

## 2

### Revisão Bibliográfica

Questões como: Como achar o melhor caminho? - onde melhor pode ser definido, por exemplo, pelo caminho mais curto, pelo caminho com menor custo ou ainda pelo caminho que atenda as restrições de passar por determinados pontos (nós) ou arcos – é um desafio há bastante tempo.

Os primeiros registros de estudos a respeito de roteirização datam do começo do século XVIII. Desde então, diversas teorias foram desenvolvidas, além de ferramentas de suporte devido aos avanços tecnológicos, principalmente, na área computacional voltada para solucionar alguns tipos de algoritmos.

Este capítulo aborda o conjunto de princípios teóricos que suportam os métodos de roteirização em arcos e nós, tanto no que se refere à formulação quanto à resolução, além de abordar também sistemas e *softwares* voltados para resolução de problemas em roteirização. Ele está estruturado em 3 partes: 1– Problema de Roteirização, 2 – O Sistema de Informação Geográfica (GIS), e, 3 – TRANSCAD.

#### 2.1

##### Problema de Roteirização

A ‘Teoria de Grafos’, atualmente um dos temas de estudo da área de Pesquisa Operacional, teve seu começo desenvolvido pelo suíço Leonhard Euler com base no problema das pontes de Königsberg. Nessa época ‘Teoria de Grafos’ e roteirização em arcos se confundiam.

O problema das pontes era conseguir um caminho para uma procissão no qual se atravessasse cada uma das sete pontes sobre o rio Pregel apenas uma única vez, tendo que passar por todas e retornar ao ponto de origem. A disposição das pontes era conforme figura abaixo:

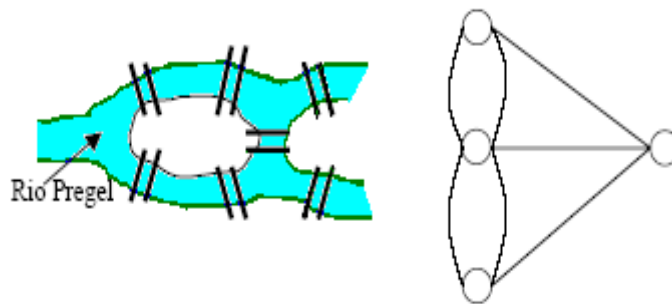


Figura 1: Pontes de Königsberg e grafo representativo

O matemático, Euler, demonstrou ser inviável a resolução desse problema. Entretanto, trouxe uma contribuição ao determinar as condições necessárias para que um problema desse tipo tivesse solução.

A área de estudo foi retomada fortemente na época da II Guerra Mundial, onde modelos quantitativos para a alocação de recursos se tornaram necessários para auxiliar as decisões logísticas. Após o término da Guerra, a área de estudo deixou de ser restrita aos militares, começando a ser aplicada também em organizações, além de ensinada e pesquisada nas universidades. Nestas instituições ganhou relevância, principalmente, no que tange ao gerenciamento de recursos.

A Pesquisa Operacional utiliza diferentes técnicas matemáticas – programação linear, programação não-linear e programação inteira. A maioria dos modelos de otimização empregados atualmente foi desenvolvida a partir da segunda metade do século XX. São eles: Caminho Mínimo (modelos desenvolvidos por Dijkstra, Ford-Moore-Bellman e Floyd-Warshall), Árvore de Peso Mínimo (modelos desenvolvidos por Prim e Kruskal), Emparelhamento (modelos desenvolvidos por Edmonds, Gabow e Micali e Vazirani), Fluxo Máximo (modelos desenvolvidos por Ford-Fulkerson), Fluxo de Custo Mínimo (Busacker), dentre outros.

Como nos demais problemas de otimização cabe ressaltar que os parâmetros fundamentais são: função objetivo, restrições e variáveis de decisão.

Os problemas básicos de roteirização em arcos, como o carteiro Chinês e seus desdobramentos são considerados clássicos nesta área. Nosso enfoque porém é outro, por esta razão, serão abordados os problemas de roteirização em nós.

Os grandes avanços na área de roteirização em nós foram propostos por Bodin e Golden (1981) e Bodin et al. (1983), que começaram seus estudos de roteirização em arcos para, depois, passarem a roteirização em nós.

E, especificamente para roteirização em nós, Christofides e Beasley (1984), definem o problema e o modelam matematicamente para um caso genérico deste tipo.

Outros que apresentaram contribuições para roteirização em nós foram: Solomon e Desrosiers (1988), Assad (1988), Ronen (1988), Brejon (1998), Bonasser (2005) e Znamensky (2006).

A base para definição de problemas e modelagens de roteirização em nós é representada pelo 'Problema do Caixeiro-Viajante' ou '*Traveling Salesman Problem*' (TSP). O problema consiste em encontrar um caminho que passe por determinados nós, comece e acabe no mesmo ponto e nunca repita um nó.

Esse problema clássico de roteirização de veículos, 'Problema do Caixeiro-Viajante', não considera restrições de capacidade do veículo, nem demandas que não sejam determinísticas e tem como função objetivo achar o caminho do mínimo custo.

Os caminhos do problema do Caixeiro-Viajante são também conhecidos como hamiltonianos, devido a Hamilton ter proposto um jogo que o representa. O jogo consistia de: partindo de um vértice e voltando ao mesmo ponto de origem, encontrar um caminho que passasse por todos os vértices do dodecaedro.

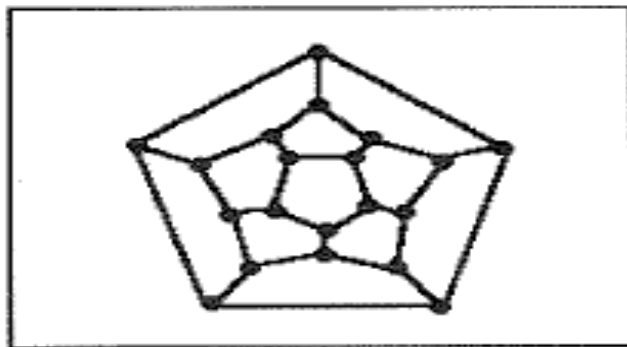


Figura 2: Grafo do problema hamiltoniano

Outros problemas clássicos de roteirização de veículos ou variações do 'Problema do Caixeiro-Viajante', serão apresentados a seguir de forma sintética:

Tabela 1: Principais problemas de roteirização em nós

|                                                                              | Sigla  | Quantos Roteiros? | Quantos Depósitos? | Tipo de Demanda | Restrições                                       | Quantas entregas por cliente? | Tempo  | Tipo de Frota | Variáveis de Decisão                         | Obs.:                                                                                                                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------|--------|-------------------|--------------------|-----------------|--------------------------------------------------|-------------------------------|--------|---------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Problema do Caixeiro-Viajante                                                | TSP    | 1                 | 1                  | Determinística  | -                                                | 1                             | 1 dia  | 1 veículo     | roteiro                                      | -                                                                                                                                                                                   |
| Problema de Múltiplos Caixeiros-Viajantes                                    | MTSP   | Múltiplos         | 1                  | Determinística  | -                                                | 1                             | 1 dia  | Homogênea     | roteiro                                      | Múltiplos Roteiros / Menor Custo / Passar por todos os nós uma única vez / Sair e Retornar ao mesmo ponto.                                                                          |
| Problema de Roteirização de Veículos                                         | VRP    | Múltiplos         | 1                  | Determinística  | capacidade do veículo                            | 1                             | 1 dia  | Homogênea     | roteiro                                      | É igual ao MTSP acrescido da restrição de capacidade de veículos.                                                                                                                   |
| Problema de Roteirização de Veículos c/ Múltiplos Depósitos                  | MDVRP  | Múltiplos         | Múltiplos          | Determinística  | capacidade do veículo                            | 1                             | 1 dia  | Homogênea     | roteiro                                      | É igual ao VRP acrescido da existência de Múltiplos Depósitos / Pode-se sair e retornar a qualquer depósito.                                                                        |
| Problema de Roteirização de Veículos c/ Demanda Estocástica                  | SVRP   | Múltiplos         | 1                  | Estocástica     | capacidade do veículo                            | 1                             | 1 dia  | Homogênea     | roteiro                                      | É igual ao VRP acrescido da existência de Demanda Estocástica                                                                                                                       |
| Problema de Roteirização de Veículos c/ Entregas Fracionadas                 | VRPSD  | Múltiplos         | 1                  | Determinística  | capacidade do veículo                            | $\geq 1$                      | 1 dia  | Homogênea     | roteiro / quantidade                         | É igual ao VRP acrescido da possibilidade de mais de uma entrega / A demanda pode ser maior ou menor que a capacidade do veículo.                                                   |
| Problema de Roteirização de Veículos c/ Dimensionamento de Frota Homogênea   | FSVRP  | Múltiplos         | 1                  | Determinística  | capacidade do veículo                            | 1                             | 1 dia  | Homogênea     | roteiro / dimensionam. da frota              | É igual ao VRP com duas Variáveis de Decisão: rota e dimensionamento da frota.                                                                                                      |
| Problema de Roteirização de Veículos c/ Frota Heterogênea Fixa               | HFFVRP | Múltiplos         | 1                  | Determinística  | capacidade do veículo                            | 1                             | 1 dia  | Heterogênea   | roteiro                                      | É igual ao VRP / Objetivo: determinar rota com mínimo custo fixo e variável dependente ou não do veículo.                                                                           |
| Problema de Roteirização de Veículos c/ Dimensionamento de Frota Heterogênea | FSMVRP | Múltiplos         | 1                  | Determinística  | capacidade do veículo                            | 1                             | 1 dia  | Heterogênea   | roteiro / dimensionam. e composição da frota | É igual ao FSVRP c/ decisão também da composição da frota / Objetivo: determinar rota e frota (tamanho e composição) com mínimo custo fixo e variável dependente ou não do veículo. |
| Problema de Roteirização de Veículos Periódico                               | PVRP   | Múltiplos         | 1                  | Determinística  | capacidade do veículo                            | 1                             | 1 dia  | Homogênea     | roteiro                                      | É igual ao VRP c/ horizonte de tempo $\geq 1$ dia                                                                                                                                   |
| Problema de Roteirização de Veículos c/ Tempo Dependente                     | TDVRP  | Múltiplos         | 1                  | Determinística  | capacidade do veículo tempo                      | 1                             | M dias | Homogênea     | roteiro                                      | Tempo entre dois clientes ou tempo entre cliente e depósito variando em função da distância e da hora do dia.                                                                       |
| Problema de Roteirização de Veículos c/ Janelas de Tempo                     | VRPTW  | Múltiplos         | 1                  | Determinística  | capacidade do veículo janela de tempo            | 1                             | 1 dia  | Homogênea     | roteiro                                      | É igual ao VRP c/ restrições de janela de tempo.                                                                                                                                    |
| Problema de Roteirização de Veículos c/ Janelas de Tempo Flexíveis           | VRPSTW | Múltiplos         | 1                  | Determinística  | capacidade do veículo janelas de tempo flexíveis | 1                             | 1 dia  | Homogênea     | roteiro                                      | É igual ao VRPTW c/ restrições de janela de tempo, que podem ser violadas mediante pagamento de penalidades.                                                                        |
| Problema de Coleta e Entrega                                                 | PDP    | Múltiplos         | 1                  | Determinística  | capacidade do veículo precedência entre tarefas  | 1                             | 1 dia  | Homogênea     | roteiro                                      | É igual ao VRP c/ restrições de precedência / Coleta deve preceder entrega / inviabiliza uso de algumas modelagens.                                                                 |

## 2.2

### O Sistema de Informação Geográfica (GIS)

#### 2.2.1

##### Introdução

Além de descrever sobre as teorias e conceitos matemáticos por trás do problema proposto como foi feito até então, é importante conhecer também sobre as aplicações diversas que estas teorias e os problemas clássicos geram como ferramentas para o dia a dia. O Sistema de Informação Geográfica é o conceito que engloba esse universo de aplicações nas quais se desdobraram as teorias.

Uma das primeiras utilizações empíricas de mapas e indicações geográficas foi a cerca de 15.500 anos onde caçadores desenhavam em suas cavernas animais por eles caçados com indicações de linhas e trilhas para indicar rotas migratórias dos mesmos.

Muito menos rudimentar e já próximo a Era Contemporânea, John Snow em 1854 utilizou-se da cartografia dos infectados por cólera em uma região londrina para descobrir com precisão um poço de água causador do surto local da doença. De lá pra cá, avançou-se bastante e a cada dia mais rico é este universo.

#### 2.2.2

##### Definições

Um Sistema de Informação Geográfica (SIG) ou em inglês *Geographic Information Systems* (GIS) é um tipo específico de geotecnologia ou geoprocessamento que através de um conjunto de técnicas computacionais relacionadas com a coleta, armazenamento e tratamento de informações espaciais ou georreferenciadas, utiliza sistemas específicos a cada aplicação que, de alguma forma, se utiliza do espaço físico geográfico.

De uma forma concisa, um GIS é composto por hardware, software e dados para captura, gerenciamento, análise, e visualização de informações referenciadas geograficamente.

Apesar de muitas vezes ser associado unicamente a informações em mapas, um GIS pode, no entanto, prover informações de diversas formas como bancos de dados ou ferramentas de modelos de solução.

### 2.2.3

#### Aplicações

A cada momento surge uma nova aplicação ou uso para sistemas de informação geográfica. O objetivo a seguir é apresentar algumas das aplicações mais usuais encontradas. A relação certamente pode ser maior e abordar mais áreas de aplicação. Portanto, uma síntese das aplicações mais clássicas para o uso do GIS pode ser a seguinte:

- **Gestão Municipal:** Problema clássico das geotecnologias, Planejamento urbano, mapeamento de áreas de saúde pública, cadastro imobiliário são apenas alguns exemplos de aplicações possíveis.
- **Meio Ambiente:** Ferramentas como imagens de satélite e radares tem sido amplamente utilizados para monitoramento de regiões remotas, distantes e enormes como por exemplo a região amazônica.
- **Planejamento de Negócios:** As ferramentas de geoprocessamento são capazes de analisar diversos fatores críticos de sucesso para a entrada ou expansão de um negócio. Perguntas como onde estão os clientes, os seus concorrentes, onde instalar seu centro de distribuição podem perfeitamente serem respondidas com aplicações GIS.
- **Utilidades e Facilidades:** Os serviços públicos de saneamento, energia elétrica, e principalmente nos últimos tempos telecomunicações tem utilizado amplamente soluções com Sistema de

Informação Geográfica para determinar áreas de atuação, monitoramento de rede, análise de falhas no sistema dentre outras aplicações.

Percebe-se claramente que as principais aplicações trabalham sempre com grandes volumes de informações. Desta forma é de extrema importância que os softwares que tratarão estes dados possuam uma robustez grande e sejam extremamente flexíveis nas opções de tratamento que se possa querer aplicar para a solução do problema.

#### 2.2.4

##### Principais Softwares de GIS

Dentre as opções cada vez maiores que o mercado de softwares a cada dia oferece, os três principais softwares de GIS são: *ArcGIS* da *ESRI*, *Maptitude* da *Caliper* e *MapInfo* da *MapInfo Corporation*.

Alguns destes *softwares* de GIS possuem módulos específicos para análise de problemas logísticos e de transporte. Pode-se destacar dois dos principais módulos existentes no mercado: O *TransCad* da *Caliper* e o *ArcGIS Network Analyst* da *ESRI*.

A presente dissertação utilizará para suas análises o *software Transcad*. Por esta razão iremos descrevê-lo com maior profundidade no próximo item. O software foi o escolhido por uma simples razão: disponibilidade. Este é o programa disponibilizado pela universidade para análises neste segmento.

#### 2.3

##### TRANSCAD - O Software utilizado

O presente trabalho baseia toda a sua parte analítica e de busca de resultados ótimos em um software comercial criado especificamente para proporcionar soluções para problemas com gerenciamento a análises de dados de transporte: o TRANSCAD.

Desta forma é essencial conhecer em detalhes esta ferramenta. Tal abordagem buscará explicitar nos tópicos que se seguem as principais características e capacidades da ferramenta e desta forma contextualizar o universo em que buscaremos os resultados do estudo.

Um tópico em especial abordado com maior profundidade será a descrição do algoritmo utilizado pela ferramenta para a roteirização de veículos.

Por fim, uma análise das limitações da versão do *software* utilizado no caso particular desta análise, será elaborada buscando desta forma descrever as condições de contorno em a mesma ocorreu.

### 2.3.1

#### Descrição do *software* e suas capacidades

Segundo a *Caliper Corporation*, fabricante do *TransCad*, o mesmo pode ser definido da seguinte forma:

“O *TransCad Transportation GIS Software* oferece um integrado conjunto de métodos classificados como estado da arte para solução de problemas analíticos chave em planejamento, gerenciamento e operações em transporte. O *TransCad* é utilizado de forma abrangente para desenvolvimento e manutenção de banco de dados em transporte, previsão de demanda, gerenciamento operacional além de *scheduling* e roteirização de veículos.”

De fato, o *TransCad* é um sistema GIS que combina um conjunto único de capacidades de cartografia digital, gestão de dados geográficos, e apresentação gráfica com ferramentas sofisticadas para aplicações em transporte, pesquisa operacional, e modelos estatísticos.

Ele foi projetado para auxiliar profissionais de transporte em seu trabalho cotidiano, e fornecer uma ferramenta de gerenciamento de dados estratégicos de transporte. Tem aplicações para todos os tipos de dados de transporte e para todos

os modais de transporte, e é ideal para a construção de informações de transporte e sistemas de suporte à decisão.

TransCad possui cinco componentes principais:

- O TransCad GIS é um dos mais poderosos sistemas de informação geográfica (GIS) disponíveis hoje no ambiente operacional Windows. É um completo sistema de informação geográfica que permite analisar e mapear os sistemas de transporte no bairro, cidade, estado, país ou escala mundial.
- Um extenso modelo de dados que fornece ferramentas essenciais para visualização e manipulação de dados de transporte. Usando esta seleção de capacidades, você pode exibir, editar e analisar seus próprios dados.
- A maior coleção de procedimentos de análise de transporte presentes em um único pacote de software. Com esses instrumentos, pode-se ligar as informações já presentes no software com seus próprios dados.
- Amplo e abrangente conjunto de dados de transporte, geográficos e demográficos. Infelizmente a maior parte dos dados referem-se a mapas a informações Norte-Americanas.
- Uma capacidade de permitir a criação macros, add-ins, aplicações em servidores, e front-ends customizados.

TransCad fornece ainda uma variedade de ferramentas de análise, interpretação, e torna efetivo o uso de mapas para apresentações e gráficos. Estas ferramentas de apoio, ou extensões estão presentes na estrutura do software. São elas:

- A tela do TransCad
- Mapas, Planilhas, Gráficos, e Layouts
- Ambientes de Trabalho
- Camadas
- Capacidade de Etiquetagem num Mapa
- Dimensionamento e localização de Mapas
- Mapas e Mapas Temáticos
- Redes e caminho mais curtos
- Rotas e sistemas de roteamento
- Matrizes
- Procedimentos (Procedures)

A figura abaixo ilustra a utilização do *TransCad* em sua tela:

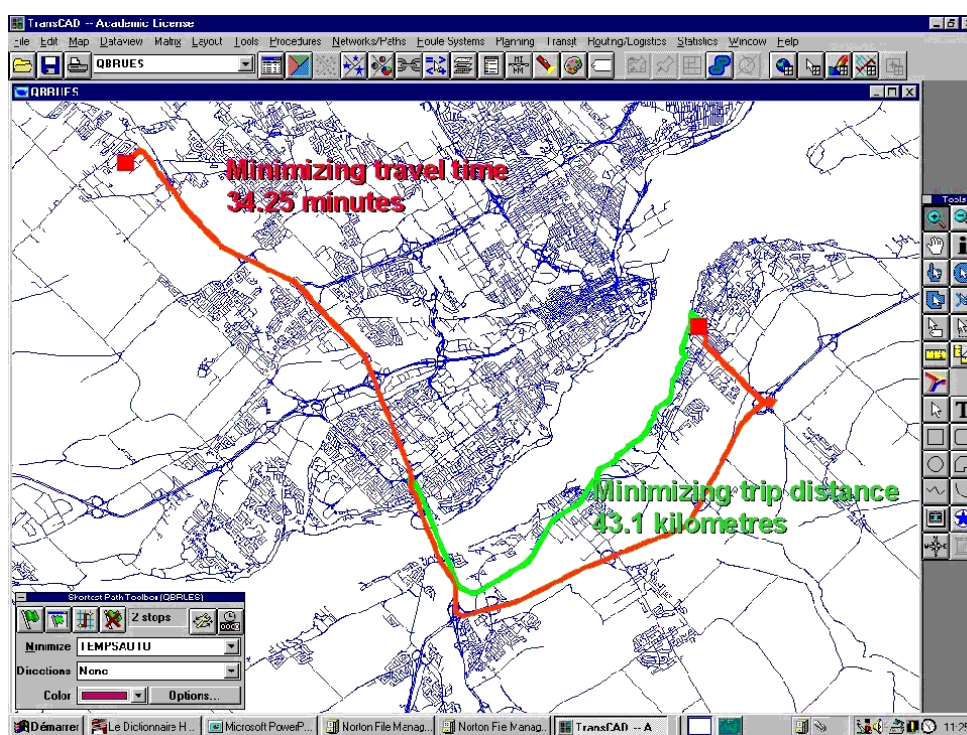


Figura 5: Visão geral *TRANSCAD*

Paulo Mendes (2005) descreve algumas aplicações que as extensões do *software* conseguem prover. Análise de Rede, Análise de Transporte Público, Planejamento de transporte e modelagem de demanda por viagens, Gerenciamento de território e localização de instalações são alguns exemplos citados por ele.

Para este trabalho, porém, as aplicações mais importantes são as que versam sobre o tema roteirização.

- Roteirização de veículos: O software contém uma gama de ferramentas para solução de problemas de busca e entrega que incluem restrições quanto ao horário que a parada pode ser realizada, tempo de viagem, saída de múltiplos depósitos e uso de frota de veículos não homogênea. Esta é a aplicação que será utilizada para a solução do problema proposto.
- Roteirização em Arcos: são uma classe de problemas que envolvem encontrar meios eficientes de viajar, em um conjunto de arcos de uma rede de transporte. A roteirização em arcos possui uma série de aplicações no setor público e privado, que incluem limpeza de ruas, coleta de lixo sólido, entrega de cartas, retirada de neve e operações porta-a-porta. Em um problema típico de roteirização em arcos, pessoas ou veículos são despachados de um ou mais depósitos para percorrer um conjunto de ruas.

### 2.3.2

#### **Procedimento para solução de Roteirização de Veículos com *TransCad* - a Metodologia do software**

Após uma descrição geral de todas as possibilidades oferecidas pelo *Transcad* para problemas de transporte, é importante concentrar nossa descrição no problema específico desta dissertação: a roteirização de veículos.

A melhor forma para introduzir um problema de roteirização de veículos é ilustrando com um exemplo. Imagine uma empresa que possui um centro de distribuição que fornece seus produtos para 30 revendedores situados em várias localidades diferentes.

A cada dia, caminhões precisam entregar produtos do centro de distribuição para cada um dos revendedores e então retornar para o centro. Cada caminhão possui uma capacidade fixa de transporte que é limitada pelo peso ou volume dos produtos que este caminhão pode transportar. Cada revendedor possui uma demanda que é o peso ou volume de bens que precisa ser entregue por dia. A forma mais simples do problema de roteirização de veículos consiste na determinação da companhia do número de caminhões que são necessários para atender a demanda de cada loja a descobrir as rotas com os custos mais eficientes para cada caminhão.

Diversos são os fatores que podem fazer com que o problema da roteirização torne-se mais complexo:

- Há mais de um centro de distribuição e os revendedores podem ser supridos por caminhões de qualquer um dos centros. Este tipo de problema é conhecido como problema com múltiplos depósitos;
- Existem restrições de tempo para entregas em algumas ou todas as revendedoras. Este tipo de restrição é conhecido como janela de tempo;
- Existem restrições de tempo nos próprios Centros de Distribuição;
- Cada parada requer uma certa quantidade de tempo para o serviço ser realizado. Na maior parte dos casos, este tempo é fixo e independe da demanda a ser entregue. Outras vezes, este tempo é dependente e proporcional à demanda que está sendo entregue.

Para todos estes fatores expostos acima, o *TransCad* mostra ser uma eficiente ferramenta para a busca da melhor solução do problema. Existem, porém, alguns tipos de situações que tornam a ferramenta pouco eficaz para roteirizar como, por exemplo:

- Frotas mistas: As frotas incluem tipos diferentes de veículos com tamanhos e restrições de capacidade diferentes;
- *Mix* de produtos: Diversos tipos de produtos devem ser entregues pelo mesmo veículo porém alguns veículos possuem restrições para transportar algum tipo de produto;
- Caminhos com o final em aberto: Veículos que não necessitam retornar à base no final de sua rota ou podem visitar centros de distribuição diferentes na saída e no retorno.

Para tais problemas, o fabricante do *software* oferece a possibilidade de desenvolvimento de soluções customizadas. Para o presente estudo, a versão do software sem customizações será utilizada na busca de uma roteirização eficiente.

São quatro as etapas necessárias no uso do *Transcad* para solucionar o problema com a roteirização de veículos:

- Preparar para a inclusão dos dados;
- Criar as Matrizes de rotas;
- Solucionar o problema de roteirização de veículos;
- Apresentar os resultados.

Na preparação para a inclusão de dados, é preciso criar arquivos com campos obrigatórios e opcionais que contenham informações dos pontos de partida (depósitos) e de parada da cada rota. Os campos obrigatórios devem ser preenchidos em quaisquer casos para uma roteirização. Os campos opcionais devem ser preenchidos de acordo com o tipo de restrição que a sua roteirização irá exigir. Um depósito precisa dos seguintes dados:

Tabela 2: Campos do depósito

| <b>Campo</b>          | <b>Tipo de registro</b>  | <b>Conteúdo</b>                                                               | <b>Tipo de campo</b> |
|-----------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| ID                    | Inteiro                  | Um número que identifica o depósito de forma única                            | Obrigatório          |
| Nome                  | <i>String</i> ou Inteiro | O Nome ou número usado para identificação do depósito nos relatórios de rotas | Obrigatório          |
| ID do Nó              | Inteiro                  | O ID do nó mais próximo do depósito em questão                                | Opcional             |
| Capacidade do Veículo | Real                     | A capacidade dos veículos que operam neste depósito                           | Opcional             |
| Hora de abertura      | Inteiro                  | Horário inicial para a saída dos veículos                                     | Opcional             |
| Hora de Fechamento    | Inteiro                  | Horário Final para o retorno dos veículos                                     | Opcional             |

Já uma parada necessita dos seguintes campos:

Tabela 3: Campos de parada

| <b>Campo</b>       | <b>Tipo de registro</b>  | <b>Conteúdo</b>                                                             | <b>Tipo de campo</b> |
|--------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| ID                 | Inteiro                  | Um número que identifica a parada de forma única                            | Obrigatório          |
| Nome               | <i>String</i> ou Inteiro | O Nome ou número usado para identificação da parada nos relatórios de rotas | Obrigatório          |
| Demanda            | Numérico                 | A demanda da parada                                                         | Obrigatório          |
| ID do Nó           | Inteiro                  | O ID do nó mais próximo da parada em questão                                | Opcional             |
| Hora de abertura   | Inteiro                  | Horário inicial para a chegada a parada                                     | Opcional             |
| Hora de Fechamento | Inteiro                  | Horário Final em que a parada pode ser atendida                             | Opcional             |
| Tempo Fixo         | Numérico                 | Tempo mínimo requerido para a parada em minutos                             | Opcional             |
| Tempo por unidade  | Numérico                 | O tempo extra de serviço requerido para cada unidade demandada na parada    | Opcional             |
| ID de Depósito     | Inteiro                  | A identificação do depósito que serve aquela parada                         | Opcional             |

O passo seguinte consiste na criação das matrizes de roteirização. Estas matrizes são arquivos contendo a distância e o tempo de viagem entre cada depósito e uma parada, bem como, entre cada par de paradas. Este arquivo é a base para um procedimento de roteirização de veículos. Existem duas formas para que o *software* calcule a distância e os tempos de viagem entre os pontos: utilizando a rede georeferenciada ou usando conexões em linha reta entre os pontos em questão. O método pela rede é mais preciso, porém, requer que os dados dos mapas contenham tais informações.

Com as matrizes geradas, a etapa seguinte é a busca da solução da roteirização. Nesta etapa, após a escolha de quais depósitos e quais nós configurarão a rodada, o *Transcad* produz três documentos de saída de dados:

- Um arquivo de texto contendo o itinerário de cada veículo.
- Uma tabela contendo a lista de paradas da cada rota. Esta tabela é produzida somente se a matriz de distância foi construída baseada numa rede georeferenciada.
- Um arquivo de resumo da rota contendo informações como: data da geração dos resultados, arquivos de *Input* utilizado, arquivos de *Output* gerados, etc.

Diversas rodadas podem ser feitas, modificando parâmetros de entrada na busca de uma solução ótima para o problema. Por fim, se a Matriz de rotas foi criada baseada na rede georeferenciada, a apresentação dos resultados gera um arquivo gráfico que mostra o caminho ótimo atingido no mapa que originou as matrizes para o estudo.

Desta forma, atinge-se com o *Transcad* o objetivo final na roteirização de veículos.

### 2.3.2.1

#### O método das economias de Clarke e Wright

O *Transcad* utiliza a heurística de Clarke and Wright (1964) para atingir a sua rota ótima. Uma revisão breve desta heurística será apresentada a seguir.

A heurística das economias de Clarke e Wright (1964), bastante conhecida e ainda muito utilizada como parte de diversos procedimentos, foi originalmente desenvolvida para solucionar o problema clássico de roteamento de veículos. Baseia-se na noção de economias, que pode ser definido como o custo da

combinação, ou união, de duas sub-rotas existentes. Trata-se de uma heurística iterativa de construção baseada numa função gulosa de inserção.

Inicialmente, cada parada é servida por um veículo, constituindo rotas entre o depósito e cada parada. Seja  $c_{ij}$  o custo de viagem partindo de uma parada  $i$  a uma parada  $j$ , podendo ser dado em distância percorrida ou tempo de deslocamento. Segundo definição de Liu & Shen (1999), duas rotas contendo as paradas  $i$  e  $j$  podem ser combinadas, desde que  $i$  e  $j$  estejam ou na primeira ou na última posição de suas respectivas rotas e que a demanda total das rotas combinadas não ultrapasse a capacidade do veículo.

Em cada iteração, todas as combinações de rotas possíveis são analisadas através da fórmula  $s_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij}$ , onde 0 representa o depósito. As duas rotas que apresentarem a maior economia de combinação são unidas. Por ser sempre escolhida a maior economia dentre as possíveis, a função de escolha é dita gulosa. Como a cada nova combinação de sub-rotas as economias são novamente calculadas e atualizadas para a próxima combinação de sub-rotas, o método é dito iterativo, (LIU & SHEN, 1999).

Uma versão seqüencial do algoritmo, descrita em Cordeau et al. (2002), 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. A versão do algoritmo, inicialmente descrita, em que a maior economia é sempre escolhida, obtém melhores resultados que a versão seqüencial.

Ainda segundo Cordeau et al. (2002), o algoritmo se mostrou bastante simples e rápido, sendo fácil de codificar, principalmente pela ausência de parâmetros. A implementação de um algoritmo de pós-otimização é bastante comum, apresentando melhora em precisão e baixo incremento de tempo à resolução do algoritmo.

Porém, muitos pesquisadores observaram que a solução construída apresentava baixa qualidade e apresentava um grande número de rotas longas em

circunferências. Por essa razão, a deficiência em flexibilidade é considerada a pior característica do algoritmo. Tendo isso em vista, algumas melhorias para o algoritmo Clark e Wright já foram propostas, sendo uma delas a utilização de economias generalizadas na forma  $s_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - \lambda c_{ij}$ , buscando produzir rotas mais compactas, sendo  $\lambda$  um parâmetro positivo.

A adição de outras restrições pode ser incorporada ao algoritmo. Porém, isso resulta freqüentemente, numa deteriorização da qualidade da solução gerada. Isso pode ser explicado, em parte, pelo princípio guloso de inserção, não oferecendo nenhum mecanismo para desfazer uma incorporação insatisfatória de um cliente a sub-rota, (CORDEAU et al., 2002).

### 2.3.3

#### Demais restrições

Além das restrições internas da ferramenta de otimização do *Transcad* para a solução de problemas, já apresentadas anteriormente, é importante observar outros pontos restritivos apresentados que puderam ser observados durante a execução do estudo proposto. Os tópicos a seguir, de forma diferente das restrições na estrutura de construção do *software*, não foram ou são impeditivos para a realização dos estudos e análises. Contudo, tais peculiaridades apresentaram-se como barreiras limitantes de um melhor aproveitamento para utilização do *software* servindo como pontos qualitativos negativos em uma análise de viabilidade de utilização dos mesmos em situações do dia-a-dia.

O primeiro deles é a inexistência de uma versão em português do *software* em questão. O fato do idioma ser o inglês não gera, para o meio acadêmico, grandes dificuldades. Porém, na utilização em empresas nacionais por funcionários desconhecedores do idioma, tal característica pode vir a contar como negativa. E como consequência natural dessa restrição observa-se que o suporte oferecido pela desenvolvedora do *software* esbarra na mesma barreira do idioma. Além disso, a lista de complementos oferecidos para enriquecer a ferramenta e torná-la mais útil para as corporações que queiram adquiri-la é, essencialmente,

baseada em dados do universo norte-americano. Dessa forma, mapas completos, estudos, análises e pesquisas de campo são exclusivamente de regiões e Estados Norte-Americanos. Para dados brasileiros, é preciso a busca em fontes alternativas de dados e, como consequência, algum tipo de perda pode vir a surgir na importação destes dados para o *software*.

Por fim, os dois últimos observados dizem respeito às condições de garantia da originalidade do produto. Estes apesar de limitadores, são vitais para a proteção tanto quanto a eventual cópia e pirataria de *software* de tão alto valor de mercado. São eles a chave decodificadora de proteção e as restrições de dias e horários para uso dos computadores compartilhados da Universidade. Tais mecanismos de garantia da autenticidade do produto limitam o uso do *software* com mais profundidade. Dessa forma, com menos tempo de utilização, a velocidade de familiarização com o mesmo e o consequente aumento de rendimento com a ferramenta não ocorre.