	12	11,4	

Fonte: Caron et al. (2000a)

Analisando a Tabela 3.2, pode-se dizer que para o problema específico que essa dissertação busca solucionar, mantendo-se a densidade de itens armazenados e a aleatoriedade das coletas, existe a possibilidade de se ampliar o armazém para até 12 corredores (100 metros totais / 8,3 metros por corredor) sem que haja aumento no comprimento da rota uma vez que 31 das 34 listas de separação contém menos de 15 itens a separar e a média de itens por lista é 5.

3.2.6. O trabalho de Roodbergen (2001)

Tomando com base o algoritmo de Ratliff e Rosenthal (1983), Roodbergen (2001) desenvolveu formulação matemática baseada em programação dinâmica, também eficiente, aplicável à roteirização de coleta manual de partes em armazéns com até três corredores transversais.

Roodbergen (2001) destaca o fato de a solução apresentada ser um algoritmo do tipo programação dinâmica. O algoritmo soluciona, corredor a corredor, cada necessidade de ligação de vértices; lógica diferente das programações não dinâmicas, as quais sempre comparam todas as possíveis conexões entre todos os vértices, para depois selecionar a melhor sequência de visitas.

Utilizando-se da programação dinâmica, a rota ótima é construída a partir de ótimas soluções para cada corredor n , o qual é então adicionado ao sub-grafo parcial anteriormente criado até o corredor $n-1$. A adição do último corredor, o corredor r (nomenclatura utilizada pelo autor para determinar o corredor mais a direita do armazém) forma a rota a ser percorrida, a qual se inicia em ℓ (corredor mais a esquerda) e inclui todos os corredores com localizações a serem visitadas.

Toscani e Veloso (2001) apresentam três características de um algoritmo baseado na programação dinâmica:

- a. Utilizando a programação dinâmica, pode-se diminuir a complexidade da busca da solução de um problema de exponencial para uma ordem polinomial.
- b. A programação dinâmica reduz o número de possíveis combinações eliminando as que sabidamente não poderão fazer parte de uma solução ótima do problema.
- c. É aplicável aos problemas de otimização com a seguinte propriedade de otimalidade. “Uma solução não ótima de um subproblema não pode ser subsolução da solução ótima desse problema”.

Outro ponto destacado por Roodbergen (2001) em relação a essa solução é a linearidade do esforço computacional em relação ao aumento do número de localizações de armazenamento a serem visitadas. A linearidade do esforço computacional é consequência da forma de operar da programação dinâmica, que não compara a distância de todos os nós em relação à população de nós remanescente, mas trabalha corredor a corredor. Por exemplo, a adição de um nó em um corredor terá reflexo na solução local (deste corredor) não aumentando o tempo e a complexidade de solução de outros corredores a serem roteirizados.

O ponto de início/término da rota está localizado num extremo da região frontal aos corredores de separação. O tamanho da lista de separação não foi determinado, tampouco foi determinada a capacidade de carga do separador.

Nesse estudo, Roodbergen (2001) adota a seguinte notação:

- a_j representa o extremo final do corredor j ($j = 1, 2, 3, \dots, n$)
- b_j representa o extremo frontal do corredor j ($j = 1, 2, 3, \dots, n$)
- v_i representa a localização a ser visitada i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)
- d representa o ponto de início e término da rota
- ℓ representa o corredor mais a esquerda com item a ser coletado
- r representa o corredor mais a direita com item a ser coletado

Da mesma forma como fez Ratliff e Rosenthal (1983), Roodbergen (2001) determina que todos os corredores sejam numerados, seqüencialmente, da esquerda para a direita. Os possíveis movimentos para a criação de arcos conectando vértices internos aos corredores de separação e conectando estes corredores entre si também foram determinados, como mostra a Figura 3.15 onde:

- t_a o separador muda de corredor de separação pelo extremo final
- t_b o separador muda de corredor de separação pelo extremo frontal
- t_1 o separador atravessa totalmente o corredor

- t_2 o separador não entra no corredor pois não existem itens a separar que estejam localizados nesse corredor
- t_3 o separador entra e sai pelo extremo frontal do corredor
- t_4 o separador entra e sai pelo extremo final do corredor

Na resolução apresentada a rota sempre se iniciará com o separador se deslocando do ponto de início da rota até o extremo frontal do corredor mais à esquerda que contiver itens a serem separados – corredor ℓ . Chegando a esse corredor, o separador deverá visitar todas as localizações com necessidade de coleta.

Para as coletas pertencentes ao corredor ℓ surgem dois possíveis sub-grafos equivalentes ou duas rotas que passam pelas localizações com itens a coletar nesse corredor. O separador pode cruzar totalmente esse corredor (sub-grafo tipo t_1 na Figura 3.15) ou pode retornar, saindo pelo mesmo extremo do corredor pelo qual entrou (sub-grafo tipo t_3 na Figura 3.15). Utilizando-se do sub-grafo (t_1), a rota continua a partir de a_j , selecionando-se o sub-grafo (t_3), a rota continua a partir de b_j .

Figura 3.15 – Possíveis transições utilizadas pelo algoritmo de Roodbergen, (2001)

Continuando a rota utilizando-se do sub-grafo t_1 (apresentado na Figura 3.15) obrigatoriamente deve-se utilizar a transição t_a enquanto, ao selecionar o sub-grafo t_3 (apresentado na Figura 3.15) deve-se fazer a transição utilizando-se de t_b . Chegando-se ao próximo corredor, as mesmas decisões deverão ser feitas em relação aos sub-grafos parciais para a coleta dos itens localizados nesse corredor. Repete-se a operação até que todos os corredores necessários sejam roteirizados.

O desenvolvimento feito por Roodbergen (2001) pode ser aplicado em armazéns com até 3 corredores transversais, o que não acontece com o algoritmo Ratliff e Rosenthal (1983).

Maiores detalhes e exemplos de soluções utilizando esse algoritmo serão apresentados no Capítulo 5 desta dissertação, quando a proposta de solução do problema específico, for apresentada.

3.2.7. O trabalho de Petersen e Aase (2003)

Petersen e Aase (2003) têm como objetivo determinar qual combinação de leiaute, política de armazenamento e política de roteirização resulta na maior redução no tempo da coleta manual de itens.

Os autores não apresentam nenhuma formulação matemática, mas afirmam terem feito experimentos em ferramentas de simulação. Ainda segundo os autores, os resultados dos experimentos da simulação foram analisados estatisticamente para que correlações entre os parâmetros e os resultados fossem encontradas. Os experimentos foram parametrizados conforme apresentados no Quadro 3.4.

Para cada uma das nove combinações de políticas de armazenagem com políticas de roteirização e consolidação, 500 diferentes listas de separação foram randomicamente geradas. Utilizando-se de ferramentas de simulação, todas as combinações foram avaliadas em relação ao tempo necessário para coleta.

Os autores concluem que a utilização de políticas de armazenagem ou a das políticas de consolidação de ordens pode trazer redução no comprimento da rota tão

significativa quanto à mudança das políticas de roteirização. Mudanças na política de roteirização para aquela apresentada por Ratliff e Rosenthal (1983) não trará resultados tão bons quanto à mudança da alocação ou da consolidação, todas individualmente consideradas.

Quadro 3.4 – Cenários estudados por Petersen e Aase (2003)

Característica	Opções
Lógica de roteirização	Passagem, Composta e a apresentada por Ratliff e Rosenthal (1983)
Localização do ponto de I/T	Central
Políticas de armazenagem	Randômica, classe de produto e Central
Tamanho das listas de separação	5 , 10 , 15 , 20 , 25 , 30 , 40
Seqüência de separação das listas de peças	Aleatórias, PEPS e maiores - primeiro
Concentração das coletas	80-20 (20% dos itens representam 80% das coletas)
Capacidade de coleta do separador	50 itens

O autor considerou a consolidação de diferentes ordens de produção, porém, como mencionado, assumiu que não seria necessária a redistribuição dos itens de acordo com as ordens a que pertenciam, assumindo o rearranjo das peças sendo feito durante a viagem de coleta, pelo próprio separador (“sort while picking”).

Ainda, em relação à consolidação de ordens de separação, quanto maior for a média de localizações a serem visitadas nas ordens recebidas pelo almoxarifado, menor serão os benefícios de consolidá-las. Consolidar ordens contendo entre 20 e 30 localizações a serem visitadas pode trazer resultados muito melhores do que trabalhá-las individualmente.

Segundo os autores, em relação ao tamanho médio das ordens de separação, os benefícios da localização de itens baseadas no quociente espaço/ordens só

aparecem quando o separador precisar visitar mais de 25 localizações de armazenamento.

Vale ressaltar que, com o separador se deslocando a velocidades constantes, a redução do tempo de percurso reflete proporcional redução no comprimento da rota.

A contribuição do trabalho de Petersen e Aase (2003) está na comparação múltipla de fatores influenciadores do comprimento da rota de separação manual em armazéns. Os resultados claramente apontam para a importância da política de alocação estar em sintonia com a política de roteirização.

Sobre a consolidação das ordens de separação gerando benefícios ao comprimento da rota, os resultados devem sempre levar em conta a restrição na capacidade de coleta do separador e o pressuposto das ordens consolidadas serem ordenadas, por pedido, ainda durante a coleta.

Comparando a situação descrita no artigo com a situação do armazém objeto de estudo desta dissertação, tem-se que a distância e respectivo tempo de viagem ganho com a consolidação das ordens de separação, seriam utilizados rearranjando as peças de acordo com os subprodutos que formam.

Finalmente, estando o armazém em funcionamento e existindo dificuldades para o reendereço das peças de acordo com alguma política de localização, resta estudar a melhor solução utilizando-se de processos de roteirização.

3.2.8. O trabalho de Hwang et al. (2004)

Hwang et al. (2004) apresentam um estudo comparativo das políticas de roteirização de Retorno, de Passagem e do Ponto Médio, analisando seus impactos em processos manuais de separação de itens em armazém que utilizam a política de localização baseada no quociente espaço/ordens.

Para o estudo, os autores desenvolveram uma heurística específica para cada política de roteirização considerada. Em cada heurística desenvolvida, investigaram

o impacto da variação da concentração de localizações a serem visitadas por corredor, do tamanho da lista de separação (localizações a serem visitadas) e da relação largura-profundidade do armazém.

No Quadro 3.5, as intersecções marcadas com X, representam as combinações entre políticas de roteirização e políticas de armazenamento baseadas no quociente espaço/ordens estudadas por Hwang et al. (2004).

Quadro 3.5 – Combinações estudadas por Hwang et al. (2004)

		Política de Roteirização		
		Retorno	Ponto Médio	Passagem
Política de Armazenamento “espaço vs ordens”	Frontal	X		
	Central			X
	Extremos		X	

Em seu estudo, os autores já não consideraram combinações que outros trabalhos mostraram ser sub-ótimas. Por exemplo, a utilização da roteirização de Passagem num armazém com alocação Frontal de itens segundo a política espaço/ordens, classificada como não produtiva por Petersen (1999), já não foi considerada por Hwang et al. (2004).

Para cada uma das três políticas de roteirização os autores testaram 160 combinações (8 tamanhos de listas de separação, vezes 4 concentrações de localizações a serem visitadas por corredor, vezes 5 formatos de armazém). Ainda, para cada combinação foram feitas 400 simulações. As características utilizadas pelos autores estão detalhadas no Quadro 3.6.

Os autores consideraram o separador caminhando pela reta formada pelo ponto médio da largura do corredor, o qual é estreito o suficiente para a coleta de itens armazenados em prateleiras opostas sem que haja a necessidade de seu deslocamento lateral.

Quadro 3.6 – Fatores e níveis do estudo de Hwang et al. (2004)

Característica	Nível	Valores
Tamanho da lista de separação	8	4, 8, 16, 24, 32, 48, 64, 80
Concentração das coletas (% Demanda Atendida / % Itens Estocados)	4	50/50, 50/20, 60/20, 70/20
Leiaute do armazém (largura – profundidade em metros)	5	80,00 – 45,75 70,00 – 51,86 60,00 – 60,00 50,00 – 71,40 40,00 – 88,50
Política roteirização	3	(R) Retorno, (M) Ponto Médio e (P) Passagem

Sobre o formato do armazém, a conclusão dos autores diz que armazéns com largura da área de armazenagem igual à metade de sua profundidade (comprimento do corredor) apresentam rotas mais curtas de separação. Conclusão similar àquela encontrada por Petersen (1997) onde armazéns com poucos corredores compridos tiveram rotas menores que aqueles com número maior de corredores curtos. Essa conclusão está em linha com as teorias relacionadas ao corredor transversal: quanto mais largo for o armazém, maior será a distância percorrida pelo separador nos corredores transversais – corredores de conexão.

Outra conclusão dos autores é que a distância da viagem tende a diminuir quanto maior for a concentração de um mesmo item em diversas ordens de separação, isto porque, utilizando-se a armazenagem baseada em espaço/ordens, tais localizações tendem a estar mais próximas do ponto de início/término.

3.2.9. O trabalho de Theys et al. (2009)

O trabalho de Theys et al. (2009) busca responder a questão sobre a real necessidade da utilização de heurísticas consideradas “estado-da-arte” em relação

ao uso de heurísticas dedicadas, como as de Passagem e Retorno, para se resolver o problema da roteirização da separação manual em armazéns. Ainda, busca descobrir a vantagem de se melhorar as heurísticas consideradas “estado-da-arte” com a aplicação de outra heurística nas rotas primeiramente obtidas.

Sabendo-se que algoritmos eficientes foram descritos por Ratliff e Rosenthal (1983) e que Roodbergen e De Koster (2001) estenderam sua capacidade para armazéns com até 3 corredores transversais, os autores afirmam ainda existe espaço para o estudo de novas soluções para armazéns com mais de 3 destes corredores.

Para a solução de problemas em armazéns com mais de 3 corredores transversais, os autores utilizaram-se de uma adaptação do algoritmo chamado Lin-Kernighan comparando essa solução com àquela encontradas pelas heurísticas de roteirização, melhoradas por ferramentas de procura local do tipo k-opt e com os resultados obtidos por algoritmos que trabalham corredor-a-corredor, como, por exemplo, o algoritmo de Roodbergen (2001).

De forma resumida, o método 2-opt testa trocas possíveis entre pares de arcos, refazendo as conexões quando houver uma melhoria no roteiro. O processo termina quando não for possível mais realizar nenhuma troca que resulte em melhoria (Cunha, 2002).

Os autores ressaltam que para se solucionar o problema utilizando-se de um algoritmo tipo TSP, antes é preciso adaptar o problema da coleta manual de itens em armazém, partindo-se de um grafo e chegando-se a uma matriz de distâncias entre os vértices a serem visitados. O Quadro 3.7 apresenta os parâmetros utilizados pelos autores.

Os autores também concluíram que a utilização de lógicas de solução mais complexa, como o TSP-Lin-Kernighan, pode reduzir a distância das rotas traçadas pelas políticas fixas de movimentação e heurística dinâmicas entre 8 e 47%. Aplicando-se TSP nos resultados encontrados pelas políticas fixas de roteirização como, por exemplo, Política Passagem, Maior Distância e Composta não obteve significativa melhora, em torno de 0,1% melhores.

Quadro 3.7 – Cenários estudados por Theys et al. (2009)

Característica	Opções
Lógica de roteirização	TSP - Lin-Kernighan Política Passagem, Maior Distância e Composta Heurística corredor-a-corredor
Localização do ponto de I/T	Central e Descentralizado
Número de corredores	5, 15 e 60
Número de corredores transversais intermediários	3, 6 e 11
Políticas de armazenagem	Randômica e espaço/ordem
Tamanho da lista de separação	3 tamanhos (15, 60, 240)

Outro estudo feito pelos autores foi a utilização da heurística 2-opt nos resultados encontrados pelas políticas de roteirização, o que reduziu as distâncias das rotas entre 10 e 42%. Entretanto, os resultados deste experimento não chegaram a se igualar ao resultado apresentado pelo uso da solução TSP-Lin-Kernighan.

Os autores explicam ainda que as heurísticas dedicadas constroem rotas segmento-a-segmento, um corredor por vez, sem considerar o impacto deste nos corredores ainda por roteirizar. Assim, a lógica de trabalho destas heurísticas restringe o espaço de solução possível de ser analisado.

Desta forma, a utilização do 2-opt nos resultados originalmente encontrados, rearranja as soluções, abrindo oportunidade para encontrar resultados ainda melhores, os quais estavam fora da área de procura. A utilização do algoritmo de Roodbergem (2001) em conjunto com a heurística 2-opt pode trazer significativas melhorias nos resultados encontrados pela política de roteirização.

3.3. A Influência de Outros Fatores na Decisão de Roteirização

3.3.1. O trabalho de Caron et al. (1998)

O trabalho de Caron et al. (1998) apresenta solução para o problema da roteirização da coleta manual de peças em armazém com corredores de separação paralelos aos corredores de transição.

Caron et al. (1998) associaram a alocação de itens baseada em volume com as estratégias de roteirização de Passagem e de Retorno já apresentadas por Petersen (1997). Utilizaram-se da (i) estratégia de roteirização de Retorno para alocação Frontal (próximas ao extremo de entrada do corredor) dos itens com baixo quociente espaço/ordens e da (ii) roteirização de Passagem quando os itens com baixo quociente espaço/ordens são alocados no corredor próximo a I/T .

Na Figura 3.16 e 3.17 a região assinalada com a letra A é aquela destinada à alocação de itens com baixo quociente espaço/ordens, a região demarcada com a letra B corresponde àquela reservada aos itens com valores medianos no quociente espaço/ordens e a região sinalizada com a letra C é destinada aos itens com alto quociente espaço/ordens.

Figura 3.16 – Leiaute e alocação para política de Retorno (Caron et al., 1998)

Figura 3.17 – Leiaute e alocação para política de Passagem (Caron et al., 1998)

Os autores também analisaram a influência do número de corredores de separação para cada uma das políticas de roteirização utilizadas. Quando um número ímpar de corredores deve ser visitado, a política de Passagem não foi utilizada para o último corredor, evitando que a rota acabasse no fundo do armazém (Caron et al., 1998).

Pelo fato de os autores não admitirem armazéns com número ímpar de corredores quando a política de roteirização de Passagem é utilizada, foi necessário desenvolver duas heurísticas diferentes e específicas (uma para cada tipo leiaute de armazém).

Um sistema desenvolvido em Visual Basic foi utilizado para testar as heurísticas desenvolvidas. A comparação dos resultados analíticos e os resultados apresentados pelo modelo são inferiores a 5% (Caron et al., 1998), o que, segundo os próprios autores, valida a eficiência das heurísticas por eles desenvolvidas.

Para cada uma das possíveis combinações de variáveis apresentadas no Quadro 3.8, variou-se também as concentrações do número de coletas por corredores, as quais se iniciaram com 50% das coletas localizadas em 20% dos corredores e chegando até 80% das coletas localizadas em 20% dos corredores.

Em suas conclusões, os autores destacam que a escolha da melhor política de roteirização é fortemente dependente da média do número de localizações a serem

visitadas em cada corredor, sendo que a alocação segundo o quociente espaço/ordens tem efeito apenas secundário na distância da rota.

Quadro 3.8 – Cenários estudados por Caron et al. (1998),

Característica	Opções
Lógica de Roteirização	Política Passagem e Retorno
Localização do ponto de I/T	Central
Políticas de armazenagem	Frontal e Central
Tamanho da lista de separação	8 listas (4, 8, 16, 24, 32, 48, 64 e 80)
Concentração das coletas por corredor	50/20 , 60/20 , 70/20 e 80/20

A política de Retorno tem melhor desempenho para concentrações de itens a serem coletados por corredor abaixo de 0,5; para as outras situações, independente da alocação espaço/ordens utilizada (Central ou Frontal), a política de Passagem obteve rotas mais curtas.

Para alocações randômicas de itens, a política de Passagem sempre será melhor que a política de Retorno (Caron et al., 1998). Entretanto, afirmam os autores, havendo a necessidade de deslocamentos laterais para a coleta de itens em faces opostas do corredor, a diferença entre os desempenhos das duas políticas de roteirização pode cair.

3.3.2. O trabalho de Vaughan e Petersen (1999)

Vaughan e Petersen (1999) analisam o impacto da adição de corredores transversais na distância da rota de separação de peças em armazém com alocação randômica dos itens.

Segundo os autores, intuitivamente, a adição de corredores transversais, ligando os corredores de armazenamento, adiciona flexibilidade à rota. Entretanto, a adição de

corredores transversais também adiciona distâncias a serem percorridas pelo separador durante sua viagem até as localizações de armazenamento que devem ser visitadas. Para determinar o melhor número de corredores transversais os autores desenvolveram um algoritmo baseado em programação dinâmica.

O algoritmo desenvolvido roteiriza corredor por corredor, iniciando-se com o deslocamento do separador até o item mais distante da entrada do corredor 1, definido como o corredor mais a esquerda em relação ao ponto I/T com itens a serem coletados, já coletando os itens presentes neste percurso.

O algoritmo segue por encaminhar o separador até o segundo corredor de separação utilizando-se do corredor de transição intermediário (qualquer corredor de transição diferente do Frontal ou do Traseiro) mais próximo a última coleta.

Já no segundo corredor, o algoritmo coleta primeiro o item mais próximo ao ponto de sua chegada neste corredor, direciona-o então até o item mais distante, e, novamente parte para o corredor de separação seguinte pelo corredor de transição mais próximo ao último item coletado (o item mais distante ao ponto de sua chegada).

A roteirização termina no corredor mais a direita em relação ao ponto I/T com itens a serem coletados. Neste corredor sempre se coleta primeiro o item mais distante do extremo frontal do corredor de separação.

Neste estudo, 100 replicações foram feitas para cada uma das possibilidades de combinação entre características, as quais são apresentadas no Quadro 3.9.

Vaughan e Petersen (1999) concluem que quando a densidade de itens coletados é alta, a adição de corredores transversais tem pouco efeito na redução do comprimento da rota. Isto ocorre porque os corredores de separação terão grande possibilidade de serem totalmente percorridos, tornando pouco efetivos os corredores de ligação na redução da distância total percorrida.

Quadro 3.9 – Parâmetros, e características utilizadas por Vaughan e Petersen (1999)

Característica	Opções
Lógica de Roteirização	Vaughan e Petersen (1999)
Localização do ponto de I/T	I no extremo esquerdo do corredor frontal T no extremo direito do corredor frontal
Número de corredores transversais	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9
Comprimento do corredor de separação	200, 400 e 600 pés
Número de corredores de separação	10, 20 e 30
Itens por corredor	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 e 5.0

Os autores também afirmam que existe um melhor aproveitamento dos corredores transversais com o aumento do número de corredores de separação. Nesse cenário aumentam-se as probabilidades de maior dispersão dos itens entre corredores, diminuindo-se a probabilidade do separador atravessar todo um corredor de separação. Neste caso, o separador se utiliza dos corredores transversais como atalhos de passagem.

Sumarizando, o estudo mostrou que para corredores curtos ou situações onde existe a necessidade de um número muito grande ou muito pequeno de itens a serem coletados por corredor, a rota não consegue capitalizar a inclusão dos “atalhos”, representados pelos corredores transversais, como explicaram os autores. Quanto ao número ótimo de corredores transversais, este variará de acordo com as políticas operacionais e a profundidade do armazém.

3.3.3. O trabalho de De Koster et al. (1999)

As implicações da consolidação de ordens em uma única viagem de separação foram analisadas por De Koster et al. (1999) que utilizam o conceito de separar enquanto coleta (tradução livre do termo “sorting while picking” em língua inglesa).

Nesse tipo de operação, o separador coleta várias ordens que foram consolidadas em uma única lista de separação. Entretanto, no mesmo momento em que o separador coleta as quantidades, ele já as separa de acordo com os pedidos a que pertencem. Esse processo de separar as quantidades para os pedidos a que pertencem, já no momento da sua coleta, evita a tarefa posterior de separação dos itens de ordens diferentes, que foram coletados misturados.

Os autores apresentam três formas de se consolidar as ordens individualmente recebidas pelo armazém: consolidá-las por seqüência de chegada; selecionar uma ordem semente e adicionar a ela uma das ordens ainda disponíveis para consolidação, e utilizar o algoritmo de economias de Clarke e Wright (1964).

De acordo com Cunha et al. (2002), o algoritmo das economias, ou heurística de Clarke e Wright, consiste no agrupamento seqüencial de cidades, com base numa ordem decrescente de economias decorrentes da sua inclusão, isto é, considerando o impacto, da junção do nó no circuito, nas economias agregadas da distância entre nós e da distância de cada um dos nós ao nó inicial.

Outros parâmetros utilizados são o ponto de início e término da rota estar localizado no canto esquerdo da região frontal à área de separação; os movimentos laterais dentro dos corredores de separação são desprezíveis e os itens estão randomicamente localizados nas posições de armazenamento.

Três diferentes leiautes de armazéns foram estudados. O primeiro com armazenamento de materiais em paletes e separação feita com o auxílio de veículos motorizados; o segundo é caracterizado por separação manual e armazenamento em prateleiras; e o terceiro, um armazém teórico onde o armazenamento de materiais é feito em paletes e a coleta conta com o auxílio de veículo motorizado de capacidade de transporte acima do que aconteceria numa operação real.

A introdução do terceiro armazém no experimento possibilita o estudo do impacto da consolidação de grande número de ordens de separação com alto volume a separar, sem que haja restrição da capacidade de carga do separador.

Os autores explicam que, no processo de consolidação de ordens de separação em uma mesma lista de coleta, ordens com muitos itens podem ocasionar perda de produtividade. Esse impacto é resultado do fato de o separador possuir um limite de carga e grandes ordens, tomando muito da capacidade de carregamento disponível, reduzem as possibilidades de agrupamentos que poderiam ser feitos com as ordens ainda por consolidar.

Os autores utilizaram como políticas de roteirização a de Passagem e a de Maior Distância, concluindo que para consolidações de ordens com poucos itens a serem separados, a estratégia de Maior Distância apresenta melhores resultados que a estratégia de Passagem.

A estratégia Maior Distância apresenta melhor resultado, pois evita a viagem do separador por setores do corredor sem itens a serem coletados; conclusão semelhante àquela apresentada no trabalho de De Koster et al. (1999). No caso de grandes quantidades consolidadas numa mesma ordem de separação, a menor rota será encontrada utilizando-se da roteirização de Passagem ou os algoritmos de escolha da semente (*seed order*).

3.4. Outros Trabalhos Correlatos

O estudo bibliográfico teve acesso a artigos que apresentaram menor relação com o tema pesquisado nesta dissertação. Entretanto, tais obras guardam relevância em relação à separação de itens em armazéns e estão resumidamente apresentadas a seguir.

Hsieh e Tsai (2006) desenvolveram estudo considerando que o ponto de início da rota não é o mesmo que o ponto de término, como apresentado na Figura 3.18. Para os autores, o ponto de início está localizado em uma das extremidades do corredor frontal enquanto o ponto de término encontra-se na extremidade oposta. Este cenário tende a diminuir a distância média entre o ponto de origem até a primeira coleta e o da última coleta até o ponto de término.

Figura 3.18 - Posicionamento dos pontos de início e término (Hsieh e Tsai, 2006)

Consideração deve ser feita ao fato do separador, após entregar os itens coletados no ponto de término da rota, deve, obrigatoriamente, caminhar até o ponto de início para receber a próxima lista de separação. A distância obrigatoriamente percorrida pelo separador desde o ponto de término até o ponto de início da rota, considerada como parte do trajeto por outros autores, não foi considerada nos cálculos pelo autor, o que dificulta uma direta comparação dos resultados.

Seguindo a tendência de se estudar a influência dos parâmetros operacionais na formação da melhor rota de separação, Gue et al. (2006) analisam o impacto dos corredores estreitos em situação de alta densidade de itens a serem coletados e várias ordens sendo separadas simultaneamente, por diversos separadores trabalhando paralelamente.

Na formulação matemática desenvolvida, os separadores trafegam circularmente em corredores unidirecionais parando, sempre que necessário, para executar a coleta dos itens da lista de separação (Gue et al., 2006). Como os corredores são estreitos e os separadores saem em seqüência/fila. Qualquer separador que não seja o primeiro a partir em direção as localizações de armazenamento deverá sempre esperar (em fila) quando o separador caminhando à sua frente parar para coletar os itens que necessita.

O autor conclui que o congestionamento gerado por corredores que não permitem ultrapassagens entre os separadores pode aumentar de 2 a 11% o tempo de

separação em relação às configurações de armazéns com corredores largos que permitam a ultrapassagem entre separadores (Gue et al., 2006).

Molnár (2004) utiliza algoritmo genético para resolver o problema da separação de itens utilizando-se de equipamento motorizado. O autor apresenta o algoritmo desenvolvido e sua aplicação teórica, mas não apresenta resultados de sua aplicação.

Dekker et al. (2004) aplicam as políticas de roteirização em armazém com grande variedade de produto em relação à seu peso e volume. Concluem que separando os produtos por classes, dedicando equipamentos por setor e utilizando-se a política de roteirização do ponto médio, reduções de 29% poderiam ser alcançadas.

Dentre os artigos pesquisados, poucos trataram da coleta de itens localizados em mais de uma posição de armazenamento. Daniels et al. (1998) estudaram este cenário concluindo que dentre as heurística pesquisadas por eles, a da *busca tabu* parece ser a melhor alternativa de solução para esta situação, obtendo melhor desempenho que a heurística da *vizinhança mais próxima* ou do *arco mais curto*.

Le-duc et al. (2005) desenvolveram um algoritmo para calcular o conjunto ótimo de peças a serem consolidadas em uma única viagem de coleta. O autor utilizou-se de armazém com corredores de separação paralelos ao frontal onde se localiza o ponto *I/T*. Os autores concluem que sempre será possível se encontrar o conjunto ótimo de itens, resultado da consolidação dos pedidos.

Gouvinhas et al. (2005) estudam a importância do planejamento físico no processo de armazenagem através de um estudo de caso. Apresentam os vários processos que acontecem em um centro de distribuição (recebimento, estocagem, embalagem, expedição) e propõe uma análise qualitativa das interferências e interdependências deles no fluxo físico dos materiais.

Manzini et al. (2005) propõe um sistema para determinar e simular rotas traçadas para coletas utilizando-se de equipamento motorizado. Para isto determina grupos de dados que irão compor sua análise: área do armazém, formato do armazém,

classe de produto baseada em espaço/ordens, política de roteirização, número de itens a serem coletados e capacidade do equipamento. Os autores concluem que consolidar ordens e utilizar alocação baseada em espaço/ordens pode trazer reduções de mais de 20% no comprimento da rota.

Hsieh e Tsai (2006) utilizaram-se de um software chamado eM-plant para simular as operações de separação considerando o deslocamento lateral do separador para coletas em lados opostos do corredor. A conclusão do artigo afirma que o algoritmo gera rotas menores, para este tipo de operações, que a utilização da política de Retorno.

Para mais detalhes sobre variações do tema, indicam-se as obras apresentadas no Quadro 3.10:

Quadro 3.10 – Bibliografia de assuntos correlatos complementar

Assunto	Obras
Alocação	LE-DUC, T. et al. (2005), VAN DEN BERG, J. P. et al. (1998), DE KOSTER ET AL. (2006)
Armazéns automatizados	AZADIVAR, F.. (1989), ROODBERGEN, K. J.; et al. (2009), MALMBORG, C. (2001)
Consolidação	HO, YING-CHIN et al. (2008), DE KOSTER, M. et al. (1999), GADEMANN (2005) e WON, J. e OLAFSSON, S. (2005)
Leiaute	ROODBERGEN, K. et al. (2009), CORMIER, G. et al. (1992), DANIELS, R. et al. (1998), HU, K. et al. (2009), PARIKH, J. et al. (2009)
TSP	MAKRIS E GIAKOUMAKIS (2003), MOLNÁR, B. (2004) e TSAI, C. et al. (2008)

3.5. Conclusões da revisão bibliográfica

O estudo da roteirização da separação manual em armazém sofre grande impulso em 1983, com Rathlif e Rosenthal separando esta classe de problemas dos clássicos problemas do caixeiro viajante.

De 1983 até por volta de 2003, os trabalhos encontrados durante a revisão bibliográfica tratam da aplicação da mesma lógica baseada na programação

dinâmica iniciada por Ratliff e Rosenthal (1983) ou baseiam-se em utilização de políticas operacionais como forma de diminuir as distâncias percorridas nas viagens de coleta.

Ainda na esfera da programação dinâmica, em Vaughan e Petersen (1999) aparecem as primeiras tentativas da roteirização de coletas em armazéns com mais de três corredores transversais, problema mais tarde resolvido por Roodbergen (2001). As pesquisas realizadas mostram que os algoritmos baseados na programação dinâmica ainda persistiam como a solução mais adotada entre os estudiosos.

Caron et al. (1998) se destacam pela aplicação das teorias de alocação baseadas no quociente espaço/ordens. Os autores analisam o impacto da dispersão e da concentração dos itens nos corredores de separação na determinação do comprimento da rota de separação a percorrer.

O impacto da variação do tamanho das listas de separação, cenário um pouco mais complexo que o estudo do leiaute, foi considerado por autores, como, por exemplo, Petersen e Aase (2003) e Hwang et al. (2004). Por volta de 2004 pesquisas sobre roteirização da coleta manual em armazéns voltaram a origem do problema, sendo novamente caracterizados como uma variação do clássico problema do caixeiro viajante. Molnár (2004) inicia estudos sobre a roteirização de empilhadeiras em armazém utilizando-se dos algoritmos genéticos aplicados a um conjunto de características operacionais (multi-critério).

Alguns autores decidiram aplicar meta-heurísticas para a resolução de problemas mais complexos, quando existe na necessidade de se roteirizar armazéns com mais de três corredores transversais e com a necessidade de múltiplos separadores trabalhando paralelamente.

Foi só em 2009 que Theys et al. (2009) afirmam ter encontrado um algoritmo otimizador para a roteirização de armazéns com mais de três corredores transversais. No mesmo artigo os autores concluem que melhorias nas políticas de

roteirização até então estudadas poderiam vir com a aplicação de heurísticas do tipo k-opt sobre o resultado obtido.

A solução proposta para o problema de coleta manual, utilizando-se do algoritmo de Roodbergen (2001), parece adequada às características do problema a ser resolvido nesta dissertação. Por alguns anos esta proposta tornou-se a melhor opção disponível por sua facilidade de aplicação, facilidade de entendimento pelo separador, pela velocidade de resposta do algoritmo e por sua expansibilidade para armazéns com maior número de corredores e/ou com até três corredores transversais. Assim, a solução admitida, mesmo sendo superada em alguns quesitos por outras mais modernas, como o algoritmo TSP - Lin-Kernighan, resolve eficazmente o problema apresentado.

É importante, mais uma vez, destacar o artigo de Theys et al. (2009) pois suas conclusões abrem novas oportunidades para a revisão deste estudo. Conforme proposto pelo autor, a utilização dos algoritmos baseados em programação dinâmica são os que mais oportunidades de melhoria oferecem para a aplicação de heurísticas k-opt em seus resultados.

Desta forma, desde já existem oportunidades para adicionar conhecimentos a este tema tão pouco explorado nas academias brasileiras. Cumpre-se assim o ditado que diz ser o conhecimento a única matéria-prima que não segue a lei dos rendimentos decrescentes.

4. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA / ESTUDO DE CASO

4.1. Introdução

Este capítulo tem como objetivo apresentar as características do leiaute e as políticas operacionais referentes ao processo de coleta manual de peças no armazém objeto desta pesquisa.

Toma-se como problema real que se pretende resolver uma empresa de manufatura de equipamentos médicos de alta tecnologia. Os equipamentos produzidos pela empresa são utilizados em unidades de tratamento intensivo (UTI) de hospitais públicos e particulares de todo o país. A empresa também exporta parte de sua produção.

Os produtos têm alto valor agregado, o que impacta tanto no tamanho médio dos pedidos (média de 5 unidades) quanto no custo de manutenção de estoques. O custo do estoque de matéria-prima é alto, assim, os fornecedores realizam entregas semanais da quantidade de material necessária para a semana de produção. A empresa exige que os fornecedores tenham um determinado nível de estoque para pronta entrega.

Os processos da manufatura integram peças, transformando-as em produtos intermediários, os quais são agrupados para formar o produto final. O produto intermediário (PI) também pode ser chamado de subsistema ou subconjunto.

Os subconjuntos são montados por grupos de colaboradores trabalhando em células que recebem os insumos (componentes da estrutura do produto) diretamente do almoxarifado. Os subconjuntos montados são enviados às células de integração, as quais montam o produto final e os enviam para o teste de desempenho. O fluxo descrito está esquematicamente apresentado na Figura 4.1

Figura 4.1 - Fluxo esquemático de materiais do processo produtivo

Todos os produtos são compostos por três tipos de subsistemas ou subconjuntos: o mecânico, o hidráulico e o elétrico. Todos os subconjuntos são formados por grande variedade de pequenas peças, as quais devem ser montadas numa específica e obrigatória sequência.

Dessa forma, o problema real abordado se relaciona a produtos com alta complexidade de montagem, onde o agrupamento das peças separadas no almoxarifado influencia na produtividade das linhas de produção. O conjunto de peças necessárias à montagem de cada um dos diferentes subsistemas do produto deve ser entregue separadamente à linha de produção, para que os montadores não precisem, antes de iniciar o processo de montagem, separá-las de acordo com o subsistema a que pertencem.

Tem-se, assim, uma necessidade operacional apresentada ao almoxarifado: o de separar as peças contidas na listagem de necessidades de acordo com o subsistema ao qual pertencem.

Para cada pedido de vendas, uma nova ordem de produção é aberta; pedidos de venda contendo o mesmo produto podem ser consolidados numa mesma ordem de produção. Caso se tenha um pedido único, com apenas duas unidades, abre-se uma ordem de produção para que 5 unidades sejam produzidas. Outra prática corrente é não produzir ordens com mais de 10 unidades de um mesmo produto.

Para cada ordem de produção aberta, uma listagem contendo as necessidades de peças, originadas na estrutura do produto, é enviada ao almoxarifado de tal forma que, dificilmente, menos de 5 ou mais de 10 unidades são trabalhadas. Tal prática não é uma regra, são quantidades de referência que, segundo funcionários do almoxarifado e da produção, facilitam o manuseio e a montagem do lote de produção.

Manufaturas que trabalham com a montagem de produtos de alta complexidade e cadeias de varejo com operações de vendas *on-line*, que necessitem separar individualmente cada pedido de cliente, são exemplos de empresas que podem se utilizar do algoritmo de roteirização apresentado nesta dissertação para melhorar seus processos de separação.

Entretanto, pelo fato desta dissertação se concentrar na coleta manual de itens, operações motorizadas ou com o auxílio de equipamentos de separação devem selecionar outro algoritmo que melhor se adeque às características destes processos, os quais trabalham com diferentes leiautes, políticas e premissas.

Na Figura 4.2 a estrutura de produto é apresentada como uma lista de materiais e na Figura 4.3 na forma de estrutura de produto, na mesma seqüência na qual as partes devem ser montadas. Nas figuras, ao lado dos nomes dos produtos intermediários (PIs) e matérias-primas (MPs) se apresenta o nível de estrutura de produto correspondente.

Na Figura 4.2, observam-se matérias-primas como o TUBO PU-3 PN: 5732 (linha 16) e a ANILHA OVALGRIP N. 4 HO-60 (linha 15), ambas de nono nível de montagem, sendo agregadas para formarem o oitavo nível do produto: a MANGUEIRA N.4-15MM (linha 14).

Linha	Nível	Cod Parte	Tipo	Código do PI	Descrição	Qt
1	001	LA257	PA		Produto Final	
2	002	LA203000	PI	LA203000	CALIBRACAO	1,00
3	003	LA200070	PI	LA200070	KIT PARA FECHAMENTO	1,00
4	003	LA200500	PI	LA200500	SUBCJT. PLACA MAE	1,00
5	004	LA200703	PI	LA200703	TAMPA GABINETE	1,00
6	004	LA201100	MP	LA200707	MANGUEIRAS PNEUMATICAS	1,00
7	005	LA000004	MP	LA200707	ABRACADEIRA T-18R	8,00
8	005	LA200250	PI	LA200250	VALVULAS DE PRESSÃO	1,00
9	006	LA200251	MP	LA200250	MANIFOLD	1,00
10	006	LA201105	MP	LA200250	MANGUEIRA N.5-245MM	1,00
11	006	LA201131	PI	LA201131	CIRCUITO ENTRADAS	1,00
12	006	LA201132	PI	LA201132	CIRCUITO SAÍDAS	1,00
13	007	LA201134	PI	LA201134	VALVULA SAIDA	1,00
14	008	LA201104	MP	LA201134	MANGUEIRA N.4-15MM	1,00
15	009	LA000010	MP	LA201134	ANILHA OVALGRIP N.4 HO-60	1,00
16	009	LA800007	MP	LA201134	TUBO PU-3 PN: 5732	0,02
17	008	LA201136	MP	LA201134	MANGUEIRA N.28-45MM	1,00
18	009	LA000008	MP	LA201134	ANILHA OVALGRIP N.2 HO-60	1,00
19	009	LA000014	MP	LA201134	ANILHA OVALGRIP N.8 HO-60	1,00
20	009	LA800007	MP	LA201134	TUBO PU-3	0,05

Figura 4.2 – Exemplo de estrutura de produto, lista de materiais

A agregação de vários produtos intermediários de oitavo nível irá formar o produto intermediário de sétimo nível, neste caso a VÁLVULA SAÍDA (linha 13). Essa válvula fará parte do CIRCUITO SAÍDAS (LINHA 12) no sexto nível de montagem do produto. A agregação de produtos intermediários acontece até que o produto acabado, pronto para a venda, seja obtido - nesse exemplo o produto LA257.

Neste contexto, a falta de um componente da estrutura do produto inviabiliza a conclusão de sua montagem, tornando inválida a alternativa de separação parcial dos itens requisitados ao almoxarifado. Nesta operação, voltada ao abastecimento de linhas de produção, a separação de peças só começa quando houver no armazém quantidade suficiente para montagem de unidades completas de produto.

O armazém sob análise nesta dissertação tem corredores estreitos. A coleta é de partes com dimensões reduzidas e leves podendo ser feita manualmente, sem o auxílio de equipamentos motorizados.

Figura 4.3 – Exemplo de estrutura de produto

Por meio deste estudo pretende-se determinar a melhor seqüência de localizações de coleta a serem visitadas e o melhor caminho, considerando os aspectos do leiaute e das políticas operacionais do armazém. Em outras palavras, em que ordem os itens devem ser coletados de modo a minimizar o percurso de coleta.

Na operação atual, a lista de separação é uma cópia da estrutura do produto, sem considerar nenhum aspecto relacionado à roteirização da separação dos componentes. Os separadores, subjetivamente, criam as rotas para cada lista de coleta que recebem.

Pequenos componentes são acondicionados em caixas de armazenamento, as quais são estocadas em prateleiras, cujas alturas admitem que o separador alcance, sem a necessidade de equipamentos, qualquer material nelas armazenado, conforme ilustrado na Figura 4.4. As características de prateleiras e armazenamento são as mesmas adotadas por autores com Hwang et al. (2004) e Caron et al. (1998) em seus estudos sobre roteirização em armazéns com separação manual de peças.

Figura 4.4 – Exemplo esquemático de corredores de separação estreitos

Para a resolução do problema de roteirização da separação manual de peças será utilizado um método baseado em programação dinâmica conforme proposto por Roodbergen (2001). Alguns fatores foram decisivos para a escolha desse algoritmo para a resolução do problema específico abordado neste trabalho. A primeira virtude

deste algoritmo é a qualidade das rotas criadas para coletas em armazém com dois corredores de transição. O algoritmo é capaz de criar rotas mais curtas que aquelas traçadas, de forma subjetiva, pelos separadores, como comprovaram os testes práticos a serem apresentados adiante.

Outra qualidade desta opção é sua facilidade de compreensão e sua flexibilidade de aplicação em armazéns com diferentes larguras, comprimentos e números de corredores. Adicionalmente, esse método apresenta tempo de resolução que cresce linearmente em relação ao número de corredores e de localizações de separação adicionadas.

Ainda, esta opção pode ser desenvolvida diretamente em planilhas Excel, o que a torna uma opção de baixo custo para empresas com poucos recursos para investir nesta operação. Finalmente, esta opção, com alguns ajustes, torna-se expansível para roteirizar coletas em armazéns com até 3 corredores transversais.

A função objetivo que se busca minimizar com a utilização deste algoritmo é a distância total percorrida pelo separador durante sua viagem de coleta. Faz-se necessária esta ressalva, pois a função objetivo está dissociada do tempo que o separador leva para percorrer a rota. Aliás, independente do separador responsável pelas coletas de uma determinada rota, esta rota terá sempre o mesmo comprimento.

4.2. Objetivo operacional do armazém

O objetivo operacional do armazém deste estudo é separar matérias-primas, nesse caso peças, para serem entregues às linhas de montagem. A operação de coleta é manual, sem o auxílio de equipamento motorizado. As peças são suficientemente pequenas para que o separador possa carregar todo o volume coletado numa única viagem, que, neste caso, corresponde à apenas um subsistema.

4.3. Políticas de separação

A política de separação adotada é separar individualmente cada conjunto de peças pertencentes a cada subsistema do produto.

Sabendo-se que as peças de cada subsistema do produto devem ser coletadas respeitando tal agrupamento, cada subsistema deve ser trabalhado individualmente pelo separador. Dois separadores podem trabalhar paralelamente em duas listas de necessidades de dois subconjuntos de um mesmo produto, mas nunca dividirão a coleta de peças de um mesmo subsistema.

Atualmente, oito separadores trabalham no processo de separação de peças no almoxarifado, sendo que todos são capazes de separar todos os subsistemas de todos os produtos, não havendo especialização de separador por produto.

As listagens contendo as necessidades de peças são entregues ao almoxarifado de acordo com as datas de entregas dos pedidos aos clientes. Depois de entregues ao almoxarifado, internamente, as listagens de separação de cada subsistema de produto são ordenadas aleatoriamente; invariavelmente são trabalhadas na mesma seqüência em que foram impressas.

É pela lista de separação que o separador de peças irá se orientar para coletar todas as peças necessárias à montagem de cada um dos subsistemas do produto. Na operação atual, não há rota ou seqüência de coleta a ser obrigatoriamente seguida.

4.4. Políticas de roteirização

No problema abordado por essa pesquisa, não existe no almoxarifado nenhuma lógica de separação que determine rotas mais curtas para a coleta dos itens necessários à produção. Por não existir padrão pré-determinado de direção de

movimentação regulando a formação das rotas, essas são formadas subjetivamente pelo próprio separador.

4.5. Estrutura do armazém

A estrutura do armazém é composta pelos aspectos físicos idealizados durante a fase de projeto e montados durante sua construção. Dessa forma, o armazém objeto desta pesquisa já tem definidas as suas características. Dentre as características do armazém que já estão definidas pode-se citar a área de estocagem e a relação largura-profundidade, o número de corredores de separação, os corredores transversais, a largura dos corredores, a localização do ponto de início e término das rotas e o tipo de equipamento de armazenamento. Tais características serão discutidas nas subseções a seguir.

4.5.1. A relação largura-profundidade do armazém

A relação largura-profundidade do armazém objeto desta pesquisa não apresenta as proporções admitidas como ótimas; o armazém possui 9,5 metros de profundidade por 13 metros de largura. Como mostra o esquema apresentado na Figura 4.5, este armazém é mais largo que profundo.

Hwang et al. (2004), discutindo sobre o formato do armazém, concluem que armazéns com profundidade igual a duas vezes sua largura apresentam rotas mais curtas de separação. À mesma conclusão chegaram autores como Petersen (1997), Petersen (1999), Vaughan e Petersen (1999) ou Hwang et al.(2004). Essa conclusão se baseia no fato que quanto mais largo for o armazém, maior será a distância percorrida pelo separador nos corredores transversais.

Figura 4.5 - Leiaute do armazém

O armazém possui 8 corredores de separação, como também mostra a Figura 4.5, e 1797 localizações de armazenamento distribuídas em 15 prateleiras, de A até O, da direita para a esquerda. Os números apresentados na parte interna dos retângulos que esquematicamente representam as secções de prateleiras são os endereços de armazenamento alocados para a respectiva estante. Na lista de separação, esses serão os endereços apresentados ao separador para que possa localizar a prateleira que deve ser visitada.

4.5.2. Os corredores de separação

Como se pode notar na Figura 4.5 o armazém sob análise tem número par de corredores, o que possibilita melhor desempenho de algumas das políticas de roteirização, evitando que o separador tenha que cruzar duas vezes o último corredor quando a última peça a coletar estiver localizada na parte traseira do último corredor a ser visitado.

Todos os corredores têm largura de 0,80 metro e as prateleiras de armazenamento têm profundidade de 0,44 metro. Para mudar de corredor o separador caminha por 0,88 metro no corredor transversal sendo utilizado. Cada corredor é formado por uma seqüência de prateleiras medindo 0,92 metro de largura cada.

Nesse armazém existem estruturas metálicas (marcadas em cinza no leiaute esquemático apresentado na Figura 4.5) tomando parte da área de armazenagem e determinando o comprimento mais curto de quatro seqüências de prateleiras. Essas estruturas metálicas devem ser contornadas durante o processo de separação, criando uma situação única ao problema proposto.

Enquanto todas as outras seqüências são formadas por 8 prateleiras de armazenamento, como mostra a Figura 4.5, as prateleiras mais curtas A e B são formadas por 4 prateleiras, e as faces M e N por 5 prateleiras.

O diferente espaço de prateleira destinado a cada peça no estoque influencia o número de localizações existentes em cada face de corredor, variando de 55, (prateleira A) até 178 (prateleira C). O espaço destinado a cada peça é calculado com base em seu tamanho e demanda.

O leiaute do almoxarifado apresenta outro diferencial em relação àqueles apresentados nos estudos que fizeram parte da revisão bibliográfica. O corredor mais à direita do armazém, delimitado pelas prateleiras de armazenamento da seqüência A e pela parede divisória da área do armazém, tem apenas uma face de coleta, a face das prateleiras A.

Quanto à regra de endereçamento, todos os endereços das localizações começam com a letra que representa a face de corredor onde a localização se encontra. Os números que se seguem às letras são seqüenciais, e representam a seqüência em que o item está armazenado naquela face de corredor. Nas estantes, a seqüência de endereços começa no canto superior esquerdo, passando por todas as prateleiras, sempre da esquerda para a direita, terminando no canto inferior direito da estante, como mostram as setas na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Exemplo da lógica de endereçamento para a prateleira K

As localizações no estoque são dedicadas; cada item tem sua localização única e, neste endereço único de armazenamento, somente esse item pode ser armazenado. O espaço de prateleira é calculado em relação ao seu volume e a demanda. Assim, uma estante que armazena parafusos contém maior número de localizações que uma estante armazenando manômetros, por exemplo. Logo, cada prateleira e estante tem um número diferente de localização, de acordo com as peças que foram determinadas à ela.

4.5.3. Número de corredores transversais

No problema apresentado, não existem corredores transversais intermediários comunicando corredores paralelos de separação. Os corredores transversais se encontram: um na região frontal à área de armazenagem e outro nos fundos do armazém.

4.5.4. Localização do ponto de início/término

Para armazéns com corredores estreitos e separação manual de itens, Petersen (1997) notou que a localização central de um único ponto de início e término da rota de separação resulta em viagens com distâncias mais curtas do que quando tal ponto está localizado num dos extremos da região localizada à frente da área de armazenamento.

No problema de roteirização a ser solucionado, o ponto de início e término da rota de separação encontra-se localizado no centro da região frontal da área de armazenamento, como mostra a Figura 4.7.

Figura 4.7 - Detalhe frontal do armazém

Pode-se notar pela Figura 4.8, apresentada por Petersen (1997), que para um armazém com 16 corredores de armazenamento, corredores representados no eixo das abscissas, o comprimento da rota de separação (representado no eixo das ordenadas) de um conjunto fixo de peças, varia de acordo com a localização do ponto de início/término da rota.

Pela Figura 4.8 é possível perceber que quanto mais desalinhado estiver o ponto de início/término da rota em relação ao corredor central do armazém, representado pelo corredor oitavo corredor na Figura 4.8, maiores serão os comprimentos das rotas.

Dependendo da localização do ponto de início/término o comprimento das rotas variou de 115 a 160 metros, favorecendo a sua localização central.

Figura 4.8 – Comprimento da rota em relação a localização do ponto início/término
Fonte: Petersen (2001)

4.5.5. Equipamento de armazenamento e separação

Conforme mencionado anteriormente, o objetivo operacional do armazém deste estudo é separar peças a serem entregues à linha de montagem, e a coleta é manual sem o auxílio de equipamentos motorizados.

A estrutura de armazenamento é composta por estantes com bandejas de estocagem medindo 0,92 metros de largura, as quais se assemelham àquelas descritas por Roodbergen (2001), e ilustrada na Figura 4.9.

Em cada prateleira, caixas de armazenagem guardam os itens a serem coletados. A altura máxima de armazenamento em relação ao solo é de 214 cm, sendo possível ao separador alcançar todas as localizações de armazenamento sem o auxílio de escadas ou outros equipamentos de separação.

Neste estudo, será utilizado o ponto médio da largura da prateleira de separação como sendo o ponto até onde o separador deverá se deslocar para que possa separar as partes nela armazenadas, independente do posicionamento desse item na prateleira, tamanho ou peso.

Figura 4.9 - Prateleiras de armazenamento

Caso exista mais de um item a ser coletado numa mesma prateleira, será considerada para cálculo do comprimento da rota, somente a distância necessária para a chegada do separador até esta localização, pois não há distância a ser percorrida para a coleta de múltiplos itens num mesmo vértice.

Deve-se considerar somente as distâncias percorridas entre as localizações de armazenagem, como também fizeram De Koster et al. (1999); Petersen (1999), Caron et al. (2000b), Petersen et al. (2004) e Hwang et al. (2004).

4.6. Políticas de armazenamento

Outro fator determinante para a distância percorrida pelo separador em sua viagem de coleta até as localizações a serem visitadas é a política de armazenamento.

Em relação à política de armazenamento, a empresa utiliza duas das políticas descritas por Roodbergen (2001): a política de localização dedicada e a política por classe de produto.

Primeiramente, a empresa decidiu agrupar as partes de um mesmo produto em uma mesma região do armazém. Entretanto, as mudanças e melhorias de projetos e o aumento das linhas de produto baseado no aproveitamento de peças já desenvolvidas, levaram à dispersão dos itens de um mesmo produto, principalmente os mais novos, dentre vários corredores do armazém, deteriorando a política de alocação baseadas em classes de produto.

Manteve-se a política de localização dedicada onde um item é localizado somente num endereço do armazém, e esse endereço só pode armazenar este específico item a ele determinado.

Assim, no caso do armazém sob análise, não há nenhuma política específica de armazenamento direcionada pela estrutura dos produtos, mas existe alguma concentração de peças de um mesmo subconjunto num mesmo corredor. A localização é dedicada e a seleção da localização para receber um novo item é aleatória.

4.7. Família e estrutura de produtos

A empresa manufatura quatro famílias de produtos, as quais estão codificadas neste trabalho como Família 1, 2, 3 e 4. As famílias foram determinadas de acordo com a aplicação do produto. Assim, a Família 1 corresponde a produtos utilizados principalmente durante as cirurgias, enquanto a Família 2 agrega produtos mais utilizados no processo de recuperação do paciente no período pós-operatório. Uma terceira família é composta por um produto complementar, pequeno, de baixo valor agregado. A Família 4 corresponde a produto não utilizado diretamente em paciente.

A Família 1 é composta pelos produtos, também codificados, LA280, LA257, LA277, LA275 e LA279. Essa família de produtos representa mais de 94% do número de unidades vendidas. A Tabela 4.1 mostra a participação percentual dos produtos nas vendas acumuladas no período de janeiro de 2006 até junho de 2007.

A segunda família compreende os produtos LA272 e LA273, os quais podem ser considerados como acessórios de utilização comum a vários produtos. A Família 3 é formada por apenas um produto codificado como LA271. Por fim, a Família 4, corresponde ao produto LA265 apenas.

Tabela 4.1 - Participação dos produtos nas vendas anuais – 2006 e 2007

Família	Cod Prod	Total
Família 1	LA280	52%
	LA257	19%
	LA277	12%
	LA275	5%
	LA279	5%
Família 1 Total		94%
Família 2	LA272	2%
	LA273	1%
Família 2 Total		3%
Família 3	LA271	2%
Família 3 Total		2%
Família 4	LA265	1%
Família 4 Total		1%
Total geral		100%

Todos os produtos, independentemente da família, são integrados por três grandes grupos de subsistemas: elétrico, mecânico e hidráulico. Os subsistemas são produzidos pelas células de montagem intermediárias que recebem do almoxarifado as peças necessárias para sua composição.

As células de montagem intermediária enviam para as células de integração os produtos intermediários, subconjuntos, para serem agregados, formando o produto acabado, como apresentado esquematicamente na Figura 4.10.

Além das peças separadas no almoxarifado, outros componentes estão presentes na estrutura do produto final, como, por exemplo, calços, embalagens plásticas e caixas de papelão. Uma vez que esses componentes não são separados pelo armazém, pois estão armazenados no setor de embalagem, eles não serão considerados neste estudo de roteirização de separação manual em armazém.

Figura 4.10 – Fluxo de montagem do produto

Também não serão consideradas neste estudo as matérias-primas em estado bruto, como por exemplo, as barras de alumínio ou chapas metálicas. Isso se deve ao fato de as matérias-primas em estado bruto serem transformadas em peças, as quais são transferidas para armazenamento no almoxarifado, integrando-se então ao processo de separação.

Finalmente, não serão consideradas neste trabalho, também por não serem armazenadas e separadas no almoxarifado, as porcas e parafusos e anéis de vedação. Esses três grupos de componentes são armazenados, separados e apontados nas ordens de produção pelas próprias células de montagem, de acordo com os requisitos da estrutura do produto. Dessa forma, são objetos da análise deste estudo somente os componentes do produto (as peças) separados pelo almoxarifado.

Todos os lotes com as quantidades das peças necessárias à produção dos subsistemas são recebidos e inspecionados pelo departamento de Controle de Qualidade, ainda antes de sua entrada no almoxarifado. Após a inspeção dos lotes, o Controle de Qualidade libera as peças aprovadas para serem armazenadas e, mais tarde, separadas para o envio às células de montagem. Peças recusadas pelo Controle de Qualidade são devolvidas ao fornecedor.

A análise das estruturas dos produtos finais, apresentada sumariamente na Tabela 4.2, mostra que na Família 1, o produto codificado como LA257 utiliza 180 diferentes peças a serem separadas pelo almoxarifado, enquanto o produto LA275 é composto por 246. A Família 2 contém os produtos com maior número de diferentes peças, 559 e 619.

Tabela 4.2 - Estrutura de produtos, diferentes peças utilizadas por produto

Contar de Qt		Número de Peças por Produto Intermediário (PI)										
Família	Cod Prod	002	003	004	005	006	007	008	009	010	Peças no PA	
Família 1	LA257		3	22	52	63	30	8	2		180	
	LA275	6	8	3	48	98	38	27	9	9	246	
	LA277	6	11	15	113	51	32	16	9		253	
	LA279	3	7	10	105	52	31	16	9	1	234	
	LA280	7	13	6	47	98	39	28	10	8	256	
Família 2	LA272	1	3	41	65	129	167	104	44	5	559	
	LA273	1	3	28	63	149	182	126	49	18	619	
Família 3	LA271		4	13	21	24	17				79	
Família 4	LA265	2		15	63	65	12				157	

Todas as peças separadas pelo almoxarifado serão montadas de acordo com a estrutura do produto, formando produtos intermediários (PIs) ou subconjuntos do produto acabado (PA). A integração dos PIs irá formar o PA; como se pode notar na Tabela 4.2, o PA LA280, pertencente a Família 1, apresenta 10 níveis de PIs para serem integrados até que se forme o produto completo.

Um PA que na Tabela 4.2 se apresenta sem nenhuma peça designada para um nível de PI de sua estrutura significa que o nível é composto apenas por subsistemas, peças já integradas, e não partes vindas do almoxarifado; isto acontece no nível 003 do produto LA265 da Família 4, por exemplo.

Caso o separador pudesse coletar, numa mesma visita até uma localização de armazenamento, toda a quantidade necessária de uma determinada peça, independentemente do subsistema ao qual ela pertence, poder-se-ia considerar que o número de diferentes peças contidas em cada produto representaria o número de visitas às localizações de armazenagem necessárias para separar todas as partes presentes na estrutura do produto final.

Entretanto, pelos requisitos da manufatura – receber cada subconjunto separadamente - uma peça necessária em dois subconjuntos diferentes irá representar duas visitas do separador à mesma localização de armazenamento. Assim, cada subsistema, como anteriormente ressaltado, gera uma listagem de separação diferente e independente para ser trabalhada pelos separadores.

Pela análise das estruturas dos produtos, detectou-se que algumas peças são utilizadas em mais que um PI do mesmo PA. Na Tabela 4.3 pode-se observar que as peças LA14100004 e a LA14100011 são utilizadas em diferentes produtos intermediários (PIs) utilizados em diferentes níveis de montagem. Essas peças irão requerer, para a montagem do produto acabado, mais de uma visita de coleta a suas localizações de armazenamento. Mais especificamente, uma visita para cada produto intermediário no qual são utilizadas.

Tabela 4.3 - Estrutura de produtos, utilização partes em subsistemas

Código da Peça	PI onde é utilizada	Nível do PI no PA
LA14100004	LA26503000005	005
	LA26503000007	007
	LA26503000006	006
LA14100011	LA26503000009	009
	LA26503000006	006

Nessa situação, onde cada repetição de peça em diferentes PIs deve ser considerada com uma visita até a localização de armazenamento tem-se, por exemplo, o produto LA257 demandando 228 visitas as localizações de armazenamento; como mostra a Tabela 4.4, e não mais 180 visitas, como seria o caso se todas as quantidades de uma determinada peça, independentemente do PI que as utiliza, pudessem ser coletadas em uma única visita ao endereço de localização de armazenamento.

Tabela 4.4 - Estrutura de produtos – partes consideradas com repetição

Contar de Qt		Nível da parte na estrutura do produto									
Família	Cod Prod	002	003	004	005	006	007	008	009	010	Total geral
Família 1	LA257		3	22	56	77	45	20	5		228
	LA275	6	8	5	50	104	42	36	14	9	274
	LA277	6	11	19	124	55	38	19	9		281
	LA279	3	7	14	113	55	38	19	9	1	259
	LA280	7	13	8	49	103	44	37	15	8	284
Família 1 Total		22	42	68	392	394	207	131	52	18	1326
Família 2	LA272	1	6	43	70	143	222	281	70	6	842
	LA273	1	4	30	73	162	234	236	63	23	826
Família 2 Total		2	10	73	143	305	456	517	133	29	1668
Família 3	LA271		5	13	21	24	17				80
Família 3 Total			5	13	21	24	17				80
Família 4	LA265	2		28	121	155	26				332
Família 4 Total		2		28	121	155	26				332

Ponderando-se o número de visitas às localizações de armazenamento de cada produto pelo seu volume percentual de vendas (tomando-se como base o volume de vendas acumulado de janeiro a junho de 2007) tem-se que a Família 1 é responsável por aproximadamente 88% das visitas às localizações de armazenamento feitas no almoxarifado da empresa, como mostra o quadro do lado direito da Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Participação dos produtos nas visitas de separação

Soma de Vendas %			% Separações			Separações Ponderadas %		
Família	Cod Prod	Total	Família	Cod Prod	Total	Família	Cod Prod	Total
Família 1	LA257	52%	Família 1	LA257	6,7%	Família 1	LA257	44,3%
	LA280	19%		LA275	8,0%		LA275	19,9%
	LA277	12%		LA277	8,3%		LA277	13,1%
	LA275	5%		LA279	7,6%		LA279	5,2%
	LA279	5%		LA280	8,3%		LA280	5,1%
Família 1 Total		94%	Família 1 Total		38,9%	Família 1 Total		87,7%
Família 2	LA272	2%	Família 2	LA272	24,7%	Família 2	LA272	7,0%
	LA273	1%		LA273	24,3%		LA273	3,2%
Família 2 Total		3%	Família 2 Total		49,0%	Família 2 Total		10,2%
Família 3	LA271	2%	Família 3	LA271	2,3%	Família 3	LA271	0,6%
Família 3 Total		2%	Família 3 Total		2,3%	Família 3 Total		0,6%
Família 4	LA265	1%	Família 4	LA265	9,7%	Família 4	LA265	1,6%
Família 4 Total		1%	Família 4 Total		9,7%	Família 4 Total		1,6%
Total geral		100%	Total geral		100,0%	Total geral		100,0%

A alta participação dos pedidos do produto LA257, pertencente à Família 1, no volume total de separação do armazém, quase 45% das visitas as localizações de

armazenamento, embasou a escolha desse produto como opção de estudo deste trabalho.

A escolha de outros produtos dentro da Família 1 apresentaria pouca variação nos componentes coletados, uma vez que suas estruturas de produtos são criadas com base na utilização de peças já desenvolvidas. Assim, os resultados obtidos com o produto LA257 podem ser considerados como um bom balizador para a utilização do algoritmo para roteirizar outros produtos da mesma família.

Logo, a escolha do LA257 pode representar uma cobertura de até 87,7% das coletas efetuadas no almoxarifado; valor igual ao percentual de participação da Família 1 nas coletas do armazém.

Em relação ao produto LA257, considerando-se que o grupo de peças de cada subsistema deve ser coletado separadamente, esse produto demanda 228 visitas às localizações de armazenamento. Ainda, sabendo-se que o produto é formado por 34 diferentes subsistemas, isso irá requerer a separação de 34 diferentes listas de coleta, as quais são apresentadas na Tabela 4.6.

A Tabela 4.6 também mostra o número de visitas às localizações armazenamento para cada lista de separação de LA257, como pode ser visto na coluna esquerda da tabela, elas variam entre 1 e 49 peças.

Todas as peças de cada um dos subsistemas têm uma localização pré-determinada e única no almoxarifado. Em cada visita a uma localização de armazenagem, o separador deverá coletar a quantidade de produto requerida na listagem de separação. Assume-se que o separador será sempre capaz de separar e transportar toda a quantidade requerida na listagem de separação.

Tabela 4.6 – Número de peças a separar em subsistemas do produto LA257

Peças a Separar	
Código do PI	Total
LA24300450	49
LA24300600	19
LA24300500	18
LA24301128	15
LA24300616	14
LA24301116	12
LA24301129	12
LA24301100	11
LA24300610	9
LA24300514	7
LA24300300	6
LA24301106	5
LA24300050	5
LA24300607	4
LA24301120	4
LA24301136	4
LA24301121	3
LA24300700	3
LA24300609	3
LA24301131	2
LA24300306	2
LA24301104	2
LA24301102	2
LA24301105	2
LA24300550	2
LA24301132	2
LA24301103	2
LA24301108	2
LA24300703	2
LA24300706	1
LA24300070	1
LA24300707	1
LA24300060	1
LA24300303	1
Total geral	228

Na Tabela 4.7 pode-se encontrar a lista de separação de um PI pertencente ao produto LA257, o **SUBCJT. PLACA MAE**, composto por 18 diferentes componentes. Seguindo a estrutura do produto, para a montagem de uma unidade deste produto intermediário, serão necessárias 38 peças.

Tabela 4.7 - Exemplo da estrutura de um Pls do produto LA257

Código do Produto	Quantidade	Tipo	Lista de Separação
SUBCJT. PLACA MAE	1,00	PI	LA24300500
FLAT CABLE 16VIAS DISPLAY/MOT.	1,00	MP	LA24300500
FLAT CABLE 50 VIAS 240MM I-5	1,00	MP	LA24300500
FLAT CABLE 20VIAS DISPLAY/CON.	1,00	MP	LA24300500
FLAT CABLE 50 VIAS 360MM I-5	1,00	MP	LA24300500
FIO TER.VALV.EXAL/PAIN.FRONT I5	2,00	MP	LA24300500
CHICOTE ALIM. PCI DISPLAY I-5	1,00	MP	LA24300500
PCI FLUXOMETRO ELETRONICO MON.	1,00	MP	LA24300500
PCI POWER INTER-5 (VERSAO 2)	1,00	MP	LA24300500
PCI CONTROL	1,00	MP	LA24300500
PCI PRESSURE	1,00	MP	LA24300500
PCI VENTILADOR	1,00	MP	LA24300500
PINCA DO KNOB	2,00	MP	LA24300500
CORPO DO KNOB C/INDIC.DIA.24MM	2,00	MP	LA24300500
CONJUNTO KNOB Ø16X19 E MOLA	9,00	MP	LA24300500
TRILHO ESPACADOR P/PCI'S	2,00	MP	LA24300500
CLIPS ESPACADOR P/PCI'S	6,00	MP	LA24300500
SUBCJT. PAINEL FRONTAL	1,00	MP	LA24300500
MOLA DO KNOB VALVULA PIP/PEEP	2,00	MP	LA24300500

4.8. Considerações finais do capítulo

A existência de um armazém já construído e com política de separação rígida faz com que a solução a ser adotada para a roteirização das listas de separações deva ser compatível com tais características. O Quadro 4.1 a seguir sumariza as características do problema proposto.

Comparando os tópicos que caracterizam o problema proposto com a teoria apresentada durante a revisão bibliográfica, conclui-se que a política de separação é determinada pelos requisitos da manufatura: separar as peças de acordo com os subsistemas a que pertencem, sem possibilidade de agrupamento de diferentes listas de separação.

Quadro 4.1 – Configuração do problema proposto

Característica	Configuração
Relação largura-profundidade	13 metros x 9,5 metros
Número de corredores de separação	8
Número de corredores transversais	2 (Frontal e Traseiro) perpendiculares aos corredores de separação
Largura dos corredores	0,88 metros
Localização do ponto <i>I/T</i>	Central
Velocidade de deslocamento	Constante, porém não impacta função objetivo
Capacidade de carga do separador	Ilimitada
Equipamento de armazenagem	Prateleiras
Tamanho da lista de separação	Diversos variando de 1 a 49 coletas
Alocação dos itens	Randômica
Políticas de roteirização	A ser definida
Políticas de armazenamento	Randômica dedicada
Políticas de separação	Separação por produto intermediário

A alocação dos itens é randômica com localizações dedicadas. A impossibilidade de remanejamento em curto prazo reduz as chances da utilização de heurísticas direcionadas a algum tipo específico de estratégia de localização.

Considerando-se ainda que o tamanho das listagens de separação, mesmo variando entre 1 e 49 itens, contém, na maioria das vezes, menos de 15 itens a coletar, a melhor alternativa de solução será aquela que construir rotas sem necessidades específicas como, por exemplo, a concentração de coletas em determinado corredor ou segmento do armazém.

No algoritmo baseado em programação dinâmica desenvolvido por Roodbergen (2001) cada localização de armazenamento a ser visitada é analisada em função do grupo sendo coletado (as localizações a serem visitadas num mesmo corredor) e da

posição do separador em relação ao próximo corredor a separar. Tal estratégia é uma opção às políticas de roteirização baseadas no uso de regras fixas para deslocamento ou no uso obrigatório de determinadas estratégias de endereçamento.

Assim, pelas características do problema apresentado e pelas características dos algoritmos de solução descritos durante a revisão bibliográfica, decidiu-se pela utilização do algoritmo desenvolvido por Roodbergen (2001) como método de solução.

No Quadro 4.2, estão sumarizadas as características do algoritmo de Roodbergen (2001) que suportaram sua escolha para a tarefa de reduzir as distâncias das rotas da separação manual de peças em armazém, o qual é o objeto de estudo desta dissertação.

Quadro 4.2 – Vantagens do algoritmo de Roodbergen (2001)

Característica	Configuração
Qualidade das rotas criadas	O algoritmo é capaz criar rotas suficientes para coletas em armazém com dois corredores de transição
Implementação	O algoritmo é fácil de ser entendido pelos separadores
Lógica	Baseia-se em programação dinâmica, criando rotas corredor-a-corredor
Adequação ao leiaute	Adequa ao leiaute atual e a sua expansão no número de corredores
Adequação a política de armazenamento	Não apresenta lógica para uma política específica, adequa-se à existente
Adequação a política de separação	Não apresenta lógica para uma política específica, adequa-se à existente
Tamanho da lista de separação	Tamanho da lista independe para a roteirização, corredores passam a ser mais influentes
Esforço computacional	Esforço cresce linearmente em relação ao número de corredores e de localizações de separação

Comparando-se as características do algoritmo apresentadas no Quadro 4.1 com as características do problema, apresentadas no Quadro 4.2, pode-se notar sobre sua adequação.

O Quadro 4.3 apresenta uma matriz relacionando as características do problema proposto com as características do algoritmo de solução. Nas intersecções onde existe relacionamento entre as características de ambos, um sumário caracterizador é apresentado.

5. ALGORITMO DE SOLUÇÃO

5.1. Escolha do algoritmo de solução

Os fatores considerados durante o processo de escolha do algoritmo de solução do problema da roteirização manual em armazém foram, a qualidade das rotas criadas, sua capacidade em resolver o problema em reduzido tempo de processamento, sua facilidade de utilização, e, principalmente, a possibilidade de aplicação do algoritmo em problemas mais genéricos, além daqueles relativos à roteirização dos produtos da empresa objeto desta pesquisa.

Concluída a revisão bibliográfica, constatou-se que dois grupos de soluções se sobressaíam. O primeiro grupo é formado por heurísticas que pré-determinam as regras de movimentação do separador. Nesse primeiro grupo encontram-se as heurísticas baseadas em estratégias fixas, como, por exemplo, a de Passagem e a de Maior Distância. Utilizando-se destas estratégias, qualquer que seja a rota formada pela estratégia de solução, essa tem, *à priori*, seu comportamento já determinado. Isto é, de antemão já se sabe que, utilizando-se da roteirização de Passagem, jamais o separador sairá de um corredor com localizações a serem visitadas pelo mesmo extremo pelo qual entrou.

Este grupo de soluções apresenta a vantagem de ser mais facilmente entendido pelo separador, em função da regra e lógica de movimentos pré-determinados. Entretanto, por se adequarem a específicas políticas de armazenamento, não traçam as melhores rotas quando existe grande variedade no tamanho e na dispersão das coletas dentre as localizações de armazenamento. Essa característica é reflexo do fato de cada política de roteirização se adequar melhor a uma específica situação de concentração na localização dos itens a coletar ou específica política de armazenagem.

O segundo grupo de soluções é aquele formado por heurísticas que não pré-determinam o caminho do separador, ficando livres para efetivamente construir a

rota para leiautes, estratégias de separação e estratégias de armazenamento já existentes em armazéns em funcionamento. Esse grupo de solução pode ainda ser subdividido em dois.

O primeiro subgrupo é formado por heurísticas que, para encontrar a melhor rota, testam todas as possíveis seqüências de vértices a serem visitados, escolhendo aquela com menor distância percorrida. Neste grupo, o problema da roteirização é, na maioria das vezes, resolvido como uma variação do clássico problema do caixeiro viajante, um problema NP-difícil (Ratliff e Rosenthal, 1983), utilizando-se de heurísticas desenvolvidas para este tipo de problema. (Theys et al., 2009), salientando que ainda não existe soluções ótimas (computacionalmente viáveis) para armazéns com mais de três corredores transversais, propõe a utilização da heurística de Lin-Kernighan.

O segundo subgrupo é formado por heurísticas que montam a rota, corredor a corredor, sem a necessidade de testar todos os possíveis seqüenciamentos de vértices a visitar num único passo de solução. Dada a configuração do armazém, a rota ótima corresponde a uma seqüência ordenada de corredores em que jamais irá conter idas e vindas entre eles, como, por exemplo, seqüenciando visitas nos corredores $A \rightarrow F \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow G \rightarrow C$; em outras palavras, a rota ótima, de menor distância é tal que os corredores são obrigatoriamente visitados na ordem $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F$.

Esse segundo subgrupo utiliza-se de soluções genericamente chamadas de programação dinâmica. Algoritmos baseados em programação dinâmica utilizam, para atingir sua solução, a estratégia de dividir para conquistar (Toscani e Veloso, 2001). Essa estratégia consiste em dividir o problema em partes menores, solucionar de forma ótima esses subproblemas menos complexos e agrupar as respostas numa solução final ótima. A lógica da programação dinâmica está no fato de a solução ótima ser composta por soluções ótimas para os problemas intermediários, mais fáceis de serem resolvidos.

Assim, através da análise da tese de doutorado de Roodbergen (2001), percebeu-se que o algoritmo baseado em programação dinâmica por ele desenvolvido a partir do

trabalho de Ratliff e Rosenthal (1983) poderia ser utilizado como método de solução para o problema específico que essa dissertação procura resolver, uma vez que, para armazéns com até três corredores transversais, ela apresenta soluções satisfatórias, como concordam Theys et al. (2009).

A utilização desta solução baseada em programação dinâmica traz consigo a vantagem desse algoritmo já ter sido testado em outros estudos, como, por exemplo, Roodebregt e De Koster (2001a), Roodebregt e De Koster (2001b) e Theys et al. (2009).

O algoritmo de Roodbergen (2001) apresenta-se como o mais adequado, pois não se utiliza do processo de análise combinatória para formar e selecionar a melhor sequência de localizações a visitar, mas baseia-se em programação dinâmica. Utilizando-se de programação dinâmica, o algoritmo busca combinações de ótimos parciais (ótimos por corredor) para se chegar a um ótimo total.

Sabendo-se que soluções ótimas não são possíveis de serem formadas a partir de sub-ótimos - não ótimos - locais (Toscani e Veloso, 2001), Roodbergen (2001) soluciona a rota para cada corredor e descarta as opções de maior distância percorrida, como mostra esquematicamente a Figura 5.1. Ou seja, pode-se assegurar que as rotas sub-ótimas até um dado corredor intermediário certamente não farão parte da rota ótima para o armazém como um todo; analogamente, a rota ótima para o armazém como um todo não passa por sub-rotas que não são ótimas.

Tomando o armazém representado na Figura 5.2, com três localizações a serem visitadas, como exemplo para a explicação da lógica dos algoritmos baseados em programação dinâmica, o primeiro passo é decompor o problema. Ao invés de considerar todas as localizações a serem visitadas como um único conjunto de vértices, cada corredor é considerado um problema de roteirização que deve ser resolvido separadamente. Cada corredor resolvido é adicionado à rota; somente os corredores com localizações a serem visitadas são considerados para a sequência de percursos; ou seja, as características do problema permitem que já se pré-defina que a sequência ótima de percurso dos corredores seja corredor 1, corredor 2, corredor 3, obrigatoriamente.

Figura 5.3 – Exemplo de rota para coleta no primeiro corredor

Para coletar o item 2 localizado no Corredor 2, uma das opções é continuar pela rota A e chegar até o Corredor 2 utilizando-se do corredor transversal traseiro do armazém. Porém, uma vez que chegar até a segunda coleta utilizando-se do corredor frontal, rota B, resulta em rota mais curta, descarta-se solucionar o problema a partir da rota A.

Não sendo a rota A a melhor opção para se chegar ao Corredor 2, ela jamais poderá ser parte da melhor opção de rota que contenha todos os vértices a serem visitados, como detalhado em Toscani e Veloso (2001). Assim, por ter menor comprimento, a sub-rota B passa a fazer da solução e a sub-rota A está descartada. Tal situação pode ser vista comparando-se os Esquemas 2 e 3 da Figura 5.4

Continua-se até o Corredor 3, último corredor com itens a serem separados. Como o separador deve sempre retornar ao ponto I/T para completar a viagem de separação, a melhor rota para o Corredor 3 é entrar e sair pelo extremo frontal do corredor (rota C no Esquema 4 da Figura 5.5); atravessá-lo totalmente para depois retornar até I/T adiciona mais distância a rota (rota D no Esquema 5 da Figura 5.5).

Figura 5.4 – Exemplo de rota para coletas no segundo corredor

Neste momento, descarta-se novamente a rota mais longa, a rota C e a rota D passa a fazer parte da solução final, sendo conectada, integrada à solução parcial anterior (rota B) que chegava até o corredor 2. Desta forma, se completa o processo de roteirização da coleta desses 3 itens alocados em 3 diferentes corredores do armazém.

Figura 5.5 – Lógica da programação dinâmica

Analisando o algoritmo de Roodbergen (2001) à luz dos conceitos de programação dinâmica enunciados por Hillier e Lieberman (1995) verifica-se que o mesmo apresenta as características consideradas mais importantes para definição de um algoritmo baseado em programação dinâmica. A primeira característica essencial é ser o problema formado por múltiplos estágios resolvidos seqüencialmente, um a um, como é o caso da resolução corredor-a-corredor do algoritmo em questão.

Ainda, segundo Hillier e Lieberman (1995) cada estágio deve resultar um estado que contenha todas as informações necessárias para se avaliar as conseqüências que uma decisão irá ter sobre as futuras decisões a tomar. No algoritmo de Roodbergen

(2001) essas informações correspondem às distâncias acumuladas resultantes em cada alternativa de rota parcial. Segundo os autores, esta informação talvez possa ser considerada a mais importante na caracterização das programações dinâmicas sendo que não existem regras para a sua formação, mas propriedades que devem guiar sua formação.

A primeira propriedade é a situação conter informação suficiente para se tomar decisões futuras independentemente da forma como a situação atual foi atingida. A segunda propriedade é apresentar um número pequeno de variáveis, duas ou três, para reduzir o esforço computacional. As duas propriedades estão presentes no algoritmo apresentado por Roodbergen (2001), uma vez que a partir de um extremo do corredor a rota pode prosseguir sem a necessidade de se determinar como aquele ponto foi atingido e só existem duas possibilidades de uma situação ser atingida, possibilidades representadas pelos dois extremos de um corredor de separação.

No entanto, deve-se destacar que essa solução cria rotas sem padrões específicos de movimentação dos separadores; em outras palavras, requer que o separador preste atenção na direção a seguir antes de cada arco a percorrer. Isto porque ele pode tanto seguir atravessando o corredor no qual está, quanto voltar e sair pelo mesmo extremo do corredor pelo qual entrou.

Porém, independente da política de roteirização, o fator humano tem grande influência na qualidade do processo de separação de peças, pois esse depende da atenção do separador à rota a seguir e às localizações a visitar. Retirar do separador a tarefa e a responsabilidade de determinar a melhor rota, automatizando o processo de roteirização, o libera para se concentrar no processo de separação, evitando rotas sub-ótimas ou localizações esquecidas de serem visitadas; algo que se verificou poder acontecer, conforme visto mais adiante no Capítulo 7.

Diferentes métodos poderiam ser utilizados para a solução do problema de roteirização da separação manual em armazém como, por exemplo, uma das políticas de roteirização apresentadas por Petersen (1997).

5.2. Notações utilizadas no algoritmo de solução

Conforme foi anteriormente apresentado na revisão bibliográfica, o algoritmo de Roodbergen (2001), baseado em programação dinâmica, se utiliza de possíveis conexões entre corredores paralelos e possíveis sub-rotas para traçar a melhor rota contendo todos os itens a coletar. As conexões e as sub-rotas admitidas garantem a manutenção das propriedades de um grafo, apresentadas na seção 3.2.1.

O objetivo desta seção é detalhar a estratégia de solução baseada no trabalho de Roodbergen (2001), e posteriormente ilustrá-la a partir de um exemplo esquemático.

Primeiramente, toma-se o esquema de armazém apresentado na Figura 5.6 e seu correspondente grafo apresentado na parte inferior da mesma figura, indicando as distâncias entre seus vértices. No grafo apresentado é possível observar a localização dos vértices relacionados à notação utilizada para a formalização do algoritmo de solução.

No grafo da Figura 5.6, todas as distâncias entre as possíveis ligações entre dois vértices são apresentadas ao lado dos arcos de ligação. Por exemplo, a distância entre corredores de separação, é de 1,68 metros. No grafo, os nós $a_1, a_2, a_3, \dots, a_8$, indicam os extremos traseiros do armazém, enquanto os nós $b_1, b_2, b_3, \dots, b_8$, indicam os extremos frontais. O vértice do tipo v_i representa locais de coleta, como por exemplo, o vértice v_1 que determina o local da coleta 1. O vértice I/T representa o ponto de início e término da rota.

Numa determinada rota formada, os vértices de coleta (v_i) de uma determinada rota devem ser visitados numa ordem pré-estabelecida, os arcos de conexão, não direcionados, podem ser percorridos, mais de uma vez, em qualquer sentido; a distância adicionada pela utilização do arco é a mesma e não dependendo do sentido no qual ele é percorrido.

Figura 5.6 – Representação de armazém com localizações de armazenamento a serem visitadas

Ainda, os vértices do tipo v_i e I/T devem obrigatoriamente ser visitados, já os vértices dos tipos a_j e b_j , só serão visitados quando forem necessários para a formação da rota. Assim, no exemplo apresentado na Figura 5.6, os vértices a_7 , a_8 , b_7 e b_8 , sendo extremos de corredores sem localizações de coleta a visitar e estando a direita do último corredor com coletas a serem feitas, não serão incluídos na rota, são grafos do tipo $(0, 0, 1)$, como apresentou o Teorema 1 de Ratliff e Rosenthal, (1983) e exemplifica a Figura 5.7.

Em geral pode-se afirmar que, dependendo da rota traçada, o separador se utiliza ou não de um determinado arco conectando dois vértices adjacentes. Quando a rota se utilizar de um determinado vértice, a distância correspondente a seu comprimento deve ser adicionada à sua distância da rota, ou seja, à função d . Arcos não utilizados não fazem parte da rota. Seu comprimento não deve ser adicionado à função objetivo.

A função objetivo d corresponde à soma das distâncias percorridas pelo separador durante sua viagem de coleta. Cada viagem tem uma rota específica, composta por um conjunto de vértices que devem ser visitados. O conjunto de vértices é composto pelas localizações de armazenamento com itens a serem coletados (notadas como v_i), pelos extremos dos corredores (notados como a_j e b_j) e pelo ponto I/T , de onde o separador deve iniciar e terminar a rota. Como por exemplo, uma possível rota seria $I/T - b_1 - v_1 - a_1 - a_3 - v_2 - b_3 - b_4 - v_3 - a_4 - a_5 - v_4 - a_5 - a_6 - v_5 - b_6 - I/T$ com distância total de 54,50 metros (604 cm + 188 cm + 648 cm + 168 cm + 168 cm + 648 cm + 188 cm + 168 cm + 464 cm + 372 cm + 168 cm + 188 cm + 188 cm + 168 cm + 188 cm + 648 cm + 286 cm), como mostra o grafo da Figura 5.7.

As sub-rotas admitidas representam um conjunto de vértices, todos pertencentes a um mesmo corredor j . Essas sub-rotas podem conter apenas um dos extremos do corredor (extremo a_j ou b_j) ou os dois extremos do corredor (extremos a_j e b_j), dependendo do caminho percorrido pelo separador.

Primeiramente, Roodbergen (2001) define quais seriam as duas possíveis transições entre dois corredores paralelos j e $j+1$. Caso o separador esteja posicionado em qualquer vértice do tipo a_j , ele só poderá chegar até a_{j+1} utilizando das transições do corredor traseiro, as quais foram chamadas de t_a . Analogamente, caso o separador esteja posicionado num vértice b_j , ele só poderá transacionar para b_{j+1} pelo corredor frontal do armazém e estas conexões foram chamadas de t_b . Estas conexões podem ser exemplificadas pelas transições entre os corredores 3 e 4 ou entre os corredores 5 e 6 da Figura 5.7.

Figura 5.7 – Exemplo de rota criada utilizando-se das conexões apresentadas por Roodbergen (2001)

Em relação aos corredores de separação, todo corredor sem item a ser coletado não deverá ser visitado. Porém seus extremos a_j e b_j podem participar da rota como vértices de passagem. Neste caso, quando o separador passar pelo extremo de um corredor j , mas não visitar este corredor, chamaremos de t_2 a sub-rota desse

corredor de separação, composto por um grupo nulo de localizações a visitar. Como aconteceu com o corredor 2, do exemplo da Figura 5.7.

Caso o separador cruze totalmente o corredor, independente do sentido, chamar-se-á este movimento de t_1 , como podemos perceber nos corredores 4 e 5 da Figura 5.7. Nessa Figura 5.7, o corredor 4 foi atravessado em direção aos fundos do armazém enquanto o corredor 5 foi atravessado pelo separador caminhando em direção à frente do armazém.

Duas podem ser as situações em que o separador entra num corredor com localizações a serem visitadas e deixa este corredor pelo mesmo extremo que entrou. A primeira acontece quando o separador, utilizando-se de t_b , chega ao vértice a_j de corredor. Neste caso, ele, obrigatoriamente volta a a_j depois de coletar os itens localizados neste corredor. Esta sub-rotina ou rota parcial relativa ao corredor j é chamada t_3 e um exemplo pode ser visto na sub-rotina criada para os corredores 1 e 3 da Figura 5.7.

Quando o separador chega a um corredor j utilizando-se de t_a , devendo entrar e sair pelo mesmo extremo deste corredor; chama-se esta sub-rotina de t_4 , como exemplifica o corredor 5 da Figura 5.7.

Assim, como notação tem-se:

$J = 1, 2, 3 \dots n$	indica os corredores de separação, numerados de tal modo que $j-1$ e $j+1$ são os corredores vizinhos de j . Os corredores são sempre numerados da esquerda para a direita.
a_j	representa o extremo final do corredor j ($j = 1, 2, 3, \dots, n$)
b_j	representa o extremo frontal do corredor j ($j = 1, 2, 3, \dots, n$)
v_i	representa a localização a ser visitada i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)
I/T	representa o ponto de início e término da rota
d	representa a função objetivo, a soma das distâncias percorrida pelo separador durante a rota de coleta

t_a	o separador muda de corredor de separação utilizando-se do corredor transversal localizado no fundo do armazém
t_b	o separador muda de corredor de separação utilizando-se do corredor transversal frontal do armazém
t_1	o separador atravessa totalmente o segmento de corredor
t_2	o separador não entra no corredor pois não existem itens a separar que estejam localizados nesse corredor
t_3	o separador entra e sai pelo extremo frontal do corredor
t_4	o separador entra e sai pelo extremo final do corredor

5.2.1. Detalhamento da lógica de resolução e programação

Para exemplificar a utilização do algoritmo toma-se como exemplo o armazém esquematicamente apresentado na Figura 5.8. O lado esquerdo da Figura 5.8 apresenta um leiaute de um armazém com três corredores de separação, seis seqüências de prateleiras de armazenamento e dois corredores transversais, um frontal e outro traseiro. As localizações marcadas em preto representam localizações que devem ser visitadas pelo separador.

O lado direito da Figura 5.8 mostra esse mesmo armazém, agora na forma de um sub-grafo. Neste sub-grafo do armazém, contendo as localizações a serem visitadas, também se pode encontrar, assinaladas ao lado dos arcos, as distâncias relativas às conexões entre os vértices. Somente as conexões possíveis têm sua distância calculada, assim, a conexão entre os vértices v_2 e v_4 , por ser impossível de se percorrer, não apresentam distância calculada.

Todas as rotas terão início no corredor mais a esquerda em relação ao ponto de início/término que contiver itens para serem separados e terminarão no corredor mais à direita em relação ao ponto de início/término que contiver localizações a serem visitadas, independentemente do corredor.

Figura 5.8 - Leiaute de armazém para exemplo numérico

Iniciar as rotas em um extremo do armazém corresponde a iniciar as rotas num extremo do campo geográfico das possíveis soluções, a partir de onde só uma direção na sequência de corredores a serem visitados é factível. Desta forma, elimina-se a necessidade do algoritmo solucionar o problema tendo duas possíveis direções de solução. O início da solução num corredor extremo assegura a solução ótima, se ela puder ser assegurada. Para a aplicação do algoritmo proposto, três passos devem ser seguidos.

Passo 1: Deve-se começar a resolução formando as duas possíveis sub-rotas para o corredor mais a esquerda em relação ao ponto I/T e calculando seus comprimentos. Sempre uma das possíveis sub-rotas terminará em a_j (L_j^a) enquanto a outra terminará em b_j (L_j^b).

É importante notar que L representa distância percorrida e que esta distância é computada até os vértices a_j ou b_j de um corredor j qualquer que já tenha sido roteirizado.

Na Figura 5.9 estão representadas as duas possíveis rotas para o corredor $j=1$ (L_1^a e L_1^b) e suas respectivas distâncias associadas.

comprimento da sub-rota que começa em I/T e termina no nó , visitando os vértices contidos em $j=1$

comprimento da sub-rota que começa em I/T e termina no nó , visitando os vértices contidos em $j=1$

Figura 5.9 – Possíveis rotas e , para o corredor $j=1$

Caso exista um só corredor com itens a serem coletados, $j=1=n$ adiciona-se as sub-rotas e , a distância necessária para se retornar a I/T . Está finalizado o processo de roteirização, escolhe-se a rota com menor distância percorrida. A figura 5.10 exemplifica essa situação descrita. Caso $j=1 \neq n$, inicia-se o passo 2.

Figura 5.10 – Possíveis rotas para separações com apenas 1 corredor visitado

Passo 2: Para cada corredor consecutivo j ($1 < j < n$) determina-se a distância e .

Cada corredor $j-1$ roteirizado cria duas opções de início para a roteirização de j (e), sendo elas a sub-rota de menor distância que terminou em e a sub-rota de menor distância que terminou em .

Cada uma das opções de início pode acabar em um dos dois extremos do corredor j (vértices ou vértice). Assim, cada corredor j roteirizado gera quatro sub-rotas, duas do tipo e duas do tipo e . Sempre se deve escolher a rota mais curta entre as duas que terminarem em um mesmo vértice extremo do corredor.

Para se encontrar a distância de I/T até a roteirização de j , e assim determinar a rota mais curta entre as opções a comparar, deve-se, para cada sub-grafo parcial de $j=1$

(L_1^a e L_1^b), adicionar a distância para se percorrer de L_1 até L_j onde j corresponde ao último corredor já roteirizado. Como apresentado na Figura 5.11, a melhor opção para a sub-roteira L_j^a , j ($1 < j < n$) será:

$$L_j^a = \begin{cases} L_{j-1}^a + t_a + t_4 & \text{se } d(L_{j-1}^a + t_a + t_4) < d(L_{j-1}^b + t_b + t_1) \\ \text{Caso contrário} & d(L_{j-1}^b + t_b + t_1) \end{cases}$$

Figura 5.11 – Possíveis rotas L_2^a para o corredor $j=2$

Como apresentado na Figura 5.12, a melhor opção para a sub-roteira L_j^b , j ($1 < j < n$) será:

$$L_j^b = \begin{cases} L_{j-1}^b + t_b + t_3 & \text{se } d(L_{j-1}^b + t_b + t_3) < d(L_{j-1}^a + t_a + t_1) \\ \text{Caso contrário} & d(L_{j-1}^a + t_a + t_1) \end{cases}$$

L_j^a e L_j^b representam as distâncias percorridas, respectivamente, até a_j e b_j e, para continuar a roteirização deve-se escolher a rota mais curta tanto para L_j^a quanto para L_j^b . As distâncias destas duas sub-rotas traçadas são o ponto de início para a roteirização do corredor $j+1$, $1 < j+1 < n$.

Figura 5.12 – Possíveis rotas L_2^b para o corredor $j=2$

A Figura 5.13 apresenta as duas rotas parciais L_2^a e L_2^b escolhidas no exemplo proposto. Repete-se o Passo 2 até que $j+1=n$ quando inicia-se o Passo 3 da roteirização.

Figura 5.13 – Rotas escolhidas para o corredor $j=2$

A programação apresentada na Figura 5.14 detalha nas linhas 17 a 20 a fórmula de cálculo das distâncias, tanto daquela relativa à sub-rote que retorna ao mesmo extremo de entrada do corredor, quanto àquela relativa ao seu atravessamento.

A lógica para a escolha da melhor sub-rote L_j^a e L_j^b , para que se possa continuar a roteirização de L_{j+1}^a e L_{j+1}^b estão apresentadas nas linhas 27 a 29. Mantém-se esta sub-rotina ativa até que $j+1=n$.

Se o corredor j , $j>1$, não contiver nenhum item a separar então:

$$L_j^a = L_{j-1}^a + t_a$$

$$L_j^b = L_{j-1}^b + t_b$$

Se $j=n$, L_j^a é contraproducente, pois, uma vez que todas as rotas devem acabar em I/T , o separador deveria ainda partir de a_j , cruzar novamente todo o corredor n em direção a b_j e depois dirigir-se até I/T . Assim, se $j=n$ inicia-se o Passo 3.

```

1  'Deslocamento constante até próximo trilho = ta ou Tb
2  best(a) = best(a) + dst_bet_trail
3  best(b) = best(b) + dst_bet_trail
4  ' Roteirização
5  '0 = b-x-b; x = maxb(t); ref best(b)
6  '1 = b-a; ref best(a);
7  '2 = a-x-a; x = minb(t); ref best(a)
8  '3 = a-b; ref best(b)
9  For t = itl_trail + 1 To nt
10 Range("info_interacao") = t & "/" & nt
11 Range("info_NINT") = t
12 Range("info_MAXINT") = nt
13     'Se há produto para coleta, gera-se as opções.
14     'Caso contrário, verifica-se se há mais produtos para coleta
15     If maxb(t) > 0 Then
16         tt = tt + 1
17         desloc(0) = (dst_trail - (dst_trail - maxb(t))) * 2
18         desloc(1) = dst_trail
19         desloc(2) = (minb(t)) * 2
20         desloc(3) = dst_trail
21
22         opc(0) = best(b) + desloc(0) 'best(b) vai e volta, continua b
23         opc(1) = best(b) + desloc(1) 'best(b) atravessa até a, transforma-se em a
24         opc(2) = best(a) + desloc(2) 'best(a) vai e volta, continua a
25         opc(3) = best(a) + desloc(3) 'best(a) atravessa até b, transforma-se em b
26
27         'COMPARA-SE AS OPÇÕES. Se opção for melhor, opção muda-se pra best
28         '0 com 3: BEST(b)
29         '1 com 2: BEST(a)
30         ii = ii + 1

```

Figura 5.14 – Lógica de roteirização para corredores intermediários

Passo 3: Para o último corredor do armazém, quando $j=n$, determina-se

$$L_n^b = \begin{cases} L_{n-1}^b + t_b + t_3 & \text{se } d(L_{n-1}^b + t_b + t_3) < d(L_{n-1}^a + t_a + t_1) \\ \text{Caso contrário} & d(L_{n-1}^a + t_a + t_1) \end{cases}$$

Ao resultado da rota parcial L_n^b adiciona-se a distância entre b_n e I/T . Escolhe-se como solução do problema a rota com menor comprimento depois da adição da distância entre b_j e I/T .

A função objetivo d , representando o comprimento da rota é recalculada a cada conexão entre vértices ou sub-rota percorrida, adiciona-se a ela a distância então percorrida pelo separador. O resultado do exemplo numérico pode ser encontrado na Figura 5.15.

Figura 5.15 – Possíveis rotas L_n^b para o corredor $j=n$

É importante ressaltar que as transições definidas Roodbergen (2001) só informam o modo de entrar e sair do corredor e a forma de conectá-los, não contendo nenhuma informação sobre a distância. Tais distâncias devem ser informadas nos grafos, para que se possa calcular a distância total percorrida na rota.

Este algoritmo é capaz de criar rotas mais curtas e com maior confiabilidade que as rotas atualmente traçadas, subjetivamente, pelos separadores, como será apresentado adiante.

Na programação desenvolvida, a sub-rota do último corredor deve, obrigatoriamente, terminar em seu extremo frontal. Assim, apenas duas opções de rotas são possíveis. Esta opções de rota estão calculadas nas linhas 2 e 3 da rotina apresentada na Figura 5.16.

1	<i>If t = lst_trail Then 'se é último trilha com produto</i>
2	<i>best(b) = best(b) + start_distances(t) or</i>
3	<i>best(a) = best(a) + dst_trail + start_distances(t)</i>
4	<i>step = step + 1</i>
5	<i>registra_interacao step, -1, 0, start_distances(t), -1, best(b), True, 0</i>
6	<i>registra_interacao step, -1, 1, dst_trail + start_distances(t), -1,</i>
7	<i>best(a), True, 0</i>

Figura 5.16 – Lógica de roteirização para o último corredor

Ao final da roteirização do último corredor acrescenta-se a distância deste até o ponto I/T da rota finalizando a rotina.

5.3. Desenvolvimento do sistema

Aplicando-se a lógica apresentada o algoritmo foi desenvolvido em ambiente de planilha Excel, utilizando-se do VBA como linguagem de programação. Decidiu-se pela utilização de planilhas Excel porque o programa já é utilizado por empresas de menor porte, aumentando as possibilidades da utilização do algoritmo em situações reais de separação manual de produtos.

Houve a possibilidade de desenvolver o algoritmo em linguagem específica para a implementação em ambiente Microsiga, um software de ERP muito utilizado em pequenas e médias empresas no Brasil. Entretanto, utilizando-se do Excel, não se limita a utilização do sistema desenvolvido em ambientes específicos, nem se restringe o entendimento de sua lógica a programadores profissionais. Ainda, mantém a possibilidade de um algoritmo como uma opção de baixo custo.

O algoritmo foi originalmente estruturado para a roteirização da coleta de um conjunto de peças pertencentes à estrutura do produto da empresa objeto de estudo, no armazém por ela utilizado. Entretanto, durante a programação tomou-se a decisão por torná-lo mais genérico. Assim, o algoritmo implementado é genérico para ser utilizado na roteirização de diferentes tamanhos de listas de separação em diferentes leiautes de armazém.

Para simular a utilização desta generalidade do sistema desenvolvido, foi preciso o sorteio de grupos de peças a coletar e de localizações a serem utilizadas num armazém teórico, com número diferente de corredores ou prateleiras. Para os sorteios necessários, foi utilizado o algoritmo Mersenne Twister. Decidiu-se pela utilização de tal algoritmo em preferência a função de geração de números randômicos do Excel RAND() e a função Rnd() contida no VBA pois, seu período de $2^{19937} - 1$, apresenta menor probabilidade dos números sorteados se repetirem.

Mesmo não sendo completamente seguro, uma vez que se poderia descobrir a continuação de uma determinada seqüência a partir de um período longo de sorteios (Matsumoto e Nishimura, 1998), este gerador apresenta períodos muito maiores que os outros geradores citados.

5.4. Considerações finais do capítulo

No Capítulo 5 procurou-se apresentar de forma teórica e com um exemplo numérico a lógica de funcionamento do algoritmo a ser utilizado na resolução do problema proposto.

O entendimento da lógica utilizada é importante para que se possa corretamente entender os parâmetros e utilizar-se do algoritmo, foco do Capítulo 6 a seguir. No mesmo capítulo, serão apresentados testes aplicados à programação para validar sua lógica e funcionamento.

6. DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO, EXPERIMENTOS E TESTES

6.1. Introdução ao sistema - premissas

Este capítulo tem por objetivo discutir sobre as características do sistema desenvolvido, sua utilização e funcionalidades, finalizando por apresentar os testes aplicados para garantir seu perfeito funcionamento.

Inicialmente, o algoritmo foi projetado para resolver o problema de roteirização da coleta manual de peças em uma empresa onde, por requisitos da produção, os itens que compõem um dado subsistema do produto devem ser obrigatoriamente coletados na mesma viagem de separação.

Conforme anteriormente discutido no Capítulo 4, o problema inicialmente proposto tem parâmetros detalhadamente definidos, como, por exemplo, o tamanho das listas de peças a serem separadas, o número de corredores e seus comprimentos, o número de prateleiras por corredor e o número de itens por prateleira. Entretanto, estas características não podiam ser admitidas iguais para outros armazéns que apresentam o mesmo problema de roteirização da coleta.

Assim, optou-se por desenvolver um sistema de apoio a decisão (SAD), cujo núcleo central é o algoritmo proposto, com características que o tornassem genérico. O sistema desenvolvido pode ser parametrizado de acordo com as características de leiaute e da operação específica para a qual as rotas serão programadas. Como anteriormente mencionado, o algoritmo foi desenvolvido em ambiente de planilha Excel, utilizando-se do VBA como linguagem de programação.

As parametrizações do sistema devem seguir algumas premissas básicas, sob as quais a lógica do sistema foi desenvolvida. A premissa mais importante diz respeito ao leiaute do armazém; mais especificamente, possibilita a sua utilização em armazéns com até dois corredores transversais, um frontal e outro traseiro. Também

se deve respeitar o alinhamento dos corredores de separação, os quais devem ser perpendiculares à lateral do armazém que contenha o ponto I/T . Ainda sobre o leiaute, I/T deve estar localizado no ponto central do corredor transversal frontal.

Em relação às ordens a serem separadas, admite-se que não há nenhum processo que requeira o agrupamento de ordens antes de suas coletas. Ainda, independente do número de peças a serem separadas, assume-se que o separador tem capacidade para coletar e transportar todas as peças requeridas para que complete a rota. Em cada viagem de coleta, cada separador só pode trabalhar em uma única lista de separação, não podendo existir separadores trabalhando paralelamente em diferentes listas de separação.

Sobre o processo de deslocamento, todas as rotas são percorridas a pé, sem nenhum auxílio de equipamento motorizado. As prateleiras têm altura que permitem ao separador coletar todas as peças armazenadas independente da altura do endereço de armazenamento. Sempre que existir a necessidade de visitar uma localização de coleta, o separador irá se deslocar até o ponto médio do comprimento da prateleira. Considera-se que não há deslocamentos para a coleta de mais de um item numa mesma prateleira. Ainda, a profundidade das prateleiras foi fixada em 44 centímetros, mesma profundidade que as prateleiras atualmente utilizadas pela empresa.

Ainda, a_j e b_j estão localizadas a 50 centímetros do extremo final do corredor, determinando a distância da lateral do corredor que o separador caminha enquanto se desloca pelos corredores de transição.

Quando houver mudanças no número de corredores de separação, o sistema ajusta o tamanho do armazém, aumentando ou diminuindo sua largura e profundidade de acordo com o número de corredores adicionados e medidas escolhidas durante sua parametrização.

Ainda em relação aos corredores, a largura do corredor é considerada como suficiente para que o separador faça as coletas, em prateleiras opostas, sem necessidade de deslocamento lateral; o separador sempre irá se deslocar pelo ponto

médio da distância entre as prateleiras que formam o corredor. Uma vez que as laterais dos corredores são formadas por um conjunto de prateleiras, o comprimento desses corredores deve, sempre, ser um múltiplo de comprimento da prateleira.

De posse destas informações, serão apresentadas a seguir as possibilidades de configuração do sistema, as telas de entradas de dados e, para algumas ocasiões, a lógica utilizada durante a programação do sistema.

6.2. Configuração dos dados de entrada

O Quadro 6.1 sintetiza os parâmetros de entrada para o sistema desenvolvido. Todas as configurações apresentadas nesse quadro podem ser alteradas de acordo com as características da operação de separação manual de peças onde este sistema for utilizado.

Quadro 6.1 – Configuração do algoritmo proposto

Característica	Configuração
Número de corredores de separação	O sistema aceita até 30 corredores
Distância entre corredores	De acordo com necessidade, distância é utilizada para cálculo das movimentações nos corredores transversais.
Largura dos corredores de separação	De acordo com necessidade, distância é utilizada para cálculo das movimentações nos corredores transversais.
Número de prateleiras	Parametrizável de acordo com necessidade
Comprimento da prateleira	Parametrizável de acordo com necessidade
Número de Itens por prateleira	Parametrizável de acordo com necessidade
Tamanho da lista de separação	Parametrizável de acordo com necessidade
Políticas de armazenamento	Parametrizável de acordo com necessidade
Políticas de separação	Parametrizável de acordo com necessidade

Pode-se notar pelo Quadro 6.1 que alguns parâmetros não mencionados nos artigos apresentados durante a revisão bibliográfica foram cuidadosamente adicionados na

solução proposta, como, por exemplo, a largura do corredor de separação, o comprimento da prateleira e o número de itens endereçados em cada vértice (prateleira).

Pela flexibilidade dos parâmetros apresentados no Quadro 6.1 é possível notar a possível utilização do sistema para armazéns com inúmeros diferentes leiautes, políticas de armazenamento e separação. Todas as parametrizações podem ser feitas pelo usuário do sistema através das planilhas do Excel.

Em linhas gerais, os dados de entrada para a configuração do sistema podem ser divididos em três grupos: leiaute do armazém, listas de separação e localização/endereçamento dos itens armazenados.

Em relação ao leiaute do armazém, o sistema está preparado para trabalhar com o número de corredores determinados no problema original (oito), porém, admite leiautes com até 30 corredores. Em ambos os casos, deve-se informar ao sistema quais faces (seqüência de prateleiras) delimitam quais corredores. O sistema admite a formação de corredores com apenas uma face de coleta, como aconteceu no problema real em análise.

O lado esquerdo da Figura 6.1 mostra um exemplo da tela de entrada de dados preenchido com a formação dos corredores. Observa-se na coluna Corredor da Figura 6.1 que as faces O e N formam o corredor 1; e sempre o corredor 1 será o primeiro corredor do armazém, o corredor mais a esquerda em relação ao ponto I/T . No lado direito da Figura 6.1, para cada corredor de coleta é informada a distância de seu extremo frontal até I/T .

Depois de definido o número de corredores e respectivas faces, é necessário definir qual é o número de prateleiras por face de corredor e qual é o comprimento de cada prateleira (comprimento dos vértices v_i). Como se pode notar na Figura 6.2, para a face O, oito prateleiras foram criadas, todas na coluna Prateleira.

Corredor x Prateleira		Distância até I/T	
Face	Corredor	Corredor	DIST_INI
O	1	1	6,0
N	1	2	4,4
M	2	3	2,9
L	2	4	1,6
K	3	5	1,6
J	3	6	2,9
I	4	7	4,4
H	4	8	6,0

Figura 6.1 – Tela de entrada de dados – corredores e faces

Ainda na Figura 6.2 coluna Prateleira, pode-se notar que enquanto a seqüência de prateleiras O é formada por oito prateleiras de armazenamento, numeradas de 1 a 8, a seqüência N é formada por apenas 5, numeradas de 4 até 8. Esta diferenciação entre faces de mesmo corredor existe para adequar o método de solução aos problemas reais encontrados. Neste exemplo, como aconteceu no armazém objeto de estudo deste trabalho, uma das seqüências de prateleiras delimitando um corredor é 3 unidades mais curta que a outra.

Config Corredores e Sequências de Prateleiras					
Face	Primeiro	Último	Corredor	Prateleira	DESLOC+
O	1	10	1	1	
O	11	24	1	2	
O	24	37	1	3	
O	38	60	1	4	
O	61	77	1	5	
O	78	100	1	6	
O	101	119	1	7	
O	120	138	1	8	
N	1	19	1	4	3
N	20	30	1	5	
N	31	45	1	6	
N	46	54	1	7	
N	55	58	1	8	

Figura 6.2 – Tela de entrada de dados – prateleiras por corredor

No mesmo formulário apresentado na Figura 6.2 informam-se quais endereços estão contidos em cada uma das prateleiras. A coluna “Primeiro” determina o primeiro endereço e a coluna Último determina o último endereço de armazenamento contido na correspondente prateleira. Desta forma, é possível determinar quantidades diferentes de posições de armazenamento para cada prateleira específica. Novamente esta flexibilidade segue o que acontece no dia-a-dia dos armazéns.

A configuração do leiaute do armazém termina quando o operador informa o comprimento da prateleira de armazenamento (o comprimento dos vértices v_i); no exemplo apresentado na Figura 6.3 informou-se 0,92 metros. Este refinamento também não foi encontrado nos trabalhos da literatura revisada no Capítulo 3.

Configurações Gerais	Valor	Unid
Tamanho do Corredor:	7,36	metro
Distância entre Corredores	1,68	metro
Número de Corredores	8,00	und
Comprimento da Prateleira	0,92	metro

Figura 6.3 – Tela de entrada de dados – comprimento das prateleiras

Ainda na tela apresentada na Figura 6.3, se deve informar ao sistema a distância entre corredores de separação, pois, a cada mudança de corredor de separação, utilizando-se do corredor de transição, o comprimento desta distância influenciará no comprimento da rota.

Com as informações fornecidas até aqui, o sistema já pode calcular o comprimento dos corredores e a distância de cada vértice até o extremo de seu corredor.

Terminada a configuração do leiaute do armazém, deve-se agora informar ao sistema as estruturas dos produtos ou as listas de peças a serem separados. Na Figura 6.4, seis diferentes listas de coletas, referentes a seis diferentes subprodutos, foram informadas, como se pode ver nas linhas 4 e 5 da tela apresentada. O sistema tratará cada lista de coleta como uma rota diferente.

Como discutido, o sistema não faz nenhum tratamento de consolidação de listas. Entretanto, pela flexibilidade no tamanho das listas, podendo conter até mil itens, nada impede que o trabalho de consolidação seja feito antes da entrada de dados nesta tela.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Listas de Separação						
2	Conjunto de itens ou estrutura de produto						
3							
4		1	2	3	4	5	6
5	Lista	LA24300050	LA24300060	LA24300070	LA24300300	LA24300303	LA24300306
6	ITENS	LA12300312	LA24101420	LA24101364	LA12700021	LA21100140	LA25601005
7		LA24200703			LA24101362		LA51700035
8		LA91200323			LA24200304		
9		LA91200324			LA24200310		
10		LA91517004			LA24200318		
11					LA24300302		

Figura 6.4 – Estrutura de produtos ou listas de separação a roteirizar

A Figura 6.5 mostra a tela utilizada para o endereçamento dos itens nas localizações disponíveis no armazém. Nesta figura nota-se que o sistema informa, na linha de número 3, o número total de itens endereçados. Ainda na Figura 6.5, a linha 6 mostra o endereçamento do item LA12300312, alocado na face de coleta O e endereço de número 13. O item LA12300312 é o primeiro da lista de peças que compõe o produto LA24300050, informado na célula B6 da Figura 6.4.

O sistema utiliza as localizações criadas via tela mostrada na Figura 6.2 para determinar onde cada item criado na planilha apresentada na Figura 6.5 está endereçado. Sabendo da localização de cada item, a lista de separação é percorrida para que as localizações a serem visitadas sejam então determinadas. É a partir desta determinação que o sistema começa o trabalho de roteirização.

Cada formulário de entrada de dados cria uma tabela de armazenamento de informações, cada tabela se relaciona a uma variável do sistema. A caracterização das variáveis do sistema é apresentada no Quadro 6.2 enquanto a lista das tabelas responsáveis por armazenar os dados é apresentada no Quadro 6.3; estas tabelas formam a base de dados para todos os cálculos feitos pelo sistema no processo de definição da rota.

B	C	D
LOCALIZAÇÃO DOS ITENS		
Total:	180	endereçados
Item	Face	Endereço
LA12300312	O	13
LA24200703	K	101
LA91200323	C	28
LA91200324	C	29
LA91517004	C	45

Figura 6.5 – Tela de endereçamento

Quadro 6.2 – Determinação das variáveis relacionadas aos dados de entrada

1	<i>Dim nt</i>	<i>As Integer 'Número de corredores</i>
2	<i>Dim maxb()</i>	<i>As Double 'Máxima distância de bloco no corredor t</i>
3	<i>Dim minb()</i>	<i>As Double 'Mínima distância de bloco no corredor t</i>
4	<i>Dim itl_trail</i>	<i>As Integer 'Corredor inicial. Mais a esquerda</i>
5	<i>Dim start_distances()</i>	<i>As Double 'Distância ponto partida ao corredor 1</i>
6	<i>Dim dst_trail</i>	<i>As Double 'Comprimento do corredor</i>
7	<i>Dim dst_bet_trail</i>	<i>As Double 'Distância entre corredores</i>
8	<i>Dim dst_block</i>	<i>As Double 'Comprimento da prateleira</i>
9	<i>Dim lst_trail</i>	<i>As Integer 'Corredor final</i>

A tabela descrita na linha 11 do Quadro 6.3 – Range (“report_prateleiras”), por exemplo, determina que o roteirizador deva utilizar um número de prateleiras definido pelo operador na tabela (“num_prateleiras”) descartando o número de prateleiras do problema original, determinado em 15.

Quadro 6.3 – Lista das tabelas de dados criadas pelo sistema

1	<i>Range("report_corredor")</i>	<i>= Range("tam_corredor")</i>
2	<i>Range("report_tamcorredor")</i>	<i>= Range("tam_bet_corredor")</i>
3	<i>Range("INFOG")(3, 1)</i>	<i>= Now</i>
4	<i>Range("report_prateleira")</i>	<i>= Range("tam_prateleira")</i>
5	<i>Range("report_sel")</i>	<i>= "Cenário" & Range("sel_cenario")</i>
6	<i>Range("report_prod")</i>	<i>= Range("txt_produto")</i>
7	<i>Range("report_max")</i>	<i>= Range("maxitem")</i>
8	<i>Range("report_min")</i>	<i>= Range("minitem")</i>
9	<i>Range("report_rodada")</i>	<i>= actualbatch</i>
10	<i>Range("report_semente")</i>	<i>= Range("semente")</i>
11	<i>Range("report_prateleiras")</i>	<i>= IIf(Range("sel_opção") = "3", Range("num_prateleiras"), 15)</i>

De acordo com sua parametrização, o sistema pode então ser utilizado para três objetivos diferentes:

- a. Roteirizar coletas de subconjuntos de produto em armazém existente, porém parametrizável às necessidades do usuário.
- b. Roteirizar as coletas de grupos aleatórios de peças (simulando um conjunto de peças a ser direcionado à assistência técnica), e
- c. Roteirizar as listas de separação cadastradas num novo armazém, flexível em relação ao número de corredores, número de bandejas por prateleira e dimensões, simulando aumentos na área de armazenagem da empresa.

Tem-se assim, a descrição da flexibilidade do algoritmo também em relação a sua aplicação. Independente da opção de utilização selecionada, a lógica utilizada pelo sistema para a roteirização das coletas será a mesma.

6.3. Testes de funcionalidade e de validação

A fim de testar o sistema desenvolvido foram propostos 6 testes funcionais e 8 problemas para validação da capacidade do algoritmo em traçar as rotas de acordo com a lógica determinada. Todos os testes têm baixa complexidade, sendo simples o suficiente para que se possa calcular manualmente, utilizando-se da mesma lógica do algoritmo proposto, qual seria a melhor rota a ser percorrida.

Os testes funcionais foram montados para validar a lógica de solução e as fórmulas de cálculo das distâncias contidas no sistema. Assim, os testes 1, 2 e 3 avaliaram a capacidade do algoritmo de encontrar o corredor mais a esquerda do ponto de início e término da rota que contenha itens a serem coletados.

O teste 4 comprovou a capacidade do algoritmo de encontrar posições em corredores diferentes, seqüenciar as coletas a partir do corredor mais a esquerda e corretamente calcular as distância percorridas, tanto nos corredores de separação quanto nos corredores transversais.

No teste 5 foram adicionadas visitas à localizações mais distantes do extremo frontal do corredor testando novamente as fórmulas de cálculos de distâncias. Neste teste, o algoritmo trabalhou com dois corredores contendo localizações a visitar. No teste 6, a adição do terceiro corredor com localizações a serem visitadas, avaliou a capacidade do algoritmo em decidir pelas opções a) atravessar completamente um corredor ou b) entrar e sair de um corredor utilizando-se de um mesmo extremo.

A partir do teste 7 as rotas foram propostas com o objetivo de efetivamente validar o algoritmo para utilização no problema proposto. O teste 7 validou a capacidade do sistema em calcular e recalculer a rota de coleta quando novas localizações devem ser visitadas. A adição da localização assinalada com a letra X no lado esquerdo da Figura 6.6 determinou nova rota de passagem no corredor vizinho, delimitados pelas prateleiras (e / d). Também estão apresentados na Figura 6.6 os resultados, distância e rota, calculados para as duas listas de coleta preparadas.

Os testes 8 e 9 avaliaram a capacidade do sistema em decidir sobre uma nova rota quando uma localização que não seja a definidora de traçado (identificada com um X na Figura 6.7) é retirada da lista de coleta.

Figura 6.6 – O Impacto feito na rota pela adição de localizações a visitar

O teste 10 validou a inclusão da quarta prateleira, enquanto o teste 11 validou a inclusão do quarto corredor de separação. O cenário com 4 corredores validou rotas com mais de uma decisão de caminho entre o primeiro e o último corredor a visitar. Os testes 12, 13 e 14 foram criados para validar a lógica de roteirização do primeiro e do último corredor, as quais são similares entre si, porém distintas da lógica de decisão dos corredores intermediários.

Figura 6.7 – O Impacto feito na rota pela exclusão de localizações a visitar

Na Tabela 6.1 estão apresentados os resultados obtidos e esperados tanto para os problemas criados para teste de funcionalidade quanto para os problemas criados para a validação do sistema. Todos os resultados esperados foram calculados aplicando-se a lógica do algoritmo em resolução manual das roteirizações propostas.

Tabela 6.1 – Tabela de testes e resultados para a validação do algoritmo

	Teste Número													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Coleta 1	C45	C45	C45	J3	C131	C144	C144	C45	C45	J3	J119	O13	O13	O13
Coleta 2		C144	C131	G28	C144	D86	D86	D86	D86	G28	L114	K101	C18	K64
Coleta 3			C144		O13	F82	D33	D33	D87	D87	I92			
Coleta 4					O16		F82	F82	F82	F82	O16			
Resultado Esperado	11,68	20,88	20,88	12,69	36,32	30,86	34,54	29,02	29,02	28,54	34,22	24,39	25,28	20,71
Resultado Obtido	11,68	20,88	20,88	12,69	36,32	30,86	34,54	29,02	29,02	28,54	34,22	24,39	25,28	20,71

6.4. Testes adicionais

Ainda na fase de testes do sistema, um novo leiaute de armazém foi configurado para validar a terceira opção de utilização do algoritmo. O problema apresentado por Ratliff e Rosenthal (1983) e Roodbergem (2001), a roteirização da coleta de 12 itens em armazém com 12 prateleiras e 6 corredores, conforme leiaute apresentado na Figura 6.8.

Figura 6.8 – Representações de um centro de distribuição: corredores e grafo

Fonte: Ratliff e Rosenthal (1983)

A rota obtida pelo algoritmo desenvolvido foi a mesma obtida através da resolução manual do problema, também se utilizando da heurística desenvolvida por Roodbergen (2001). O sistema também traçou a mesma rota que foi traçada pela utilização desta heurística pelos autores, para a coleta de itens nas localizações assinaladas com a letra *c*, confirmando o correto funcionamento do sistema, como mostra a rota apresentada na Figura 6.9.

Deve-se ressaltar que duas diferenças nas hipóteses do algoritmo apresentado nesta dissertação com as hipóteses encontradas na revisão bibliográfica fazem com que os resultados numéricos não fossem iguais, mesmo a rota sendo a mesma.

Figura 6.9 – Rota solução para o problema de Ratliff e Rosenthal (1983)

A primeira diferença está na localização teórica até onde o separador se desloca para fazer a coleta em uma determinada prateleira. Os autores consideram o vértice como um ponto sem dimensão, enquanto o algoritmo apresentado nesta dissertação considera que o separador se desloca até o meio da prateleira, com dimensões especificadas, adicionando metade de sua extensão como deslocamento necessário para a coleta.

Outra diferença está no fato do algoritmo aqui apresentado considerar um deslocamento de 0,5 metros em todas as entradas e saídas dos corredores de separação, assumindo que o separador caminha nos corredores transversais, a 0,5 metros de distância do final das prateleiras de armazenamento.

O algoritmo passou por várias correções que ajustaram três fontes principais de erros. A correção mais significativa foi na fórmula de cálculo da rota do primeiro corredor. O cálculo da distância referente ao separador entrar e sair pelo mesmo extremo se dá em relação ao item mais próximo do extremo oposto – sempre o extremo traseiro no caso do primeiro corredor. Entretanto, utilizando a regra genérica dos corredores intermediários, o sistema calculava e comparava a distância dos dois extremos em relação a seus itens mais distantes, quando somente a distância do extremo frontal é factível. Problema corrigido com a mudança do cálculo das distâncias relativas aos extremos opostos do corredor.

A segunda fonte de erros foi o cálculo da rota do último corredor, que apresentava o mesmo erro conceitual que o cálculo do primeiro corredor. O último corredor só apresenta opções factíveis de rota terminando no extremo frontal, porém o sistema comparava e calculava as opções terminando nos dois extremos.

A terceira correção feita foi um ajuste em relação ao extremo das prateleiras que se considera como a_j e ao extremo que se considera b_j , a fim de iniciar a distribuição das localizações de armazenamento. O sistema distribuía as localizações dos fundos para frente, causando um efeito espelho que, visualmente, parecia correto, mas gerava rotas erradas. Esta falha também foi corrigida.

Para possibilitar a comparação dos tempos de processamento das diversas configurações utilizadas, todos os testes e experimentos foram feitos num mesmo e único computador. O computador utilizado tem processador AMD® Athlon Dual Core com velocidade de 2.3 GHz e conta com 2,00 GB de memória RAM. O sistema operacional instalado no computador utilizado é o Windows Vista e a versão do software Excel utilizada foi a 2007.

6.5. Considerações finais do capítulo

Terminada a fase de testes do sistema, pode-se dizer que o funcionamento do algoritmo está correto. Para todos os testes aplicados, na forma de problemas direcionados a validação de funcionalidades específicas, o algoritmo apresentou a resposta correta. Assim, não há razões para dizer que o sistema não pode ser aplicado em situações reais de roteirização.

No capítulo a seguir serão apresentadas as análises e os resultados obtidos com a utilização do algoritmo na roteirização de listas de separação relacionadas a subconjuntos do produto final, na roteirização de grupos aleatórios de peças, e no estudo do impacto do número de corredores de separação no comprimento das rotas.

7. AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DO ALGORITMO ATRAVÉS DE ESTUDO DE CASO

O algoritmo de roteirização desenvolvido foi configurado de acordo com as características do problema original de roteirização da separação manual de peças no armazém da manufatura de produtos hospitalares, problema que, a partir deste ponto, será chamado de problema original.

Depois de terminada a configuração, utilizou-se o sistema para roteirizar as 34 listas de separação que compõem o produto LA257. As características do problema original discutidas no Capítulo 4 deste trabalho são apresentadas no Quadro 7.1 e os resultados da roteirização serão discutidos mais adiante.

Quadro 7.1 – Sumário dos parâmetros do problema original

Característica	Configuração
Ponto de início e término	Central
Número de corredores	8
Comprimento do corredor	7,36 metros
Largura do corredor	0,80 metro
Comprimento da prateleira	0,92 metro
Profundidade da prateleira	0,44 metro
Listas de separação	34 (referentes aos 34 Pls a serem separados)
Tamanho da lista de separação	1,2,3,4,5,6,7,9,11,12,14,15,18,19 e 49 peças
Número de peças por prateleira	Variado
Política de armazenamento	Randômica
Concentração de itens	Aleatória

Os dados de entrada para a configuração do sistema de roteirização podem ser divididos em três grupos: leiaute do armazém, políticas de armazenamento/localização e listas de separação. As características do leiaute do armazém do problema original foram coletadas no próprio armazém, através da medição das distâncias e dos comprimentos necessários, como, por exemplo, o

comprimento das prateleiras de armazenamento. Os endereços de armazenamento das peças foram coletados diretamente das tabelas de dados do sistema ERP utilizado pela empresa. Finalmente, as listas de separação foram formadas a partir da estrutura do produto, também obtida via extração do banco de dados do sistema de gestão utilizado.

Para evitar o possível reconhecimento da empresa que cedeu as informações para esta dissertação, os códigos dos produtos finais, produtos intermediários e peças, foram renomeados.

Informações relativas às políticas utilizadas, como, por exemplo, a localização randômica de peças e a coleta de itens de acordo com as estruturas do produto, foram coletadas através de entrevistas com funcionários do almoxarifado e do departamento de PCP.

7.1. Proposta de avaliação dos resultados

Inicialmente, a fim de avaliar as rotas criadas pelo algoritmo e medir sua efetividade, propõe-se a comparação das rotas por ele criadas com as rotas geradas pelos próprios separadores em seu dia-a-dia de trabalho. Optou-se por este método de avaliação uma vez que não foi possível encontrar, durante a revisão bibliográfica, resultados práticos e comparáveis da utilização deste algoritmo em situações que pudessem ser, ao menos, semelhantes ao problema original apresentado nesta dissertação.

Dois separadores foram selecionados dentre os oito que atualmente trabalham no almoxarifado. Para cada um deles foi entregue um conjunto de 34 mapas, cada um referente a um subconjunto do produto final LA257.

Nos mapas entregues aos separadores, marcou-se com um “X” as localizações que deveriam ser visitadas. Pediu-se então que eles traçassem o que seria, para eles, o caminho mais curto para se visitar todas as localizações assinaladas. Um exemplo

das rotas traçadas pelos separadores 1 e 2, respectivamente, para um mesmo conjunto de coletas é apresentado na Figura 7.1.

Figura 7.1 – Exemplo de rotas traçadas pelos separadores A e B

A partir das rotas traçadas pelos separadores calculou-se a distância de cada uma delas e estes resultados foram comparados com os resultados obtidos pelo algoritmo. A apresentação dos resultados comparativos, análises e conclusões sobre a efetividade do algoritmo aplicado encontram-se a seguir.

7.2. Resultados e análises

O resultado da comparação entre as distâncias percorridas por cada um dos separadores e a distância da rota proposta pelo algoritmo, para a separação das 34 listas de itens pertencentes ao produto LA257, é apresentado na Tabela 7.1.

Pelos resultados consolidados, apresentados na Tabela 7.1, não se pode afirmar que o algoritmo obteve significativos ganhos na redução das distâncias das rotas percorridas para a separação das listas deste produto. O separador 1 coletou os itens percorrendo rotas, em média 2% mais longas que as traçadas pelo algoritmo, enquanto, para o separador 2 esta média foi de 3%.

Tabela 7.1 – Comparação das rotas traçadas pelo roteirizador e pelos separadores

Lista	Nº Corredor	Itens a Separar	Localizações	Distância (m) Roteirizador	Distância (m) Separador 1	Distância (m) Separador 2	Observação
1	3	5	3	36,33	40,00	40,00	
2	1	1	1	18,95	18,95	18,95	
3	1	1	1	22,63	24,67	22,63	
4	5	6	6	54,89	58,56	Erro separação	Não considerada na comparação
5	1	1	1	18,95	24,67	18,95	
6	2	2	2	28,39	28,39	28,39	
7	7	49	22	76,75	76,75	89,62	Maiores erros do separador 2 = 12,9 m ou 17%
8	3	18	9	42,78	44,88	42,78	
9	4	7	7	46,06	46,06	Erro separação	Não considerada na comparação
10	2	2	2	22,33	22,33	22,33	
11	2	19	7	27,98	27,98	31,65	
12	4	4	4	45,61	53,02	45,61	Maior erro em metros do separador 1 = 7,4
13	1	3	3	20,79	24,68	20,79	Maior erro % do separador 1 = 19%
14	3	9	7	37,26	37,26	37,26	
15	4	14	7	40,54	40,54	40,54	
16	3	3	3	36,71	Erro separação	36,71	Não considerada na comparação
17	2	2	2	29,72	29,72	29,72	
18	1	1	1	18,95	18,95	18,95	
19	1	1	1	18,95	18,95	18,95	
20	2	11	4	27,98	27,98	27,98	
21	2	2	2	39,55	39,55	39,55	
22	2	2	2	39,55	39,55	39,55	
23	2	2	2	39,55	39,55	39,55	
24	2	2	2	39,55	39,55	39,55	
25	2	5	3	39,55	39,55	39,55	
26	2	2	2	39,55	39,55	39,55	
27	6	12	7	56,43	56,43	61,94	
28	3	4	3	56,43	56,43	48,82	
29	2	3	2	31,18	31,18	33,01	
30	4	15	8	56,27	56,27	56,27	
31	4	12	7	56,27	56,27	56,27	
32	2	2	2	27,98	27,98	27,98	
33	2	2	2	27,98	27,98	27,98	
34	2	4	3	39,55	39,55	39,55	
DISTÂNCIA TOTAL PERCORRIDA (METROS)				1.114	1.139	1.144	
					2% maior que o algoritmo	3% maior que o algoritmo	

Nas comparações de distância total percorrida, algoritmo versus separador, não foram consideradas as rotas em que o separador não coletou todos os itens necessários.

As listas de separação parecem formar grupos com diferentes níveis de dificuldades, fazendo com que o algoritmo traga maior ou menor redução na distância da rota, em relação àquelas traçadas pelos separadores, dependendo das características da lista sendo trabalhada.

Pela Tabela 7.2 pode-se perceber que o número de corredores a ser visitado influencia no quão melhor é o desempenho do algoritmo em relação ao desempenho dos separadores.

Tabela 7.2 – Comparação dos grupos de rotas traçadas pelo roteirizador e pelos separadores

Corredores a serem visitados na rota	Separador Vs Algoritmo		Erros de Separação	
	Separador 1	Separador 2	Separador 1	Separador 2
5 ou mais	0%	14%	0	1
4 ou mais	2%	6%	0	2
3 ou mais	3%	5%	1	2
2 ou mais	1%	3%	1	2
1 ou mais	2%	3%	1	2

Para rotas com 5 ou mais corredores de separação a serem visitados, o algoritmo chega a traçar rotas, em média, até 14% melhores que as traçadas por um separador escolhido ao acaso. Para rotas com 4 ou mais corredores a serem visitados, o algoritmo tem desempenho médio de até 6% melhor que o separador roteirizando suas próprias coletas. Para rotas visitando apenas 1 ou 2 corredores, a vantagem da utilização do algoritmo é reduzida para um percentual próximo a 2%.

Como apresentado na Tabela 7.1, a rota traçada pelo separador 2 para a lista separação de número 7, contendo 22 localizações a serem visitadas em 7 diferentes corredores de separação, apresentou comprimento 17% maior que a rota traçada pelo algoritmo.

A lista de separação 12, cuja coleta das peças requer a visita de quatro corredores de separação, pode ser feita deslocando-se 45,6 metros, de acordo com a rota traçada pelo algoritmo de roteirização, ou 53 metros, de acordo com a rota feita por um dos separadores, a diferença de 16% entre as rotas pode ser visualizada na Figura 7.2.

É necessário ressaltar que mesmo rotas com poucos corredores de separação a serem visitados podem trazer grandes diferenças percentuais a favor do algoritmo. Para separar a lista de número 13, com 3 localizações de armazenamento a serem

visitadas num mesmo corredor, a rota traçada pelo separador 2 foi 19% maior que a rota traçada pelo algoritmo, como também mostra a Tabela 7.1.

Figura 7.2 – Comparativo de rotas LA24300607 – algoritmo e separador

Tomando-se como exemplo a lista de separação de número 4, comparando as rotas traçadas pelos separadores com a traçada pelo algoritmo, pode-se perceber que a complexidade, advinda das várias possíveis rotas de coleta, influencia a capacidade do separador em decidir qual é o caminho mais curto a seguir.

A Figura 7.3 apresenta os detalhes das rotas traçadas pelos separadores para a viagem de separação de número 4. Para esta rota, o separador 1 traçou rota mais comprida que o algoritmo, enquanto o separador 2 não visitou um dos corredores que deveriam ser visitados (o corredor L), não coletando na localização assinalada com a letra F, destacada pela seta no mapa representativo da rota. Deve-se considerar ainda, o benefício do auxílio visual ao separador, representado pelo mapa fornecido para que traçassem as rotas.

Além da menor distância de rota traçada pelo algoritmo, sua utilização pode trazer benefícios à qualidade da separação. Um dos separadores não visitou uma localização de armazenamento na rota de número 16 enquanto o outro separador cometeu o mesmo erro em duas ocasiões, rotas 4 e 9. Assim, pode-se dizer que 4,5% das rotas traçadas pelos dois separadores (3 das 68 rotas percorridas) sem o auxílio de um roteirizador tiveram que ser retrabalhadas.

Assim, quando a rota se torna mais complexa o desempenho do algoritmo mostra outra vantagem de sua utilização, a assertividade. No Quadro 7.2 se pode encontrar um sumário comparativo do desempenho dos separadores em relação ao algoritmo.

Figura 7.3 – Comparativo de rotas LA24300300 – algoritmo e separador

Quadro 7.2 – Comparativo de desempenho dos separadores em relação ao algoritmo

Separador 1	Separador 2
a. 1 rota com erro de separação (separador não visitou uma localização)	a. 2 rotas com erro de separação (separador não visitou uma localização)
b. 7 rotas mais compridas que roteirizador	b. 6 rotas mais compridas que roteirizador
c. a rota de pior resultado ficou 30% mais comprida que a do roteirizador	f. a rota de pior resultado ficou 17% mais comprida que a do roteirizador
d. Média dos erros 15%	c. Média dos erros 10%
e. Das 13 rotas com mais de 2 corredores	d. Das 13 rotas com mais de 2 corredores
i. 5 foram mais compridas	i. 4 foram mais compridas
ii. 1 rota faltando item	ii. 2 rotas faltando item

Os dados apresentados na Tabela 7.1 foram então analisados com base em alguns dos parâmetros apresentados nos trabalhos discutidos durante a revisão bibliográfica. A partir dos dados coletados nas 34 listas de separação roteirizadas, comparando o comportamento do comprimento das rotas em relação a três fatores: número de itens a coletar, número de vértices visitados e número de corredores visitados; é possível fazer uma análise dos fatores que mais influenciam seu comprimento.

Nas figuras apresentadas a partir deste ponto, os gráficos comparando o comprimento da rota ou o tempo de processamento com alguma variável do problema seguirão a seguinte determinação:

- O comprimento da rota ou o tempo de processamento sempre serão representados como sendo a área em azul no gráfico, cujos valores estão relacionados ao eixo principal das ordenadas, o eixo do lado esquerdo do gráfico.
- A variável sob análise sempre será representada por uma linha vermelha, cujos valores estão relacionados ao eixo secundário das ordenadas, o eixo do lado direito do gráfico.
- O eixo x, eixo das abscissas, sempre será relacionado ao número da lista de separação ou ao número do experimento referente aos valores obtidos.

A Figura 7.4 correlaciona o comprimento da rota com o número de localizações de armazenamento visitadas. Pela análise dos dados, verifica-se que a curva das distâncias percorridas não apresenta os impactos das variações no número de localizações de armazenamento visitadas.

Comparando as rotas 12 e 14 se tem que, enquanto a rota 12 visita 4 localizações de armazenamento com deslocamento igual a 45,6 metros, a rota 14 visita 7 localização e apresenta comprimento igual a 37,2 metros. Conclui-se que o número

de localizações de coleta a visitar pode não ser determinante do comprimento da rota.

Figura 7.4 – Comprimento da rota em relação à quantidade de pontos de coleta

Uma possível razão para a baixa correlação entre comprimento das rotas e localizações de armazenamento visitadas é o impacto da dispersão das coletas dentre os corredores.

A Figura 7.5 mostra, para cada uma das 34 listas de separação roteirizadas, a distância percorrida e o número de corredores visitados; verifica-se que o comprimento da rota tem grande correlação com o número de corredores visitados.

A maior correlação do comprimento da rota com o número de corredores visitados se dá pelo fato de uma nova visita a um novo corredor, obrigatoriamente, adicionar distância à rota. Entretanto, a adição de uma nova localização de coleta a visitar depende de sua posição em relação às outras da lista de separação para determinar se adiciona ou não distância a ser percorrida na rota.

Figura 7.5 – Comprimento da rota em relação ao número de corredores visitados

Ainda sobre a Figura 7.5, as rotas destacadas, relativas às listas de separação 20 a 22, têm comprimentos diferentes para um mesmo número de corredores visitados, o que poderia parecer antagônico à correlação estabelecida. Porém, não existe antagonismo, este fato pode acontecer por dois motivos:

- Os corredores são percorridos utilizando-se de diferentes sub-rotas: atravessamento ou retorno.
- Caso o separador use a sub-rotas parcial de retorno, a distância adicionada à rota irá variar de acordo com o vértice mais distante do extremo pelo qual o separador acessou o corredor.

A partir dos dados da Tabela 7.1, também é possível fazer uma análise da influência da concentração das localizações de coleta. Esta concentração será representada pela distância média entre os itens coletados, a qual será calculada pelo quociente do comprimento da rota pelo número de localizações de armazenamento visitadas.

Pela Figura 7.6, pode-se observar que as variações no comprimento da rota não seguem as variações da concentração de localizações de coletas a serem visitadas, como pode exemplificar a comparação entre as rotas 7 e 18 ou 5 e 27.

Figura 7.6 – Comprimento da rota em relação à distância entre vértices visitados - subconjuntos

De forma mais detalhada, na Figura 7.7 pode-se analisar a correlação entre comprimento das rotas e concentração dos vértices visitados e, na Figuras 7.8 a correlação entre comprimento das rotas e corredores visitados. Enquanto a variação dos corredores explica 82% da variação no comprimento da rota, a concentração dos itens explica apenas 21%.

Figura 7.7 – Comprimento da rota em relação à distância entre vértices visitados

Porém, é preciso ressaltar que a correlação apresentada é reflexo de algumas rotas com características muito particulares, como as rotas 21, 22, 23 e 24, com poucos

itens alocados nos corredores extremos do armazém, corredores A e O, as quais influenciaram o resultado da correlação.

Figura 7.8 – Correlações entre comprimento das rotas e corredores visitados

Uma característica do algoritmo destacada por Roodbergen (2001) é a linearidade do esforço computacional em relação ao aumento do número de corredores e localizações de armazenamento visitadas. Isto se dá pelo fato do algoritmo solucionar o problema dividindo-o em corredores, evitando o efeito multiplicador de possibilidades que surgem quando se relaciona cada localização com todas as outras possíveis de serem visitadas.

A Figura 7.9 demonstra que o tempo de processamento das diversas listas de separação teve pouca variação em relação ao número de localizações de armazenamento visitadas, mantendo-se próximo da média de 32 segundos, independentemente do número de corredores, como mostra a Figura 7.10. As rotas 7, 12 e 24 apresentaram desvios significativos em relação à média, porém, somente a rota 12, com 49 itens a serem coletados, apresenta razões para o maior tempo de processamento.

Pelas características do algoritmo utilizado e pelo pequeno número de corredores no armazém configurado, apenas 8 corredores, não se esperavam grandes variações no tempo de processamento, porém esperava-se variação maior que a apresentada

uma vez que, listas de separação com apenas um corredor requerem menor número de cálculos que as listas contendo 4 corredores.

Figura 7.9 – Tempo de processamento em relação aos pontos de coletas

Figura 7.10 – Tempo de processamento em relação aos corredores visitados

Pode-se conjecturar que os problemas apresentados são pequenos para a capacidade do algoritmo, fazendo com que o ele sempre trabalhe com tempo de processamento em seu limite inferior.

7.3. Utilização do algoritmo em leiautes e listas de separação de abrangência ainda mais genérica

A aplicação do algoritmo desenvolvido no problema original não revela a extensão de sua eficácia em armazéns com diferentes configurações e situações onde a estrutura do produto não é determinante da política de separação.

Assim, este trabalho propõe duas novas aplicações do algoritmo desenvolvido. A primeira aplicação dar-se-á pela sua utilização em operação de separação onde o mesmo armazém de 8 corredores é utilizado, porém, serão roteirizadas listas de separação com um conjunto variado de itens não atrelados a estrutura do produto.

A segunda aplicação adicional do algoritmo acontece com sua utilização em situação onde três diferentes grupos de peças (representadas por três subconjuntos do produto original) têm suas localizações de armazenamento sorteadas dentre as possíveis localizações de um novo armazém experimental, com número de corredores variando entre 2 e 24. O reendereço das peças conforme o número de corredores e localizações disponíveis proporcionará um estudo mais detalhado do efeito da concentração/dispersão das localizações de armazenamento a serem visitadas.

7.3.1. Aplicação do algoritmo para listas de separação aleatórias

Nesta seção serão apresentados os resultados da utilização do algoritmo em situação onde se mantiveram fixas as características do armazém, tais como o número de corredores, comprimento do corredor e número de bandejas por corredor; porém, diversos tamanhos de listas de separação foram admitidos.

No Quadro 7.3 estão apresentados os 12 tamanhos de listas roteirizadas, listas com quantidade de itens a coletar variando de 2 a 24 peças. Para cada tamanho de lista de separação a ser roteirizada foram sorteados 10 diferentes grupos de peças a coletar. Para a criação das 10 listas de separação para cada quantidade de peças a separar, utilizou-se o pseudo-gerador de números aleatórios Mersenne Twister.

Quadro 7.3 – Sumário da configuração do problema

Característica	Configuração
Ponto de início e término	Central
Número de corredores	8
Comprimento do corredor	7,36 metros
Largura do corredor	0,80 metro
Comprimento da prateleira	0,92 metro
Profundidade da prateleira	0,44 metro
Listas de separação	12
Itens a coletar por rota	2,4,6,8,10,12,14,16,18,20,22 e 24 peças
Número de peças por prateleira	1
Política de armazenamento	Randômica
Concentração de itens	Aleatória
Sorteios	10

7.3.1.1. Resultados e análises

As características das rotas criadas pelo algoritmo para as 120 listas de coletas geradas apontam para resultados análogos àqueles encontrados na roteirização dos subconjuntos de produto: em armazéns com apenas dois corredores transversais, o número de corredores de separação visitados tem forte influência na determinação do comprimento da rota, como se pode visualizar na Figura 7.11, a qual mostra grande correlação entre as distâncias percorridas na rota e o número de corredores visitados.

Figura 7.11 – Comprimento da rota em relação à quantidade de corredores visitados

Na Figura 7.12 se pode observar a correlação de 98% entre o comprimento da rota e número de corredores visitados. Esta mesma conclusão de dependência foi obtida a partir das rotas criadas para a separação de listas de peças relacionadas à estrutura do produto, as quais apresentaram correlação de 82% com o número de corredores visitados.

Figura 7.12 – Relação entre corredores visitados e o comprimento da rota

Porém, diferente da conclusão obtida com a separação de subconjuntos do produto final, a Figura 7.13 mostra que existe grande influência da concentração dos vértices

no comprimento total da rota, com correlação, nos experimentos com itens aleatórios, igual a 86%.

A maior correlação apresentada nestes experimentos pode ser reflexo do fato das coletas, desconexas da estrutura do produto, se apresentem mais dispersas dentre os 8 corredores de separação do armazém, gerando melhor população para análise.

Figura 7.13 – Correlação entre comprimento da rota e distância entre vértices visitados

A correlação é inversa, pois, neste experimento, a concentração acontece por um adensamento de coletas dentre os 8 possíveis corredores e não por uma concentração de um número fixo de coletas em um número cada vez menor de corredores a visitar.

Pela Figura 7.13 nota-se que maiores concentrações de vértices a visitar determinam maior comprimento de rota, pois maior número de corredores, dentre os 8 possíveis, serão visitados. Em outras palavras, é como adicionar um item a coletar no corredor central, dentre duas coletas localizadas nos corredores extremos A e O; a distância média entre os itens seria reduzida pela metade, porém, haveria um aumento na distância percorrida.

Em relação ao tempo de processamento, apresentado na Figura 7.14, se pode notar que a média do tempo necessário para a roteirização de listas aleatórias é de 50

segundos, maior que a média das rotas criadas no problema original (32 segundos). Tal fato pode ser explicado pelas características das listas de separação; enquanto no problema original poucas listas de separação estavam dispersas em mais de 4 corredores, apenas 8 das 34 roteirizadas, nos experimentos com sorteio de itens a separar, 75% das rotas geradas visitam mais de 4 corredores.

Figura 7.14 – Relação entre tempo de processamento e corredores visitados

Comparando as distâncias das rotas criadas nesse experimento e apresentadas na Figura 7.16, com aquelas obtidas na roteirização das listas atreladas às estruturas de produto, novamente apresentados na Figura 7.15, pode-se dizer que nos dois conjuntos de experimento, listas com números similares de corredores a serem visitados apresentam comprimentos similares de rota. Por exemplo, a rota 4 do dentre as listas sorteadas visita 4 corredores de separação e apresenta comprimento igual a 55 metros e a rota sorteadas de número 10, que visita 4 corredores e percorre 50 metros.

Figura 7.15 – Comprimento da rota em relação ao número de corredores visitados – problema original

Figura 7.16– Comprimento da rota em relação à quantidade de corredores visitados - sorteio listas

Caso se considere que este paralelismo possa ser um indicativo de desempenho comparável do algoritmo nas duas situações e que não haja motivos para que os separadores tenham desempenhos diferentes na roteirização de listas aleatórias de produtos em relação ao desempenho na coleta de listas referenciadas às estruturas,

poder-se-ia esperar nas coletas de assistência técnica, o mesmo percentual na redução do comprimento de rotas e no aumento na qualidade da separação que foi observado na separação das listas de peças dos subconjuntos.

Assim, se poderia também dizer que este algoritmo se apresenta como boa solução para a roteirização de pedidos aleatórios como são os pedidos de assistência técnica.

7.3.2. Aplicação do algoritmo para mudança de leiautes

A utilização do algoritmo em situações controladas foi o motivo pelo qual se optou por avaliar 3 subconjuntos a serem separados, respectivamente contendo 6, 18 e 49 peças, em dez diferentes leiautes de armazém: número de corredores variando de 1 a 10. Escolheram-se estes tamanhos de listas de separação porque dividindo-se cada uma destas quantidades pelas dez opções de corredores obtém-se 27 diferentes concentrações de itens a serem coletados por corredor, possibilitando um melhor estudo da distância média entre itens a coletar.

Os 30 experimentos criados também utilizaram como base a largura e o comprimento de corredores do armazém do problema original e o comprimento da prateleira de armazenamento.

Este grupo de experimentos poderá ajudar a empresa, dando-lhe subsídios para entender qual seria o impacto do aumento ou da diminuição do número de corredores atualmente disponíveis.

Pelas características de generalidade desta configuração, ela também poderá servir de ponto de comparação deste trabalho com outros que se dedicarem a estudar o impacto da variação do leiaute do armazém no comprimento da rota de separação. No Quadro 7.4 encontram-se as configurações utilizadas nesta fase do estudo.

Quadro 7.4 – Sumário de configurações dos experimentos

Característica	Configuração
Ponto de início e término	Central
Número de corredores	1,2,3,4,5,6,7,8,9 e 10
Comprimento do corredor	7,36 metros
Largura do corredor	0,80 metro
Comprimento da prateleira	0,92 metro
Profundidade da prateleira	0,44 metro
Listas de separação	3
Itens a coletar por rota	6, 18 e 49 peças
Número de peças por prateleira	1
Política de armazenamento	Randômica
Concentração de itens	Aleatória
Sorteios	10

7.3.2.1. Resultados e análises

A análise do comprimento da rota de separação em relação ao número de itens coletados, feitas nos experimentos anteriores, não continham a influência da variação do número de corredores do armazém, pois nos experimentos anteriores, o número de corredores sempre foi igual a 8. No conjunto de situações criadas nesta fase da pesquisa, pode-se analisar a influência da variação do número de coletas em 10 diferentes leiautes.

A Figura 7.17 mostra que independentemente do tamanho da lista de separação (6, 18 ou 49 itens a coletar) o comprimento da rota tem forte relação com o número de corredores visitados. Analisando a Figura 7.18, a qual apresenta as rotas ordenadas em relação a seu comprimento total, se verifica que viagens de coleta com mesmo número de corredores visitados têm comprimento total muito próximos, mesmo quando o número de itens a separar é diferente, como exemplificam as rotas 5, 7, 14 e 10, duas listas contendo 6 itens a separar e duas contendo 18 itens, em destaque na Figura 7.18.

Figura 7.17 – Relação número de coletas com comprimento da rota – sequência rotas

Figura 7.18 – Relação número de coletas com comprimento da rota – sequência comprimento

Estudando o impacto da concentração das localizações visitadas, se percebe pela Figura 7.19, que a correlação desta variável com o comprimento da rota cria três populações com diferentes comportamentos. Os diferentes grupos refletem a influencia do número de corredores se sobressaindo a influência da distância média entre coletas. É possível notar um sub-grupo A visitando de 6 a 11 corredores, o

sub-grupo B, visitando entre 4 e 7 corredores e, por fim, o grupo C visitando no máximo 3 corredores.

Assim, quando se analisa a correlação em relação ao número de corredores visitados, tem-se que esta variável pode explicar 98% das variações no comprimento da rota.

Figura 7.19 – Correlação das variáveis corredores visitados e dispersão das coletas

Analisando o comportamento das curvas da distância percorrida, da distância média entre vértices e do número de corredores visitados, apresentados na Figura 7.20, percebe-se que a sintonia entre o comportamento da curva distância percorrida e número de corredores visitados, reiterando as conclusões dos experimentos feitos anteriormente.

Em relação ao processamento, não se pode identificar nenhuma variável que se sobressaia como responsável pela variação ou pela determinação do tempo necessário para que o algoritmo gere as rotas de coleta. Na Figura 7.21 o número de localizações a visitar e na Figura 7.22, o número de corredores visitados não se apresentam como influenciadores do tempo de processamento do algoritmo.

Figura 7.20 – Paralelismo entre número de corredores e dispersão das coletas e comprimento de rota

Figura 7.21 – Tempo de processamento em relação as localizações de coleta visitadas

Figura 7.22 – Tempo de processamento em relação aos corredores visitados

Comparando o comprimento das rotas criadas nos experimentos com mudança do número de corredores de separação com as rotas criadas nos experimentos do problema original, como mostram as Figuras 7.23 e 7.24, é possível perceber o mesmo paralelismo de resultados encontrado na comparação de experimentos feita na seção 7.3.1.1.

Figura 7.23 – Comprimento da rota em relação ao número de corredores visitados – problema original

Figura 7.24 – Comprimento da rota em relação ao número de corredores visitados – mudança de leiaute

Utilizando-se do mesmo raciocínio apresentado para os experimentos da seção anterior, se poderia dizer que estes resultados são válidos e podem ajudar a empresa em suas decisões sobre leiaute de armazém.

7.4. Considerações finais do capítulo

Pode-se concluir que este algoritmo é eficaz no processo de roteirização da separação de peças em armazém com coleta manual, traçando rotas mais curtas ou de mesmo comprimento que aquelas traçadas pelos separadores sem o auxílio de tal algoritmo.

Ainda, podemos dizer que o algoritmo é de extrema importância para a roteirização da coleta de peças em armazéns, tendo utilidade não apenas na redução das distâncias percorridas no processo de coleta, mas também auxiliando no aumento da qualidade do processo de separação.

O algoritmo tem flexibilidade de utilização e facilidade de parametrização, suportando sua aplicação em três grupos de problemas; relacionados à estrutura de

produto, relacionados ao agrupamento aleatório de peças e a variação no leiaute do armazém.

Pelos resultados obtidos, parece existir coerência no desempenho do algoritmo em relação ao número de corredores visitados, o qual parece ser a variável com maior influência sobre o comprimento da rota. Ainda, pode se concluir pelos experimentos que, quanto menor for o número de corredores nos quais as coletas estão dispersas menor será o comprimento da rota.

Tem-se assim desenvolvido um algoritmo como inicialmente proposto, com capacidade para resolver problemas em reduzido tempo de processamento, apresentando boa qualidade de solução, de fácil utilização e, principalmente, com possibilidade de aplicação em problemas mais genéricos, além daqueles relativos à roteirização dos produtos na empresa objeto desta pesquisa.

Entretanto deve-se ressaltar que alguns erros de coleta observados durante a separação das listas de peças ainda poderão ocorrer. Por exemplo, o fato da rota criada pelo sistema adicionar responsabilidades ao separador, exigindo que ele preste atenção no caminho a seguir, pode reduzir sua atenção às localizações a coletar, aumentando a incidência de localizações esquecidas de serem visitadas.

Toda operação baseada ou dependente de sistemas informatizados deve considerar a possibilidade de falha e sistemas de redundância. Assim, ao se utilizar um sistema como o desenvolvido deve-se considerar a possibilidade do sistema sair do ar exigindo a volta da roteirização feita pelos próprios separadores.

Também se deve ponderar que a roteirização prévia das ordens a separar representa uma nova tarefa no fluxo de coleta e seu tempo de execução deve ser considerado. Caso o tempo de processamento se torne excessivo em relação ao tempo de coleta, o processo de preparação das rotas pode se tornar um gargalo do almoxarifado.

Algumas situações, como, por exemplo, a localização física divergente da localização da peça no sistema e saldos errados de estoques, mesmo não fazendo

parte do objetivo de roteirização do sistema, afetam o tempo de separação e devem ser tratadas para que a sistema desenvolvido obtenha os resultados esperados.

A magnitude da redução do tempo de separação gerada pela utilização do sistema em relação à roteirização feita pelo separador difere de acordo com a dificuldade do traçado. Pode não ser vantajosa a utilização do sistema para a roteirização de coletas pouco complexas, as quais geram baixa redução no tempo de percurso. Por exemplo, algumas rotas do problema apresentado não apresentaram nenhum ganho pela aplicação das rotas feitas com a utilização do algoritmo.

Finalmente, a relação custo-benefício da utilização de sistemas para a geração das rotas deve ser avaliada e comparada com o custo e o benefício da adição de funcionários. Em algumas situações pode ser mais vantajoso se conseguir a redução no tempo de coleta de um grupo de listas de separação via aumento no número de funcionários.

8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho abordou um problema real de roteirização da separação manual de peças em armazém com dois corredores transversais, destinado à estocagem de partes para suprir as necessidades das linhas de produção. Mais especificamente, quando diferentes agrupamentos das peças separadas para a montagem do produto impactam diferentemente na produtividade das linhas de produção.

Este problema é comum em empresas de menor porte, sem recursos para investir em sofisticados sistemas de roteirização. Desta forma, estas empresas não abordam de objetivamente o impacto da roteirização das listas de separação em seus custos operacionais e na qualidade do processo de separação, optando por confiar na experiência dos separadores, os quais roteirizam, subjetivamente, as listas de separação que recebem.

A importância do processo de roteirização nos custos foi ressaltada por vários autores, que afirmaram ser o processo de separação de peças representante de até 65% do custo total relacionado às tarefas de operacionalização do armazém (Hwang et al., 2004). Entretanto, o impacto do processo de roteirização na qualidade da separação não foi tratado por nenhum dos autores. Parece que este trabalho inova nesta abordagem antes não contemplada.

A roteirização da viagem de coleta dos separadores foi dissociada do clássico problema do caixeiro viajante quando Ratliff e Rosenthal (1983) desenvolveram um algoritmo eficaz, baseado em programação dinâmica e aplicável em armazéns com até dois corredores transversais. Paralelamente, outras heurísticas foram desenvolvidas para reger os deslocamentos dos separadores de acordo com as políticas de localização existentes no armazém. Algumas dessas políticas se destacaram por sua facilidade de entendimento e aplicação, entretanto estas políticas têm seu resultado dependente da política de armazenamento adotada pela empresa.

Roodbergen (2001) criou um algoritmo eficiente para a roteirização de coletas em armazéns com até 3 corredores transversais. Este algoritmo tem como vantagens a capacidade de resolver o problema em reduzido tempo de processamento, a eficiência na qualidade das rotas criadas, a baixa complexidade das respostas, a sua facilidade de implementação, entendimento e utilização e, principalmente, a flexibilidade para aplicação do algoritmo escolhido em problemas mais genéricos, independente da política de armazenamento ou do número de corredores do armazém.

Aplicando-se a lógica apresentada, o algoritmo foi implementado em ambiente de planilha Excel, utilizando-se do VBA como ferramenta de programação. Decidiu-se pela utilização de planilhas Excel porque tal programa já é utilizado por empresas de menor porte, aumentando as possibilidades da utilização do algoritmo em situações reais de separação manual de produtos.

O desenvolvimento em planilha Excel também proporcionou o atendimento de outro objetivo: tornar genérico o sistema desenvolvido, podendo ser parametrizado de acordo com as características de layout e da operação específica para a qual as rotas serão feitas.

Finalmente o fato de o sistema ser desenvolvido baseado em formulários de entrada via Excel, permite que o usuário prepare os dados fora do sistema, podendo informar, por exemplo, listas de separação já consolidadas ou o endereçamento dos itens baseadas em alguma política de volume, por exemplo.

O sistema desenvolvido é flexível e genérico o suficiente para ser utilizado em qualquer armazém com dois corredores transversais, independente de sua largura, profundidade, número de prateleiras ou tamanho das bandejas de armazenamento.

Utilizando-se da flexibilidade e generalidade do sistema, ele foi então aplicado na roteirização de coletas em três situações diferentes:

- a. Roteirizar coletas dos subconjuntos do produto no armazém original existente, parametrizável às necessidades do usuário.

- b. Roteirizar as coletas de grupos aleatórios de peças no armazém existente (simulando um conjunto de peças a ser enviado à assistência técnica), e
- c. Roteirizar listas de separação atuais num novo armazém flexível em relação ao número de corredores, número de bandejas por prateleira e dimensões, simulando expansões na área de armazenagem da empresa.

A primeira aplicação do algoritmo foi na roteirização das 34 listas de separação de peças do produto LA257 utilizando-se como parâmetros de leiaute e armazenamento aqueles efetivamente utilizados pelo armazém sob análise.

Para avaliar as rotas criadas pelo algoritmo e medir sua efetividade, propôs-se a comparação das rotas criadas pelo sistema com as rotas feitas pelos separadores em seu dia-a-dia de trabalho.

Comparando os resultados obtidos pode-se afirmar que rotas com maior dificuldade de entendimento e visualização pelo separador podem ser reduzidas, em média, em média 2 a 3%, mas até 17%. Além da redução das distâncias das rotas, a utilização de tal lógica de roteirização aumentou a confiabilidade do processo, evitando que os separadores se esquecessem de visitar localizações de coleta durante seu processo de auto roteirização.

Para rotas com 5 ou mais corredores a serem visitados, o algoritmo chega a traçar rotas, em média, até 14% melhores que as traçadas por um separador escolhido ao acaso. Para rotas com 4 ou mais corredores a serem visitados, o algoritmo tem desempenho médio até 6% melhor que as traçadas pelo mesmo separador, roteirizando suas próprias coletas. Para rotas visitando apenas 1 ou 2 corredores, a vantagem da utilização do algoritmo é reduzida para um percentual em torno de 2%, fato relacionado a facilidade de se resolver este problema.

Para confirmar a possibilidade de utilização do algoritmo em outros leiautes de armazém e outras configurações de listas de separação, dois novos conjuntos de problemas foram propostos.

Primeiramente utilizou-se o algoritmo em situação onde se mantiveram fixas as características do armazém, número de corredores, comprimento do corredor, número de bandejas por corredor, porém foram admitidos diversos tamanhos de listas de separação.

As listas de separação foram criadas aumentando-se progressivamente o número de peças a serem coletadas. Para a criação das listas de separação, utilizou-se o pseudo-gerador de números aleatório Mersenne Twister, sorteando os itens a serem coletados.

Foram criadas 12 diferentes listas de separação, variando de 2 a 24 peças, em incrementos iguais a 2 itens. Para cada tamanho de lista de separação sortearam-se 10 diferentes conjuntos de peças a separar, totalizando 120 rotas a serem criadas.

Neste experimento, considerando-se de apenas 8 corredores, se atinge muito rápido a concentração de 1 item por corredor, ponto a partir do qual, o sistema tem maior probabilidade para atravessá-lo totalmente. Assim, quando se passa da média de 1 item por corredor, o aumento de itens a serem coletados e respectiva redução na distância média entre coletas, tem efeito apenas marginal.

Novamente, a replicação de situações controladas foi o motivo pelo qual se optou por avaliar 3 subconjuntos a serem separados, respectivamente com 6, 18 e 49 peças, em dez diferentes layouts de armazém: número de corredores variando de 1 a 10.

Os 30 cenários criados também utilizaram como base a largura e o comprimento de corredores do armazém do problema original, assim como o comprimento da bandeja de armazenamento. Pelos experimentos pode-se dizer que independentemente do tamanho da lista de separação o número de corredores visitados tem forte influência na determinação do comprimento da rota.

Nestas rotas criadas através de sorteio das localizações de armazenamento a visitar, tem-se que, utilizando-se do algoritmo de Roodbergen (2001) a distância

média entre coletas, é um fator secundário para a determinação do comprimento da rota em relação ao número de corredores visitados

Conclui-se assim que o algoritmo selecionado para a resolução de um problema real, a separação manual de itens em armazém com dois corredores transversais e necessidade de agrupamento específico de itens coletados (lista de peças dos subconjuntos) é capaz de gerar rotas menores que as geradas sem a utilização de lógicas de roteirização.

Ainda, pode-se dizer que o algoritmo é flexível e genérico para ser utilizado também como ferramenta gerencial e de simulação visto que dentre suas possibilidades de uso está a parametrização de diferentes leiautes e listas de separação.

Também se nota a facilidade de implementação, entendimento e uso do sistema desenvolvido, fatores que a priori são barreiras à sua implementação como auxílio à operação e decisão.

Entretanto, a mesma característica que torna este algoritmo eficaz e com baixo tempo de reposta, ser baseado em programação dinâmica, trabalhando corredor-a-corredor, apresenta agora questionamentos para futuros estudos.

Seria possível que a grande correlação entre corredores visitados e comprimento da rota seja um reflexo da forma como o algoritmo trabalha? Aplicar outra heurística a partir dos resultados criados pelo algoritmo de Roodbergen (2001) como propôs Theys et al. (2009) poderia reduzir de forma significativa o comprimento das rotas, mesmo com alto número de coletas por corredor?

Ainda, poderia ser estudado o impacto de mudanças no leiaute do armazém como, por exemplo, a inclusão de maior número de corredores de transição. Ainda, existe a possibilidade de se estudar a influencia que restrições na capacidade de carga do separador poderia ter no resultado da roteirização.

Também se poderia expandir o problema estudado adicionando tempo de procura da peça na localização, tempo para coleta e descarga das peças separadas, formando um cenário mais completo da real operação de separação em armazéns.

Estas perguntas surgem da pesquisa e da procura de soluções por melhorias no processo de coleta manual de peças, a qual espera colaborar para que se continuem estudando sobre o tema.

Assim, existem ainda diversos tópicos sobre o processo de roteirização da separação manual de peças em armazém que podem ser explorados em estudos futuros. Esta dissertação cumpriu seu objetivo de apresentar o processo de separação de peça, estudar a literatura disponível sobre o problema e propor uma solução específica para um problema real apresentado e genérica suficiente para que novas pesquisas possam surgir a partir deste ponto.

9. BIBLIOGRAFIA

ASCHEUER, N.; GRÖTSCHER, M.; ABDEL-AZIZ ABDEL-HAMID, A. Order picking in an automatic warehouse: Solving online asymmetric TSPs. **Mathematical Methods of Operations Research**, 1999, Vol. 49 Issue 3, p501, 15p; (AN 4719695)

AZADIVAR, F.. Optimum allocation of resources between the random access and rack storage spaces in an automated warehousing system. **International Journal of Production Research**, Jan1989, Vol. 27 Issue 1, p119, 13p.

BALLOU, R.H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos / Logística Empresarial**. 5ª Ed. Porto Alegre: Bookman, 2006, 38p.

CARON, F.; MARCHET, G.; PEREGO, A. Optimal layout in low-level picker-to-part systems. **International Journal of Production Research**. v.38, n.1, p.101-117, 2000a.

CARON, F.; MARCHET, G.; PEREGO, A. Routing policies and COI-based storage policies in picker-to-part systems. **International Journal of Production Research**, v.36, n.3, p.713-32, 1998.

CARON, F.; MARCHET, G.; PEREGO, A. Layout design in manual picking systems: a simulation approach. **Integrated Manufacturing Systems**. v.11, n.2, p.94-104, 2000b.

CARVALHO, L. E. X. **Desenvolvimento de Solução Integrada de Sistemas de Limpeza Urbana em Ambiente SIG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.

CHIH; C.; e JOSÉ JÚNIOR. Modeling and simulation of retrieving process. **Revista Eletrônica Sistemas & Gestão**. v.2 p.81-101, 2007.

CHIN, S. Y.; PONTES, H. L. J.; PORTO, A. J. V. (2005). Retrieving Process analysis in a parts distribution center: a case study of manual trolley fleet substitution, 2005. Proceedings of the 2005 Winter Simulations Conference. M.E.Kufl, N. M. Steiger, F. B. Armstrong, and J. A. Joines, eds.

CLARK, G; WRIGHT, J.W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. **Operations Research**, v.12, p.568-581, 1964.

COLORNI, A.; DORIGO M.; MAFFIOLI, F.; MANIEZZO, V.; RIGHINI, G.; TRUBIAN, M. Heuristics From Nature For Hard Combinatorial Optimization Problems. **International Transactions in Operational Research**, v.3, n.1, p.1-21, 1996.

CORRÊA, HENRIQUE L. E CORRÊA, A. CARLOS. Administração de produção e operações: manufatura e serviços: uma abordagem estratégica. 2ª. Edição São Paulo: Atlas, 2007. 32p

CORMIER, GILLES; GUNN, ELDON A.. A review of warehouse models.. **European Journal of Operational Research**, 4/10/1992, Vol. 58 Issue 1, p3-13, 11p.

CORNUÉJOLS, G.; FONLUPT, J.; NADDEF, D. The traveling salesman problem on a graph and some related integer polyhedral. **Mathematical Programming**, v.33, n.1, p.1-27, 1985.

COYLE, J. J.; BARDI, E. J.; LANGLEY, C. J. (1996) The Management of Business Logistics (West St. Paul – MN).

CUNHA, C. B. Aspectos Práticos da Aplicação de Modelos de Roteirização de Veículos a Problemas Reais. *Transportes*, v. 8 , n. 2, p. 51-74, 2000.

CUNHA, CLAUDIO BARBIERI DA; BONASSER, ULISSES DE OLIVEIRA; ABRAHÃO, FERNANDO TEIXEIRA MENDES – Experimentos computacionais com heurísticas de melhorias para o problema do caixeiro viajante [em linha]. São Paulo: ANPET, 2002. [consult. 13 abr. 2009]. Disponível em [www: www: anpet.org.br](http://www.anpet.org.br)

<url:http://www.ptr.poli.usp.br/ptr/docentes/cbcunha/files/2-opt_tsp_anpet_2002_cbc.pdf>

CUNHA, C. B. Contribuição à Modelagem de Problemas em Logística e Transportes. Tese (Livre Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. p. 128, 2006.

DANIELS, R. L.; RUMMEL, J. L.; SCHANTZ, R. A model for warehouse order picking. **European Journal of Operational Research**. v.105, n.1, p.1-17, 1998.

DANIELS, RICHARD L.; RUMMEL, JEFFREY L.; SCHANTZ, ROBERT.. A model for warehouse order picking. **European Journal of Operational Research**, 02/16/98, Vol. 105 Issue 1, p1-17, 17p.

DE KOSTER, RENE; KALLEVEEN, H. VAN E ROODBERGEN, K. J. (2002). Quick response practices at the warehouse of Ankor. Report Series Research in Management. Erasmus Research Institute of Management (ERIM), RSM Erasmus University, Fevereiro de 2002

DE KOSTER, RENE; LE-DUC, THO; ROODBERGEN (2006). Design and control warehouse order picking: a literature review (2006); Report Series Research in management. Erasmus Research Institute of Management (ERIM), RSM Erasmus University, January 2006.

DE KOSTER, RENE; POORT E. V. D. Routing order pickers in a warehouse: A comparison between optimal and heuristic solutions. **IIE Transactions**. v.30, n.5, p.469-480, 1998.

DE KOSTER; VAN DER POORT; WOLTERS, M. Efficient orderbatching methods in warehouses. **International Journal of Production Research**. v.37, n.7, p.1479-1504, 1999.

DEKKER, R.; DE KOSTER, RENE; ROODBERGEN, K. J. E KALLEVEEN, H. VAN, Improving order picking response time at Ankor's warehouse. *Interfaces*. V. 34, n. 4, July-August 2004, p. 303-313.

GADEMANN, N. E VAN DE VELDE, SF. Order batching to minimize total travel time in a parallel-aisle warehouse. **IIE Transactions**, Jan2005, Vol. 37 Issue 1, p63-75, 13p.

GOLDBERG, D. E. (1989) **Genetic Algorithms: in Search Optimization and Machine Learning**, Reading, MA, Addison-Wesley

GOUVINHAS, REIDSON PEREIRA; DANTAS, LUCIANA DE MEDEIROS; ALMEIDA, MARÍLIA DE SOUZA; QUEIROZ, TATIANA SILVA DE; SANTOS, SUELY XAVIER DOS; PERALES, WATTSON. **A importância do planejamento físico na otimização do processo de armazenagem: um estudo de caso**. XXV Encontro Nacional de Eng. de Produção – Porto Alegre, RS, Brasil, 29 out a 01 de nov de 2005.

GUE, KEVIN R.; MELLER, R. D.; SKUFCA, J. The effects of pick density on order picking areas with narrow aisles. **IIE Transactions**, v.38, n.10 p.859-868, 2006.

HALL, R. W. H. Distance approximation for routing manual pickers in a warehouse. **IIE Transactions**, v.25, n.4, p.76–87, 1993.

HILLIER, F.S., & LIEBERMAN, G.J. (1995). Introduction to operations research. McGraw-Hill, Inc., New York, pp.327.

HO, YING-CHIN; SU, TENG-SHENG; SHI, Z.. Order-batching methods for an order-picking warehouse with two cross aisles. **Computers & Industrial Engineering**, Sep2008, Vol. 55 Issue 2, p321-347, 27p.

HSIEH, L.-F.; TSAI, L. The optimum design of a warehouse system on order picking efficiency. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. V. 28, n. 5, p.626-637, 2006.

HU, K; CHANG, T.; FU, H.; YEH, H.. Improvement order picking in mobile storage systems with a middle cross aisle. **International Journal of Production Research**, Feb2009, Vol. 47 Issue 4, p1089-1104, 16p.

HWANG, H; OH, Y. H.; LEE, Y.K. An evaluation of routing policies for order-picking operations in low-level picker-to-part system. **International Journal of Production Research**. v.42, n.18, p.3873-3889, 2004.

LE-DUC, T.; DE KOSTER, R. (M.) B. M. (2005d). Design and control of efficient order picking: a literature review. Report, Erasmus Research Institute of Management(ERIM), RSM Erasmus University, the Netherlands.

LE-DUC, T.; DE KOSTER, R. (M.) B. M. Travel distance estimation and storage zone optimization in a 2-block ABC-storage strategy warehouse. **International Journal of Production Research**. v.43, n.17, p.3561-3581, 2005a.

LE-DUC, T.; DE KOSTER, R. (M.) B. M.. Travel distance estimation and storage zone optimization in a 2-block class-based storage strategy warehouse. **International Journal of Production Research**, 9/1/2005, Vol. 43 Issue 17, p3561-3581, 21p.

LE-DUC, THO; DE KOSTER , RENÉ M.B.M. Travel time estimation and order batching in a 2-block warehouse. **European Journal of Operational Research**. v.176, n. 1, p. 374-388, 2005.

MAKRIS, P.A., AND GIAKOUMAKIS, I.G., k-interchange heuristic as an optimization procedure for material handling applications, **Applied Mathematical Modeling**, 2003, 27(5), 345-358.

MALMBORG, CHARLES J.. Rule of thumb heuristics for configuring storage racks in automated storage and retrieval systems design. **International Journal of Production Research**, 02/15/2001, Vol. 39 Issue 3, p511-527, 17p.

MANZINI, R., GAMBERI, M., AND REGATTIERI, A., 2005, "Design and control of a flexible order-picking system (FOPS): A new integrated approach to the implementation of an expert system" **Journal of Manufacturing Technology Management**, vol. 16, no. 1, pp. 18-35.

MATSUMOTO, M. e NISHIMURA, T. em <http://www.math.sci.hiroshima-u.ac.jp/~m-mat/MT/ewhat-is-mt.html>, [capturado em 3 de maio de 2009]

MOLNÁR, BALÁZS. Planning of order picking processes using simulation and genetic algorithm in multi-criteria scheduling optimization. Proceedings of the 16th European Simulation Symposium. SCS Press, 2004.

NAGY, G; SALHI, S. Location-routing: Issues, models and methods. **European Journal of Operations Research**. v.177, n.2, p.649-672, 2006.

PACHÉ, G.. Retail Logistics in France: The Coming of Vertical Disintegration. **International Journal of Logistics Management**, 1998, Vol. 9 Issue 1, p85-93, 9p.

PAES, FREDERICO G. **Otimização de rotas para a coleta do lixo doméstico: um tratamento GRASP do problema do carteiro chinês misto (PCCM)**. Dissertação de Mestrado em Ciências de Engenharia UENF, Campos-RJ. p.

PARIKH, P. J.; MELLER, R. D.. Estimating picker blocking in wide-aisle order picking systems. **IIE Transactions**, Mar2009, Vol. 41 Issue 3, p232-246, 15p.

PETERSEN II, C. G. An evaluation of order picking routing policies. **International Journal of Operations & Production Management**. v.17, n.11, p.1098-1111, 1997.

PETERSEN II, C. G. The impact of routing and storage policies on warehouse efficiency. **International Journal of Operations & Production Management**. v.19, n.10, p.1053-1064, 1999.

PETERSEN, C. G.; AASE, G. R. A comparison of picking, storage, and routing policies in manual order picking. **International Journal of Production Economics**. v.92 n.1, p.11-19, 2003.

PETERSEN, C. G.; AASE, G. R.; HEISER, D. R. Improving order-picking performance through the implementation of class-based storage. **International Journal of Physical Distribution and Logistics Management**. v.34, n.7, p.534-544, 2004.

RATLIFF, H. D.; ROSENTHAL, A. S. Order picking in a rectangular warehouse: a solvable case of the traveling salesman problem. **Operations Research**. v.31, n.3, p.507–521, 1983.

ROODBERGEN, J. K. Layout and routing methods for warehouses, Ph.D. thesis, Erasmus University Rotterdam, The Netherlands. 2001. Tese (Doutorado)

ROODBERGEN, J. K.; DE KOSTER, R. Routing order pickers in a warehouse with a middle aisle. **European Journal of Operational Research**. v.133, n.1, p.32-43, 2001a.

ROODBERGEN, J. K.; DE KOSTER, R. Routing methods for warehouses with multiple cross aisles. **International Journal of Production Research**. v.39, n.9, p.1865-1883, 2001b.

ROODBERGEN, K. J.; SHARP, G. P.; VIS, I. F. A.. A survey of literature on automated storage and retrieval systems. **European Journal of Operational Research**, Apr2009, Vol. 194 Issue 2, p343-362, 20p.

ROODBERGEN, K. J.; SHARP, G. P.; VIS, I. F. A.. Designing the layout structure of manual order picking areas in warehouses. **IIE Transactions**, Nov2008, Vol. 40 Issue 11, p1032-1045, 14p.

SANTOS, A. Centros de distribuição como vantagem competitiva. **Revista de Ciências Gerenciais**. n. 12, p.34-40, 2005.

SHIH, C.; JOSÉ JÚNIOR, J. Modeling and simulation of retrieving process. **Sistemas e Gestão**. v.2, n.2, p.81-101, 2007

TEIXEIRA, R.G. e CUNHA, C.B. (2002) “**Heurísticas para o Problema de Dimensionamento e Roteirização de uma Frota Heterogênea Utilizando o Algoritmo Out-of-Kilter**”. *TRANSPORTES*, v.10, n.2, p.9-30.

THEYS, C.; BRÄYSY, O; DULLAERT, W.; RAA, B. Evolutionary Methods for Design, Optimization and Control, P. Neittaanmaki, J. Periaux, and T. Tuovinen (Eds.) , Barcelona, Spain, 2007.

THEYS, C.; BRÄYSY, O; DULLAERT, W.; RAA, B. Using tsp-heuristic for routing order pickers in warehouse. **European Journal of Operational Research**. (2009), doi: 10.1016/j.ejor.2009.01.036 .

TOMPKINS, J. A.; BOOZER, Y. A.; FRANZELLE, E. H.; TANCHOCO, J. M. A.; TREVINO, J., (1996). Facilities Planning (New York: Wiley)

TOSCAINE, LARA V. e VELOSO, PAULO A. S. Complexidade de Algoritmos, Porto Alegre, Editora Sagra-Luzzato, 1ª Edição, 2001. Disponível em: <http://www.inf.ufrgs.br/~laira/transparencias/transparenciasCap52.pdf>

TSAI, C. ; LIOU, J. J. H.; HUANG, T. M.. Using a multiple-GA method to solve the batch picking problem: considering travel distance and order due time. **International Journal of Production Research**, Nov2008, Vol. 46 Issue 22, p6533-6555, 23p.

VAN DEN BERG, J. P.; SHARP, G. P.; GADEMANN, A. J. R. M. (NOUD); POCHET, Y.. Forward-reserve allocation in a warehouse with unit-load replenishments. **European Journal of Operational Research**, 11/16/98, Vol. 111 Issue 1, p98-113, 16p.

VAUGHAN, T. S.; PETERSEN, C. G. The effect of warehouse cross aisles on order picking efficiency. **International Journal of Production Research**. v.37, n.4, p.881-897, 1999.

WON, J.; OLAFSSON, S. Joint order batching and order picking in warehouse operations. **International Journal of Production Research**. v.43, n.7, p.1427-1442, 2005.

WU, LUCIELE. **O Problema de Roteirização Periódica de Veículos**. 28p, Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

10.ANEXOS

10.1. Listas de separação/estrutura do produto LA257 – Parte 1

LA24300450	LA12700021	O032	1
	LA13600117	O046	1
	LA13800007	O063	1
	LA14100007	O070	1
	LA14100008	O071	1
	LA14100010	O073	1
	LA14100015	O078	1
	LA14100063	O085	1
	LA14100067	O089	1
	LA14100073	O094	1
	LA14100081	O095	1
	LA14300002	M050	1
	LA14300006	M054	1
	LA14300007	M053	1
	LA24100037	L084	1
	LA24100048	L085	1
	LA24200207	K055	1
	LA24300402	K171	1
	LA24300403	J005	1
	LA24300405	J006	1
	LA24300409	J007	1
	LA24300410	J008	1
	LA24300414	J010	1
	LA24300415	J011	1
	LA24300418	J003	1
	LA24300451	J015	1
	LA24300501	J016	1
	LA24300507	J017	1
	LA24300508	J018	1
	LA24300512	J021	1
	LA24300513	J022	1
	LA24300515	J026	1
	LA24301101	J083	1
	LA24301114	J096	1
	LA24301115	J097	1
	LA24301119	J101	1
	LA24301135	J117	1
	LA24301137	J119	1
	LA25600402	G028	1
	LA25601005	G089	1
	LA31212002	B018	1
	LA51300013	B039	1
	LA51700035	A005	1
	LA51700043	A007	1
	LA51900007	A067	1
	LA51900035	D033	1
	LA51900036	F082	1
	LA51900037	D034	1
	LA91200181	C022	1
LA24300450 Total			49

10.2. Listas de separação/estrutura do produto LA257 – Parte 2

LA24300050	LA12300312	O013	1
	LA24200703	K101	1
	LA91200323	C028	1
	LA91200324	C029	1
	LA91517004	C045	1
LA24300050 Total			5
LA24300060	LA24101420	C131	1
LA24300060 Total			1
LA24300070	LA24101364	L121	1
LA24300070 Total			1
LA24300300	LA12700021	O032	1
	LA24101362	L119	1
	LA24200304	C132	1
	LA24200310	K064	1
	LA24200318	D086	1
	LA24300302	K169	1
LA24300300 Total			6
LA24300303	LA21100140	L063	1
LA24300303 Total			1
LA24300306	LA25601005	G089	1
	LA51700035	A005	1
LA24300306 Total			2
LA24300500	LA14200103	O123	1
	LA14200104	O124	1
	LA14200105	O125	1
	LA14200110	O128	1
	LA14200310	N012	1
	LA14200505	N015	1
	LA14601051	M081	1
	LA14601060	L001	1
	LA14601079	L007	1
	LA14601080	L008	1
	LA14601084	L009	1
	LA24101326	L105	1
	LA24101363	L120	1
	LA24200144	K047	1
	LA24200510	K085	1
	LA24200511	K086	1
	LA24300100	K151	1
	LA24300222	K156	1
LA24300500 Total			18

10.3. Listas de separação/estrutura do produto LA257 – Parte 3

LA24300514	LA12501202	O027	1
	LA13800006	O062	1
	LA13800015	O059	1
	LA14200702	N040	1
	LA24300511	J033	1
	LA26100505	D087	1
	LA91200337	L114	1
LA24300514 Total			7
LA24300550	LA14100004	O067	1
	LA14601061	L002	1
LA24300550 Total			2
LA24300600	LA12700019	O031	1
	LA13600043	O044	1
	LA13800002	O058	1
	LA13900001	O060	1
	LA14200608	N028	1
	LA14200609	N029	1
	LA14200613	N032	1
	LA14200614	N033	1
	LA14200615	N034	1
	LA14200627	N038	1
	LA24200604	K089	1
	LA24200613	K095	1
	LA24200617	K098	1
	LA24200621	K099	1
	LA24300602	J030	1
	LA24300604	J024	1
	LA24300605	J020	1
	LA24300606	J032	1
	LA31212009	N039	1
LA24300600 Total			19
LA24300607	LA21100024	L042	1
	LA24300608	J034	1
	LA51200009	B049	1
	LA51700092	A016	1
LA24300607 Total			4
LA24300609	LA21100051	L046	1
	LA24101112	L090	1
	LA51900018	L010	1
LA24300609 Total			3

10.4. Listas de separação/estrutura do produto LA257 – Parte 4

LA24300610	LA12300632	O016	1
	LA13800012	O064	1
	LA14200611	N030	1
	LA14200612	N031	1
	LA14900002	L028	1
	LA14900003	L029	1
	LA14900004	L031	1
	LA24200615	K096	1
	LA24300611	J037	1
LA24300610 Total			9
LA24300616	LA14100004	O067	1
	LA14100084	O098	1
	LA14100086	O100	1
	LA14100088	O102	1
	LA14100619	O117	1
	LA14100622	O118	1
	LA14100627	O119	1
	LA24300615	J038	1
	LA24301117	J099	1
	LA24301118	J100	1
	LA24301124	J106	1
	LA24301126	J108	1
	LA51900037	D034	1
	LA51900055	I033	1
LA24300616 Total			14
LA24300700	LA24100037	L084	1
	LA24200710	K106	1
	LA91200412	C039	1
LA24300700 Total			3
LA24300703	LA24200709	K105	1
	LA24300701	C144	1
LA24300703 Total			2
LA24300706	LA31217001	B019	1
LA24300706 Total			1
LA24300707	LA31217001	B019	1
LA24300707 Total			1

10.5. Listas de separação/estrutura do produto LA257 – Parte 5

LA24301100	LA14100004	O067	1
	LA24200205	K057	1
	LA24200206	K058	1
	LA24200207	K055	1
	LA24300203	K158	1
	LA24300205	K160	1
	LA24300207	K161	1
	LA24300208	K162	1
	LA24300215	K063	1
	LA24300221	K066	1
	LA24300251	K167	1
LA24301100 Total			11
LA24301102	LA14100008	O071	1
	LA51900007	A067	1
LA24301102 Total			2
LA24301103	LA14100009	O072	1
	LA51900007	A067	1
LA24301103 Total			2
LA24301104	LA14100010	O073	1
	LA51900007	A067	1
LA24301104 Total			2
LA24301105	LA14100011	O074	1
	LA51900007	A067	1
LA24301105 Total			2
LA24301106	LA14100012	O075	1
	LA51700030	A003	1
	LA51700035	A005	1
	LA51700043	A007	1
	LA51900007	A067	1
LA24301106 Total			5
LA24301108	LA14100014	O077	1
	LA51900007	A067	1
LA24301108 Total			2

10.6. Listas de separação/estrutura do produto LA257 – Parte 6

LA24301116	LA14100063	O085	1
	LA14100064	O086	1
	LA14100067	O089	1
	LA14100068	O090	1
	LA24300619	J040	1
	LA24300620	J041	1
	LA24301122	J103	1
	LA24301125	J107	1
	LA51700097	A019	1
	LA51900035	D033	1
	LA91200112	C018	1
	LA91200164	M080	1
LA24301116 Total			12
LA24301120	LA14100082	O096	1
	LA14100084	O098	1
	LA51700043	A007	1
	LA51900037	D034	1
LA24301120 Total			4
LA24301121	LA14100083	O097	1
	LA14100084	O098	1
	LA51900037	D034	1
LA24301121 Total			3
LA24301128	LA14100004	O067	1
	LA14100006	O069	1
	LA14100007	O070	1
	LA14100013	O076	1
	LA14100015	O078	1
	LA14100084	O098	1
	LA14100089	O103	1
	LA24301107	J089	1
	LA24301109	J091	1
	LA24301110	J092	1
	LA24301111	J093	1
	LA24301127	J109	1
	LA51700042	A006	1
	LA51900007	A067	1
	LA51900037	D034	1
LA24301128 Total			15

10.7. Listas de separação/estrutura do produto LA257 – Parte 7

LA24301129	LA14100004	O067	1
	LA14100007	O070	1
	LA14100008	O071	1
	LA14100009	O072	1
	LA14100084	O098	1
	LA14100085	O099	1
	LA24301112	J094	1
	LA24301113	J095	1
	LA24301123	J105	1
	LA51700042	A006	1
	LA51900007	A067	1
	LA51900037	D034	1
LA24301129 Total			12
LA24301131	LA14100004	O067	1
	LA24300852	J056	1
LA24301131 Total			2
LA24301132	LA14100004	O067	1
	LA24300852	J056	1
LA24301132 Total			2
LA24301136	LA14100008	O071	1
	LA14100014	O077	1
	LA51700043	A007	1
	LA51900007	A067	1
LA24301136 Total			4