



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**Mateus Brito Gama**

**ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS: IMPLEMENTAÇÃO E  
MELHORIA DO MÉTODO DE CLARKE E WRIGHT**

Juazeiro - BA  
2011

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**Mateus Brito Gama**

**ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS: IMPLEMENTAÇÃO E  
MELHORIA DO MÉTODO DE CLARKE E WRIGHT**

Trabalho apresentado à Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF, Campus Juazeiro – BA, como requisito da obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Rodrigues de Lima Júnior

**Juazeiro - BA  
2011**

	Gama, Mateus Brito
G184r	Roteirização de veículos: implementação e melhoria do método de Clarke e Wright / Mateus Brito Gama. - Juazeiro, 2011.
	93 f. : il ; 29 cm.
	Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Juazeiro, Juazeiro-BA, 2011.
	Orientador: Prof. Dr. Paulo César Rodrigues de Lima Júnior.
	1. Logística. 2. Distribuição Física. 3. Transporte. 4. Roteirização de Veículos. 5. Método de Clarke e Wright. I. Título. II. Universidade Federal do Vale do São Francisco
CDD 658.7	

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Integrado de Biblioteca SIBI/UNIVASF

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**FOLHA DE APROVAÇÃO**  
Para TCC

Mateus Brito Gama

**ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS: IMPLEMENTAÇÃO E MELHORIA DO  
MÉTODO DE CLARKE E WRIGHT**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial  
para obtenção do título de Engenheiro de Produção, pela Universidade  
Federal do Vale do São Francisco.



---

Paulo César Rodrigues de Lima Júnior, Dr – UNIVASF



---

Ana Cristina Gonçalves Castro Silva, MSc – UNIVASF



---

Jorge Alberto Santana de Jesus – FASJ

Aprovado pelo Colegiado de Engenharia de Produção em 09/12/2012

Dedico este trabalho ao meu pai, Pedro, e minha mãe, Gislene, pelo incentivo, apoio e confiança.

## AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço a Deus pela vida, e por ter me dar à oportunidade de conviver com pessoas que me fizeram chegar até aqui.

Agradeço a toda minha família, por me mostrarem, desde cedo, os verdadeiros princípios da vida e por proporcionarem momentos de muita alegria para mim.

De modo mais que especial gostaria de agradecer às duas pessoas pelo qual me motivam a crescer tanto pessoalmente, quanto profissionalmente: meus pais. Pedro Carlos Gama da Silva e Gislene Feitosa Brito Gama, pelo amor, educação, apoio e confiança nas decisões que tomei até hoje, meu “Muito Obrigado” por tudo!

Agradeço também a meu irmão, Filipe Brito Gama, pela companhia e amizade.

A Ana, pessoa que me ‘atura’ há muitos tempo, e, sem dúvida, me ajuda muito no dia a dia.

Agradeço à instituição UNIVASF, junto aos técnicos e professores que contribuíram para minha formação. Estendo este agradecimento para o professor e amigo Dr. José Luiz Moreira de Carvalho, responsável pela minha iniciação na pesquisa e pelo aprendizado que a mesma proporcionou.

A todos os amigos que compartilharam comigo às diversas noites de estudo, as preocupações, lamentações e vitórias conquistadas na graduação. Agradeço a Bruno Luís, Neurisnaldo Guerra e Raoni Gonzaga, pela amizade, ajuda, e não menos importante, pelos momentos de descontração, que não foram poucos. Também, aos amigos e amigas da turma 2007.2 da Engenharia de Produção: Raquel, Laiane, Mel, Helder, Lucas, Luiz Henrique, Paty, Amanda...

Em especial, agradeço ao professor, amigo e orientador, Paulo César, pela dedicação e paciência na construção deste trabalho, que muito contribuiu para minha formação; pelos conselhos dados nos momentos de incerteza do curso; pelo enorme aprendizado obtido nas disciplinas das quais lecionou, mostrando sempre o lado prático da Engenharia. Meus sinceros agradecimentos.

Por fim, e, não menos especial, agradeço à Paula de Sousa Pereira por me dedicar amor e carinho diariamente; por modificar, para melhor, meu jeito de ser e agir; pelo apoio, paciência e compreensão nos muitos dias difíceis; por completar a minha vida.

## RESUMO

O aumento na exigência dos mercados, aliado à competitividade entre as empresas, faz com que haja uma busca constante por melhorias no desempenho operacional, para aproveitar ao máximo os recursos disponíveis de forma a minimizar, principalmente, os custos logísticos do processo produtivo. Vários estudos demonstram que a operação de movimentação de cargas absorve de um a dois terços destes custos logísticos, implicando na busca constante por melhorias na execução da atividade de transporte. Entre os mecanismos utilizados na otimização dos sistemas de transporte, destaca-se a roteirização de veículos, que desempenha um papel central no campo da logística e da distribuição física. Um dos métodos mais conhecidos e aplicados, inclusive muito utilizado em *softwares* comerciais de roteirização, é o método de Clarke e Wright. Esse método, assim como outros, apresentam algumas limitações nos algoritmos de solução, não contemplando algumas situações. Diante disto o presente trabalho teve por objetivo, desenvolver uma melhoria para o método heurístico de Clarke e Wright, baseando-se na carga que for destinada a cada ponto de entrega/coleta dos roteiros criados pela heurística. Como resultado da pesquisa, foi desenvolvido um modelo de roteirização, por meio da implementação computacional do método de CW e da melhoria proposta, utilizando-se o *software* de programação Delphi® 2010. Para avaliar a o método de CW no modelo de roteirização, foram realizados três testes de validação, em que foi constatado que o mesmo produz soluções válidas e coerentes com o algoritmo do referido método. No que tange as melhorias, estas foram aplicadas aos mesmos exemplos dos testes de validação, possibilitando concluir que a melhoria proposta para o método de CW contribuiu na otimização da solução dos referidos, e possibilita a redução dos custos de distribuição, em termos de distância e carregamento. Foram apresentadas outras aplicações para o modelo de roteirização desenvolvido, uma destas foi para o caso da criação de roteiros para representantes de venda, e a outra se refere à utilização da melhoria desenvolvida, para estabelecer a melhor localização para um depósito, levando em consideração o fator distância•peso.

*Palavras – chave: Logística. Distribuição Física. Transporte. Roteirização de Veículos. Método de Clarke e Wright.*

## ABSTRACT

The increase in markets requirement, coupled with competitiveness between companies, cause a constant search for improvements in operational performance, taking full advantage of the available resources so as to mainly minimize logistics costs. Several researches show that the operation of cargo handling absolves from one to two thirds of logistics costs, implying in constant search for improvements in execution of transport activity. Among the mechanisms used in the optimization of transport systems, stands out the vehicle routing problem, that carry out a central role in the range of logistics and physical distribution. One of the most known and applied method (widely used in commercial routing *software*) is the Clarke and Wright. This method, as well as others, has some limitations in the algorithm solution, not contemplating some situations. According to this, this work aimed to develop an improvement in the Clarke and Wright heuristic method, based on the load that is aimed at each point of delivery/collection of itineraries created by heuristics. As a result of this research, it was developed a model of a routing problem through the computational implementation of the CW method and its improvement using the programming *software* Delphi® 2010. In order to evaluate the implementation of the CW method in the routing model, were carried out three validation tests, where it was found that it produces valid and consistent solutions. The improvements were applied to the same examples of the validation tests, making it possible to conclude that the proposed improvement to the CW method contributes to the optimization of the solution and enables the reduction in distribution costs, in terms of distance and loading. Finally, it was still presented others applications to the developed routing model. One of these was a case of the creation of roadmaps for sales representatives, and the other refers to establish the best location for a depot, taking into consideration the distance•weight factor.

*Keywords: Logistic. Physical Distribution. Transport. Vehicle Routing Problem. Clarke and Wright.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> – Agrupamentos inadequado (a) e adequado (b) de pontos. ....	30
<b>Figura 2</b> – Exemplo do Problema do Caixeiro Viajante .....	40
<b>Figura 3</b> – Método da varredura e sua evolução. ....	41
<b>Figura 4</b> – Ilustração do conceito de ganho com a integração de dois clientes em roteiro compartilhado.....	43
<b>Figura 5</b> – Fluxograma de execução do modelo de roteirização desenvolvido. ....	52
<b>Figura 6</b> – Exemplo dos dados de entrada para o modelo no formato <i>.txt</i> . ....	53
<b>Figura 7</b> – (a) Pontos de demanda para o problema de roteirização exemplificado (b) rotas geradas através da roteirização dos pontos de demanda. ....	55
<b>Figura 8</b> – Matriz de análise das rotas para o problema de roteirização exemplificado. ....	56
<b>Figura 9</b> – <i>Layout</i> da interface com o usuário do modelo desenvolvido. ....	57
<b>Figura 10</b> – Rotas geradas como solução pelo exemplo disposto em Novaes (2004). ....	59
<b>Figura 11</b> – Rotas geradas pelo modelo no problema disposto em Novaes (2004). ....	59
<b>Figura 12</b> – Rotas geradas como solução pelo modelo para o problema disposta em Novaes (2004), apresentada com auxílio do Microsoft Excel®. ....	60
<b>Figura 13</b> – Rotas geradas como solução pelo modelo desenvolvido no Microsoft Excel® para o problema com aplicação analítica.....	61
<b>Figura 14</b> – Rotas geradas pelo modelo no problema com aplicação analítica.....	62
<b>Figura 15</b> – Rotas geradas como solução pelo modelo para o problema com aplicação analítica, apresentada com auxílio do Microsoft Excel®. ....	62
<b>Figura 16</b> – Detalhe das informações dos pontos gerados pelo modelo para a rota 1. ....	63
<b>Figura 17</b> – Rotas geradas pelo modelo no problema com 100 pontos de demanda. ....	64
<b>Figura 18</b> – Rotas geradas como solução pelo modelo para o problema com 100 pontos de demanda, apresentada com auxílio do ArcGIS®.....	65
<b>Figura 19</b> – Detalhe da rota 20 com a sequencia de demanda, apresentada com auxílio do ArcGIS® .....	65

<b>Figura 20</b> - Detalhe da rota 7 com a sequencia de demanda, apresentada com auxilio do ArcGIS® .....	66
<b>Figura 21</b> - Detalhe da rota 14 com a sequencia de demanda, apresentada com auxilio do Microsoft ArcGIS® .....	66
<b>Figura 22</b> - Detalhe da rota 15 com a sequencia de demanda, apresentada com auxilio do Microsoft ArcGIS® .....	67
<b>Figura 23</b> - Detalhe da rota 20 com a sequencia de demanda, apresentada com auxilio do Microsoft ArcGIS® .....	67
<b>Figura 24</b> – Resumo da avaliação das rotas fornecido pelo modelo de roteirização no problema disposto em Novaes (2004).....	69
<b>Figura 25</b> – Detalhe da rota 11 com a sequência e a carga dos pontos de demanda, apresentada com auxilio do Microsoft Excel® .....	70
<b>Figura 26</b> – Resumo da avaliação das rotas fornecido pelo modelo de roteirização no problema com aplicação analítica. ....	71
<b>Figura 27</b> - Detalhe das rotas 4 e 2 com a sequência e a carga dos pontos de demanda, apresentada com auxilio do Microsoft Excel® .....	72
<b>Figura 28</b> – Resumo da avaliação das rotas fornecido pelo modelo de roteirização no problema com 100 pontos de demanda. ....	73
<b>Figura 29</b> – Detalhe da rota 14 com a sequência e a carga dos pontos de demanda, apresentada com auxilio do ArcGIS® .....	74
<b>Figura 30</b> – Rotas geradas pelo modelo no problema de roteirização de visitas.....	75
<b>Figura 31</b> – Resultado fornecido pelo modelo para o problema roteirização de pontos de vista, apresentado com auxilio do ArcGIS® .....	76
<b>Figura 32</b> – Solução fornecida pelo modelo de roteirização para os cenários 1 (a) e 2 (b), apresentadas com auxilio do ArcGIS® .....	78
<b>Figura 33</b> – Resumo da avaliação das rotas para o cenário de localização 1 (a) e 2 (b).....	79

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Dados de entrada para o problema com aplicação analítica. ....	61
<b>Tabela 2</b> – Dados de entrada para o modelo no problema com 100 pontos de demanda. ....	64
<b>Tabela 3</b> – Economias resultantes das rotas modificadas pelo modelo de roteirização, no problema disposto em Novaes (2004). ....	69
<b>Tabela 4</b> – Economias resultantes das rotas modificadas pelo modelo de roteirização, no problema com aplicação analítica.....	71
<b>Tabela 5</b> – Economias resultantes das rotas modificadas pelo modelo de roteirização no problema com 100 pontos de demanda.....	73
<b>Tabela 6</b> – Dados de entrada do modelo para problema de roteirização de visitas..	75
<b>Tabela 7</b> – Coordenadas do depósito para os cenários 1 e 2.....	77
<b>Tabela 8</b> – Somatório do fator distância•peso para os cenários de localização do depósito.....	79

## LISTA DE QUAROS

<b>Quadro 1</b> – Características dos problemas de roteirização e programação.....	31
<b>Quadro 2</b> – Os problemas básicos de roteirização pura.....	33
<b>Quadro 3</b> – Os problemas básicos de programação de veículos. ....	34
<b>Quadro 4</b> – Os problemas básicos de programação e tripulação.....	34
<b>Quadro 5</b> – Os problemas básicos de roteirização e programação.....	35
<b>Quadro 6</b> – Estratégias de solução para os problemas de roteirização e programação. ....	37

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>vi</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>viii</b>
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	<b>ix</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>xi</b>
<b>LISTA DE QUAROS</b> .....	<b>xii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1. Definição dos Problemas .....	17
1.2. Objetivos .....	20
1.2.1. Geral.....	20
1.2.2. Específicos .....	20
1.3. Justificativa .....	21
1.4. Estrutura do Trabalho .....	22
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>24</b>
2.1. Logística Empresarial.....	24
2.2. Distribuição Física.....	25
2.3. Transportes.....	26
2.4. Roteirização de Veículos .....	27
2.4.1. Classificação dos Problemas de Roteirização e Programação de Veículos (PRPV).....	32
2.4.2. Classificação dos Métodos de Solução para os PRPV .....	36
2.4.3. Métodos Heurísticos para os PRPV .....	39
2.4.3.1. Problema do Caixeiro Viajante .....	39
2.4.3.2. Método da Varredura (Sweep Algorithm) .....	40

2.4.3.3. Método de Clarke e Wright (CW) .....	41
2.4.4. Algoritmo do Método de CW .....	42
2.4.5. Aplicações dos PRPV na Literatura.....	44
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>46</b>
3.1. Finalidade da Pesquisa.....	46
3.2. Tipologia da Pesquisa.....	46
3.3. Variáveis da Pesquisa.....	47
3.4. Delineamento da Pesquisa .....	47
3.4.1. <i>Software</i> Utilizado.....	48
3.4.2. Etapas da Pesquisa.....	48
3.4.3. Validação do Método de CW e Aplicação da Melhoria.....	49
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>51</b>
4.1. Modelo de Roteirização Desenvolvido .....	51
4.1.1. Fluxograma de Execução.....	51
4.1.2. Interface do Modelo.....	56
4.2. Validação do Método de CW Implementado.....	57
4.2.1. Aplicação de um Exemplo de Novaes (2004).....	58
4.2.2. Aplicação Analítica do Método de CW: <i>Microsoft Excel</i> <sup>®</sup> .....	60
4.2.3. Aplicação com 100 Pontos de Demanda na Cidade de Petrolina – PE...63	
4.3. Aplicação da Melhoria no Método de CW .....	68
4.3.1. Exemplo de Novaes (2004).....	68
4.3.2. Modelo Analítico do Método de CW .....	70
4.3.3. Exemplo com 100 Pontos de Demanda na Cidade de Petrolina – PE ....72	
4.4. Outras Aplicações para o Modelo de Roteirização Desenvolvido .....	74
4.4.1. Roteirização de Pontos de Visita para Representantes de Venda .....	74

4.4.2. Localização de Depósito .....	76
<b>5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>80</b>
5.1. Conclusões .....	80
5.2. Recomendações .....	83
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>85</b>
<b>ANEXO 1 – Pontos de demanda do problema de roteirização disposto em Novaes (2005) .....</b>	<b>88</b>
<b>ANEXO 2 – Pontos de demanda do problema de roteirização aplicado no modelo analítico de CW .....</b>	<b>89</b>
<b>ANEXO 3 – Matrizes gerados no problema de roteirização aplicado no Microsoft Excel<sup>®</sup>, a partir de um modelo analítico .....</b>	<b>90</b>
<b>ANEXO 4 – Pontos de demanda da cidade de Petrolina-PE, com carga aleatória...92</b>	<b>92</b>
<b>ANEXO 5 – Pontos de demanda da cidade de Petrolina-PE, com carga unitária.....93</b>	<b>93</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A logística, conforme Novaes (2004), pode ser entendida como processo de planejar, implementar e controlar, de maneira eficiente, o fluxo e a armazenagem de mercadorias, bem como os serviços e informações associadas, cobrindo desde o ponto de origem até o ponto de consumo, com o objetivo de atender os requisitos do consumidor.

Complementando este conceito, Ballou (2006) afirma que a logística empresarial está relacionada com um conjunto de atividades funcionais, como transporte e controle de estoques, que se repetem inúmeras vezes ao longo do canal, de modo que matérias primas vão sendo convertidas em produtos acabados, aos quais se agrega valor ao consumidor. A logística empresarial, ainda segundo o autor, pode ser entendida como a integração da administração de materiais com a distribuição física.

Segundo Hesse e Rodrigue (2004), a distribuição física, que aborda o conceito central deste trabalho, refere-se à gama de atividades envolvidas na movimentação de mercadorias do local de produção até os pontos finais de venda e consumo. O objetivo geral da distribuição física, conforme Novaes (2004), é levar os produtos certos, para os lugares certos, no momento certo e com nível de serviço desejado pelo consumidor, pelo menor custo possível. A fim de atender este objetivo, este processo é composto por diversas atividades, onde pode-se destacar a de transporte.

Para Ballou (2006), o transporte é uma área fundamental de decisões dentro da logística, pois, com exceção dos produtos adquiridos, esta atividade é a que absorve a maior percentagem dos custos logísticos totais, normalmente entre um e dois terços. Por este motivo, torna-se fundamental para as empresas encontrarem mecanismos para reduzir ao máximo seus custos de transporte.

A roteirização de veículos apresenta-se como um destes mecanismos. Conforme Laporte (1992), a roteirização de veículo desempenha um papel central no âmbito da distribuição física e da logística, e pode ser definido como o problema do planejamento ótimo de entregas ou rotas de coleta de um ou vários depósitos, para

uma série de cidades ou clientes, geograficamente dispersos, sujeitos a restrições adicionais.

Além da redução do custo de transporte dentro das empresas, em especial as distribuidoras, a solução otimizada do problema de roteirização traz uma economia bastante significativa para o consumidor final, resultando, segundo Galvão et al. (1997), em uma vasta literatura sobre o assunto, relacionando-o à formulação de diversos tipos de problemas, métodos de solução correspondentes e aplicações.

Um dos métodos mais conhecidos e aplicados, inclusive muito utilizado em *softwares* comerciais de roteirização, é o método de Clarke e Wright. Conforme Laporte (1992), este clássico algoritmo foi proposto pela primeira vez em 1964, pelos autores que deram nome ao método, para resolver um problema de roteirização de veículos (PRV).

Este método, baseado na abordagem das economias, tem atravessado os anos como algo dotado de flexibilidade suficiente para resolver uma ampla coleção de restrições práticas, sendo relativamente rápido, em termos computacionais, para problemas com um número moderado de paradas, e capaz de gerar soluções que são quase ótimas (BALLOU, 2006).

Apesar disto, segundo Pelizaro (2000), muitas modificações têm sido propostas para o método de Clarke e Wright buscando a obtenção de diferentes resultados. Es como a Golden *et al.* (1977) que conseguiram reduzir substancialmente o tempo de processamento da heurística de Clarke e Wright, utilizando técnicas de ciências computacionais

### **1.1. Definição do Objeto de Estudo**

Em tempos de mercados competitivos e mais exigentes, há uma busca constante por melhorias no desempenho operacional das empresas, buscando oferecer qualidade no atendimento ao cliente, aproveitando ao máximo os recursos disponíveis de forma a minimizar os custos logísticos do processo produtivo (RIBEIRO; RUIZ; DEXHEIMER, 2001).

O transporte normalmente representa o elemento mais importante em termos de custos logísticos para inúmeras empresas. A movimentação de cargas absorve de um a dois terços dos custos logísticos totais, por isso, aumentar a eficiência por meio da máxima utilização dos equipamentos e pessoal de transporte é uma das maiores preocupações do setor. Reduzir os custos do transporte e melhorar os serviços ao cliente, descobrir os melhores roteiros para os veículos ao longo de uma rede rodoviária, ferroviária, hidroviária ou rotas de navegação aérea, a fim de minimizar os tempos e as distâncias, constituem problemas muito frequentes de tomada de decisão (BALLOU, 2006).

Em face disto, surge a necessidade de otimização das rotas de um sistema de distribuição física, que consiste em transportar a carga desde o produtor ou distribuidor até os consumidores, que se encontram localizados em pontos geograficamente dispersos sobre determinada região, respeitando sempre os horários de entrega (RIBEIRO; RUIZ; DEXHEIMER, 2001).

Este processo de distribuição, conhecidos como problemas de roteirização, aparecem em uma série de serviços, como entrega bancária, entrega postal, entrega de mercadorias, rotas de ônibus escolar, coleta de lixo industrial, serviço de entregas noturnas, operações de frete e outros. A solução de problemas relacionados a este tema pode diminuir bastante o custo de distribuição, causando uma grande economia tanto para a indústria como para o governo, o que justifica, assim, a importância de estudos nesta área e a constante busca de soluções otimizadas para a variada gama de problemas que existem dentro desta temática (HVENEGAARD, 2008).

Em conformidade com isto, Carmo *et al.* (2003) *apud* Enumoto (2005), afirma que a solução otimizada do problema de roteirização e programação de veículos, além da redução do custo de transporte, leva também a uma economia bastante significativa tanto para as empresas distribuidoras como para o consumidor final. Não por menos, existe uma vasta literatura sobre roteirização, relacionada à formulação de diversos tipos de problema, métodos de solução correspondentes e aplicações (GALVÃO *et al.*, 1997).

O primeiro problema de roteirização a ser estudado foi o do caixeiro viajante, que consiste basicamente em encontrar o melhor roteiro para percorrer um conjunto de pontos ou cidades, buscando o menor caminho. Problemas de roteirização de

veículos são muitas vezes definidos como problemas de múltiplos caixeiros viajantes, já que no decorrer do tempo novas restrições foram sendo incorporadas ao problema original, de modo a melhor representar os diferentes tipos de problemas que envolvem roteiros de pessoas e veículos. Entre estas restrições, pode-se citar: horário de atendimento; capacidades dos veículos; frota composta de veículos de diferentes tamanhos; duração máxima dos roteiros dos veículos (tempo ou distância); restrições de tipos de veículos que podem atender determinados clientes (CUNHA, 2000).

Problemas de roteirização de veículos consiste na otimização combinatória pertencentes à categoria *NP-hard*, de modo que o tempo computacional necessário à obtenção da solução ótima é uma função exponencial do tamanho do problema. Em termos práticos, isto significa que não é possível obter a solução ótima de problemas reais pertencentes a esta categoria e, na grande maioria das aplicações, são utilizados métodos heurísticos, que produzem soluções aproximadas de boa qualidade em tempo reduzido (GALVÃO, 1997).

Para Cunha (2000) uma consequência disto é que os métodos de solução de todos os *softwares* e aplicativos comerciais encontrados no mercado para roteirização de veículos são heurísticos. Apesar da grande maioria dos desenvolvedores destes *softwares* de roteirização manterem em sigilo os algoritmos de solução utilizados, a análise de resultados obtidos para algumas situações específicas de problemas, permite perceber que são heurísticas simples, e mais do que isso, pode-se afirmar que muitos dos pacotes comerciais têm como base a heurística de economias, proposta por Clarke e Wright (1964). Além da rapidez em termos de tempo de processamento, a heurística de economias apresenta uma qualidade essencial no caso de um aplicativo comercial genérico: robustez, ou seja, capacidade de resolver satisfatoriamente problemas com diferentes restrições, sem degradação sensível na qualidade das soluções e nos tempos de processamento (TEIXEIRA; CUNHA, 2002).

Porém, a heurística de Clarke e Wright não contempla algumas situações específicas, pois, para obtenção de suas soluções, considera, como principais restrições, o tempo de rota e a capacidade do veículo. Este método oferece, como solução, uma sequência de visitas que deve ser seguida, mas não define claramente

o sentido de visitação que deve ser seguido que, em muitos casos, poderia influenciar nas economias ligadas ao custo de transporte.

Diante do exposto, define-se, como objeto de estudo, a seguinte questão: Que melhoria poderia ser implementada na heurística de Clarke e Wright para a mesma fornecesse soluções mais otimizadas no que se refere aos custos de transporte?

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Geral**

Desenvolver uma melhoria para o método heurístico de Clarke e Wright, baseando-se na carga que for destinada a cada ponto de entrega/coleta, a fim de obter soluções mais otimizadas no que se refere aos custos de transporte.

### **1.2.2. Específicos**

O objetivo geral desdobra-se nos seguintes objetivos específicos:

1. Implementar o método de Clarke e Wright utilizando a linguagem de programação Delphi;
2. Realizar simulações em laboratório para problemas de roteirização de diversas dimensões, visando validar o método de Clarke e Wright implementado;
3. Implementar a melhoria do método, levando em consideração a carga a ser transportada;
4. Verificar as diferenças obtidas entre as novas soluções oferecidas pela adoção da melhoria e aquelas obtidas anteriormente.

### 1.3. Justificativa

Na literatura além dos problemas de roteirização de cunho operacional relativos ao transporte de passageiros, prestação de serviços, e aqueles relacionados ao transporte de carga (coleta e distribuição), são encontrados problemas de roteirização de natureza mais tática ou estratégica do que operacional, tais como: problemas integrados de localização e roteirização; problemas integrados de estoque e roteirização, nos quais a programação dos atendimentos deve levar em consideração não só aspectos espaciais e os custos dos roteiros, como também questões como o nível de estoque; problemas de faturamento e roteirização, nos quais é preciso definir simultaneamente quem vai ser atendido a cada dia de um período de tempo pré-determinado; entre outros (CUNHA, 2000).

Isto mostra a vasta aplicabilidade que a roteirização de veículos tem dentro da logística e da pesquisa operacional (PO). De acordo com Assad (1988) *apud* Cunha (2000), a roteirização de veículos consiste em uma das histórias de grande sucesso da PO nas últimas décadas. Estas duas áreas, nas quais se propõe este estudo, estão inseridas dentro da abrangência do curso de engenharia de produção, já que, conforme a ABEPRO (2008), a logística representa o estudo das técnicas para o tratamento das principais questões envolvendo o transporte, a movimentação, o estoque e o armazenamento de insumos e produtos, visando à redução de custos, a garantia da disponibilidade do produto, bem como o atendimento dos níveis de exigências dos clientes. Enquanto a pesquisa operacional compreende a resolução de problemas reais envolvendo situações de tomada de decisão, através de modelos matemáticos habitualmente processados computacionalmente.

Apesar desta diversidade de aplicações dos problemas de roteirização, é muito comum que as heurísticas embutidas nos *softwares* produzam soluções que correspondem a algum tipo de sub-otimização, buscando prioritariamente minimizar a frota e, em seguida, a distância total percorrida. Isso decorre do fato de que as heurísticas clássicas em que se apoiam os *softwares*, tais como as heurísticas das economias de Clarke e Wright, de varredura e outras do tipo agrupa-primeiro e roteiriza depois se baseiam em medidas de distâncias ou tempos de viagem e não consideram outras parcelas de custo. Nestes pacotes comerciais também não são considerados, por exemplo, na definição dos roteiros, o problema do arranjo da

carga em cada veículo. Em entregas (e coletas) cujas cargas apresentem dimensões muito diversas (grandes e pequenos pesos e/ou volumes), como as encontradas, por exemplo, em entregas de lojas de departamento e de supermercados (por exemplo, geladeiras ao lado de batedeiras portáteis), o arranjo das cargas dentro do veículo pode ser decisivo para a otimização da distribuição (CUNHA, 2000).

Além da questão do arranjo da carga, para este mesmo caso citado anteriormente, em que o carregamento do veículo apresenta dimensões e, conseqüentemente, pesos diversos, é fundamental, para redução dos custos de transporte, decidir onde será início do roteiro, pois, caso as entregas que possuem grande densidade estejam localizadas logo no início de um lado do roteiro, o veículo percorrerá uma distância maior, ou pelo menos igual, com um menor peso. Isto, evidentemente, impactará na redução dos custos.

Conforme Naruo (2003), redução do custo dos transportes e a melhoria do serviço ao cliente, através da busca dos melhores trajetos que um veículo deve fazer em uma rede viária, o qual minimizará o tempo ou a distância, é um problema frequente de decisão. Esta se expressa em uma variedade de formas, contudo as principais são a roteirização e a programação de veículo.

Baseado no exposto, pode-se constatar que o estudo para propor uma melhoria no método das economias de Clarke e Wright, que é comumente utilizado nos *softwares* comerciais de roteirização, apresenta-se como uma solução para uma possível redução nos custos de transporte das empresas que utilizam de sistemas de entrega e/ou coletas de carga.

#### **1.4. Estrutura do Trabalho**

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos. O primeiro capítulo introduz o trabalho, fazendo uma contextualização geral do estudo, da definição do problema, justificativa e os objetivos do mesmo.

No segundo capítulo é feita uma revisão teórica que norteia a pesquisa, fundamentada nos principais conceitos relacionados aos objetivos do trabalho.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia utilizada para execução do trabalho, a partir da descrição das características da pesquisa, bem como, a forma que a mesma foi delineada.

No quarto capítulo são expostos os resultados obtidos com o desenvolvimento deste trabalho, além das análises e implicações complementares a este.

Por fim, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões da pesquisa, além de recomendações para futuros trabalho na área.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são contemplados os principais conceitos que fundamentam ou se relacionam com o tema deste trabalho, entre estes, ressaltam-se a Logística Empresarial, Distribuição Física, Transporte e, por fim, a Roteirização de Veículos, na qual é dado maior enfoque.

### 2.1. Logística Empresarial

A conceituação da logística apresentou uma evolução contínua, sendo hoje considerada como um dos elementos chave na estratégia competitiva das empresas. No início era confundida com o transporte e a armazenagem de produtos, e hoje, é o ponto mais importante da cadeia produtiva integrada, procurando atuar de acordo como o moderno conceito de *Supply Chain Management* (SCM), ou Gerenciamento da Cadeia de Suprimento. Apesar desta evolução conceitual, a logística – baseando-se na definição do *Council of Logistics Management* – pode ser entendida como processo de planejar, implementar e controlar, de maneira eficiente, o fluxo e a armazenagem, bem como os serviços e informações associadas, cobrindo desde o ponto de origem até o ponto de consumo, com o objetivo de atender os requisitos do consumidor (NOVAES, 2004).

Para Ribeiro, Ruiz e Dexheimer (2001), a logística pode ser entendida como o planejamento, organização e controle de todas as operações de movimento e estoque, relativas ao fluxo de mercadorias, desde o ponto de aquisição de matéria-prima até o consumidor final, objetivando a máxima produtividade.

Conforme Novaes (2004) a moderna logística busca contemplar alguns fatores, nos quais podem ser destacados:

- Prazos previamente acertados e cumpridos integralmente, ao longo de toda cadeia de suprimento;
- Integração efetiva e sistêmica entre todos os setores da empresa;
- Integração efetiva e estreita (parcerias) com fornecedores e clientes;

- Busca da otimização global, envolvendo a racionalização dos processos e a redução de custos em toda a cadeia de suprimentos;
- Satisfação plena do cliente, mantendo um nível de serviço preestabelecido e adequado.

Outro conceito amplamente difundido na literatura se refere à logística empresarial, definida por Ballou (2006), como um conjunto de atividades funcionais, como transporte e controle de estoques, que se repetem inúmeras vezes ao longo do canal, de modo que matérias primas vão sendo convertidas em produtos acabados, aos quais se agrega valor ao consumidor. Ou seja, uma vez que as fontes de matérias primas, fábricas e pontos de venda não têm a mesma localização, e o canal representa uma sequência de etapas de produção, as atividades logísticas podem ser repetidas várias vezes até um produto chegar ao mercado.

A logística empresarial representa a integração da administração de materiais com a distribuição física. O primeiro está atrelado ao canal físico de suprimento e diz respeito à lacuna em tempo e espaço entre as fontes materiais imediatas de uma empresa e seus pontos de processamento, enquanto que o segundo relaciona-se com o canal físico de distribuição, se referindo a lacuna de tempo e espaço entre os pontos de processamento da empresa e seus clientes (BALLOU, 2006).

O objeto de estudo deste trabalho encontra-se atrelado ao processo de distribuição física, portanto no tópico subsequente será dado ênfase a este conceito, que contempla, entre outros aspectos, a questão dos transportes.

## **2.2. Distribuição Física**

Os especialistas em logística denominam de distribuição física de produtos, ou simplesmente distribuição física, os processos operacionais e de controle que permitem transferir os produtos desde o ponto de fabricação, até o ponto em que a mercadoria é finalmente entregue ao consumidor. Com isto, os responsáveis pela distribuição física operam elementos específicos, de natureza predominantemente material: depósitos, estoque, equipamentos de carga e descarga, entre outros (NOVAES, 2004).

Para Hesse e Rodrigue (2004) a distribuição física refere-se à gama de atividades envolvidas na movimentação de mercadorias do local de produção até os pontos finais de venda e consumo. Ainda segundo os autores, esta deve assegurar que as exigências de mobilidade das cadeias de suprimento sejam totalmente preenchidas, englobando assim todas as funções de circulação e manipulação de mercadorias, especialmente os serviços de transporte (rodoviário, ferroviário, aeroviário, aquaviário e dutoviário), o transbordo e serviços de armazenamento (como por exemplo, remessa, armazenamento e gestão de inventário), comercialização e vendas em atacado e varejo.

O objetivo geral da distribuição física, como meta ideal, é levar os produtos certos, para os lugares certos, no momento certo e com nível de serviço desejado pelo consumidor, pelo menor custo possível. Para atender a estes objetivos vários componentes, de caráter físico ou informacional, estão presentes no sistema de distribuição: instalações fixas (centros de distribuição, armazéns), estoque de produtos, veículos, informações diversas, *hardware* e *software* diversos, custos e pessoal (NOVAES, 2004).

Neste contexto, Ballou (2006) destaca que as principais atividades logísticas ligadas à distribuição física estão relacionadas à manutenção de estoque, processamento de pedidos, programação de produtos, embalagem preventiva, armazenamento, controle de materiais, manutenção de informações e transporte.

A atividade de transporte, a qual será discutida na sequência, apresenta-se como um das mais importantes dentro do contexto da distribuição física, e mais especificamente para este trabalho, representa o 'conceito chave' na abordagem da roteirização e programação dos veículos.

### **2.3. Transportes**

O transporte é uma área fundamental de decisões deste *mix* logístico. Com exceção dos produtos adquiridos, esta atividade é a que absorve a maior percentagem dos custos logísticos totais, normalmente entre um e dois terços. Embora as decisões sobre transporte se manifestem automaticamente em uma variedade de formatos, as principais são a seleção do modal, a roteirização dos

embarques, a programação dos veículos e a consolidação dos fretes (BALLOU, 2006).

Para Nogueira e Estrela (2006) esta atividade de distribuição não agrega melhoria ou valor aos produtos, e como efeito, é considerada uma despesa, absorvendo grande parte das receitas de vendas das empresas. Neste sentido, a estruturação de como o produto é transportado pode agregar valor ao mesmo, visto que a mercadoria não deve chegar ao consumidor final com alterações de qualidade ou atrasos na entrega.

Na concepção de Novaes (2004), o processo de distribuição de produtos, desempenhada pela atividade de transporte, ocorre, na prática, em diversas situações, contudo estas podem ser resumidas em duas configurações básicas:

- Distribuição “um para um” em que o veículo é totalmente carregado no depósito da fábrica ou num centro de distribuição (CD) do varejista e transporta a carga para um outro ponto de destino, podendo ser outro CD, uma loja, ou outra instalação;
- Distribuição “um para muitos”, ou compartilhada, em que o veículo é carregado no CD do varejista com mercadorias destinadas a diversas lojas ou clientes, e executando um roteiro de entregas predeterminado.

Para Ballou (2006), nesta situação de servir a pontos múltiplos de destino, sempre deverá haver o problema de combinar os destinos com as fontes, de modo a encontrar a melhor rota entre os mesmos. A roteirização de veículos, a qual será explorada no próximo tópico, apresenta-se como um mecanismo de otimização na distribuição de produtos, do ponto de fabricação (ou distribuição) ao ponto de consumo. Conforme Laporte (1992), a roteirização de veículos desempenha um papel central no âmbito da distribuição física e da logística.

## **2.4. Roteirização de Veículos**

Sistemas de distribuição física têm, como um de seus componentes, a roteirização de veículos de entrega, que consiste em obter rotas que minimizem custos de distribuição de uma frota de veículos operando a partir de um ou mais depósitos centrais, observadas as restrições relevantes à operação de entrega

específica. Este problema aparece, por exemplo, na distribuição de mercadorias e serviços a partir de depósitos centrais, na coleta de correspondência pelos Correios, na coleta e entrega de crianças por ônibus escolares, na roteirização de helicópteros na indústria do petróleo e na roteirização de manutenção preventiva em fábricas (GALVÃO ET AL., 1997).

O Problema de Roteirização de Veículo, ou *Vehicle Routing Problem* (VRP), pode ser descrito como o problema do planejamento ótimo de entregas ou rotas de coleta de um ou vários depósitos, para uma série de cidades ou clientes, geograficamente dispersos, sujeitos a restrições adicionais (LAPORTE, 1992).

Para Wu (2007) a roteirização de veículos pode ser definida como o atendimento de nós de demanda, localizados em pontos diferentes no espaço, sendo que, para cada ligação entre um par de nós, há distâncias e custos associados. Com o intuito de atendê-los, utiliza-se uma frota de veículos disponíveis que partem e retornam a um depósito central. Ainda segundo a autora, o objetivo é determinar o conjunto de rotas de menor custo que atenda as necessidades dos nós, respeitando restrições operacionais.

O problema de roteirização de veículos foi introduzido pela primeira vez por Dantzig e Ramser em 1959, e desde então tem sido amplamente estudado. Este é um problema de otimização combinatória, que busca encontrar o uso eficiente de uma frota de veículos, pelo qual devem fazer um número de paradas para distribuir ou coletar produtos ou passageiros. Cada cliente deve ser atribuído a exatamente um veículo, em uma ordem específica, de modo que sejam respeitados a capacidade do veículo e que o custo total seja minimizado (BJARNADÓTTIR, 2004).

O termo *roteirização* de veículos, embora não encontrado nos dicionários de língua portuguesa, é a forma que vem sendo utilizada como equivalente ao inglês *routing* (ou *routeing*) para designar o processo para a determinação de um ou mais roteiros ou sequências de paradas a serem cumpridos por veículos de uma frota, objetivando visitar um conjunto de pontos geograficamente dispersos, em locais pré-determinados, que necessitam de atendimento. Quando a definição dos roteiros, envolve não só aspectos espaciais ou geográficos, mas também temporais, tais como restrições de horários de atendimento nos pontos a serem visitados, os problemas são então denominados roteirização e programação de veículos (CUNHA, 2000).

Um problema real de roteirização é definido por três fatores fundamentais: decisões, objetivos e restrições. As decisões dizem respeito à alocação de um grupo de clientes, que devem ser visitados, a um conjunto de veículos e respectivos motoristas, envolvendo também a programação e o sequenciamento das visitas. Como objetivos principais, o processo de roteirização visa propiciar um serviço de alto nível aos clientes, mas ao mesmo tempo mantendo os custos operacionais e de capital tão baixos quanto possível. Por outro lado, deve obedecer a certas restrições. Em primeiro lugar, deve completar as rotas com os recursos disponíveis, mas cumprindo totalmente os compromissos assumidos com os clientes. Em segundo lugar, deve respeitar os limites de tempo impostos pela jornada de trabalho dos motoristas e ajudantes. Finalmente, devem ser respeitadas as restrições de trânsito, no que se refere a velocidades máximas, horários de carga e descarga, tamanho máximo dos veículos nas vias públicas, entre outros (NOVAES, 2004).

Ribeiro, Ruiz e Dexheimer (2001) apresentam as seguintes restrições para os problemas de roteirização:

- Restrições de unicidade: cada cliente só pode ser servido por um e somente um veículo;
- Restrições de frota: cada veículo tem uma capacidade conhecida de carga, além disto o número de veículos que compõe a frota pode ser conhecido a priori, tendo-se neste caso que impor a condição adicional de que o número de rotas a ser gerado não pode ultrapassar o número de veículos disponíveis;
- Restrições de precedência: determinados clientes não podem ser visitados antes que outros o sejam (situação comum onde há entrega e coleta simultânea de mercadorias);
- Restrições temporais: cada veículo só pode operar durante intervalos de tempo de duração limitada, ou cada cliente só opera, para recebimento ou entrega de mercadoria, durante uma faixa limitada de tempo.

Diante do exposto, pode-se afirmar que uma boa roteirização envolve a alocação ótima de um grupo de clientes em roteiros, que respeitem, essencialmente, as diversas restrições do problema e o objetivo da roteirização. No entanto, conforme Ballou (2006), o processo para atingir uma boa roteirização e programação de veículos está relacionado à aplicação de oito princípios, que abrangem questões como a combinação de paradas em dias diferentes, roteiros iniciados a partir da

parada mais distante, combinação da rota de coleta com a de entrega, entre outras. A fim de enfatizar os princípios que relacionam-se diretamente com o enfoque da pesquisa, a seguir serão destacados três deles:

1. **Carregar caminhões com volumes destinados a paradas que estejam mais próximas entre si.** Os roteiros dos caminhões devem ser organizados em torno de agrupamentos de paradas próximas uma das outras a fim de minimizar o tráfego entre elas, assim como é mostrado na Figura 1.

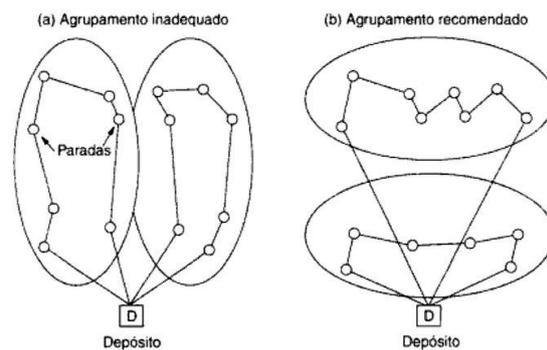


Figura 1 – Agrupamentos inadequado (a) e adequado (b) de pontos.

Fonte: Ballou (2006).

2. **O sequenciamento das paradas num roteiro de caminhões deve ter forma de lágrima:** As paradas devem ser sequenciadas de maneira a não ocorrer nenhuma superposição entre elas com o roteiro assumindo a forma de lágrima.
3. **Os roteiros mais eficientes são aqueles que fazem uso dos maiores veículos disponíveis:** Em um roteiro ideal, a utilização de um veículo com capacidade suficiente para abastecer todas as paradas de um roteiro, minimizaria sempre a distância ou o tempo total percorrido para servir a todas as paradas.

Os problemas de roteirização apresentam algumas características (Quadro 1), que conforme Naruo (2003), são apresentadas de acordo com critérios e descrições que podem ser usadas para modelar os problemas reais.

**Quadro 1 – Características dos problemas de roteirização e programação.**

<b>Características</b>	<b>Possibilidades</b>
1. Tamanho da frota disponível	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Um veículo</li><li>▪ Vários veículos</li></ul>
2. Tipo de frota disponível	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Homogênea (somente um tipo de veículo)</li><li>▪ Heterogênea (vários tipos de veículo)</li><li>▪ Veículos especiais (dividido em compartimentos)</li></ul>
3. Garagem dos veículos	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Um único depósito</li><li>▪ Vários depósitos</li></ul>
4. Natureza da demanda	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Determinística</li><li>▪ Probabilística</li><li>▪ Parcialmente satisfeita</li></ul>
5. Localização da demanda	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Nos nós (não necessariamente em todos)</li><li>▪ Nos arcos (não necessariamente em todos)</li><li>▪ Misto</li></ul>
6. Característica da rede	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Não orientada</li><li>▪ Orientada</li><li>▪ Mista</li><li>▪ Euclidiana</li></ul>
7. Restrições de capacidade do veículo	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Impostas (veículos com mesma capacidade)</li><li>▪ Impostas (veículos com diferentes capacidades)</li><li>▪ Não impostas (capacidade ilimitada)</li></ul>
8. Tempo máximo de rotas	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Impostas (rotas com mesmo tempo máx)</li><li>▪ Impostas (rotas com diferentes tempos máx)</li><li>▪ Não impostas (capacidade ilimitada)</li></ul>
9. Operações envolvidas	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Somente coletas</li><li>▪ Somente entregas</li><li>▪ Mistas</li></ul>
10. Custos	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Variáveis ou custos de roteirização</li><li>▪ Fixos de operação ou custos de aquisição dos veículos</li><li>▪ Custos comuns de transporte</li></ul>
11. Objetivos	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Minimizar os custos totais de roteirização</li><li>▪ Minimizar a soma dos custos fixos e variáveis</li><li>▪ Minimizar o número necessário de veículos</li><li>▪ Maximizar a função utilizada pelo cliente</li></ul>

**Fonte:** Naruo (2003).

Para Novaes (2004), os problemas de roteirização ocorrem com bastante frequência na distribuição de produtos e serviços, assim como pode ser visto nos exemplos:

- Entrega, em domicílio, de produtos comprados nas lojas de varejo ou pela internet; Distribuição de bebidas em bares e restaurantes;
- Distribuição de dinheiro para caixas eletrônicos de bancos;
- Distribuição de combustíveis para postos de gasolina;
- Coleta de lixo urbano;
- Entrega domiciliar de correspondência;

- Distribuição de produtos dos Centros de Distribuição (CD) de atacadistas para lojas do varejo.

Para Naruo (2003), todos os sistemas de roteirização e programação têm, essencialmente, a mesma saída: para cada veículo ou tripulante, uma rota e um programa é providenciado. Em linhas gerais, a rota especifica a sequencia de locais a serem visitados, e o programa identifica os tempos nos quais as atividades nestes locais são realizadas.

#### **2.4.1. Classificação dos Problemas de Roteirização e Programação de Veículos (PRPV)**

Conforme Cunha (2000), na literatura existem diversas propostas que buscam caracterizar os variados tipos de problemas. Algumas destas abordagens serão descritas no presente tópico.

Um dos primeiros trabalhos na literatura que abordam esta questão é o de Bodin et al. (1983), que já é tomado como referência por diversos autores, entre eles Cunha (2000), Naruo (2003), Neto e Lima (2005). Para os autores os problemas de roteirização podem ser classificados em três grupos principais:

- Problemas de roteirização “pura” de veículos ou PRV;
- Problemas de programação de veículos e tripulações (PRVT);
- Problemas combinados de roteirização e programação de veículos.

O problema de roteirização pura de veículos, segundo Neto e Lima (2005), pode ser considerado, basicamente, como um problema espacial, onde as condicionantes temporais não são consideradas na geração dos roteiros para coleta ou entrega, e apenas em alguns casos, a restrição de percurso máximo da rota pode ser considerada. Nesse tipo de problema, ainda segundo os autores, existe um conjunto de nós ou arcos que devem ser atendidos por uma frota de veículos, onde o objetivo é definir uma sequência de locais (a rota) que cada veículo deve seguir a fim de se atingir a minimização do custo de transporte.

Naruo (2003) aborda em seu trabalho os casos clássicos dos problemas de roteirização pura, que estão descritos no Quadro 2.

**Quadro 2 – Os problemas básicos de roteirização pura.**

<b>Problema</b>	<b>Descrição</b>
Caixeiro Viajante (PCV)	Consiste em determinar uma rota de mínimo custo que passe por todos os nós de uma rede, exatamente uma vez.
Carteiro Chinês	Este caso requer a determinação de uma rota e custo mínimo que passe por todos os arcos de uma rede, pelo menos uma vez. É problema de cobertura de arcos.
Múltiplos Caixeiros Viajantes	É uma generalização do problema do caixeiro viajante na qual é necessário se considerar mais de um caixeiro viajante (ou veículos). Não há novas restrições e os M veículos originam e terminam suas rotas de um depósito comum.
Roteirização em nós: único depósito, vários veículos	Conhecido como problema clássico de roteirização de veículo ou, apenas, PRV. É outra generalização do problema do caixeiro viajante onde a frota de veículos parte de um depósito centra e serve a todos os nós, objetivando-se por minimizar a distância percorrida.
Roteirização em nós: vários depósitos, vários veículos	É uma generalização do problema anterior, com vários depósitos, ao invés de um. Cada veículo é alocado a um único depósito.
Roteirização em nós: vários depósitos, vários veículos	É idêntico ao PRV, exceto que a demanda não é conhecida com certeza.
Carteiro Chinês Capacitado	É uma generalização do problema do Carteiro Chinês, acrescido da restrição de capacidade dos veículos.

**Fonte:** Adaptado de Naruo (2003).

Os problemas de programação de veículos e de tripulações, conforme Neto e Lima (2005), podem ser considerados como problemas de roteirização com restrições adicionais relacionadas aos horários em que várias atividades devem ser executadas. Estes problemas caracterizam-se por já terem os aspectos espaciais definidos, como roteiros ou sequências de viagens a serem realizadas, faltando apenas determinar a alocação de veículos e tripulações a este conjunto de viagens programadas (CUNHA, 2000).

O PRVT ainda pode ser classificado em dois grupos: (1) programação de veículos e (2) programação de tripulações. Conforme Naruo (2003), a criação da sequência para as atividades dos veículos no espaço e no tempo é o preceito básico da programação de veículos. Enquanto na programação de tripulação a preocupação principal é criar a sequência para o movimento da tripulação no espaço e no tempo, ou seja, promover aos ocupantes do veículo a movimentação desejada pelos mesmos.

Ainda segundo o autor, no que se refere aos problemas de programação de veículos, existem algumas restrições que determinam a complexidade dos mesmos no mundo real, onde entre elas estão: limite de tempo que um veículo pode estar em

serviço antes de retornar ao depósito para reabastecimento ou manutenção; certas tarefas que podem ser realizadas apenas por tipos específicos de veículos; a presença de diferentes depósitos dos veículos. Baseados nestas restrições o autor cita alguns exemplos característicos deste problema (Quadro 3).

**Quadro 3 – Os problemas básicos de programação de veículos.**

<b>Problema</b>	<b>Descrição</b>
Um único depósito	Consiste no particionamento dos nós (tarefas) de uma rede acíclica em um conjunto de rotas, de maneira que uma determinada função custo seja minimizada. Cada rota corresponde à programação de um veículo. Uma função objetivo que minimiza o número de rotas, efetivamente minimiza os custos de capital desde que o número de veículos necessários seja igual ao de rotas.
Restrições de tamanho de rota	Estes problemas consistem nas considerações de restrições de tempo e distância máxima de viagem, que na prática, representam a necessidade de reabastecimento e manutenção de veículos.
Múltiplos tipos de veículos	Consideram as diferentes características dos veículos para realizarem as tarefas. Normalmente a característica considerada é a capacidade do veículo.
Múltiplos depósitos	Consiste em problemas com veículos que realizam tarefas a partir de diferentes depósitos. Os veículos devem sair de e chegar ao mesmo depósito e para o tamanho da frota de cada depósito deve se especificar um mínimo e o máximo.

**Fonte:** Naruo (2003).

Para os autores Neto e Lima (2005), o problema de programação de tripulação é bem similar a de veículos, contudo envolvem restrições mais complexas, como horários de parada para almoço, regulamentação trabalhista, entre outros. Alguns exemplos deste tipo de problema podem ser vistos no Quadro 4.

**Quadro 4 – Os problemas básicos de programação e tripulação.**

<b>Problema</b>	<b>Descrição</b>
Programação de pessoal para um local fixo	Neste problema divide o dia de trabalho em $T$ períodos e especifica-se uma demanda para cada trabalhador para cada período de tempo. Procura-se encontrar um conjunto de programas com trabalhadores para cobrir todas as tarefas. É assumido que pode haver intercâmbio entre os trabalhadores, e que cada trabalhador pode ser desalocado no final de um período de trabalho e que outro pode ser alocado ao serviço em cada começo de um período.
Programação de veículos e tripulação em transporte público	Consiste em determinar a alocação ótima de veículos a um conjunto de viagens programadas de linhas, e determinar também as jornadas de trabalho das tripulações, considerando que as trocas de serviço e de turno só podem ser realizadas em pontos específicos de trajeto das linhas.
Programação de tripulação no transporte aéreo	É semelhante à programação de tripulações em veículos, uma vez que as tabelas de horários de partida e chegada das rotas aéreas nos diversos pontos são definidas a priori e, portanto, conhecidas e determinadas.
Programação de pessoal em turnos de revezamento	Consiste na programação diária variando de um dia para o outro, havendo um rodízio de turno de pessoal, em função de restrições trabalhistas, e equilíbrio do esforço de trabalho, etc.

**Fonte:** Naruo (2003).

Com relação aos problemas combinados de roteirização e programação, ou simplesmente problemas de roteirização e programação, pode-se dizer que o mesmo ocorre, na maioria dos casos, em situações que englobam restrições de janelas de tempo (horário de atendimento) e de precedência entre tarefas, onde a coleta deve preceder a entrega e ambas devem estar alocadas ao mesmo veículo (CUNHA, 2000). Para Diniz, citado por Naruo (2003), esses problemas combinados frequentemente surgem na prática e são representativos de muitas aplicações do mundo real. Os principais problemas combinados estão descritos no Quadro 5.

**Quadro 5 – Os problemas básicos de roteirização e programação.**

<b>Problema</b>	<b>Descrição</b>
Ônibus escolares	Consiste no problema de um grupo de escolas, cada qual com seu conjunto de paradas de ônibus que tem vinculado, para cada ponto, um dado número de estudantes e uma janela de tempo correspondente aos horários para pegar os alunos nas paradas e leva-los até a escola. O principal objetivo é minimizar os custos de transporte para o município.
Caminhões: Cavalo mecânico – carreta com carga completa	O termo carga completa significa que a carga é engatada ao cavalo mecânico e é transportado direto da origem ao destino. A carga na carreta tem um único destino. A capacidade do cavalo mecânico corresponde a apenas uma carreta. Este problema envolve restrições de precedência.
Caminhões: Cavalo mecânico – carreta com carga parcial	Semelhante ao anterior, mas a carga não precisa ser completa. Assim, a carga da carreta pode ser separada entre diferentes origens e destinos.
Serviços de coleta de resíduos domiciliares e de varrição de ruas	Semelhante ao problema do carteiro chinês, porém com restrições de capacidade dos veículos, de duração máxima da jornada e de janelas de tempo associadas aos horários de proibição de estacionamento, de forma a possibilitar a execução do serviço de varrição. Em geral, o objetivo consiste na minimização da frota ou um objetivo correlato, por exemplo, de minimização do tempo morto total, para uma frota conhecida.
<i>Dial-a-ride</i> : transporte especial de pessoas	Sistema o transporte é obtido pedindo por telefone. Cada usuário tem local de origem e destino diferentes e, eventualmente horário e faixas horárias de saída e chegada. A precedência entre as tarefas é uma restrição decisiva para a viabilidade da solução.
Aeronaves	Consiste em programar simultaneamente rotas aéreas (início – escalas – fim), com alocação de aeronaves e definição de tabelas de horários, levando em consideração dados de demanda entre os pares de cidades, frequência do serviço desejado, vôos diretos vs com escalas, etc. Esse problema envolve tanto o transporte de pessoas, como cargas e encomendas.

**Fonte:** Naruo (2003).

Outro tipo de classificação dos problemas de roteirização e programação de veículos, proposta por Ronen (1988), e citado por Cunha (2000), baseou-se nos ambientes operacionais e nos objetivos a serem atingidos:

- Problemas relativos ao transporte de passageiros: programação de linhas de ônibus; de sistemas de táxi; de sistemas de transporte de pessoas, ou *dial a ride*; de transporte escolar utilizando ônibus, entre outros;
- Problemas de prestação de serviços: roteirização e programação de equipes de reparos ou de serviços públicos, como o de coleta de lixo e entrega postal;
- Problemas relativos ao transporte de carga (coleta e distribuição).

Uma última classificação encontrada na literatura, esta descrita por Novaes (2004), divide os problemas de roteirização em: problemas sem restrições e outros com restrições. O primeiro caso, conforme o próprio autor, ocorre quando a separação dos clientes, pelos diversos roteiros, já foi realizada previamente e, conseqüentemente, as restrições de tempo e capacidade estão resolvidas. Deste modo, o problema que resta a ser resolvido é o de encontrar a sequência de visitas que torne mínimo o percurso dentro de uma zona de pontos a serem atendidos, ou como é chamado, dentro do bolsão de distribuição. Para o autor, a roteirização sem restrição recebe o nome, na literatura, do já referido PCV.

Ainda segundo o autor, os problemas de roteirização com restrições estão condicionados aos limites de tempo ou de capacidade do veículo, onde muitas vezes é preciso roteirizá-los sem que haja uma prévia divisão da região em bolsões. Na literatura, ainda segundo o autor, são descritos diversos métodos para resolver este tipo de problema, muitos deles envolvendo modelos matemáticos razoavelmente complexos. No tópico seguinte serão expostos alguns destes métodos de solução.

#### **2.4.2. Classificação dos Métodos de Solução para os PRPV**

Nas últimas décadas, conforme Enumoto (2005), a pesquisa por métodos de soluções de rotas e de programação de veículos vem crescendo, já que são técnicas fundamentais para empresas que necessitam consolidar cargas para entrega ou coleta, minimizando assim os custos de distribuição das mesmas. Na literatura, segundo Naruo (2003), encontra-se diversas estratégias e métodos de solução para esta categoria de problema. Este mesmo autor cita Bodin e Golden (1981), que classificam as estratégias de solução para os problemas de roteirização e programação em sete categorias (Quadro 6).

**Quadro 6** – Estratégias de solução para os problemas de roteirização e programação.

<b>Estratégia</b>	<b>Descrição</b>
Agrupa primeiro – roteiriza depois	Procedimento que agrupa a demanda dos nós ou arcos primeiro e então desenvolvem rotas econômicas sobre cada agrupamento como segundo passo.
Roteiriza primeiro – agrupa depois	Primeiro uma grande rota, geralmente ineficiente, é criada, na qual incluem-se todas as entidades de demanda nos nós ou arcos. Depois, a grande rota é dividida em rotas menores, mas factíveis.
Economias ou inserções	Procedimentos que constroem uma solução de tal maneira a que cada passo do procedimento uma configuração corrente é comparada com outra configuração alternativa. Esta última é aquela que produz a maior economia em termos de algum critério. O processo é concluído com uma configuração factível.
Melhoria/troca	Procedimento heurístico que, em cada etapa, uma solução factível é alterada, resultando em outra solução com custo total reduzido. Este procedimento continua até que não sejam mais possíveis reduções adicionais de custo.
Programação	Esta abordagem requer algoritmos que sejam diretamente baseadas em formulações matemáticas do problema em questão.
Otimização interativa	Este procedimento tem propósito geral na qual um alto grau de interação humana é incorporado no processo de solução do problema. A ideia é fixar parâmetros no modelo baseando-se na experiência do tomador de decisões.
Métodos exatos	Procedimentos para problemas de roteirização de veículos que incluem técnicas especializadas de <i>branch and bound</i> , programação inteira mista e programação linear inteira.

**Fonte:** Naruo (2003).

Outra forma de classificação é apresentada por Cunha (1997), citado por Enumoto (2003), o qual divide os métodos de solução em:

- **Métodos exatos** – São aqueles que possibilitam a obtenção da solução ótima. Estes possuem uma classificação de algoritmos em termos de complexidade polinomial. Os algoritmos polinomiais são aqueles em que o número de operações necessárias para obtenção da solução ótima de um dado problema é limitado. Alguns autores consideram que os algoritmos exatos são usados apenas em soluções de problemas de pequeno porte, enquanto para problemas de maior porte, são normalmente utilizados métodos heurísticos ou combinação dos dois métodos.
- **Métodos heurísticos** – Geram soluções aproximadas, ou sub ótimas, porém chegam à solução de modo mais rápido, exigindo assim, um menor esforço computacional. Adotam regras empíricas de agrupamento ou técnicas baseadas em “economias”, acrescentando ou excluindo paradas.

- Métodos emergentes ou meta heurísticas – Agregam técnicas mais recentes e avançadas, não tradicionais, baseadas em sistemas especialistas, métodos de busca avançada (*tabu search*) ou procedimentos iterativos. Mesmo assim, cabe ressaltar que as estratégias e técnicas deste método são procedimentos heurísticos, não garantindo a obtenção de solução ótima.

Há algum tempo vem ocorrendo um esforço muito grande no desenvolvimento das chamadas meta heurísticas. Na verdade a ideia deste método é explorar, de maneira inteligente, o processo de escolha de soluções, buscando aquelas com maior chance de sucesso. Contudo, cabe ressaltar que mesmo que as soluções obtidas, através da meta heurística, tenham maior qualidade do que as heurísticas convencionais, o esforço e o tempo computacional ainda são grandes. Além disto, como a meta heurística depende muito dos parâmetros característicos de cada problema, se torna inviável sua utilização em *softwares* comerciais (CUNHA, 2000).

Ainda segundo o autor, o principal motivo pelo qual existe esta busca pelo desenvolvimento da meta heurísticas é que a maioria dos *softwares* de solução dos problemas de roteirização, ou os algoritmos embutidos neles, se propõe apenas a otimizar os roteiros, e na prática, acabam por não englobar todas as parcelas de custos de operação, que vão desde custo com a distância percorrida (custo variável), até custos com horários da tripulação (fixo). Isto ocorre porque a maioria dos algoritmos que os *softwares* se apoiam, como a heurística das economias (Clarke e Wright, 1964), da varredura (Wren e Holiday, 1972; Gillet e Miller, 1974) e outras do tipo agrupa primeiro e roteiriza depois (Fisher e Jaikumar, 1981), se baseia em medidas de distância ou tempos de viagem, não considerando outras parcelas de custo.

Contudo, mesmo com tais limitações, são comumente encontrados, na literatura, diversos trabalhos que buscam estudar algum tipo de melhoria para estes métodos heurísticos, com o intuito de agregar novas restrições, sem demandar um esforço computacional tão grande. Portanto nos próximos tópicos serão abordados com mais detalhes alguns dos mais difundidos métodos de roteirização, em especial, a heurística de Clarke e Wright, e em seguida, serão apresentados alguns trabalhos encontrados na literatura que buscaram desenvolver algum tipo de melhoria nos métodos de roteirização.

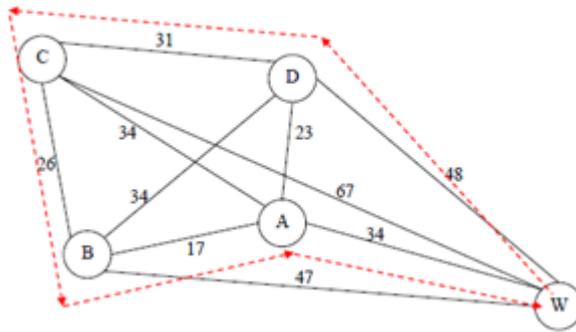
### 2.4.3. Métodos Heurísticos para os PRPV

Para Cordeau e Laporte (2002) os métodos heurísticos podem ser agrupados em, basicamente, três categorias: (1) heurísticas construtivas (por exemplo, Clarke e Wright, 1964) que buscam gradualmente construir uma solução viável, tentando manter o custo desta solução o mais baixo possível; (2) heurística de duas fases, onde os clientes são primeiramente agrupados em rotas viáveis, e só então as rotas reais são construídas (por exemplo, método da varredura, Gillet e Miller, 1974); (3) e, por fim, os métodos de melhoria, que podem atuar em rotas únicas, pela aplicação da heurística do PCV, ou em várias rotas, através da realização de trocas ou realocações de clientes.

#### 2.4.3.1. Problema do Caixeiro Viajante

O problema do caixeiro viajante (ou *traveling salesman problem*), segundo Cunha (2000), foi o primeiro problema de roteirização estudado, o qual tinha por objetivo definir um trajeto de cidades a serem visitadas por um caixeiro viajante, de modo que a distância total percorrida seja minimizada, e que todas as cidades sejam visitadas exatamente uma vez.

Para Enumoto (2005), este problema consiste em determinar uma rota de mínimo custo que passe por todos os nós, uma única vez, sem considerar restrições de tempo nem limitações de capacidade. Ainda segundo o autor sua formulação original é dada da seguinte forma: existem  $N$  pontos (nós) numa rede, onde o caixeiro viajante deve partir de um ponto inicial (depósito ou base), e visitar pelo menos uma vez os outros  $N - 1$  pontos, voltando no final da viagem para o ponto inicial, como mostra a Figura 2.



**Figura 2** – Exemplo do Problema do Caixeiro Viajante  
**Fonte:** Enumoto (2005)

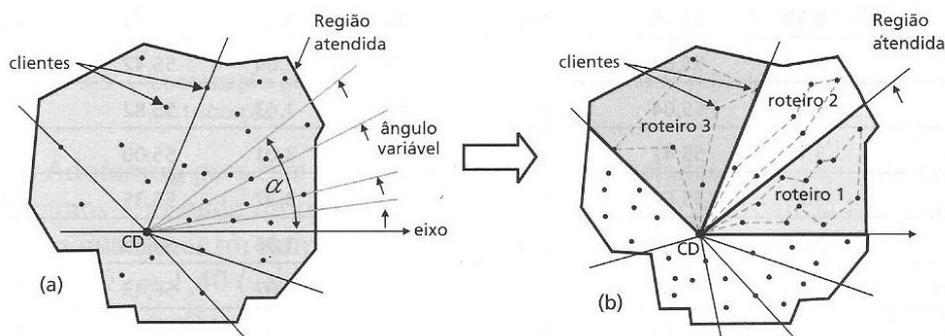
Para Botelho (2003), se o custo para se deslocar de um nó qualquer “i” para outro nó qualquer “j” for igual ao custo de ir do nó “j” para o nó “i”, o problema será denominado de simétrico. Caso contrário, o problema será assimétrico. Neste tipo de problema, as demandas estão nos nós e os custos estão nas movimentações de um nó origem até um nó destino.

#### **2.4.3.2. Método da Varredura (*Sweep Algorithm*)**

O método da varredura, também conhecida como *sweep algorithm* ou até pela heurística de Gillet e Miller (1974), é uma estratégia onde se procura obter a solução do problema em duas etapas distintas. A primeira visa agrupar os pontos de demanda segundo algum critério de proximidade, enquanto na segunda etapa cada grupo é solucionado independentemente (LUIZELLI E GARCIA, 2010).

Conforme Novaes (2004) este método consiste na seguinte sequência de procedimentos: Inicialmente, tomado o depósito como centro, deve-se definir um eixo passando pelo mesmo (geralmente este coincide com a linha horizontal ou o eixo das abscissas), assim como é visto na Figura 3-a. Posteriormente deve-se girar o eixo em torno do CD no sentido anti-horário até que a linha inclua um cliente (Figura 3-b). Para cada cliente pelo qual a linha passa deve ser realizado um teste para verificar se este pode ser incluído no roteiro em formação (o teste avalia as restrições de tempo de atendimento e da quantidade de mercadoria transportada). Caso este novo cliente não possa ser incluído no roteiro em formação é sinal que as possibilidades deste roteiro se esgotaram e, neste caso, uma nova rota é iniciada. Ao fim do processo, para cada roteiro encontrado, pode ser aplicado um método de

melhoria de roteiro, que visa aperfeiçoar o resultado obtido através de uma sistemática predefinida. As técnicas de melhoria mais utilizadas são a do *2-opt* e *3-opt*.



**Figura 3 – Método da varredura e sua evolução.**  
**Fonte:** Novaes (2004).

Para Ballou (2006) este método é recomendável, pela sua facilidade de resolução, quando há uma necessidade de elaborar padrões de roteiros no prazo máximo de uma hora após o recebimento dos dados definitivos sobre as paradas a serem feitas e seus respectivos volumes. Ainda conforme o autor, para uma variedade de problemas seu índice de erro projetado é cerca de 10%.

### **2.4.3.3. Método de Clarke e Wright (CW)**

Este clássico algoritmo foi proposto pela primeira vez em 1964 por Clarke e Wright para resolver o PRV em que o número de veículos é livre. O método inicia como a rota do veículo contendo apenas o depósito e outro vértice, de modo que em cada etapa, duas rotas são mescladas de acordo com o maior ganho que pode ser gerado (LAPORTE, 1992).

Este método, baseado na abordagem das economias, tem atravessado os anos como algo dotado de flexibilidade suficiente para resolver uma ampla coleção de restrições práticas, sendo relativamente rápido, em termos computacionais, para problemas com um número moderado de paradas, e capaz de gerar soluções que são quase ótimas (BALLOU, 2006).

Ainda segundo o autor o objetivo do método das economias é minimizar a distância total percorrida por todos os veículos e indiretamente minimizar o número de veículos necessários para servir a todas as paradas. Conforme Novaes (2004), à

medida que o método vai construindo os roteiros de forma inteligente, buscando reduzir ao máximo a distância percorrida, o número de veículos utilizados para realizar o serviço tende a diminuir, o que acaba por reduzir os investimentos e o custo de operação.

Para este mesmo autor, o método tem sido muito utilizado, e com grande sucesso, na resolução de problemas isolados, como também aparece embutido dentro de muitos *softwares* de roteirização. Segundo Rego (2008) o *software Transcad* utiliza a heurística de Clarke e Wright para atingir a sua rota “ótima”. A fim de expandir os conceitos do referido método, será apresentada, a seguir uma breve revisão deste algoritmo.

#### **2.4.4. Algoritmo do Método de CW**

Para facilitar a compreensão da descrição deste algoritmo, optou-se por adotar como base o autor Novaes (2004), que descreve de maneira simplificada o processo de resolução deste método.

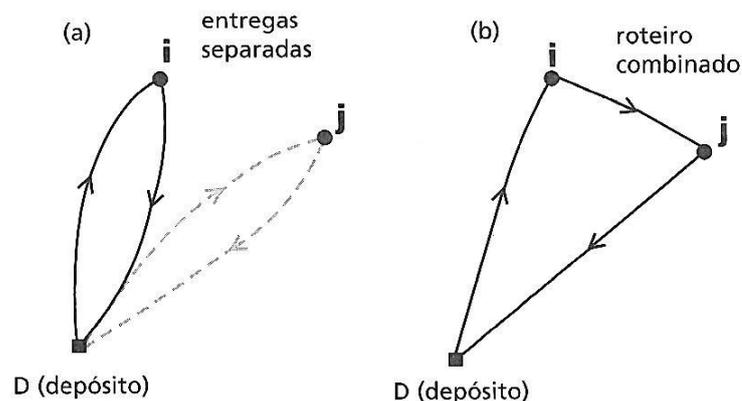
Inicialmente é importante salientar que o método de Clarke e Wright se baseia no conceito de ganho, em que este representa uma economia na distância percorrida em duas situações hipotéticas. A primeira delas representa a pior situação, em que um veículo sai do CD somente com a mercadoria destinada a um único cliente e, após fazer a entrega, o veículo volta ao depósito. Neste caso, supõe-se que um cliente  $j$  seja atendido logo após a um primeiro cliente  $i$ , e conseqüentemente, o veículo faria as duas viagens na sequência mostrada (Figura 4-a). Esta configuração, inevitavelmente, vai levar a um número excessivo de veículos e a uma quilometragem elevada para a frota.

Nesta primeira situação, sendo  $d_{D,i}$  e  $d_{D,j}$  as distâncias entre o CD e os clientes  $i$  e  $j$ , o veículo faria um percurso para atendê-los igual a:

$$L = 2 \times d_{D,i} + 2 \times d_{D,j} \quad (1)$$

A segunda situação representa uma possibilidade de melhoria desse esquema, onde os dois clientes  $i$  e  $j$  seriam juntados em um mesmo roteiro. Neste caso o veículo faria um percurso (Figura 4-b) igual a:

$$L' = d_{D,i} + d_{i,j} + d_{D,j} \quad (2)$$



**Figura 4** – Ilustração do conceito de ganho com a integração de dois clientes em roteiro compartilhado.

Fonte: Novaes (2004).

Ao integrar os clientes  $i$  e  $j$  num único roteiro, existirá uma economia, de percurso (ganho) igual à diferença entre  $L$  e  $L'$ , dado por:

$$g_{i,j} = d_{D,i} + d_{D,j} - d_{i,j} \quad (3)$$

Pode-se constatar que este ganho tende a crescer quando os pontos  $i$  e/ou  $j$  se afastam do CD, pois as parcelas  $d_{D,i}$  e  $d_{D,j}$  têm valores positivos. Assim como, o ganho tende a crescer quando os pontos  $i$  e  $j$ , estão mais próximos, pois então a parcela  $d_{i,j}$ , que aparece com sinal negativo na relação da equação (3), tem valor absoluto menor.

Feita as devidas considerações, pode-se então destacar as etapas do método Clarke e Wright:

Etapa 1: Combinam-se todos os pontos, que representam os clientes, dois a dois e calcula-se o ganho para cada combinação através da relação (3).

Etapa 2: Ordenam-se todas as combinações  $i, j$ , de forma decrescente, segundo os valores dos ganhos  $g_{i,j}$ .

Etapa 3: Inicia-se a análise com a combinação dos dois nós que apresentaram o maior ganho, e posteriormente, a análise continua, decrescendo na lista de ganhos, para os demais pares de pontos.

Etapa 4: Para um par de pontos  $(i, j)$ , retirado da sequência de combinações, verificar se os dois pontos já fazem parte de um roteiro iniciado:

- Se  $i, j$  não foram incluídos em nenhum dos roteiros já iniciados, criar então uma nova rota com esses dois pontos;
- Se o ponto  $i$  já pertence a um roteiro iniciado, verificar se esse ponto é o primeiro ou último desses roteiros (não levando em conta o CD), caso a resposta seja positiva, acrescentar o par de pontos  $(i, j)$  na extremidade apropriada. Deve-se então fazer a mesma análise para o ponto  $j$ . Se nenhum dos dois pontos satisfizer essa condição separadamente, retornar para a etapa 3;
- Se ambos os pontos  $i, j$  fazem parte, cada um deles, de roteiros iniciados, mas diferentes, verificar se ambos são extremos dos respectivos roteiros. Se a resposta for positiva, fundir os dois roteiros num só, juntando-os de forma a unir  $i, j$ . Caso contrário, passar para Etapa 5;
- Se ambos os nós  $i, j$  pertencerem a um mesmo roteiro, passar para a Etapa 5.

Etapa 5: Cada vez que se acrescentar um ou mais pontos num roteiro, ou quando se fundir dois roteiros em um só, verificar se a nova configuração satisfaz as restrições de tempo e de capacidade. Caso atenda aos limites das restrições, a nova configuração é aceita.

Etapa 6: O processo encerra quando todos os pontos de demanda tiverem sido incluídos em um roteiro.

#### **2.4.5. Aplicações dos PRPV na Literatura**

Em seu trabalho, Pelizaro (2000) aborda que muitas modificações têm sido propostas para o método de Clarke e Wright (1964), buscando diferentes resultados. Segundo o autor, Gaskell (1967) e Yellow (1970) introduziram um novo conceito de economia dado por  $s_{ij} - q c_{ij}$ , onde  $q$  é um parâmetro escalar. Variando  $q$ , é possível dar maior ou menor ênfase aos custos de viagem entre dois nós, dependendo da sua posição relativa ao depósito. Este parâmetro pode ser alterado, obtendo-se diferentes soluções.

A autora Pelizaro (2000) cita, também, Golden *et al.* (1977), que conseguiram reduzir substancialmente o tempo de processamento da heurística de Clarke e Wright, utilizando técnicas de ciências computacionais.

Ainda com relação à heurística de Clarke e Wright, Rego (2008) descreve uma versão sequencial do algoritmo, proposta por Cordeau *et al.* (2002), que consiste na combinação de sub rotas a uma mesma sub rota inicialmente escolhida, até que não seja mais possível a combinação desta com nenhuma outra, passando então para outra sub rota que será tomada como referência. Conforme os próprios autores, o algoritmo se mostrou bastante simples e rápido, sendo fácil de codificar, principalmente pela ausência de parâmetros.

Em seu trabalho de dissertação Corrales P. (2001) utilizou o método Clarke e Wright para determinar rotas econômicas que atendam a um dado conjunto de clientes, considerando as restrições de capacidade de veículos e de tempo de percurso. Segundo a própria autora este método foi escolhido já que seu algoritmo permite incorporar de modo eficiente diversos tipos de restrições, e desta forma o mesmo se adaptou melhor as exigências do trabalho proposto. Além disto, o trabalho se propôs a integrar este algoritmo a um Sistema de Informação Geográfica (SIG) (possibilita representar graficamente os resultados obtidos com o método) e conceber uma heurística para criar um conjunto de soluções alternativas para resolução do Problema de Roteamento de uma Frota Veicular.

### **3. METODOLOGIA**

O presente capítulo visa descrever o procedimento metodológico que foi utilizado no trabalho de monografia, a fim de facilitar a compreensão do desdobramento da pesquisa. Para isto será inicialmente apresentada a finalidade da pesquisa, seguida da tipologia da mesma, ambas descritas conforme a literatura pesquisada, e, ao fim, serão detalhadas as etapas realizadas para a conclusão do estudo.

#### **3.1. Finalidade da Pesquisa**

Conforme Andrade (2009), as variadas finalidades da pesquisa podem ser classificadas, basicamente, em dois grupos: aquelas motivadas por razões de ordem intelectual, e outras, motivadas por razões de ordem prática. A pesquisa realizada neste trabalho tem características de cunho operacional, e por este fato, assemelha-se à finalidade prática, que segundo a autora, tem como objetivo atender às exigências da vida moderna e contribuir na busca de soluções de problemas concretos (pesquisa “aplicada”).

Contudo, mesmo com tais características, a referida pesquisa também assume um aspecto intelectual (denominada “pura” ou “fundamental”), quanto a sua finalidade, visto que buscou contribuir para o desenvolvimento científico na área da Logística e da Pesquisa Operacional. Esta característica mútua do propósito desta pesquisa é justificada por Andrade (2009), o qual afirma que os dois grupos (“pura” e “aplicada”) não constituem departamentos isolados, e com isto, podem se complementar no desenvolvimento de um estudo.

#### **3.2. Tipologia da Pesquisa**

Uma pesquisa, segundo Cervo (2007), ao ser classificada quanto à sua natureza, pode constituir-se como um trabalho científico original ou um resumo do

assunto, e quanto aos procedimentos, que pode ser divididos em três grupos: bibliográfica, descritiva e experimental. A pesquisa realizada neste trabalho de monografia, quanto a sua natureza, pode ser caracterizada por um resumo do assunto, já que, conforme Andrade (2009), este é o tipo de pesquisa mais comum nos cursos de graduação, onde os trabalhos são mais fundamentados em outros estudos mais avançados e feitos por autoridades no assunto.

Quanto ao procedimento, esta pesquisa pode ser classificada como experimental já que a mesma, segundo Cervo (2007), caracteriza-se por manipular diretamente as variáveis relacionadas com o objeto de estudo, visando estabelecer possíveis relações entre elas. Para Gil (2002), é fundamental que a pesquisa com estas características apresente as seguintes propriedades: manipulação, onde o pesquisador precisa essencialmente manipular pelo menos uma variável; controle, onde se faz necessário a inserção de um mais controles na situação e experimenta; e, por fim, distribuição aleatória, onde os elementos para participar dos grupos experimentais e de controle devem ser feitos aleatoriamente.

### **3.3. Variáveis da Pesquisa**

As variáveis contempladas na presente pesquisa são basicamente a localização dos pontos de demanda, às cargas a serem distribuídas aos mesmos, bem como o tempo de deslocamento e distâncias referentes a estes pontos. Estas variáveis foram colhidas tanto de exemplos obtido na literatura pesquisada, como a partir de cenários aleatórios criados, em um dos casos, com auxílio do *software* ArcGIS®. (tanto de bases de dados já estruturadas).

### **3.4. Delineamento da Pesquisa**

Este tópico busca descrever, de modo mais específico, as etapas de execução da pesquisa, a fim de entender o modo como a melhoria no método de roteirização foi implementada. Contempla-se, também, a apresentação do *software* utilizado na

realização do trabalho, seguido dos procedimentos adotados na validação do modelo de CW implementado, bem como, aplicação da melhoria.

### **3.4.1. Software Utilizado**

No desenvolvimento do sistema de roteirização para o qual se propõe este trabalho, fez-se necessária a implementação computacional, através de uma linguagem de programação, do método heurístico de Clarke e Wright, acrescido da melhoria em questão. Para isto, optou-se pela utilização do *software* Delphi® 2010, que agrega algumas características importantes que facilitam o desenvolvimento do modelo.

Conforme Folsta et al. (2009), este *software* apresenta, como vantagens: a existência de uma grande quantidade de componentes prontos em sua biblioteca, desenvolvimento rápido, facilidade de criação de interface, por basear-se na programação voltada a objetos, além de possuir funções matemáticas mais robustas. Outro aspecto que motivou a escolha deste programa foi à facilidade de se estabelecer interface com bancos de dados, o que contribui, significativamente, na obtenção dos dados de entrada e na armazenagem dos dados processados.

### **3.4.2. Etapas da Pesquisa**

Este trabalho foi iniciado a partir de uma revisão bibliográfica, através de pesquisas em livros, artigos científicos, revistas científicas, dentre outros. Essa etapa foi fundamental, pois serviu de base para as etapas subsequentes. Cabe salientar que a mesma foi iniciada no projeto de TCC, sendo concluída no desenvolvimento do relatório final da monografia.

Concomitantemente à revisão bibliográfica, foi iniciada a fase de implementação computacional do método de Clarke e Wright. Nesta etapa o método foi implementado sem nenhuma alteração, assim como descrito em seu algoritmo. Em um segundo momento, após alguns testes e correções de erros de

programação, o código implementado foi manipulado, a fim de inserir as melhorias propostas.

Após concluir a implementação do método de CW e da melhoria do mesmo, foram feitos alguns ajustes no *layout* do sistema de roteirização desenvolvido, visando melhorar a interface com o usuário. Por fim, em uma última etapa da pesquisa, este modelo 'melhorado' foi testado em alguns cenários predefinidos, visando, inicialmente, validar o método de CW, e, posteriormente, verificar se a melhoria implantada é, de fato, um atributo que otimiza o resultado fornecido pelo referido método.

### **3.4.3. Validação do Método de CW e Aplicação da Melhoria**

Como descrito anteriormente, uma das etapas da pesquisa consistiu em validar o método de CW implementado. Este procedimento teve por objetivo avaliar se o resultado fornecido pelo modelo desenvolvido é compatível com outras resoluções, provenientes da literatura, por exemplo, que utilizam este mesmo método de roteirização. Outro ponto analisado nesta validação é se o modelo produz soluções coerentes, a partir de cenários predefinidos, ou seja, se a solução encontrada se aproxima da solução esperada, para determinadas situações mais específicas.

O primeiro teste de validação foi realizado a partir de um problema de roteirização disposto em Novaes (2004). A partir dos dados contidos no mesmo, foi feita uma comparação do resultado gerado pelo modelo, com o do exemplo contido na referida literatura. O segundo teste, refere-se a uma comparação, baseada em um problema com pontos aleatórios, da resolução analítica do método de CW, auxiliada pelo *software* Microsoft Excel<sup>®</sup>, com a resolução fornecida pelo modelo desenvolvido. O terceiro, e último, teste foi realizado com base em um cenário criado com auxílio do *software* ArcGIS<sup>®</sup>, apoiado por um Sistema de Informação Geográfica (SIG), que permitiu gerar uma quantidade de 100 pontos de demanda em diversas localidades do mapa da cidade de Petrolina-PE. Os pontos gerados foram exportados para o Microsoft Excel<sup>®</sup>, para, ao fim, criar os dados de entrada do problema. O objetivo principal deste teste foi observar como o modelo desenvolvido se comporta em problemas com maior quantidade de pontos.

No que tange a melhoria do método de CW, desenvolvida neste trabalho, foi proposta uma aplicação nos mesmos problemas de roteirização utilizados no teste de validação, visando verificar a economia obtida, através das alterações nos roteiros gerados, assim como, analisar se a melhoria implementada otimiza o modelo de roteirização.

Além destas análises, foram discutidos e analisados, outros dois tipos de aplicação possível para o sistema de roteirização. O primeiro deles, refere-se a um problema que busca encontrar, através do método de CW implementado, roteiros de visita, aos pontos de demanda, para representantes de vendas. O segundo, diz respeito a uma aplicação específica da melhoria implementada no modelo, que visa estabelecer a melhor localização para um depósito, através da análise comparativa de soluções para um problema de roteirização.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

O capítulo em questão apresenta os resultados obtidos na pesquisa, acompanhados dos devidos comentários e discussões acerca dos tópicos que seguem. No primeiro tópico é feita uma descrição detalhada do modelo de roteirização desenvolvido neste trabalho. Os tópicos subsequentes mostram as análises dos testes de validação descritos na metodologia, além da aplicação da melhoria do método de CW.

### **4.1. Modelo de Roteirização Desenvolvido**

Nesta primeira seção, será feita uma apresentação geral do modelo de roteirização desenvolvido neste trabalho. Para isto, inicialmente, será feito um detalhamento do modelo através de um fluxograma de execução, visando expor o princípio de funcionamento do mesmo, e depois, irá ser apresentado à interface do modelo, e os dados de entrada e saída do mesmo.

#### **4.1.1. Fluxograma de Execução**

O modelo de roteirização, objeto de estudo deste trabalho, foi desenvolvido, como já salientado, no *software* Delphi® 2010, na linguagem de programação Delphi. Este foi elaborado, basicamente, com a implementação de dois módulos: o método de CW e a melhoria do método de CW (Figura 5).

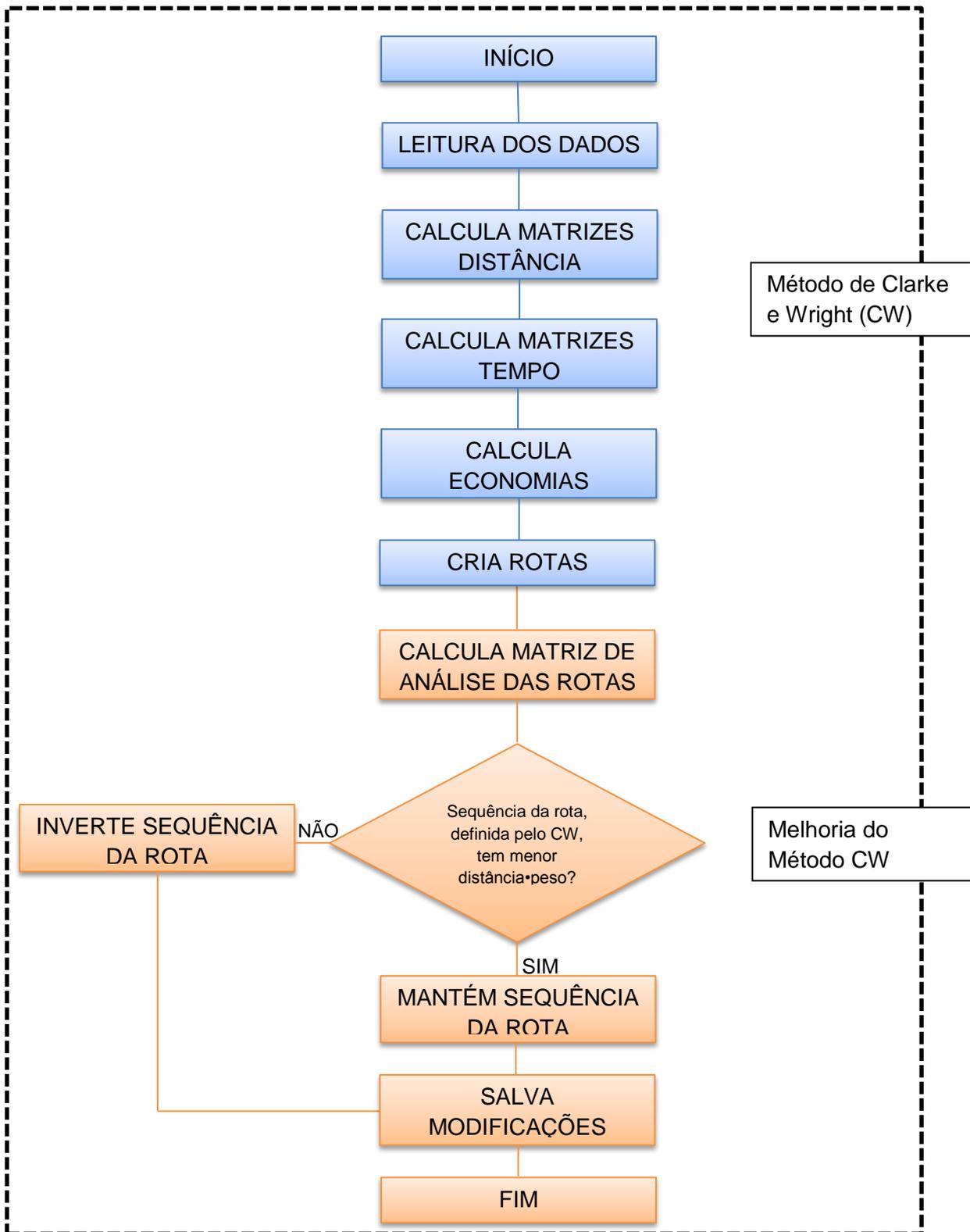
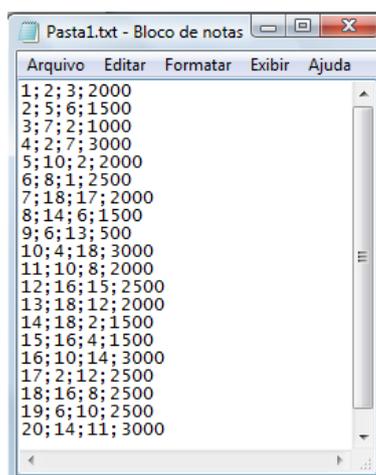


Figura 5 – Fluxograma de execução do modelo de roteirização desenvolvido.

Fonte: Produzido pelo autor.

O primeiro módulo, destacado na cor azul, representa o método de roteirização em estudo sem nenhuma modificação, e, como pode ser visto no fluxograma, está dividido em cinco procedimentos, que serão detalhados a seguir:

- **Leitura dos dados:** Este procedimento consiste na leitura dos dados de entrada do modelo de roteirização, sendo então o ponto de partida para a solução de um problema de roteirização. Estes dados, no caso do modelo desenvolvido, referem-se ao número de ordenação do ponto de demanda, a coordenada x do ponto (longitude), a coordenada y do ponto (latitude) e a quantidade (em unidade de massa) de carga demandada pelo mesmo. A leitura é feita através da interface com um banco de dados, neste caso um arquivo .txt, que armazena tais informações, separando-as por ponto e vírgula (Figura 6).



**Figura 6** – Exemplo dos dados de entrada para o modelo no formato .txt.

**Fonte:** Produzido pelo autor.

- Calcula matrizes distância: Neste, são geradas as matrizes onde estão dispostas as distâncias entre os pontos de demanda, bem como, as distâncias entre tais pontos e o centro de distribuição (CD) ou depósito. O cálculo destas distâncias tem como base as coordenadas dos pontos e do CD.
- Calcula matrizes tempo: Este procedimento gera as matrizes de tempo entre os pontos de demanda, entre tais pontos e o CD e a de tempo de parada em cada ponto. A base para o cálculo das duas primeiras matrizes depende, das matrizes distância e a informação da velocidade média do veículo (fornecida pelo usuário como dado de entrada). No que tange ao tempo de parada (**T<sub>p</sub>**), este é calculado a partir da seguinte equação:

$$Tp = a + b \times nq$$

Onde **a** é o tempo de parada fixo, **b** o tempo de parada variável (ambos fornecidos pelo usuário) e **nq** refere-se à quantidade de carga demandada pelo cliente.

- Calcula economias: Neste são realizados os cálculos das economias, assim como descrito no aporte teórico deste trabalho, gerando a matriz dos ganhos.
- Cria as rotas: O último procedimento deste módulo refere-se à geração da matriz rotas, onde estão dispostas as informações de cada roteiro formado (código da rota, carga total da rota, tempo total da rota e a quantidade de pontos). Além destes, o procedimento descrito também gera a sequência de cada rota, sendo esta a principal informação para execução do segundo módulo. Cabe ainda destacar que a formação de cada rota se baseia, primeiramente, nos ganhos (dispostos na ordem decrescente), e depois, nas restrições de carregamento máximo do veículo e na jornada de trabalho (ambos informados pelo usuário).

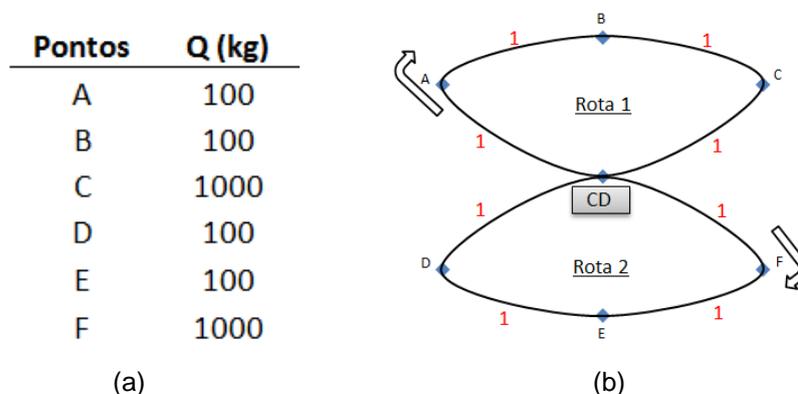
O segundo módulo, destacado na cor laranja no fluxograma da Figura 5, refere-se à melhoria do método de CW, desenvolvida no presente trabalho. Este módulo é composto, basicamente, por três procedimentos, que serão explicitados a seguir:

- Calcula matriz de análise das rotas: Como destacado anteriormente, os dados de entrada para o segundo módulo são as rotas formadas pelo método de CW, junto com a sequência da mesma e a distância entre os pontos. Em posse destes dados, este procedimento busca analisar se a sequência gerada, em cada roteiro, pelo referido método, possui a menor **distância•peso**. Para realizar esta avaliação é gerada uma matriz que contém o fator **distância•peso** da sequência rota fornecida (ou rota atual), e o fator da sequência invertida deste mesmo roteiro. Em outras palavras, esta matriz avalia qual sequência de rota (atual ou invertida) apresenta um menor fator, pois esta será a melhor sequência em termos de distância percorrida e carregamento do veículo.
- Inverte ou mantém sequência da rota: Este procedimento utiliza a matriz de análise das rotas para inverter ou manter a sequência da rota. Deste modo, como já mencionado, caso o fator **distância•peso** seja menor na sequência

gerada pelo método, esta não será invertida. De modo contrário, caso a mesma apresente um maior fator, ocorrerá a inversão.

- Salva modificações: Após a realização das devidas modificações nas sequências do roteiro, os dados contendo os pontos de demanda, as rotas modificadas e o resumo das análises são arquivados em uma base de dados. Neste caso, o modelo desenvolvido possui interface com o Microsoft Access<sup>®</sup>, que armazena o referidos dados a cada vez que o sistema de roteirização é executado.

Para facilitar a compreensão destes três últimos procedimentos, que se referem à proposta central do trabalho, segue abaixo um exemplo que ilustra, principalmente, a análise da sequência das rotas. A Figura 7-a apresenta seis de pontos de demanda, com as respectivas cargas, a serem entreguem por um veículo com capacidade de 1200 kg, que parte de um CD. Através da roteirização pelo método de CW, obteve-se dois roteiros, como mostra a Figura 7-b, onde a Rota 1 segue a sequência CD-A-B-C-CD, e a Rota 2 a sequência CD-F-E-D-CD. Cabe a ressalva que o valor disposto entre os pontos refere-se a distância, em quilômetros, do percurso.



**Figura 7** – (a) Pontos de demanda para o problema de roteirização exemplificado (b) rotas geradas através da roteirização dos pontos de demanda.

**Fonte:** Produzido pelo autor.

Com descrito no fluxograma, a próxima etapa de execução do modelo refere-se à análise das sequências dos roteiros, a partir do fator **distância•peso**. Para calcular este fator, deve-se levar em consideração a carga que irá ser transportada a cada percurso, assim para o caso da rota atual, a primeira parcela do cálculo deste fator seria 1200 kg multiplicado por 1 km, que representa a carga total que saíra do CD até o ponto A. As outras parcelas do cálculo seguem o mesmo raciocínio. Abaixo segue a descrição do mesmo:

$$d \cdot p = (1200 \times 1) + (1100) \times 1 + (1000) \times 1 + (0) \times 1 = 3300 \text{ km} \cdot \text{kg}$$

No caso do roteiro com a sequência invertida (CD-C-B-A-CD), o cálculo do fator seria:

$$d \cdot p = (1200 \times 1) + (200) \times 1 + (100) \times 1 + (0) \times 1 = 1500 \text{ km} \cdot \text{kg}$$

Utilizando o mesmo procedimento de cálculo para a Rota 2, obtém-se a matriz de análise de das rotas (Figura 8).

Matriz Análise Rotas		
Nº Rota	Distância•peso	
	Sequência Atual	Sequência Invertida
1	3300	1500
2	1500	3300

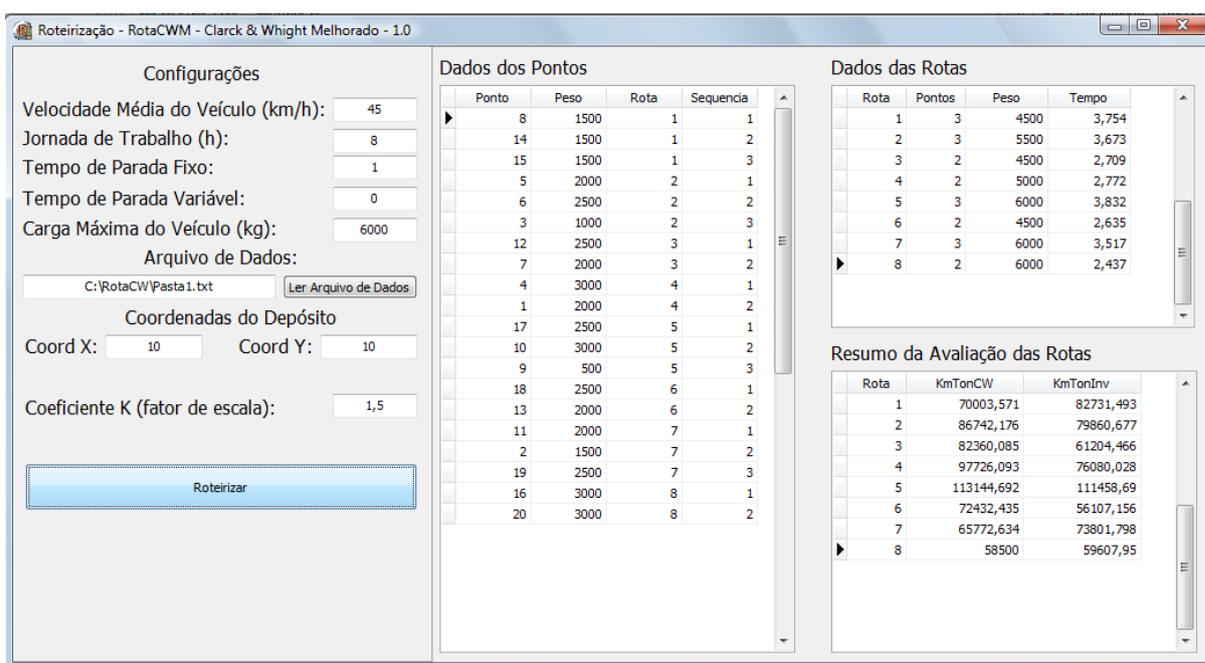
**Figura 8** – Matriz de análise das rotas para o problema de roteirização exemplificado.  
**Fonte:** Produzido pelo autor.

Esta análise nos mostra que dentre os roteiros gerados pelo método de CW, apenas a Rota 2 apresenta uma sequência adequada em termos de **distância•peso**. No caso da Rota 1, a sequência que resultaria no menor fator seria: CD-C-B-A-CD. Diante disto, a sequência da mesma seria invertida, enquanto o da Rota 2 seria mantida. Fazendo uma avaliação desta mudança no roteiro 1, pode-se dizer que a mesma gera uma economia de 1800 km•kg. Após as análises dos roteiros gerados, seguido das devidas modificações, os dados das rotas são arquivados na base de dados.

#### 4.1.2. Interface do Modelo

A interface com usuário, do modelo de roteirização em questão, foi estruturada de maneira bem simples, visando facilitar a utilização do mesmo. Como pode ser observado na Figura 9, que mostra o layout desta interface, o modelo possibilita ao usuário estabelecer algumas configurações, as quais funcionam como dados de entrada para determinado problema de roteirização. Os dados dispostos a serem configurados são: velocidade média do veículo, jornada de trabalho, carga máxima do veículo, tempo de parada fixo e variável, coordenada **x** e **y** do depósito, e o fator

de escala (k), utilizado na base de cálculo da distância. A interface ainda possui dois botões: Ler Arquivo de Dados e Roteirizar. O primeiro permite que o usuário acesse a base de dados (arquivo *.txt*) com os dados dos pontos de demanda, enquanto que o segundo, é o comando que faz o modelo iniciar a roteirização. O modelo ainda apresenta na interface, como dados de saída, a matriz contendo a informação dos pontos, outra apresenta as rotas formadas, e, por fim, a matriz de análise das rotas. Estas informações de saída permitem ao usuário consultar rapidamente os resultados obtidos na roteirização, o que facilita a análise dos mesmos.



**Figura 9** – Layout da interface com o usuário do modelo desenvolvido.

**Fonte:** Produzido pelo autor.

## 4.2. Validação do Método de CW Implementado

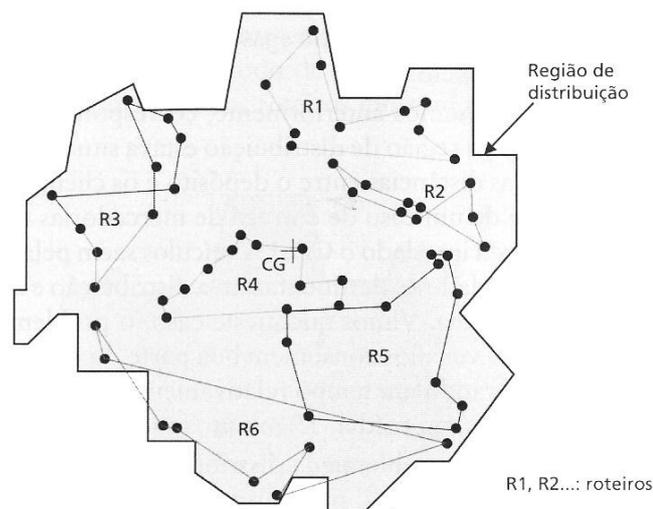
O presente tópico visa apresentar os resultados dos testes de validação do método de CW implementado no modelo de roteirização, assim como foi descrito na metodologia deste trabalho. Vale ressaltar que o objetivo principal desta validação é mostrar que o método de CW, disposto no modelo, produz resultados consistentes, baseando-se em outras aplicações e cenários aleatórios.

#### 4.2.1. Aplicação de um Exemplo de Novaes (2004)

O problema de roteirização descrito neste tópico, refere-se a uma exemplo da aplicação do método de CW por Novaes (2004). Neste, não é especificado o *software* utilizado para obtenção do resultado, mas é fato que se trata do mesmo algoritmo de solução. O problema em questão contempla um total de 60 pontos de demanda (ANEXO 1), com as respectivas cargas (kg). O veículo utilizado na distribuição tem capacidade de 4000kg, sendo a jornada de trabalho de 8h/dia, e o tempo médio de parada de 15min (0,25h).

No que tange a velocidade do veículo, dado essencial para geração das matizes tempo, não foi especificado um valor no referido problema, mas, através de alguns testes comparativos com o modelo desenvolvido, que resultou em soluções muito próximas, observou-se que foi utilizado no exemplo uma velocidade média de 30km/h. Já com relação às coordenadas do depósito, o exemplo determina apenas uma faixa de distância (75,2 a 79,8) entre os pontos e o CD, mas não as coordenadas de forma precisa. Entretanto, com base em alguns cálculos de distância entre pontos, foi estimada a localização para o depósito na coordenada (0,0). Por fim, cabe destacar que o fator (k) de distância utilizado no exemplo foi de 1,4.

Diante dos dados apresentados, a Figura 10 mostra as rotas geradas como solução no exemplo em questão. Observa-se um total de 6 roteiros, dentro da região de distribuição especificada na imagem, onde todos estes, assim como prevê o método CW, se agrupam em regiões (ou bolsões) específicos de entrega, formando, portanto, um resultado consistente.



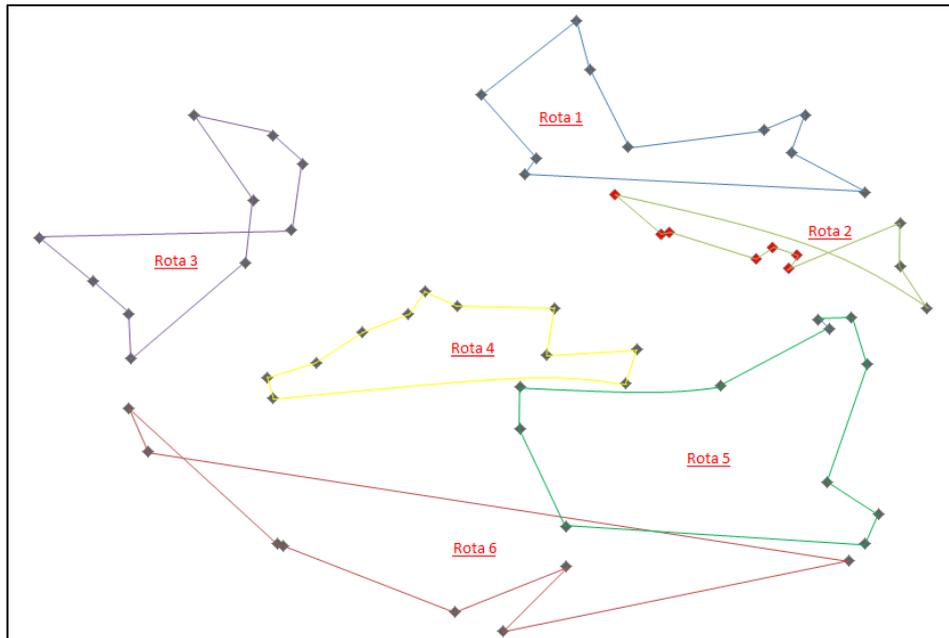
**Figura 10** – Rotas geradas como solução pelo exemplo disposto em Novaes (2004).  
**Fonte:** Novaes (2004).

Utilizando estes mesmos dados para gerar uma solução no modelo desenvolvido, obteve-se um total de 6 rotas, assim como mostra a Figura 11.

Dados das Rotas				
Rota	Pontos	Peso	Tempo	
1	10	1852	7,877	
5	10	1763	7,795	
7	10	1880	7,828	
8	11	2270	7,984	
11	11	2399	7,981	
▶ 13	8	1642	7,27	

**Figura 11** – Rotas geradas pelo modelo no problema disposto em Novaes (2004).  
**Fonte:** Produzido pelo autor.

Levando em conta a dificuldade para estabelecer uma comparação entre as duas soluções, buscou-se o recurso gráfico do *software* Microsoft Excel® para dispor os postos nas devidas coordenadas e, assim, apresentar, visualmente, os resultados obtidos pelo modelo (Figura 12).



**Figura 12** – Rotas geradas como solução pelo modelo para o problema disposta em Novaes (2004), apresentada com auxílio do Microsoft Excel®.

**Fonte:** Produzido pelo autor.

Inicialmente, é importante destacar que a numeração das rotas dispostas na Figura 12, representam a ordem como às mesmas foram geradas pelo modelo de roteirização. Isso implica que a rota 5, por exemplo, mostrada na Figura 11, refere-se a rota 2 da ilustração acima. No que se refere às rotas geradas, observou-se uma semelhança muito grande entre as duas soluções apresentadas, havendo uma singela diferença no sequenciamento de alguns pontos da rota 2 (destacados em vermelho). Esta diferença não descaracteriza, ou invalida, a solução do modelo desenvolvido, pois na agregação dos pontos, a partir dos ganhos, para formação da rota pode haver uma configuração diferente no sequenciamento mesma.

Assim, baseando-se nos resultados deste teste, o modelo apresentou uma solução muito próxima da aplicação realizada em Novaes (2004), o que mostra que o método de CW implementado no modelo de roteirização deste trabalho está, até então, validado.

#### 4.2.2. Aplicação Analítica do Método de CW: *Microsoft Excel*®

O segundo teste de validação foi realizado com uma aplicação do método de CW em um modelo analítico, desenvolvido no Microsoft Excel®, baseado em uma

série de pontos de demanda, dispostos no Anexo 2 deste trabalho. Este modelo analítico baseia-se no algoritmo de CW, e tem, no geral, o mesmo princípio de execução do modelo desenvolvido. Para facilitar o entendimento da aplicação analítica serão expostas as matrizes utilizadas para geração dos roteiros, bem como o quadro para o cálculo da rota (Anexo 3).

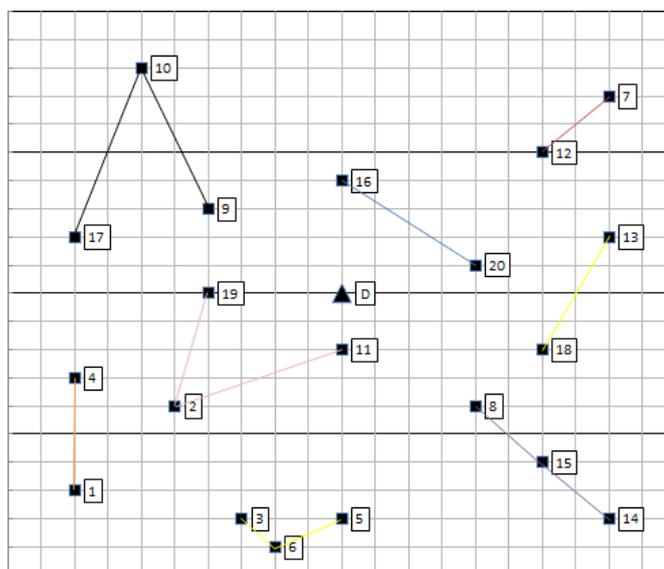
Os dados de entrada utilizados neste teste de validação estão dispostos na Tabela 1.

**Tabela 1 – Dados de entrada para o problema com aplicação analítica.**

Capacidade do Caminhão (kg)	6000
Velocidade Média (km/h)	45
Tempo Médio de Parada (h)	1
k	1,5
Coordenada do Depósito (km)	(10,10)

**Fonte:** Produzido pelo autor.

Com base nestas informações e nas matrizes apresentadas, foi possível calcular os roteiros, e assim chegar à solução final do modelo analítico, apresentada na Figura 13. Como pode ser observado, foram formados um total de 8 rotas, agrupadas em regiões específicas de entrega, distribuídas ao redor do depósito. Cabe salientar que o rotulo de dados disposto acima de cada ponto, representa a ordenação do mesmo na lista apresentada no ANEXO 2.



**Figura 13 – Rotas geradas como solução pelo modelo desenvolvido no Microsoft Excel® para o problema com aplicação analítica.**

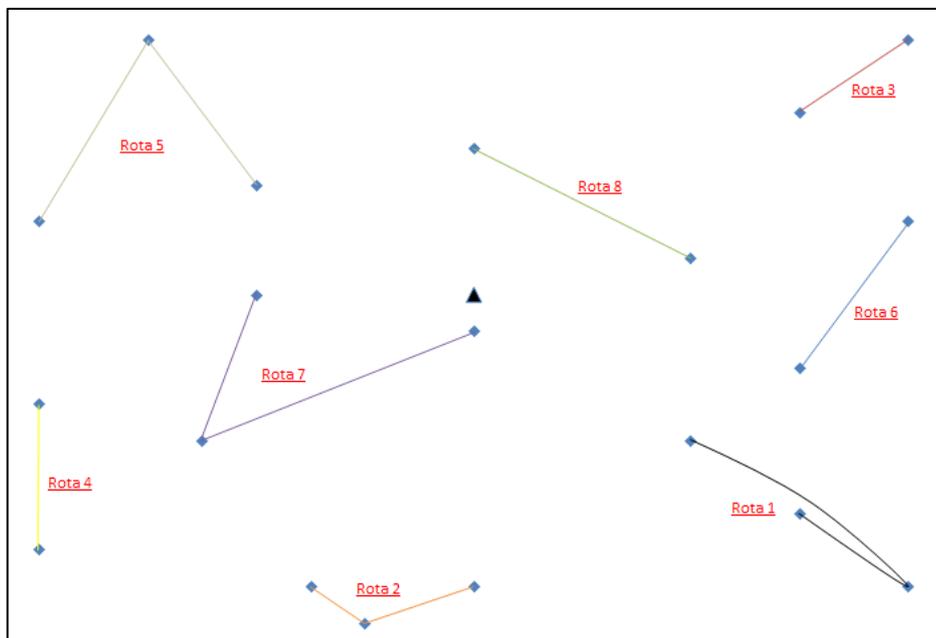
**Fonte:** Produzido pelo autor.

Aplicando estes mesmos dados no modelo desenvolvido, obteve-se, também a formação de 8 rotas (Figura 14).

Dados das Rotas			
Rota	Pontos	Peso	Tempo
1	3	4500	3,754
2	3	5500	3,673
3	2	4500	2,709
4	2	5000	2,772
5	3	6000	3,832
6	2	4500	2,635
7	3	6000	3,517
8	2	6000	2,437

**Figura 14** – Rotas geradas pelo modelo no problema com aplicação analítica.  
**Fonte:** Produzido pelo autor.

Para facilitar a visualização das mesmas, os pontos foram dispostos no Microsoft Excel®, e os roteiros foram ilustrados, como mostra a Figura 15. Como pode ser observado, as rotas geradas pelo modelo desenvolvido são as mesmas encontradas pelo modelo analítico, o que mostra que o método de CW implementado, de acordo com a comparação estabelecida, produz soluções válidas e coerentes com o algoritmo do referido método. Cabe destacar que apenas a rota 1 da Figura 15 apresentou uma pequena diferença do respectivo roteiro da solução analítica. Esta diferença refere-se a uma limitação do modelo analítico, que determina apenas o roteiro formado, mas não o sequenciamento do mesmo, o que não ocorre com o modelo de CW implementado.



**Figura 15** – Rotas geradas como solução pelo modelo para o problema com aplicação analítica, apresentada com auxílio do Microsoft Excel®.  
**Fonte:** Produzido pelo autor.

Para evidenciar esta constatação, a Figura 16 mostra, como dados de saída do modelo, os pontos referentes à rota 1, seguido das respectivas cargas de demanda, a rota a qual pertence e o sua ordem de sequência.

Dados dos Pontos			
Ponto	Peso	Rota	Sequencia
8	1500	1	1
14	1500	1	2
15	1500	1	3

**Figura 16** – Detalhe das informações dos pontos gerados pelo modelo para a rota 1.

**Fonte:** Produzido pelo autor.

#### 4.2.3. Aplicação com 100 Pontos de Demanda na Cidade de Petrolina – PE

O último teste de validação refere-se a um problema com 100 pontos de demanda, gerados aleatoriamente com auxílio do *software* ArcGIS®, em um mapa da cidade de Petrolina-PE. A criação deste problema foi possível devido a uma interface SIG do referido *software*, que permite identificar e armazenar às coordenadas de um ponto qualquer, em um determinado mapa, para ao fim, exportar as informações para uma base de dados, assim como descrito na metodologia.

Outra observação deste teste refere-se às cargas de cada ponto de demanda. Estas foram determinadas com auxílio da função 'INV.NORM' do Microsoft Excel®, estipulando a probabilidade como aleatória, uma média de 200 kg e o desvio padrão de 40 kg. Os dados referentes a estes pontos de demanda estão dispostos no Anexo 4.

A partir destes pontos foi feita a roteirização, através do modelo de desenvolvido, visando observar qual o comportamento do mesmo, na geração da solução em um problema com grande quantidade de pontos. Para este teste foram utilizados os seguintes dados de entrada (Tabela 2):

**Tabela 2** – Dados de entrada para o modelo no problema com 100 pontos de demanda.

Capacidade do Caminhão (kg)	4100
Velocidade Média (km/h)	45
Tempo Médio de Parada (h)	0,2
k	0,0013
Coordenada do Depósito (m)	(334865, 8961081)

**Fonte:** Produzido pelo autor.

Cabe observar que, pelo fato do *software* ArcGIS® gerar as coordenadas em metros, existe a necessidade de reduzir o valor de *k* para que o mesmo corrija esta unidade de medida, passando-a para quilômetro. Tal operação é necessária, pois no cálculo do tempo utiliza-se o valor da velocidade, que está na unidade de km/h. Feita esta observação, segue abaixo o resultado da roteirização (Figura 17), fornecida pelo modelo desenvolvido.

Dados das Rotas			
Rota	Pontos	Peso	Tempo
2	20	4084	4,567
7	21	4067	4,895
14	21	4015	4,677
15	19	3923	4,308
20	19	3812	4,066

**Figura 17** – Rotas geradas pelo modelo no problema com 100 pontos de demanda.

**Fonte:** Produzido pelo autor.

Como pode ser visto, foram geradas 5 rotas, que podem ser vistas na Figura 18. Assim como os pontos de demanda, esta figura, com a discriminação das rotas por diferentes cores (o CD está representado pela cor azul), foi também gerada pelo ArcGIS®.



**Figura 18** – Rotas geradas como solução pelo modelo para o problema com 100 pontos de demanda, apresentada com auxílio do ArcGIS®.  
**Fonte:** Produzido pelo autor.

Para facilitar a distinção de cada roteiro formado, serão apresentadas a seguir, de modo separado, as referidas rotas, com a indicação da ordem de sequência de cada ponto. Nas Figuras 19 a 23 cabe observar, a título de validação do método de CW implementado, a forma como as rotas foram geradas e agrupadas, para ao fim, obter uma conclusão a respeito da solução fornecida pelo modelo.

Rota 2



**Figura 19** – Detalhe da rota 20 com a sequência de demanda, apresentada com auxílio do ArcGIS®.  
**Fonte:** Produzido pelo autor.

## Rota 7



**Figura 20** - Detalhe da rota 7 com a sequencia de demanda, apresentada com auxilio do ArcGIS®.  
**Fonte:** Produzido pelo autor.

## Rotas 14



**Figura 21** - Detalhe da rota 14 com a sequencia de demanda, apresentada com auxilio do Microsoft ArcGIS®.  
**Fonte:** Produzido pelo autor.

## Rota 15



**Figura 22** - Detalhe da rota 15 com a sequencia de demanda, apresentada com auxilio do Microsoft ArcGIS®.

**Fonte:** Produzido pelo autor.

## Rota 20



**Figura 23** - Detalhe da rota 20 com a sequencia de demanda, apresentada com auxilio do Microsoft ArcGIS®.

**Fonte:** Produzido pelo autor.

No geral, baseando-se nos princípios de uma boa roteirização, disposto no aporte teórico deste trabalho, o modelo desenvolvido gera bons roteiros, com regiões específicas de entrega, um agrupamentos de pontos próximos entre si, e, as

rotas em forma de 'lágrima'. No que tange à capacidade do caminhão, observa-se que houve uma divisão adequada das cargas demandas nas rotas, havendo uma sobra máxima de capacidade do veículo de 7%, no caso da rota 20.

Contudo, mesmo com estas constatações, vale destacar que em alguns roteiros gerados, como a rota 7 e 15, foram agregados pontos que, visualmente, estão distantes do 'aglomerado' ou bolsão de entrega. Esta questão pode ser explicada pela existência de pontos isolados de demanda, como pode ser mais bem visto na Figura 22, que tornam necessários alguns 'desvios' nos roteiros. Diante do exposto, pode-se concluir que, para um problema com grande quantidade de pontos e cargas aleatórias, o método implementado gera resultados válidos e coerentes com o método de CW.

### **4.3. Aplicação da Melhoria no Método de CW**

Neste tópico, serão expostos os resultados e análises da aplicação da melhoria desenvolvida no algoritmo de solução de CW. Esta aplicação partirá do pressuposto que o método de CW está validado, e será baseada nos mesmos exemplos apresentados anteriormente, com enfoque na solução fornecida pelo modelo através da melhoria.

#### **4.3.1. Exemplo de Novaes (2004)**

O presente problema, já apresentado anteriormente, baseia-se nos pontos disposto no ANEXO 1, e tem como solução um total de 6 rotas (Figura 11). Estes roteiros foram gerados a partir do método de solução de CW e, portanto, seu sequenciamento não leva em consideração da distribuição de carga no decorrer da rota. Partindo deste pressuposto, a melhoria proposta para o método de CW, traz como solução uma avaliação de cada um destes roteiros, visando avaliar se o sequenciamento dos mesmos apresentam o menor fator distância•peso.

Para o caso em questão, o resultado desta avaliação apontou que das 6 rotas geradas, 4 delas, devem ser invertidas, por possuírem o menor fator. Com pode ser visto na Figura 24, esta rotas são a 1, 5, 11 e 13. Em contra partida, os roteiros 7 e 8 foram sequenciados de tal modo que resultaram em uma menor km•kg.

Rota	KmTonCW	KmTonInv
1	149764,153	149005,794
5	140385,321	139673,139
7	149715,612	150809,419
8	177907,04	178558,547
11	188788,796	187675,257
13	129985,64	129634,292

**Figura 24** – Resumo da avaliação das rotas fornecido pelo modelo de roteirização no problema disposto em Novaes (2004).

**Fonte:** Produzido pelo autor.

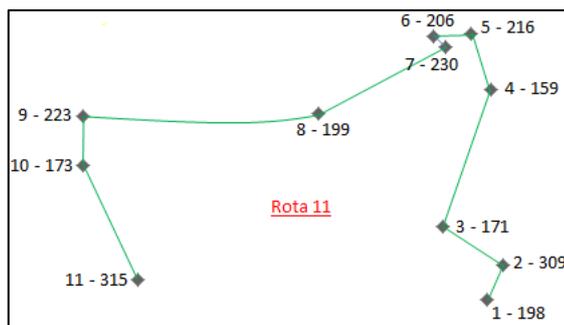
Estas modificações nos sequenciamentos dos roteiros, resultam em uma economia no custo de transporte total, pois reduzem duas variáveis relevantes em termos deste custo, que são a quilometragem e o carregamento. Mesmo não sendo objetivo deste trabalho mensurar o custo de transporte, pode-se quantificar a referida economia através da diferença entre as duas situações avaliadas pelo modelo desenvolvido. Deste modo, a Tabela 3 apresenta o resultado das economias obtidas com as modificações na rota.

**Tabela 3** – Economias resultantes das rotas modificadas pelo modelo de roteirização, no problema disposto em Novaes (2004).

Rotas Modificadas	Economia (km•kg)
1	758,359
5	712,182
11	1113,539
13	351,348
<b>Total</b>	<b>2935,428</b>

**Fonte:** Produzido pelo autor.

Os valores das economias dispostos na Tabela 3 representam, de um modo mais claro, o quanto de carga o veículo deixará de carregar e, ao mesmo tempo, o quanto de distância o mesmo deixará de percorrer, com a sequência modificada. Para facilitar o entendimento da situação exposta, a Figura 25 ilustra a rota 11, a qual apresentou a maior economia, com os pontos de demanda que a compõe, e os respectivos números de sequencia, acompanhado da carga demanda (nº sequência – carga demanda em kg).



**Figura 25** – Detalhe da rota 11 com a sequência e a carga dos pontos de demanda, apresentada com auxílio do Microsoft Excel®.

**Fonte:** Produzido pelo autor.

Analisando a Figura 25, apenas pelas cargas dos pontos de demanda, constata-se que a inversão da sequência do roteiro inicial (gerado pelo método de CW), aparentemente, não gera o melhor resultado em termos do fator  $\text{km}\cdot\text{kg}$ , pois, as maiores cargas estão concentradas no sequenciamento inverso ao da figura, ou seja, iniciando da sequência 11. Contudo, esta análise não é válida, pois não leva em consideração o fator distância, que, por sua vez, pode potencializar a geração de economia em um roteiro, como a deste caso apresentado.

Diante do exposto, considera-se validada a aplicação desta melhoria, visto que, no total, geraria, para o problema de roteirização em questão, uma economia de 2935,43  $\text{km}\cdot\text{kg}$ . Outro fator a ser destacado é que a referida melhoria avalia o sequenciamento em função de duas variáveis importantes, em termos de custos, o que reduz a chance da realização de uma análise errônea ou restrita do sequenciamento de um roteiro.

#### 4.3.2. Modelo Analítico do Método de CW

O problema de aplicação analítica, como já foi dito, baseia-se nos pontos dispostos no ANEXO 2, e como mostra a Figura 14, apresenta como resultado um total de 8 roteiros. Destes, 6 deles, com base na avaliação do sequenciamento de cada rota, devem ser invertidos, já que apresentam menor fator  $\text{km}\cdot\text{kg}$ , a saber: rota 2, 3, 4, 5 e 6 (Figura 26).

Rota	KmTonCW	KmTonInv
1	70003,571	82731,493
2	86742,176	79860,677
3	82360,085	61204,466
4	97726,093	76080,028
5	113144,692	111458,69
6	72432,435	56107,156
7	65772,634	73801,798
8	58500	59607,95

**Figura 26** – Resumo da avaliação das rotas fornecido pelo modelo de roteirização no problema com aplicação analítica.

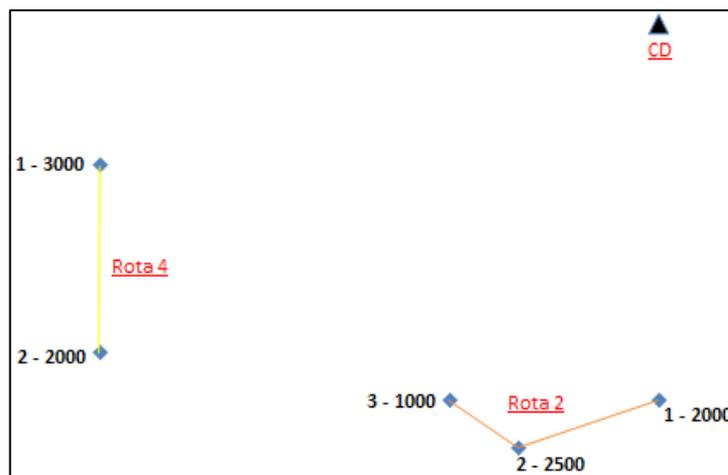
**Fonte:** Produzido pelo autor.

Como discutido na aplicação anterior, as inversões realizadas nos referidos roteiros resultam em uma economia, que impacta diretamente no custo de transporte. Para o caso apresentado, as economias dos roteiros modificados estão dispostas na tabela que segue (Tabela 4).

**Tabela 4** – Economias resultantes das rotas modificadas pelo modelo de roteirização, no problema com aplicação analítica

<b>Rotas Modificadas</b>	<b>Economia (km•kg)</b>
2	6881,499
3	21155,619
4	21646,065
5	1686,002
6	16325,279
<b>Total</b>	<b>67694,46</b>

Observa-se, através da Tabela 4, que o roteiro modificado que gerou mais economia foi o de número 4. Seguindo a mesma metodologia da aplicação anterior, este será destacado, na Figura 27, para uma análise mais detalha. Como pode ser visto, além da referida rota, foi ilustrado o roteiro 2, pois o mesmo, em uma escala decrescente de economia, é o que apresenta o maior valor, para as rotas contendo três pontos de demanda. O intuito de apresentar essas duas situações é o de enriquecer a análise perante aos resultados obtidos, não se restringindo a um roteiro com apenas dois pontos, como é o caso da rota 4. Outro ponto a se destacar, é que o CD também foi incluso na figura, para que haja uma noção da distância do mesmo, até os pontos de demanda, e com isto, fique mais claro os resultados obtidos.



**Figura 27** - Detalhe das rotas 4 e 2 com a sequência e a carga dos pontos de demanda, apresentada com auxílio do Microsoft Excel<sup>®</sup>.

**Fonte:** Produzido pelo autor.

Ao contrário da aplicação anterior, a Figura 27 mostra, visualmente, a validade da aplicação da melhoria, analisando apenas as cargas dos pontos de demanda. Na rota 4, o ponto inicial da rota, além de estar mais próximo ao CD, possui maior carga de demanda, tornado assim, evidente o resultado apresentado. Na rota 2, o ponto inicial apresenta uma carga duas vezes maior, quando comparado com o outro extremo da rota. No que tange as distâncias, tanto ao ponto intermediário, quanto ao CD, estas aproximam-se da equidade, o que, também, torna válida a solução apresentada.

No geral, para o caso em discussão, houve uma economia total de 67694,46 km•kg, o que reitera a importância na aplicação da melhoria, na solução fornecida pelo método de CW.

#### 4.3.3. Exemplo com 100 Pontos de Demanda na Cidade de Petrolina – PE

Esta última aplicação baseia-se no problema com 100 pontos de demanda e carga aleatória (ANEXO 4). O resultado fornecido pelo método de CW implementado, disposto na Figura 17, mostrou um total de 5 rotas formadas. A avaliação destas rotas, baseadas na melhoria proposta, aponta que, deste total, 2 rotas devem ter as sequências invertidas, onde esta são: rota 2 e 14 (Figura 28).

Rota	KmTonCW	KmTonInv
2	53824,808	50384,28
7	56626,347	70541,594
14	46577,63	39533,079
15	38336,761	51302,815
20	22726,539	22919,473

**Figura 28** – Resumo da avaliação das rotas fornecido pelo modelo de roteirização no problema com 100 pontos de demanda.

**Fonte:** Produzido pelo autor.

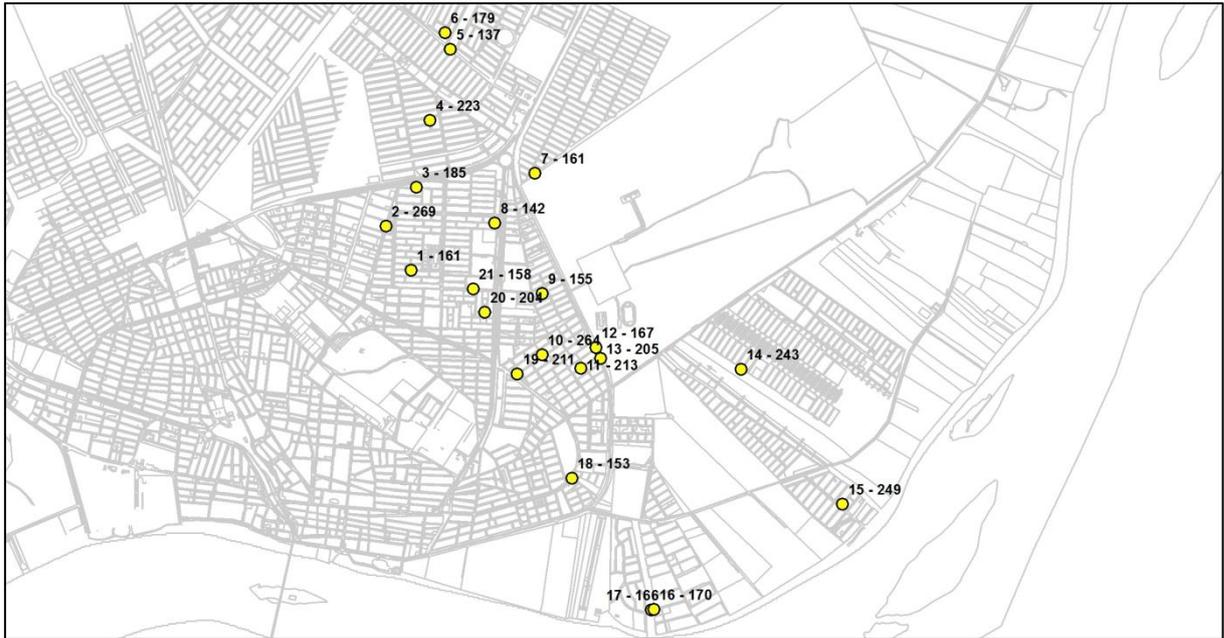
No que tange as economias geradas a partir das modificações, observa-se, na Tabela 5, um valor total de 10485,08 m•kg, com destaque para a rota 14, que representa 67,2% desta resultante. Visando analisar este expressivo valor, a referida rota será apresentada separadamente, dispondo, junto aos pontos, informações sobre o número de sequência e carga demandada (Figura 29).

**Tabela 5** – Economias resultantes das rotas modificadas pelo modelo de roteirização no problema com 100 pontos de demanda.

Rotas Modificadas	Economia (m•kg)
2	3440,528
14	7044,551
<b>Total</b>	<b>10485,08</b>

**Fonte:** Produzido pelo autor.

Através de uma análise da Figura 29, pode-se constatar, de fato, a validade da economia gerada pela modificação na rota 14. Isto porque, se calculadas, inicialmente, as cargas dos seis primeiros pontos de cada extremo, ou seja, da sequência 1 até 6, e da 21 até 16, obtém-se, respectivamente, 1154 kg e 1067 kg. Assim, baseando-se apenas na carga, a sequência modificada, mostra-se mais adequada. No que tange à variável distância, cabe atentar-se para os mesmos pontos: na sequência de 1-6 os pontos encontram-se mais agrupados, e conseqüentemente, resultam em um menor fator m•kg, o que não ocorre na sequência 21-17, onde os pontos, visualmente, estão bem mais distantes uns dos outros. Diante disto, e considerando que os valores do deslocamento do depósito aos referidos extremos são próximos (verificar na Figura 18), o fator distância reforça a coerência do expressivo valor da economia encontrado.



**Figura 29** – Detalhe da rota 14 com a sequência e a carga dos pontos de demanda, apresentada com auxílio do ArcGIS®.

**Fonte:** Produzido pelo autor.

#### **4.4. Outras Aplicações para o Modelo de Roteirização Desenvolvido**

Como foi discutido no referencial teórico deste trabalho, os métodos de roteirização podem ser aplicados a diversas situações. Diante disto, o presente tópico visa apresentar outras duas aplicações em que o modelo desenvolvido pode ser utilizado.

##### **4.4.1. Roteirização de Pontos de Visita para Representantes de Venda**

Esta primeira aplicação, envolvem os casos onde há uma série de pontos a serem visitados por representantes de empresas, que buscam informações das demandas dos clientes para uma próxima entrega. A atividade de representação de vendas, é muito comum nas empresas distribuidoras, e são essenciais para o planejamento de entrega.

Nestes casos, sob o enfoque prático, todos os pontos de demanda têm a mesma carga, não havendo prioridade de visita, ou seja, todos os pontos devem ser

visitados por uma quantidade de vendedores a ser determinada. Esta quantidade baseia-se, principalmente, na restrição de carga do veículo, que, para este exemplo específico, representa o número máximo de pontos que um vendedor pode visitar. Assim, a partir desta referência, são gerados os roteiros de visita, assim como será mostrado na solução apresentada pelo modelo desenvolvido.

O exemplo utilizado nesta aplicação refere-se ao mesmo problema de roteirização com 100 pontos de demanda, já utilizado anteriormente, com a diferença de que estes pontos demandam cargas com valor unitário (ANEXO 5). Os dados de entrada do modelo estão dispostos na Tabela 6.

**Tabela 6** – Dados de entrada do modelo para problema de roteirização de visitas.

Capacidade do Caminhão (kg)	25
Velocidade Média (km/h)	45
Tempo Médio de Parada (h)	0,2
k	0,0013
Coordenada do Depósito (m)	(334865, 8961081)

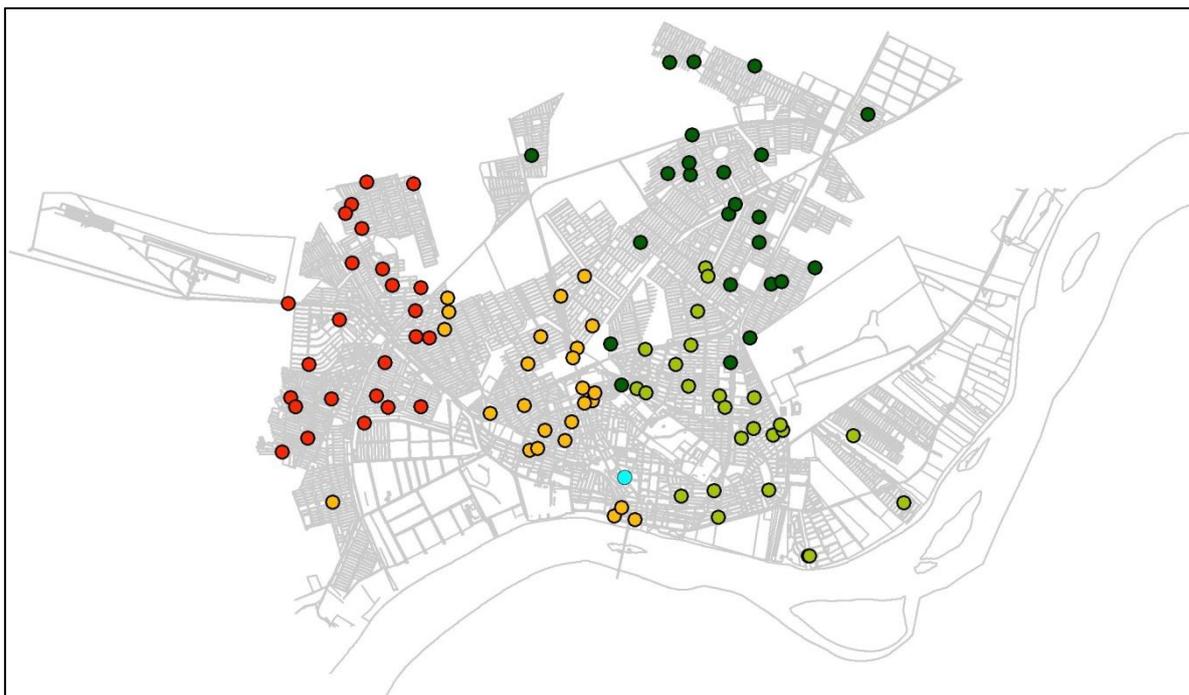
**Fonte:** Produzido pelo autor.

Através destes dados de entrada, o modelo apresentou uma solução com um total de 4 rotas, cada uma delas contendo 25 pontos de vista (Figura 30), o que já era esperado, diante do número total de pontos.

Rota	Pontos	Peso	Tempo
2	25	25	5,612
9	25	25	5,72
16	25	25	5,52
18	25	25	5,5

**Figura 30** – Rotas geradas pelo modelo no problema de roteirização de visitas

Assim como no teste anterior, as rotas geradas são apresentadas no mapa da cidade de Petrolina-PE (Figura 31), cada um delas assumindo uma cor diferente, visando facilitar a visualização das mesmas.



**Figura 31** – Resultado fornecido pelo modelo para o problema roteirização de pontos de vista, apresentado com auxílio do ArcGIS®.

**Fonte:** Produzido pelo autor.

Através desta imagem é possível constatar que as rotas geradas pelo modelo de roteirização ocupam regiões de entrega bem específicas, havendo uma clara divisão, no caso do exemplo apresentado, da região que cada representante irá visitar. Esta distinção de bolsões de entrega, evidenciado pelos agrupamentos dos pontos, representa, na verdade, os diversos bairros de uma cidade que serão visitados por cada vendedor. Cabe destacar também, a importância da roteirização nestas situações, principalmente, no que tange ao custo com meio de transporte (normalmente uma motocicleta) e com o funcionário (horas trabalhadas).

#### **4.4.2. Localização de Depósito**

Outra possível aplicação para um método de roteirização, tomando como base a melhoria proposta, está na localização (estimada) de um depósito através da análise comparativa, de duas ou mais situações, do fator distância•peso. Inicialmente, é fundamental destacar que esta aplicação é válida para casos específicos onde os pontos e as cargas de demanda não variam substancialmente no decorrer do tempo, sendo estes, por exemplo, clientes que compram sempre à

mesma empresa de distribuição uma quantidade constante de produto. Em outros casos, não haveria fundamento a aplicação da melhoria, pois o fator depende tanto da distância, como do peso, e, caso estes dois variem a cada análise, os resultados não seriam representativos, em termos de fornecer uma localização a um depósito.

A metodologia desta aplicação é simples: deve-se escolher dois ou mais pontos para um depósito ou CD ser localizado, e a partir das coordenadas do mesmo, junto a um conjunto de pontos de demanda nas condições já especificadas, são estabelecidos os fatores distância•peso para cada roteiro, de cada cenário de localização do depósito. Para realizar a comparação, de qual seria a melhor localização, os menores fatores são somados, já que estes representam a sequência ideal da rota, e este resultado é comparado entre os diversos cenários. Aquele que possuir o menor fator será, baseando-se nesta aplicação, a melhor localização para o depósito, pois, tomando o peso como constante, o menor valor da distância•peso, representa uma menor distância do ponto ao depósito.

Visando aplicar a metodologia descrita, foi estabelecida a melhor localização para um depósito no problema de roteirização com 100 pontos de demanda, e cargas aleatórias (ANEXO 4). Neste, serão avaliados dois cenários, apresentados na Tabela 7:

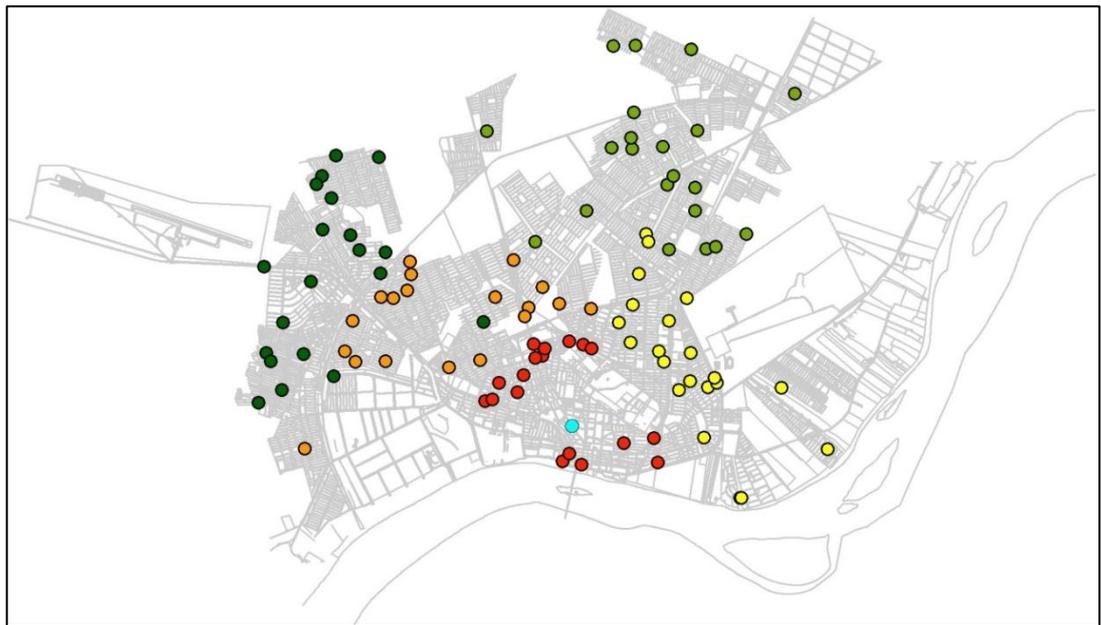
**Tabela 7 –** Coordenadas do depósito para os cenários 1 e 2.

<b>Cenários de Localização</b>	<b>Coordenada do Depósito (m)</b>
1	(334865, 8961081)
2	(334726, 8963606)

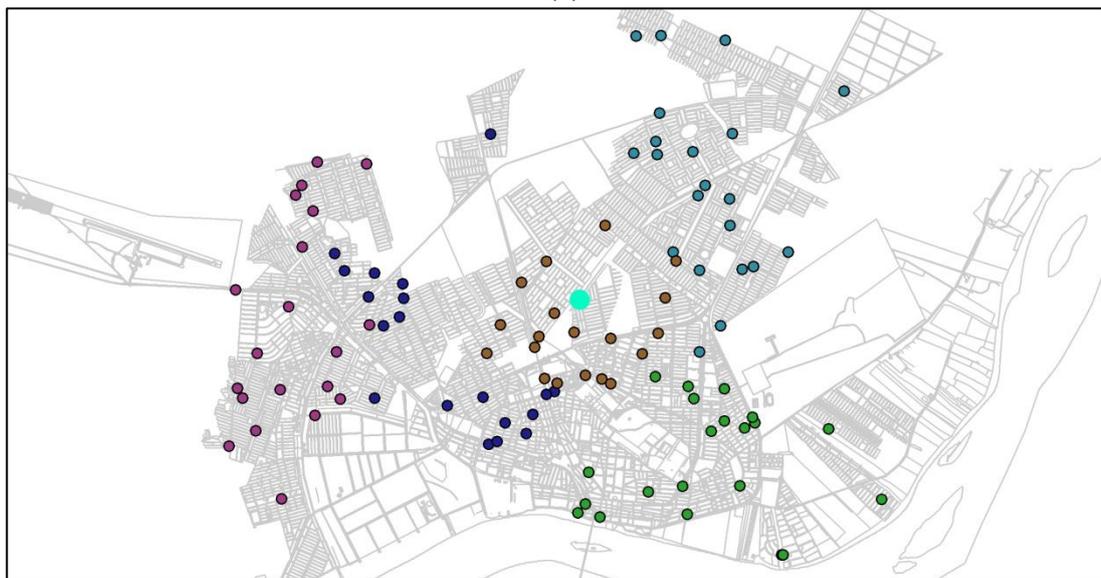
**Fonte:** Produzido pelo autor.

Como pode ser observado, o cenário 1 refere-se ao mesmo problema de roteirização já demonstrado anteriormente, enquanto o cenário 2, representa uma nova localização a ser avaliada. Para facilitar a apresentação dos resultados, serão utilizados os mesmo dados de entrada das aplicações anteriores (Tabela 2), modificando, evidentemente, a coordenada do depósito. Diante do exposto, a Figura 32-a mostra o resultado obtido a partir do cenário 1, enquanto a Figura 32-b, representa o cenário 2. Cabe destacar que os roteiros formados estão discriminados com cores diferentes, assim como o depósito, destacado na cor azul claro. Com pode ser visto, o objetivo principal desta avaliação é verificar se o depósito com uma localização mais central, estabelecido visualmente, é mais vantajoso, em termos do

fator distância•peso, perante a outro localizado mais ao sul do mapa de Petrolina-PE.



(a)



(b)

**Figura 32** – Solução fornecida pelo modelo de roteirização para os cenários 1 (a) e 2 (b), apresentadas com auxílio do ArcGIS®.

**Fonte:** Produzido pelo autor.

Para avaliar qual a melhor localização, diante das duas soluções apresentadas, são apresentados os resultados da avaliação rotas para o cenário 1 (Figura 33-a) e o cenário 2 (Figura 33-b). Como descrito no procedimento desta aplicação, deve-se somar os menores fatores, destacados em vermelho, de cada situação para, então, comparar a resultante.

Resumo da Avaliação das Rotas			Resumo da Avaliação das Rotas		
Rota	KmTonCW	KmTonInv	Rota	KmTonCW	KmTonInv
2	53824,808	50384,28	4	51042,838	51849,013
7	56626,347	70541,594	7	45790,946	37912,84
14	46577,63	39533,079	8	48509,995	49605,627
15	38336,761	51302,815	10	29619,067	50967,588
20	22726,539	22919,473	18	23663,891	30450,421

(a)

(b)

**Figura 33** – Resumo da avaliação das rotas para o cenário de localização 1 (a) e 2 (b).

**Fonte:** Produzido pelo autor.

A Tabela 8 mostra a somatória do fator distância•peso para os dois cenários em questão:

**Tabela 8** – Somatório do fator distância•peso para os cenários de localização do depósito.

Cenários de Localização	Somatório – Fator distância•peso
1	207607,01
2	190748,63

**Fonte:** Produzido pelo autor.

Com base nesta aplicação a melhor localização para o depósito, para o específico exemplo, encontra-se no cenário 2, pois este apresentou um fator menor, com a diferença de 16858,38 m•kg, em relação ao cenário 1. Esta solução indica que o depósito localizado mais ao centro do mapa da cidade, faz com que os deslocamentos realizados pelos veículos de entrega sejam reduzidos, o que, conseqüentemente, resulta na redução dos custos de transportes. Por fim, cabe a ressalva, que mesmo esta não sendo uma aplicação tão fundamentada, até pelas restrições apresentadas, é, comprovadamente, válida a utilização da melhoria proposta para o método de CW na localização de depósito.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo será dedicado a apresentar as conclusões obtidas a partir do desenvolvimento do presente estudo. Ao fim desta discussão, serão feitas recomendações para futuros estudos nesta área, que visam complementar e, conseqüentemente, melhorar os resultados obtidos ao fim deste trabalho.

### 5.1. Conclusões

O aumento na exigência dos mercados, aliado à competitividade entre as empresas, faz com que haja uma busca constante por melhorias no desempenho operacional, aproveitando ao máximo os recursos disponíveis de forma a minimizar, principalmente, os custos logísticos do processo produtivo. A logística, com um todo, envolve o processo de planejar, implementar e controlar, de maneira eficiente, o fluxo e a armazenagem de materiais, desde o ponto de origem até o ponto de consumo. Dentro da logística, o transporte é uma área central de decisões, primeiramente, pelos custos, e depois, pela relevância da função desempenhada.

Na literatura, vários estudos demonstram que a operação de movimentação de cargas absorve de um a dois terços dos custos logísticos totais, implicando na busca constante por melhorias na execução da atividade de transporte. Entre os mecanismos utilizados na otimização dos sistemas de transporte, destaca-se a roteirização de veículos, que desempenha um papel central no campo da logística e da distribuição física, e se caracteriza como o planejamento ótimo de rotas de entregas ou de coletas, de um ou vários depósitos, para uma série de cidades ou pontos de demanda, geograficamente dispersos. Esse mecanismo de distribuição pode ser desenvolvido para apoiar diversos tipos de serviços, como entrega postal, entrega de mercadorias, transporte público, coleta de resíduos, operações de frete, movimentação de tropas e equipamentos, entre outros.

Apesar da vasta aplicação, os problemas de roteirização são complexos e envolvem a otimização combinatória, pertencentes à categoria *NP-hard*, o que implica, na maioria dos casos, em elevado esforço computacional para se atingir

uma solução. Contudo, para se produzir soluções aproximadas de boa qualidade e em tempo reduzido, na maioria das aplicações, é utilizado os métodos heurísticos. Um dos métodos mais conhecidos e aplicados, inclusive muito utilizado em *softwares* comerciais de roteirização, é o método de Clarke e Wright. Esse método, assim como outros, apresentam algumas limitações nos algoritmos de solução, não contemplando, por exemplo, alguns aspectos que auxiliam a redução nos custos de distribuição.

Diante disto o presente trabalho teve por objetivo, desenvolver uma melhoria para o método heurístico de Clarke e Wright, baseando-se na carga que for destinada a cada ponto de entrega/coleta dos roteiros criados pela heurística. Esta melhoria partiu do princípio que o método de CW não contempla algumas situações específicas, este fornece como solução uma sequência de visitas que deve ser seguida, sem definir claramente em que sentido a visitação deve ser feita, o que, em muitos casos, influencia nas economias relacionadas ao custo na distribuição de produtos.

Perante o exposto, neste trabalho foi desenvolvido um modelo de roteirização, através da implementação computacional do método de CW e da melhoria proposta, utilizando-se o *software* de programação Delphi® 2010, que agrega algumas características importantes que facilitaram o desenvolvimento do modelo de roteirização, como a facilidade de se estabelecer interface com o usuário e com banco de dados.

No modelo de roteirização desenvolvido, buscou-se criar uma interface simples, visando facilitar a utilização do mesmo. Nesta é possível informar os principais dados utilizados na resolução de um problema de roteirização, como a velocidade do veículo, a jornada de trabalho, o tempo de parada, o carregamento máximo do veículo, o fator de escala  $k$  e a coordenada do depósito. A interface ainda possui um botão, que permite que o usuário acesse a base de dados (*.txt*) com os dados dos pontos de demanda, e outro que faz o modelo iniciar a roteirização. Todas estas informações a serem fornecidas pelo usuário, funcionam como dados de entrada para o modelo realizar a roteirização. Após este processo, o modelo retorna como dados de saída, na mesma interface, a matriz contendo as informações dos pontos de demanda (peso, rota e sequência), outra apresenta as rotas formadas, e, uma última, mostra a matriz de análise das rotas.

A matriz de análise das rotas apresenta um resumo que contém as informações sobre a solução gerada através da melhoria do método de CW. Esta solução contém o fator distância•peso da sequência da rota fornecida (ou rota atual), e o fator da sequência invertida deste mesmo roteiro. Caso este último seja menor, isto significa que o roteiro fornecido pelo método de CW deve ser invertido, pois demanda maior carga deslocada em certa distância (distância•peso).

A fim de avaliar a implantação do método de CW no modelo de roteirização, foram realizados três testes de validação, onde se estabeleceu, principalmente comparações com soluções obtidas por outras aplicações, e avaliou-se, também os roteiros gerados. Nos dois primeiros testes, onde se estabeleceu as comparações, modelo apresentou soluções muito semelhantes, quando comparado com as outras aplicações, o que, inicialmente, valida o método implementado. No que tange aos roteiros formados, observou-se, no geral, rotas com regiões específicas de entrega, com agrupamentos de pontos próximos entre si, e a característica forma de 'lágrima'. Além disto, houve uma divisão adequada das cargas demandas nos diversos roteiros criados, fazendo com que houvesse pouca capacidade ociosa nos veículos de entrega simulados. Assim, diante dos resultados, constatou-se que o método de CW implementado produz soluções válidas e coerentes com o algoritmo do referido método.

Com relação à melhoria implementada no modelo de roteirização, foi feita uma avaliação dos resultados fornecidos pela mesma, baseando-se nos mesmos problemas aplicados no teste de validação. Observou-se que as modificações nos sequenciamentos dos roteiros, resultam na economia de duas variáveis relevantes em termos de custo de distribuição, que são a quilometragem e o carregamento. Diante disto, foram apresentadas diferentes situações onde, em alguns casos, a economia gerada era potencializada ou pela distância, ou pela carga, e, em outros, por ambas as variáveis. Neste último caso, a economia proveniente da modificação do roteiro era maior, se comparado aos outros. Assim, conclui-se que a melhoria proposta para o método de CW contribui na otimização da solução, pois possibilita a redução dos custos de distribuição, em termos de distância percorrida e carregamento (peso).

A última parte dos resultados deste trabalho buscou apresentar outras possíveis aplicações para o modelo de roteirização desenvolvido. Uma destas

aplicações foi para o caso da criação de roteiros para representantes de venda, onde o objetivo principal é criar rotas de visitas, e não mais rotas de entrega de produtos. Deste modo, ao fim da aplicação, o modelo deve distribuir, a depender da capacidade máxima de visitas, pontos de demanda para cada representante. Os resultados obtidos foram válidos, e como era esperado, foram gerados roteiros com regiões específicas de entrega. A outra aplicação apresentada refere-se à utilização da melhoria desenvolvida, para estabelecer a melhor localização para um depósito, levando em consideração o fator distância•peso. Apesar desta aplicação somente ser válida em casos específicos, os resultados, obtidos através da comparação de dois cenários com diferentes localizações para o depósito, foram relevantes e contribuíram, de fato, para resolver o problema.

Por fim, cabe destacar que, apesar dos resultados obtidos com a implementação do modelo de roteirização, existem alguns fatores que limitam as soluções fornecidas pelo mesmo. Um destes está relacionado a pouca quantidade de testes de validação e aplicação realizados no trabalho, contemplando casos específicos que, muitas vezes, não envolvem a complexidade das situações reais. Além disto, existem outras variáveis importantes a serem consideradas em um problema de roteirização, como as janelas de tempo dos clientes para entrega/coleta, às prioridades na distribuição, as restrições de transito nas vias (estradas, ruas, etc.), entre outras. Assim, diante dos fatores apresentados, ressalta-se sobre a importância de novas implementações, que busquem agregar restrições e variáveis relevantes para otimização da solução deste tipo de problema.

## **5.2. Recomendações**

A implementação e melhoria no método de CW, desenvolvida neste trabalho, depois de diversos testes e aplicações, mostrou-se de extrema relevância na otimização dos sistemas de roteirização. Contudo, é fato que esta discussão, envolvendo melhorias nos métodos de roteirização, é muito mais abrangente, e permite uma infinidade de novas implementações nos algoritmos de solução. Uma possibilidade muito viável e de grande contribuição, para dar continuidade ao trabalho desenvolvido, é a aplicação de uma interface com SIG, que possibilite a

visualização dos roteiros gerados como solução, em mapas de determinadas regiões. Esta visualização é um aspecto que contribui bastante, tanto para avaliação dos resultados, como na utilização das rotas geradas. Aliado a esta questão, torna-se válida, também, a aplicação do modelo desenvolvido em um estudo de caso, a fim de avaliar o comportamento do mesmo em caso prático de distribuição.

Outra questão não contemplada nos objetivos deste trabalho, mas que fica como sugestão para trabalhos futuros, refere-se à estimativa de custo de distribuição a partir da economia gerada pela melhoria no método de CW. Como já foi discutido, o resultado final fornecido pelo modelo de roteirização são, primeiramente, as rota, e o fator distância•peso de cada uma delas. Para os roteiros onde houve modificação na sequência, pode-se chegar a um valor, que representa a economia pela mudança, em termos de distância percorrida e do carregamento. A questão é que, este valor, não é tão representativo em termos de custos, pois não é quantificado, de fato, quanto foi economizado através da mudança nos roteiros. A realização deste estudo seria extremamente importante para ratificar a relevância da melhoria desenvolvida em um sistema de roteirização.

## REFERÊNCIAS

- ABEPRO. **Áreas e Sub-áreas de Engenharia de Produção**, 2008. Disponível em: <<http://www.abepro.org.br/interna.asp?p=399&m=424&ss=1&c=362>>. Acesso: mar. 2011.
- ANDRADE, M. M. **Introdução à metodologia do trabalho científico**. 9. ed. São Paulo, Atlas, 2009. 162p.
- BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 616 p.
- BJARNADÓTTIR, Á. S. **Solving the Vehicle Routing Problem with Genetic Algorithms**. Department of Informatics and Mathematical Modelling, IMM Technical University of Denmark, DTU, 2004.
- BOTELHO, L. G. **Um Método para o planejamento operacional da distribuição**. 2003. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Industrial - Programa de Pós-Graduação em Logística Empresarial, PUC, Rio de Janeiro.
- CERVO, A. L. **Metodologia Científica**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.
- CORDEAU, J-F.; LAPORTE, G. **Tabu search heuristics for the vehicle routing problem**. Technical Report G-2002-15, Group for Research in Decision Analysis (GERAD), Montreal, 2002.
- CORRALES P., G. M. **Contribuição ao estudo da distribuição física de produtos em áreas urbanas: Integração de modelos matemáticos de roteamento com Sistemas de Informação Geográfica (SIG)**. 2001.124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Brasília, Brasília.
- 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.
- ENUMOTO, L. M. **Análise da distribuição física e roteirização em um atacadista do Sul de Minas Gerais**. 2005. 141 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.
- FOLSTA, M. F. **Ajuste do coeficiente global de transferência de massa de sais a partir de experimentos de solubilização em bancada**. Encontro Nacional de Hidráulica de Poços, 3, 2009.
- GALVÃO, R. D. ET AL. **Roteamento de veículos com base em sistemas de informação geográfica**. Gestão & Produção, v. 4, n. 2, p. 159-173, ago. 1997.
- GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

HESSE, M.; RODRIGUE, J-P. **The Transport Geography of Logistics and Freight Distribution**. Journal of Transport Geography, v. 12, n. 3, p. 171-184. 2004.

HVENEGAARD, R. A. **Avaliação do uso de algoritmo genético para roteirização com apoio dos sistemas de informações geográficos**. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá.

LAPORTE, G. **The vehicle routing problem: an overview of exact and approximate algorithms**. European Journal of Operational Research, v. 59, n. 3, p.345-358. 1992.

LUIZELLI, M. C.; GARCIA, V. J. **Análise comparativa entre heurísticas e Metaheurísticas aplicadas ao problema de roteamento de veículos**. In: Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, 24, 2010, Rio Grande. Anais...Rio Grande: FURG, 2010.

NOGUEIRA, K. P.; ESTRELA, G. Q. **Descrição dos gargalos no processo de distribuição física numa empresa de laticínios do Rio Grande do Norte**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 26, 2006, Fortaleza. Anais... Fortaleza: UFC, 2006. 1 CD-ROM.

NARUO, M. K. **O estudo do consórcio entre municípios de pequeno porte para disposição final de resíduos sólidos urbanos utilizando sistema de informações geográficas**. 2003. 286 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil com ênfase em Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos.

NETO, A. F.; LIMA, R. L. **Roteirização de veículos de uma rede atacadista com o auxílio de Sistemas de Informações Geográficas (SIG)**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 25., 2005, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: UFRGS, 2005.

NOVES, A. G. **Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição: estratégia, operação e avaliação**. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.

PELIZARO, C. **Avaliação de desempenho do algoritmo de um programa comercial para roteirização de veículos**. 2000. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil com ênfase em Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos.

REGO, C. R. L. **Estudo de viabilidade de implementação de software de roteamento para transporte de funcionários de refinaria da Petrobras**. 2008. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

RIBEIRO, G. M.; RUIZ, M. D. V.; DEXHEIMER, L. **Programa de roteamento de veículos: Aplicação no sistema de coleta dos correios**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 21, 2001, Salvador. Anais... Salvador: UFBA, 2001. 1 CD-ROM.

TEIXEIRA, R. G.; CUNHA, C. B. **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, 2002.

WU, L. **O problema de roteirização periódica de veículos.** 2007. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

**ANEXO 1 – Pontos de demanda do problema de roteirização disposto em Novaes (2005)**

nº	x (km)	y (km)	Q (kg)	nº	x (km)	y (km)	Q (kg)
1	1,26	55,65	203	31	2,67	56,26	175
2	1,52	55,12	125	32	1,86	55,38	228
3	2,66	55,01	183	33	3,48	54,07	177
4	2,33	56,20	208	34	0,83	55,38	133
5	2,79	55,80	141	35	0,83	54,88	162
6	3,27	56,23	188	36	2,40	55,41	243
7	2,53	56,67	209	37	2,44	54,04	310
8	3,26	55,62	215	38	3,67	55,86	39
9	0,50	55,78	300	39	3,20	55,73	167
10	3,67	55,63	172	40	2,04	55,42	274
11	1,34	55,04	267	41	1,43	55,82	68
12	3,77	55,41	251	42	3,01	55,00	199
13	3,29	55,69	128	43	3,37	55,35	206
14	3,41	55,30	230	44	1,36	54,93	150
15	3,14	55,67	158	45	1,07	56,43	307
16	3,54	56,02	254	46	2,27	54,77	173
17	0,84	55,14	207	47	3,54	54,16	198
18	2,82	55,81	189	48	2,70	55,19	159
19	1,29	55,98	147	49	1,36	56,32	253
20	2,27	54,99	223	50	2,48	56,93	91
21	3,40	54,49	171	51	2,13	56,54	198
22	2,29	56,12	112	52	3,49	55,36	216
23	2,37	55,16	340	53	1,92	55,50	225
24	1,40	54,15	175	54	2,44	54,25	315
25	3,59	54,32	309	55	2,62	56,01	303
26	0,70	55,55	75	56	3,17	56,35	252
27	1,38	54,16	220	57	1,69	55,28	76
28	2,03	53,80	286	58	3,55	55,11	159
29	2,21	53,70	218	59	1,47	56,17	187
30	3,32	56,43	165	60	0,90	54,65	94

**ANEXO 2 – Pontos de demanda do problema de roteirização aplicado no modelo analítico de CW**

nº	x (km)	y (km)	Q (kg)
1	2	3	2000
2	5	6	1500
3	7	2	1000
4	2	7	3000
5	10	2	2000
6	8	1	2500
7	18	17	2000
8	14	6	1500
9	6	13	500
10	4	17	3000
11	10	9	2000
12	16	15	2500
13	18	12	2000
14	18	2	1500
15	16	4	1500
16	10	14	3000
17	2	12	2500
18	16	8	2500
19	6	10	2500
20	14	11	3000

**ANEXO 3 – Matrizes gerados no problema de roteirização aplicado no Microsoft Excel®, a partir de um modelo analítico**

Matriz de Distâncias																					
D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
D	0,00	15,95	9,60	12,82	12,82	12,00	13,83	15,95	8,49	7,50	15,00	3,00	11,72	12,37	16,97	12,73	6,00	12,37	9,49	6,00	6,18
1	15,95	0,00	6,36	7,65	6,00	12,09	9,49	31,89	18,55	16,16	22,70	14,15	27,66	27,54	24,05	21,05	20,40	13,50	22,30	12,09	21,63
2	9,60	6,36	0,00	6,71	4,74	9,60	8,75	25,54	13,50	10,61	18,06	8,08	21,32	21,48	20,40	16,77	14,15	10,06	16,77	6,18	15,44
3	12,82	7,65	6,71	0,00	10,61	4,50	2,12	27,90	12,09	16,57	24,42	10,06	23,72	22,30	16,50	13,83	18,55	16,77	16,22	12,09	17,10
4	12,82	6,00	4,74	10,61	0,00	14,15	12,73	28,30	18,06	10,82	16,77	12,09	24,19	25,14	25,14	21,48	15,95	7,50	21,05	7,50	18,97
5	12,00	12,09	9,60	4,50	14,15	0,00	3,35	25,50	8,49	17,56	25,63	9,00	21,48	19,21	12,00	9,49	18,00	19,21	12,73	13,42	14,77
6	13,83	9,49	8,75	2,12	12,73	3,35	0,00	28,30	11,72	18,25	26,20	10,92	24,19	22,30	15,07	12,82	19,73	18,79	15,95	13,83	17,49
7	15,95	31,89	25,54	27,90	28,30	25,50	28,30	0,00	17,56	18,97	21,05	18,06	4,24	7,50	22,50	19,73	12,82	25,14	13,83	20,84	10,82
8	8,49	18,55	13,50	12,09	18,06	8,49	11,72	17,56	0,00	15,95	23,43	6,71	13,83	10,82	8,49	4,24	13,42	20,12	4,24	13,42	7,50
9	7,50	16,16	10,61	16,57	10,82	17,56	18,25	18,97	15,95	0,00	8,08	9,60	15,30	18,06	24,42	20,18	6,18	6,18	16,77	4,50	12,37
10	15,00	22,70	18,06	24,42	16,77	25,63	26,20	21,05	23,43	8,08	0,00	17,49	18,55	22,85	31,89	27,66	10,82	9,49	23,43	12,37	18,31
11	3,00	14,15	8,08	10,06	12,09	9,00	10,92	18,06	6,71	9,60	17,49	0,00	13,83	13,42	15,00	10,82	9,00	13,42	9,00	6,71	7,50
12	11,72	27,66	21,32	23,72	24,19	21,48	24,19	4,24	13,83	15,30	18,55	13,83	0,00	5,41	19,73	16,50	9,12	21,48	10,50	16,77	6,71
13	12,37	27,54	21,48	22,30	25,14	19,21	22,30	7,50	10,82	18,06	22,85	13,42	5,41	0,00	15,00	12,37	12,37	24,00	6,71	18,25	6,18
14	16,97	24,05	20,40	16,50	25,14	12,00	15,07	22,50	8,49	24,42	31,89	15,00	19,73	15,00	0,00	4,24	21,63	28,30	9,49	21,63	14,77
15	12,73	21,05	16,77	13,83	21,48	9,49	12,82	19,73	4,24	20,18	27,66	10,82	16,50	12,37	4,24	0,00	17,49	24,19	6,00	17,49	10,92
16	6,00	20,40	14,15	18,55	15,95	18,00	19,73	12,82	13,42	6,18	10,82	9,00	9,12	12,37	21,63	17,49	0,00	12,37	12,73	8,49	7,50
17	12,37	13,50	10,06	16,77	7,50	19,21	18,79	25,14	20,12	6,18	9,49	13,42	21,48	24,00	28,30	24,19	12,37	0,00	21,84	6,71	18,06
18	9,49	22,30	16,77	16,22	21,05	12,73	15,95	13,83	4,24	16,77	23,43	9,00	10,50	6,71	9,49	6,00	12,73	21,84	0,00	15,30	5,41
19	6,00	12,09	6,18	12,09	7,50	13,42	13,83	20,84	13,42	4,50	12,37	6,71	16,77	18,25	21,63	17,49	8,49	6,71	15,30	0,00	12,09
20	6,18	21,63	15,44	17,10	18,97	14,77	17,49	10,82	7,50	12,37	18,31	7,50	6,71	6,18	14,77	10,92	7,50	18,06	5,41	12,09	0,00

Matriz de Tempos																					
D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
D	0,00	0,35	0,21	0,28	0,28	0,27	0,31	0,35	0,19	0,17	0,33	0,07	0,26	0,27	0,38	0,28	0,13	0,27	0,21	0,13	0,14
1	0,35	0,00	0,14	0,17	0,13	0,27	0,21	0,71	0,41	0,36	0,50	0,31	0,61	0,61	0,53	0,47	0,45	0,30	0,50	0,27	0,48
2	0,21	0,14	0,00	0,15	0,11	0,21	0,19	0,57	0,30	0,24	0,40	0,18	0,47	0,48	0,45	0,37	0,31	0,22	0,37	0,14	0,34
3	0,28	0,17	0,15	0,00	0,24	0,10	0,05	0,62	0,27	0,37	0,54	0,22	0,53	0,50	0,37	0,31	0,41	0,37	0,36	0,27	0,38
4	0,28	0,13	0,11	0,24	0,00	0,31	0,28	0,63	0,40	0,24	0,37	0,27	0,54	0,56	0,48	0,35	0,17	0,47	0,17	0,42	
5	0,27	0,27	0,21	0,10	0,31	0,00	0,07	0,57	0,19	0,39	0,57	0,20	0,48	0,43	0,27	0,21	0,40	0,43	0,28	0,30	0,33
6	0,31	0,21	0,19	0,05	0,28	0,07	0,00	0,63	0,26	0,41	0,58	0,24	0,54	0,50	0,33	0,28	0,44	0,42	0,35	0,31	0,39
7	0,35	0,71	0,57	0,62	0,63	0,57	0,63	0,00	0,39	0,42	0,47	0,40	0,09	0,17	0,50	0,44	0,28	0,56	0,31	0,46	0,24
8	0,19	0,41	0,30	0,27	0,40	0,19	0,26	0,39	0,00	0,35	0,52	0,15	0,31	0,24	0,19	0,09	0,30	0,45	0,09	0,30	0,17
9	0,17	0,36	0,24	0,37	0,24	0,39	0,41	0,42	0,35	0,00	0,18	0,21	0,34	0,40	0,54	0,45	0,14	0,14	0,37	0,10	0,27
10	0,33	0,50	0,40	0,54	0,37	0,57	0,58	0,47	0,52	0,18	0,00	0,39	0,41	0,51	0,71	0,61	0,24	0,21	0,52	0,27	0,41
11	0,07	0,31	0,18	0,22	0,27	0,20	0,24	0,40	0,15	0,21	0,39	0,00	0,31	0,30	0,33	0,24	0,20	0,30	0,20	0,15	0,17
12	0,26	0,61	0,47	0,53	0,54	0,48	0,54	0,09	0,31	0,34	0,41	0,31	0,00	0,12	0,44	0,37	0,20	0,48	0,23	0,37	0,15
13	0,27	0,61	0,48	0,50	0,56	0,43	0,50	0,17	0,24	0,40	0,51	0,30	0,12	0,00	0,33	0,27	0,27	0,53	0,15	0,41	0,14
14	0,38	0,53	0,45	0,37	0,56	0,27	0,33	0,50	0,19	0,54	0,71	0,33	0,44	0,33	0,00	0,09	0,48	0,63	0,21	0,48	0,33
15	0,28	0,47	0,37	0,31	0,48	0,21	0,28	0,44	0,09	0,45	0,61	0,24	0,37	0,27	0,09	0,00	0,39	0,54	0,13	0,39	0,24
16	0,13	0,45	0,31	0,41	0,35	0,40	0,44	0,28	0,30	0,14	0,24	0,20	0,20	0,27	0,48	0,39	0,00	0,27	0,28	0,19	0,17
17	0,27	0,30	0,22	0,37	0,17	0,43	0,42	0,56	0,45	0,14	0,21	0,30	0,48	0,53	0,63	0,54	0,27	0,00	0,49	0,15	0,40
18	0,21	0,50	0,37	0,36	0,47	0,28	0,35	0,31	0,09	0,37	0,52	0,20	0,23	0,15	0,21	0,13	0,28	0,49	0,00	0,34	0,12
19	0,13	0,27	0,14	0,27	0,17	0,30	0,31	0,46	0,30	0,10	0,27	0,15	0,37	0,41	0,48	0,39	0,19	0,15	0,34	0,00	0,27
20	0,14	0,48	0,34	0,38	0,42	0,33	0,39	0,24	0,17	0,27	0,41	0,17	0,15	0,14	0,33	0,24	0,17	0,40	0,12	0,27	0,00

Matriz de Ganhos																					
190	D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
D																					
1																					
2		19,19																			
3		21,11	15,71																		
4		22,76	17,68	15,03																	
5		15,85	12,00	20,32	10,67																
6		20,29	14,69	24,52	13,92	22,48															
7		0,00	0,01	0,86	0,46	2,45	1,47														
8		5,88	4,59	9,21	3,24	12,00	10,60	6,87													
9		7,29	6,50	3,75	9,50	1,94	3,08	4,47	0,04												
10		8,25	6,54	3,40	11,05	1,37	2,63	9,89	0,05	14,42											
11		4,79	4,53	5,75	3,72	6,00	5,91	0,88	4,78	0,90	0,51										
12		0,00	0,00	0,81	0,34	2,24	1,36	23,42	6,37	3,92	8,16	0,89									
13		0,78	0,50	2,89	0,04	5,16	3,90	20,81	10,04	1,81	4,52	1,95	18,68								
14		8,87	6,17	13,29	4,64	16,97	15,73	10,42	16,97	0,05	0,08	4,97	8,96	14,34							
15		7,62	5,56	11,71	4,07	15,24	13,74	8,94	16,97	0,05	0,07	4,91	7,94	12,73	25,46						
16		1,54	1,45	0,26	2,87	0,00	0,10	9,13	1,07	7,32	10,18	0,00	8,59	6,00	1,34	1,24					
17		14,81	11,91	8,41	17,69	5,16	7,40	3,17	0,73	13,68	17,88	1,95	2,61	0,74	1,04	0,91	6,00				
18		3,13	2,32	6,08	1,25	8,76	7,37	11,60	13,73	0,22	1,06	3,49	10,70	15,15	16,97	16,21	2,76	0,02			
19		9,85	9,42	6,72	11,32	4,58	6,00	1,11	1,07	9,00	8,63	2,29	0,94	0,12	1,34	1,24	3,51	11,66	0,19		
20		0,50	0,35	1,90	0,03	3,41	2,52	11,31	7,17	1,32	2,87	1,68	11,19	12,37	8,38	7,99	4,68	0,49	10,26	0,09	

Ordenação dos Ganhos																					
Ordem	Ganho	Ordem	Ganho	Ordem	Ganho	Ordem	Ganho	Ordem	Ganho	Ordem	Ganho	Ordem	Ganho	Ordem	Ganho	Ordem	Ganho	Ordem	Ganho	Ordem	Ganho
1	25,46	22	15,71	43	11,32	64	8,76	85	6,08	106	4,47	127	2,45	148	1,11	169	0,34	190	0,00		
2	24,52	23	15,24	44	11,31	65	8,63	86	6,00	107	4,07	128	2,32	149	1,07	170	0,26				
3	23,42	24	15,15	45	11,19	66	8,59	87	6,00	108	3,92	129	2,29	150	1,07	171	0,22				
4	22,76	25	15,03	46	11,05	67	8,41	88	6,00	109	3,90	130	2,24	151	1,06	172	0,19				
5	22,48	26	14,81	47	10,70	68	8,38	89	6,00	110	3,75	131	1,95	152	1,04	173	0,12				
6	21,11	27	14,69	48	10,67	69	8,25	90	5,91	111	3,72	132	1,95	153	0,94	174	0,10				
7	20,81	28	14,42	49	10,60	70	8,16	91	5,88	112	3,51	133	1,94	154	0,91	175	0,09				
8	20,32	29	14,34	50	10,42	71	7,99	92	5,75	113	3,49	134	1,90	155	0,90	176	0,08				
9	20,29	30	13,92	51	10,26	72	7,94	93	5,56	114	3,41	135	1,81	156	0,89	177	0,07				
10	19,19	31	13,74	52	10,18	73	7,62	94	5,16	115	3,40	136	1,68	157	0,88	178	0,05				
11	18,68	32	13,73	53	10,04	74	7,40	95	5,16	116	3,24	137	1,54	158	0,86	179	0,05				
12	17,88	33	13,68	54	9,89	75	7,37	96	4,97	117	3,17	138	1,47	159	0,81	180	0,05				
13	17,69	34	13,29	55	9,85	76	7,32	97	4,91	118	3,13	139	1,45	160	0,78	181	0,04				
14	17,68	35	12,73	56	9,50	77	7,29	98	4,79	119	3,08	140	1,37	161	0,74	182	0,04				
15	16,97	36	12,37	57	9,42	78	7,17	99	4,78	120	2,89	141	1,36	162	0,73	183	0,03				
16	16,97	37	12,00	58	9,21	79	6,87	100	4,68	121	2,87	142	1,34	163	0,51	184	0,02				
17	16,97	38	12,00	59	9,13	80	6,72	101	4,64	122	2,87	143	1,34	164	0,50	185	0,01				
18	16,97	39	11,91	60	9,00	81	6,54	102	4,59	123	2,76	144	1,32	165	0,50	186	0,00				
19	16,21	40	11,71	61	8,96	82	6,50	103	4,58	124	2,63	145	1,25	166	0,49	187	0,00				
20	15,85	41	11,66	62	8,94	83	6,37	104	4,53	125	2,61	146	1,24	167	0,46	188	0,00				
21	15,73	42	11,60	63	8,87	84	6,17	105	4,52	126	2,52	147	1,24	168	0,35	189	0,00				

Pontos	3	Trechos	4			
<b>Calculo da Rota</b>						
Trecho	Inicio	Fim	T.Parada	T. Rota	T. Total	Carga
1	D	8	1	0,19	1,19	1500
2	8	14	1	0,19	1,19	1500
3	14	15	1	0,09	1,09	1500
4	15	D		0,28	0,28	
				<b>Total</b>	<b>3,75</b>	<b>4500</b>

## ANEXO 4 – Pontos de demanda da cidade de Petrolina-PE, com carga aleatória

nº	x (km)	y (km)	Q (kg)	nº	x (km)	y (km)	Q (kg)
1	330752	8961945	264	51	336277	8960868	192
2	329586	8962352	257	52	336705	8961704	208
3	329665	8962206	237	53	336901	8961858	249
4	330251	8960683	134	54	336903	8962343	157
5	330550	8965425	219	55	334350	8962302	269
6	336018	8963720	170	56	333489	8961545	229
7	336135	8964416	231	57	333924	8961666	164
8	336179	8964282	169	58	333606	8961831	274
9	329455	8961479	260	59	334025	8961960	176
10	329859	8961708	202	60	333277	8962218	160
11	330230	8962333	206	61	334200	8962498	202
12	330943	8962378	162	62	334390	8962428	177
13	331075	8962906	116	63	334815	8962548	233
14	330560	8964489	196	64	335059	8962494	231
15	331127	8962194	207	65	335195	8962426	208
16	331647	8962204	218	66	335193	8963111	168
17	330356	8963588	194	67	335669	8962878	196
18	331529	8965746	228	68	335868	8962528	217
19	337762	8959831	202	69	335909	8963186	176
20	330718	8965035	199	70	336357	8962380	231
21	331044	8964396	192	71	336448	8962196	236
22	331649	8964098	180	72	336529	8962904	192
23	337784	8959836	249	73	334232	8964274	238
24	331191	8964131	155	74	333858	8963958	227
25	329555	8963844	224	75	336915	8967615	267
26	336529	8964142	211	76	332083	8963715	151
27	332742	8962094	203	77	334350	8963491	193
28	335109	8964815	173	78	334116	8963136	224
29	335574	8967679	236	79	333535	8963314	180
30	333363	8961508	147	80	333391	8966197	197
31	339271	8960672	114	81	331557	8963735	224
32	330459	8965273	278	82	332071	8963936	193
33	330787	8965775	164	83	332019	8963432	199
34	329883	8962879	232	84	331780	8963300	209
35	337867	8964416	167	85	331567	8963314	244
36	336845	8963298	125	86	333335	8962881	221
37	336985	8965217	201	87	336431	8965929	199
38	336988	8964817	178	88	335932	8966520	214
39	337174	8964151	250	89	338704	8966847	156
40	337344	8964194	154	90	335953	8967691	174
41	337205	8961752	229	91	336611	8965425	150
42	336508	8965270	224	92	335540	8965913	162
43	334644	8963199	199	93	335898	8965886	194
44	334700	8960467	210	94	337027	8966204	236
45	335030	8960407	227	95	335876	8966085	243
46	337361	8961829	173	96	337325	8961915	205
47	334865	8961081	249	97	334230	8962259	219
48	334816	8960604	198	98	338471	8961741	179
49	335758	8960783	190	99	334050	8962977	193
50	336343	8960447	211	100	337138	8960877	142

## ANEXO 5 - Pontos de demanda da cidade de Petrolina-PE, com carga unitária

nº	x (km)	y (km)	Q (kg)	nº	x (km)	y (km)	Q (kg)
1	330752	8961945	1	51	336277	8960868	1
2	329586	8962352	1	52	336705	8961704	1
3	329665	8962206	1	53	336901	8961858	1
4	330251	8960683	1	54	336903	8962343	1
5	330550	8965425	1	55	334350	8962302	1
6	336018	8963720	1	56	333489	8961545	1
7	336135	8964416	1	57	333924	8961666	1
8	336179	8964282	1	58	333606	8961831	1
9	329455	8961479	1	59	334025	8961960	1
10	329859	8961708	1	60	333277	8962218	1
11	330230	8962333	1	61	334200	8962498	1
12	330943	8962378	1	62	334390	8962428	1
13	331075	8962906	1	63	334815	8962548	1
14	330560	8964489	1	64	335059	8962494	1
15	331127	8962194	1	65	335195	8962426	1
16	331647	8962204	1	66	335193	8963111	1
17	330356	8963588	1	67	335669	8962878	1
18	331529	8965746	1	68	335868	8962528	1
19	337762	8959831	1	69	335909	8963186	1
20	330718	8965035	1	70	336357	8962380	1
21	331044	8964396	1	71	336448	8962196	1
22	331649	8964098	1	72	336529	8962904	1
23	337784	8959836	1	73	334232	8964274	1
24	331191	8964131	1	74	333858	8963958	1
25	329555	8963844	1	75	336915	8967615	1
26	336529	8964142	1	76	332083	8963715	1
27	332742	8962094	1	77	334350	8963491	1
28	335109	8964815	1	78	334116	8963136	1
29	335574	8967679	1	79	333535	8963314	1
30	333363	8961508	1	80	333391	8966197	1
31	339271	8960672	1	81	331557	8963735	1
32	330459	8965273	1	82	332071	8963936	1
33	330787	8965775	1	83	332019	8963432	1
34	329883	8962879	1	84	331780	8963300	1
35	337867	8964416	1	85	331567	8963314	1
36	336845	8963298	1	86	333335	8962881	1
37	336985	8965217	1	87	336431	8965929	1
38	336988	8964817	1	88	335932	8966520	1
39	337174	8964151	1	89	338704	8966847	1
40	337344	8964194	1	90	335953	8967691	1
41	337205	8961752	1	91	336611	8965425	1
42	336508	8965270	1	92	335540	8965913	1
43	334644	8963199	1	93	335898	8965886	1
44	334700	8960467	1	94	337027	8966204	1
45	335030	8960407	1	95	335876	8966085	1
46	337361	8961829	1	96	337325	8961915	1
47	334865	8961081	1	97	334230	8962259	1
48	334816	8960604	1	98	338471	8961741	1
49	335758	8960783	1	99	334050	8962977	1
50	336343	8960447	1	100	337138	8960877	1