



ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS DE UMA REDE ATACADISTA COM O AUXÍLIO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)

Alberto Farkuh Neto

Engenheiro de Produção Mecânica

Universidade Federal de Itajubá

Instituto de Engenharia de Produção e Gestão

betofneto@yahoo.com.br

Prof. Dr. Renato da Silva Lima

Professor Adjunto

Universidade Federal de Itajubá

Instituto de Engenharia de Produção e Gestão

rslima@unifei.edu.br

RESUMO

Problemas de Roteirização e Programação de Veículos destacam-se como um daqueles de maior incidência em empresas de logística, face ao seu caráter altamente operacional. O objetivo desse trabalho é apresentar o processo de roteirização de veículos de uma rede atacadista do sul de Minas Gerais com o auxílio de um Sistema de Informações Geográficas (SIG). A partir da simulação de cenários, os efeitos da variação de alguns parâmetros do problema (horários de atendimento, capacidade e número de veículos) são analisados na busca de uma solução satisfatória. O trabalho foi realizado utilizando-se dados de entrega do Atacadista Vila Nova, para o Centro de Distribuição (CD) localizado em Poços de Caldas e clientes nas cidades de Itajubá, Pouso Alegre e Poços de Caldas. Pôde-se comprovar que o SIG é uma valiosa ferramenta de apoio à decisão, pela facilidade e rapidez de geração de diferentes cenários alternativos de decisão.

Palavras-chave: *Logística, Distribuição Física, Roteirização e Programação de Veículos, Sistema de Informações Geográficas (SIG).*

Vehicle Routing and Scheduling in a wholesale chain supported by Geographic Information System (GIS)

ABSTRACT

Vehicle Routing and Scheduling problems can be considered as one of the most incident in logistics' companies, due to highly operational characteristics. The goal of this work is to present the vehicle routing process in a wholesale chain located in the south of Minas Gerais state (Brazil), supported by Geographic Information System (GIS). Starting from simulations of scenarios, the effects of variation of some parameters' problems (time windows, capacity and number of vehicles) are analyzed in the way to search a satisfactory solution. The work was carried out using deliveries' data from Vila Nova wholesale, for the distribution center located in Poços de Caldas and costumers in the cities of Itajubá, Pouso Alegre and Poços de Caldas. The results have confirmed that GIS is a powerful support decision tool, due to its facility and speed for generation of alternative decision scenarios.

Keywords: Logistics, Physical Distribution, Vehicle Routing and Scheduling, Geographic Information System (GIS).

1. INTRODUÇÃO

O transporte é uma área chave de decisão dentro do composto logístico. À exceção do custo de bens adquiridos, o transporte absorve, em média, a porcentagem mais elevada de custos do que qualquer outra atividade logística. Embora as decisões de transporte se expressem em uma variedade de formas, as principais são a seleção do modal, a roteirização do transportador, a programação de veículos e a consolidação do embarque (BOWERSOX E CLOSS, 1997).

A atividade de distribuição de uma empresa compreende toda a movimentação e estocagem de bens “*a jusante*” da fábrica. A última etapa nesta movimentação (dos centros de distribuição para os consumidores), a qual pode ser definida como transporte local ou entrega, representa o elo mais caro da cadeia de distribuição (CHRISTOFIDES *et al.*, 1981). Para esta etapa ser realizada de maneira eficiente, a empresa deve desenvolver o planejamento e a execução da atividade de transporte de forma racional (BODIN *et al.*, 1983).

A importância dos problemas de distribuição diz respeito a magnitude dos custos associados a esta atividade. BODIN *et al.* (1983) mostraram que os custos de distribuição física agregam cerca de 16% do valor final de um item. BALLOU (2001) relata que os custos logísticos representam cerca de 23% do PIB americano, e destes custos, o transporte representa algo em torno de dois terços.

O termo *Roteirização*, embora não encontrado nos dicionários de língua portuguesa, é a forma que vem sendo utilizada como equivalente ao inglês “*routing*” para designar o processo de determinação de um ou mais roteiros ou seqüências 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. O termo *roteamento* também é utilizado alternativamente por alguns autores, embora este termo seja mais comumente utilizado quando associado às redes computacionais (CUNHA, 1997).

Um problema real de roteirização é definido por três fatores fundamentais: decisões, objetivos e restrições (PARTYKA E HALL, 2000). As *decisões* dizem respeito à alocação de um grupo de clientes, que devem ser visitados, a um conjunto de veículos e 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 capitais tão baixos quanto possível. Por outro lado, deve obedecer a certas *restrições*. Em primeiro lugar, deve-se completar as rotas com os recursos disponíveis, mas cumprindo totalmente os compromissos assumidos com os clientes. Em segundo lugar, deve-se 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 às velocidades máximas, horários de carga/descarga, tamanho máximo dos veículos nas vias públicas, etc.

Problemas de roteirização ocorrem com bastante freqüência na distribuição de produtos e serviços. Alguns exemplos são listados a seguir (NOVAES, 2004):

- 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.

Com o crescimento nas últimas décadas da utilização dos computadores e da capacidade de processamento dos mesmos, *software* específicos vêm sendo desenvolvidos para resolver os problemas de roteirização, os chamados roteirizadores (GALVÃO, 1997). No entanto, muitos deles pecam por não serem capazes de abordar a componente espacial do problema, como por exemplo a localização geográfica exata dos pontos a serem atendidos (clientes) ou a consideração das restrições de tráfego rodoviário, trabalhando com médias ou distâncias euclidianas. Uma das alternativas para esse problema é a utilização de roteirizadores como módulos associados a uma plataforma de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), ou *Geographic Information Systems* (GIS). O SIG, de modo mais amplo, é uma ferramenta que permite manipular dados georeferenciados e alfanuméricos para, a partir de análises espaciais, apoiar a tomada de decisão espacial, como a definição do melhor roteiro de entregas a ser seguido, por exemplo.

Assim, o objetivo desse trabalho é apresentar o processo de roteirização de veículos de uma rede atacadista do sul de Minas Gerais com o auxílio de um SIG. A partir da variação de diferentes parâmetros do problema, como a capacidade de veículos de entrega, horários de atendimento de clientes, tempos de descarregamento de mercadorias, entre outros, diversos cenários alternativos de decisão foram simulados, procurando-se avaliar a influência dessas variações nos diferentes roteiros propostos pelo SIG. Foram utilizados no trabalho dados reais do Atacadista Vila Nova, separados em uma amostra que continha dados referentes a dois dias típicos de entregas de clientes das cidades de Poços de Caldas, Pouso Alegre e Itajubá, localizadas no Sul de Minas Gerais, e que deveriam ser atendidas pelo CD da empresa localizado em Poços de Caldas.

O trabalho está estruturado da seguinte maneira. Após esta breve introdução são apresentadas, nas seções 2 e 3, algumas considerações teóricas relativas aos Problemas de Roteirização (seção 2) e aos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) (seção 3). Na seqüência, na seção 4, apresenta-se a resolução de um problema típico de roteirização em um SIG, utilizando dados do Atacadista Vila Nova. Finalmente, são apresentadas as conclusões do trabalho, na seção 5, seguidas da lista com as referências bibliográficas.

2. PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO

Segundo BODIN *et. al.* (1983), os problemas de roteirização podem ser classificados em três grupos principais:

- Problemas de roteirização pura de veículos;
- Problemas de programação de veículos e tripulações;
- Problemas combinados de roteirização e programação de veículos.

2.1 Problemas de roteirização pura de veículos

O problema de roteirização pura de veículos é primariamente um problema espacial, onde as condicionantes temporais não são consideradas na geração dos roteiros para coleta e/ou entrega. Em alguns casos, a restrição de comprimento máximo da rota pode ser considerada. Nesse tipo de problema, existe um conjunto de nós e/ou arcos que devem ser atendidos por uma frota de veículos. O objetivo é definir uma seqüência de locais (a rota) que cada veículo deve seguir a fim de se atingir a minimização do custo de transporte. Os principais problemas de roteirização pura de veículos são (NARUO, 2003):

Problema do caixeiro viajante. Consiste em determinar uma rota de mínimo custo que passe por todos os nós de uma rede exatamente uma vez. É um problema de cobertura de nós. Este problema admite que o indivíduo (ou veículo) que vai efetuar o roteiro não seja limitado por restrições de tempo, de capacidade, etc.

Problema do carteiro chinês. Consiste em encontrar uma rota de percurso mínimo, dentro de uma área, passando ao longo de cada arco pelo menos uma vez. É um problema de cobertura de arcos. Situações frequentes que se inserem dentro deste contexto são: varrição de rua, serviços de endereçamento postal, coleta de lixo, etc.

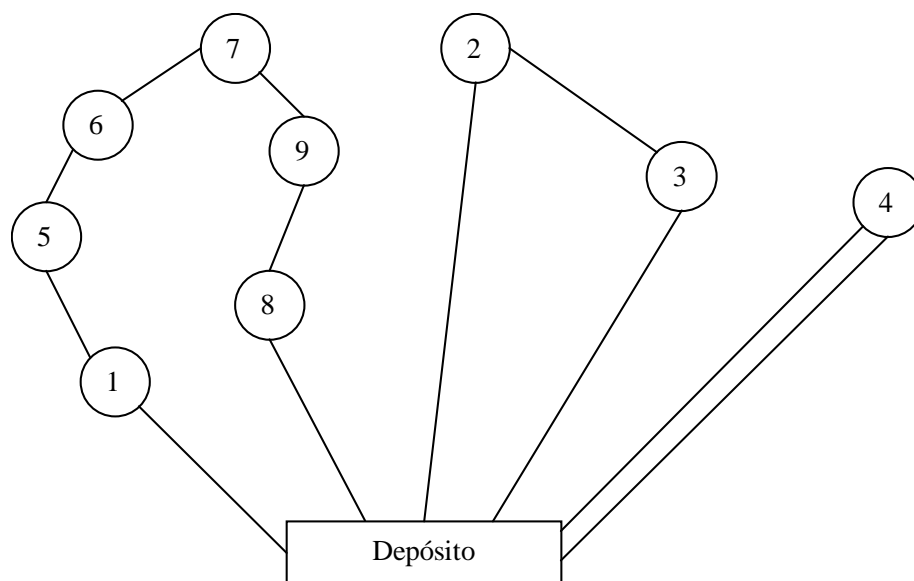
Problema de múltiplos caixeiros viajantes. É uma generalização do problema do caixeiro viajante onde há a necessidade de se levar em consideração mais de um caixeiro viajante (veículos). Os n veículos na frota têm suas rotas iniciadas e terminadas em um único depósito comum a todos. Não há restrições no número de nós que cada veículo deve visitar, exceto que cada veículo deve visitar ao menos um nó.

Problema de roteirização em nós com um único depósito. Clássico problema de roteirização de veículos – PRV. Existe quando há restrições de tempo ou capacidade dos veículos, e é uma extensão do problema do caixeiro viajante. A determinação de itinerários dos veículos implica em se fazer entregas a partir de um depósito para vários pontos de parada, de forma a minimizar a distância total a ser percorrida por toda a frota. Cada ponto de parada é servido exatamente uma vez e, somado a isso, todos os pontos de parada devem ser

designados para veículos, de tal maneira que a demanda total em qualquer rota não exceda a capacidade do veículo alocado para esta rota. A demanda em cada nó é assumida como sendo determinística e cada veículo possui capacidades conhecidas. A Figura 1 apresenta um exemplo onde itinerários são estabelecidos para os veículos atenderem os pontos de demanda a partir de um único depósito.

Problema de roteirização em nós com múltiplos depósitos. Generalização do problema anterior, em que uma frota de veículos está alocada em D depósitos ao invés de um. Todas as outras restrições com relação ao PRV são aplicáveis.

Figura 1 – Problema de roteirização de veículos (PRV)



2.2 Problemas de programação de veículos e tripulações

Os problemas de programação de veículos e de tripulações podem ser considerados como problemas de roteirização com restrições adicionais relacionadas aos horários em que várias atividades devem ser executadas. Há um tempo associado a cada tarefa a ser executada. Por exemplo, cada ponto de parada pode requerer que o atendimento seja feito em um horário específico. Assim, as condicionantes temporais devem ser consideradas explicitamente no tratamento do problema.

BODIN *et. al.* (1983) classificam os problemas desta categoria em dois grupos: programação de veículos e programação de tripulações. Estes dois tipos de problemas são essencialmente semelhantes, embora o problema de programação de tripulações envolva restrições mais complexas como horário de parada para almoço e outros aspectos de natureza

trabalhista. Estes dois tipos de problemas interagem entre si: a especificação da programação dos veículos definirá certas restrições na programação das tripulações e vice-versa. Idealmente, ambos os problemas deveriam ser resolvidos simultaneamente, mas modelos que incorporam ambos os problemas em um único problema de otimização são geralmente mais complexos. Conseqüentemente, muitas estratégias de solução adotam procedimentos seqüenciais que resolvem um problema primeiro e então o outro, com algum mecanismo de interação entre ambos. Os principais problemas de programação de veículos são (PELIZARO, 2000):

Problema de programação de veículos com um único depósito. Consiste no particionamento dos nós (tarefas) de uma rede acíclica em um conjunto de caminhos, de modo que uma determinada função custo seja minimizada. Cada caminho corresponde a um veículo. Uma função objetivo que minimize o número de caminhos efetivamente minimiza os custos de capital desde que o número de veículos necessários seja igual ao número de caminhos;

Problema de programação de veículos com restrições de comprimento de caminho. Considera restrições de tempo máximo de viagem ou de distância máxima percorrida pelo veículo antes dele voltar para o depósito. Esta restrição é comumente encontrada na prática e corresponde a restrições de combustível, considerações de manutenção, etc.;

Problema de programação de veículos de vários tipos. Considera a possibilidade de que veículos com diferentes capacidades estejam disponíveis para realização das tarefas. É semelhante ao problema anterior;

Problema de programação de veículos com múltiplos depósitos. Ocorre onde as tarefas podem ser realizadas por veículos a partir de mais de um depósito, e estes ao final do serviço retornam aos seus depósitos de origem.

Com relação a programação de tripulações, NARUO (2003) apresenta os seguintes problemas:

Problema de programação de pessoal em um local fixo. Consiste em encontrar um conjunto de programação de trabalho que seja capaz de atender todas as necessidades de tarefas em todos os períodos de tempo. Assume-se que os trabalhadores são intercambiáveis e que um determinado trabalhador possa ser deslocado ao final de cada período de tempo e que outro possa ser alocado no início de cada período de tempo;

Problema de programação de veículos e tripulações no transporte público de massa. Consiste em determinar a alocação ótima de veículos a um conjunto de viagens

programadas de linhas, e determinar também as jornadas das tripulações, considerando que as trocas de serviço e de turno só podem ser realizadas em pontos específicos dos trajetos das linhas;

Problema de programação de pessoal em turnos de revezamento. Se caracteriza pela programação diária que varia de um dia para outro, havendo um rodízio de turno de pessoal, em função de restrições legais, trabalhistas, sindicais, de equalização de esforço de trabalho e outras. A necessidade de revezamento no cumprimento das tarefas ocorre pela necessidade de uma equalização da carga e das condições de trabalho para atividades que percebem a mesma remuneração.

2.3 Problemas combinados de roteirização e programação

Quando existe a ocorrência de aplicações com restrições de janelas de tempo (horário de atendimento) e de precedência de tarefas (coleta deve preceder a entrega e ambas devem estar alocadas ao mesmo veículo), o problema pode ser visto como um problema combinado de roteirização e programação de veículos.

O problema de roteirização e programação de veículos com janelas de tempo, PRPVJT, é uma importante variação do PRV. No PRPVJT, um número de pontos para atendimento tem uma ou mais janelas de tempo durante o qual o serviço pode ser executado. Por exemplo, o proprietário de um restaurante pode desejar que as entregas de produtos sejam feitas entre 8:00 horas e 9:00 horas. Assim, qualquer rota que envolva esta tarefa deve assegurar que o tempo de entrega esteja dentro dos limites de tempo especificados.

Vale a pena se distinguir aqui as janelas de tempo *hard* e *soft*. No caso de janelas de tempo do tipo *hard*, se um veículo chega ao cliente muito cedo, ele terá que esperar para iniciar o atendimento. Em contraste, nas janelas de tempo do tipo *soft*, as restrições de janelas de tempo podem ser violadas, mas sujeitas a penalidades. Exemplos específicos de problemas com janelas de tempo *hard* incluem entregas bancárias, entregas postais, coleta de rejeitos industriais e roteirização e programação de ônibus escolares. Dentro das instâncias do problema com janelas de tempo *soft*, estão os problemas do tipo *dial-a-ride*, que são problemas de roteirização e programação de serviços de transporte de pessoas, em geral utilizados para o transporte porta-a-porta de idosos e deficientes (NARUO, 2003).

Estes problemas combinados de roteirização e programação de veículos freqüentemente surgem na prática e são representativos de muitas aplicações do mundo real, como por exemplo (BODIN *et al.*, 1983):

Problema de roteirização e programação de ônibus escolares para atendimento de um conjunto de escolas, consiste de um número de escolas e cada uma delas possui um conjunto de paradas de ônibus com um dado número de estudantes vinculados a cada uma destas e uma janela de tempo correspondente aos horários de início e término do período escolar. O principal objetivo desse problema é minimizar os custos de transportes para os municípios;

Problema de definição de roteiros e programação de serviços de coleta de resíduos domiciliares e de varrição de ruas é semelhante ao problema do carteiro chinês, mas 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 em um objetivo correlato, como por exemplo, na minimização do tempo morto total, para uma frota conhecida;

Problema de roteirização em atacadistas. Problema comum de roteirização logística, na qual se precisa associar os clientes (paradas) a serem atendidos a determinados veículos e numa seqüência ótima, que minimize o custo total, respeitando as janelas de atendimento. Esse é o problema que será abordado nesse trabalho.

2.4 Tendências tecnológicas da roteirização

Há algum tempo atrás, os despachantes localizados nos depósitos e CDs só conseguiam falar com os motoristas dos veículos através de rádio e assim mesmo quando estavam dentro da área de alcance das transmissões. No entanto, na maioria das vezes o contato só era realizado em algumas ocasiões, em que o motorista conseguia um acesso telefônico, e ligava para sua sede. Hoje em dia, os avanços tecnológicos disponibilizam ferramentas como telefones celulares, *paggers* alfanuméricos, *scanners* portáteis, pequenos computadores de bordo. Diversos veículos são hoje equipados com rastreadores, muitas vezes dispendo de receptores GPS (*Global Positioning System*), que fornecem a latitude e a longitude do caminhão em tempo real. O GPS, combinado com uma base geográfica de dados de um SIG, permite ao despachante localizar o veículo, na rede viária, a qualquer instante. Essa facilidade permite alocar o veículo mais próximo e disponível a uma tarefa emergencial, por exemplo.

Hoje se dispõe no mercado de um número razoável de *software* de roteirização (roteirizadores), que auxiliam as empresas a planejarem e programarem os serviços de

distribuição física. No entanto, num passado não muito distantes, os roteirizadores focalizavam o planejamento da distribuição no CD dentro de um prazo mínimo de 24 horas. Ou seja, o planejamento ocorria num dia, e as entregas eram realizadas no dia seguinte. Hoje, muitos clientes indagam constantemente sobre a situação de seus pedidos, perguntam quando os produtos serão entregues e querem saber onde está a carga. A razão para isso é fundamentalmente a busca por estoques cada vez menores, o que obriga as empresas a controlarem de modo bastante preciso a distribuição dos produtos, de forma a evitar situações emergenciais irreparáveis. Por isso, a tendência atual dos *software* de roteirização é de executarem a programação em tempo real através da Internet. Com a utilização de *Palm-Tops*, motoristas dos veículos poderão não somente se comunicar com a sede como também obter informações sobre tráfego e sobre condições de tempo, além de trocar mensagens com os clientes e solicitar socorro, quando necessário (NOVAES, 2004).

Outra meta das empresas fornecedoras de roteirizadores é tornar os *software* mais fáceis de serem utilizados pelos despachantes. Para isso, é necessário, entre outros requisitos, que se possua uma representação digital adequada da rede viária e uma base de dados georeferenciada dos endereços dos clientes. Infelizmente, as bases de dados georeferenciadas nem sempre estão disponíveis no mercado, e quando estão, muitas vezes estão incompletas, imprecisas e desatualizadas. Essa situação é particularmente problemática no Brasil, em que pesem os esforços de algumas entidades e empresas, que vêm tentando suplantar tais deficiências. Obviamente, quando se fala em dados georeferenciados, os Sistemas de Informações Geográficas acabam sendo o termo automaticamente associado, sendo esse o tema da próxima seção.

3. SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)

Os Sistemas de Informações Geográficas – SIG podem ser definidos como uma coleção organizada de *hardware*, *software*, dados geográficos e alfanuméricos, projetados para eficientemente, capturar, armazenar, atualizar, manipular, analisar e apresentar informações referenciadas geograficamente. Constitui-se basicamente em um mapeador temático automatizado, onde as informações obtidas são organizadas em camadas (*layers*) e tais características se unem à potencialidade dos bancos de dados automatizados. Ainda, um SIG pode ser considerado como um tipo de sistema de informação que envolve de forma sistêmica e interativa bancos de dados, tecnologia e pessoal, sendo capaz de realizar análises

espaciais, armazenar, manipular, visualizar e operar dados georeferenciados para obtenção de novas informações (CÂMARA, 1994).

Os SIG combinam os avanços das cartografias automatizadas, dos sistemas de manipulação de bancos de dados e do sensoriamento remoto com o desenvolvimento metodológico em análise geográfica, para produzir um conjunto distinto de procedimentos analíticos que auxiliam no gerenciamento e na atualização constante das informações disponíveis. O SIG oferece o ferramental operacional que auxilia e agiliza procedimentos de planejamento, gerências e tomadas de decisões, e que por isso vem sendo utilizado de forma cada vez mais promissora em diferentes áreas (CALIJURI E ROHM, 1995).

3.1 Histórico de evolução

A popularização dos computadores, via redução do seu custo, juntamente com o aumento de seu desempenho e desenvolvimento de sistemas computacionais gráficos, a partir dos anos 80 fez com que os modelos computacionais da Pesquisa Operacional passassem por uma fase de reavaliação: o papel dos modelos de otimização da PO face os avanços da microcomputação e das novas tecnologias relacionadas à computação gráfica passou a ser bastante discutido. Ficou evidente que esses modelos teriam cada vez mais que ser embutidos em sistemas computacionais gráficos, de forma transparente ao usuário não-especialista. Em particular, com o surgimento dos SIG, abriram-se amplas perspectivas para a inserção de modelos computacionais da PO nestes sistemas de informação (LIMA, 2003).

Segundo CALIJURI E ROHM (1995) o primeiro SIG surgiu no Canadá, na década de 60 e mostrava a necessidade que as agências governamentais voltadas para o meio ambiente daquele país tinham, já naquela época, de mapear suas reservas naturais. Outro objetivo era efetuar múltiplas análises a respeito do seu meio ambiente como um todo, sendo necessário o processamento de grande quantidade de dados criados pelo inventário de terras canadenses. Nas décadas posteriores ocorreram avanços consideráveis em equipamentos e *software*, permitindo o desenvolvimento de sistemas mais potentes e novas aplicações.

A computação gráfica também obteve consideráveis avanços popularizando sistemas do tipo AM/FM (*Automated Mapping/Facilities Management*) e principalmente os CAD (*Computer Aided Design*). No entanto, sistemas tipo CAD são basicamente uma ferramenta de desenho digital e não necessariamente de processamento de informação espacial. Um CAD geralmente possui funções que permitem a representação precisa de linhas e formas, podendo ser utilizado, por exemplo, na digitalização de mapas e cartas. CÂMARA

(1994) afirma que a capacidade de armazenar a topologia, estrutura de relacionamentos espaciais (vizinhança, proximidade, pertinência) que se pode estabelecer entre objetos geográficos de um mapa difere um SIG de um CAD.

LIMA (2003) afirma que a partir da década de 80 ocorreram mudanças significativas nos rumos da aplicação do SIG, onde se busca um melhor aproveitamento do potencial de análise do SIG. Em fases anteriores o SIG foi utilizado para manipular/visualizar banco de dados e posteriormente para realizar operações analíticas com dados numéricos, sempre partindo de dados estatísticos obtidos através de pesquisas. Na fase atual a capacidade de realização da análise espacial, tem sido apontada como fundamental para distinção entre outros sistemas de informação e o SIG, caracterizando-os cada vez mais como Sistemas de Apoio à Decisão Espacial (SADE).

3.2 Roteirização no SIG TransCAD

O TransCAD (CALIPER, 1996) é um Sistema de Informação Geográfica, aplicado à área de transportes, que incorpora, além das funções básicas de um SIG, rotinas específicas para soluções de problemas de logística, de pesquisa operacional e transportes em geral. Entre essas rotinas, o *software* possui um módulo específico que resolve diversos tipos de problemas de roteirização de veículos, atuando na fase preliminar de preparação dos dados, na resolução do problema em si de roteirização e programação de veículos e na elaboração das rotas, tanto na forma de relatórios quanto na forma gráfica. Algumas características do módulo de roteirização do TransCAD são apresentadas a seguir (PELIZARO, 2000):

Múltiplos depósitos. É possível determinar antes da roteirização quais as paradas que serão atendidas por um determinado depósito; ou deixar que o próprio sistema se encarregue de alocar as paradas ao depósito mais adequado.

Janela de tempo rígida. É definida por todas as paradas em função de restrições de horários de atendimento. É atribuída também ao depósito, em função do seu horário de funcionamento, ou em função da jornada de trabalho do motorista.

Tempo fixo de serviço. Corresponde ao montante de tempo requerido em cada parada, independente da quantidade de produto (ou serviço) demandada. É considerado, por exemplo, como um tempo de espera em filas para descarregar o veículo, ou o tempo para colocar o veículo em uma doca de descarga e verificar a mercadoria.

Tempo por unidade. Tempo necessário para descarregar (ou carregar) cada unidade da mercadoria demandada.

Restrição de comprimento total da rota. Esta restrição é dada em função do tempo máximo permitido para realizar uma rota.

Frota heterogênea de veículos. Pode considerar veículos de diferentes capacidades.

A seguir, na próxima seção, apresenta-se o processo de roteirização de um atacadista utilizando-se o módulo de roteirização do TransCAD

4. ROTEIRIZAÇÃO EM UM ATACADISTA ATRAVÉS DO SIG

4.1 Metodologia de pesquisa

O Método de pesquisa utilizado neste trabalho foi a Simulação Qualitativa, método no qual modelos de relacionamentos casuais entre variáveis de controle e desempenho são desenvolvidos, analisados e testados. (BRYMAN, 1989; BERTRAND *et al.*, 2002).

4.2 Caracterização do objeto de estudo

O objeto de estudo selecionado para a obtenção dos dados necessários para a roteirização no SIG foi o Atacadista Vila Nova, em virtude de contatos pré-estabelecidos entre os a empresa e a academia. O Vila Nova é um distribuidor de produtos industrializados presente nos estados de Minas Gerais e São Paulo, atuando com dois modelos de distribuição, Distribuidor Atacadista e *Cash & Carry* (auto-serviço). Segundo informações levantadas durante uma visita técnica no Centro de Distribuição da empresa em Poços de Caldas, MG, a empresa foi fundada em 1928, inicialmente como um empório, em Monte Azul Paulista, SP, sendo transferida para Poços de Caldas em 1946. Com o passar do tempo a empresa foi se expandindo e incorporando outras empresas do mesmo setor. Em 1980 ampliou suas instalações, passando a ter uma área de armazenagem de 3000 m². Em 1987 inaugurou sua primeira loja *Cash & Carry*, na marginal Tietê, em São Paulo com 3500 m². Em 1996 inaugurou seu CD com 17000 m² em Poços de Caldas. A gama de produtos comercializados inclui itens de açougue, bazar, frios, laticínios, higiene pessoal, hortifrutigranjeiros, limpeza, mercearia e perfumaria, entre outros. Conta com uma equipe de vendas de 200 representantes comerciais autônomos que atendem cerca de 12000 clientes. As entregas são realizadas em um prazo de até 48 horas através da frota de 220 caminhões. O público-alvo é o pequeno e médio varejo, comercializando e distribuindo diariamente 3.000 itens no setor de atacados e 7.200 itens no setor *Cash & Carry*.

4.3 Levantamento de dados

Para que se exemplificasse a resolução do problema de roteirização do Vila Nova via SIG, foi selecionada, com o auxílio de um funcionário da área de logística, uma amostra que correspondesse às entregas de 1 ou 2 dias típicos (dependendo do número de veículos que faria as entregas) de uma região específica da empresa. Foram então selecionados 87 clientes localizados nas cidades de Poços de Caldas, Pouso Alegre e Itajubá.

Os dados dos clientes, bem como suas respectivas coordenadas geográficas (latitude e longitude), foram inseridos no SIG TransCAD, gerando a primeira camada denominada *stops*. Nessa camada, as informações disponíveis e essenciais para a roteirização diziam respeito à *demanda* de cada cliente (quantificada pelo *peso* em kg), o *horário de abertura* e o *horário de fechamento* dos clientes (parâmetros que determinariam os horários em que os veículos poderiam realizar as entregas), *tempo fixo de entrega* (tempo mínimo gasto na entrega em cada cliente, independente da quantidade a ser entregue) e *tempo de entrega por unidade* (que depende da quantidade de itens a serem entregues), esse último admitido como variando linearmente com a quantidade (demanda) a ser entregue.

Em seguida, foi gerada a segunda camada, contendo agora informações do CD (capacidade de atendimento, (que foi sempre maior que a demanda total dos clientes), latitude e longitude), de modo análogo à camada de clientes e denominada *depots*. A terceira camada inserida, já disponível de projetos anteriores foi a camada *rodovias*, contendo as rodovias que atendem as cidades em questão. Associado a essa camada, seria necessário também a inclusão das camadas contendo as ruas das cidades para um cálculo mais preciso. Como essas bases não estão disponíveis (no formato do SIG), foram feitas algumas simplificações através de mecanismos próprios do TransCAD, simulando possíveis conexões intra-urbanas entre os clientes. Com isso, o SIG pode finalmente gerar uma rede e respectiva matriz associada com as menores distâncias possíveis entre todos os pontos dessa rede (87 clientes e 1 CD). Vale ressaltar que essa simplificação acaba não tendo grande influência na precisão do resultado final da roteirização, uma vez que as distâncias intra-urbanas são muito menores que as distâncias nas rodovias (ordem de grandeza de 1 a 2 km para 100 a 150 km, nesse exemplo).

Com essa rede de distâncias construída, foi criada uma rede adicional considerando o tempo mínimo de conexão entre todos os pontos (clientes e CD). Para isso, admitiu-se uma velocidade média em todos os trechos de 60km/h, seguindo instruções do funcionário do Vila Nova. Obviamente, esse valor poderia ser diferenciado para trechos rodoviários e urbanos, mas ainda em consequência da simplificação efetuada para os trechos urbanos, essa

diferenciação levaria a um aumento da complexidade operacional sem ganhos efetivos de precisão (alguns testes foram realizados para comprovar essa hipótese).

Por fim, para que se iniciasse o processo de elaboração das rotas, eram necessárias informações a respeito dos veículos que fariam as entregas. Para isso, foram incluídos alguns veículos disponíveis na frota da empresa e alguns outros disponíveis no mercado, com o intuito de simular o efeito da utilização de diferentes veículos. A Tabela 1 apresenta os diversos veículos utilizados no cálculo das rotas e suas características.

Tabela 1 – Tipo e características dos veículos

Tipo	Modelo	Capacidade útil (kg)
1	Sprinter	1000
2	Ford ¾	3500
3	Toco	5200
4	Mercedes MB L 1620	7000
5	Scania T 114	11000

4.4 Cenários de simulação

Com a obtenção dos dados necessários e a inclusão dos mesmos no TransCAD, foi dado início ao processo de simulação de cenários para diferentes alternativas de solução do problema de roteirização e programação de veículos com janelas de tempo (PRPVJT) para os clientes selecionados. Os parâmetros definidos para a geração de cenários buscavam reproduzir as condições reais de roteirização da empresa. Para que isso fosse possível, um dos responsáveis pela roteirização da empresa participou da elaboração dos cenários, fornecendo dados quantitativos e indicando possíveis alterações na configuração de um dado cenário para que ele fornecesse uma melhor resolução, gerando assim um novo cenário, e assim sucessivamente. Foram assim gerados diversos cenários, sendo que em cada um deles os principais parâmetros do problema eram variados buscando refletir situações de decisão ou procedimentos operacionais reais (alocação de diferentes veículos de entrega, variações nas janelas de atendimento, alterações nos tempos de descarregamento, entre outros). Serão aqui analisados oito cenários, cujas características principais são apresentadas na Tabela 2. Em todos eles, a demanda total dos 87 clientes foi sempre de 10189 kg, e a capacidade total dos veículos do cenário (número de veículos multiplicado pela capacidade de cada veículo) sempre foi o valor mais próximo possível dessa demanda total.

Tabela 2 – Descrição dos cenários

Cenário	Tipo veículo	Nro. de veículos	Capac. útil p/ veíc. (kg)	Capac. total (kg)	Tempo máximo da rota	Janela de atendimento (hs)	Tempo fixo de entrega (min)	Tempo variável de entrega (min/kg)
1	2	4	3500	14000	sem restrição	7:00 as 17:00	10	0,10
2	2	4	3500	14000	8 hs	7:00 as 17:00	10	0,10
3	1	11	1000	11000	8 hs	7:00 as 17:00	10	0,10
4	2	3	3500	10500	sem restrição	7:00 as 19:00	8	0,08
5	5	1	11000	11000	sem restrição	7:00 as 19:00	8	0,08
6	3	2	5200	10400	sem restrição	7:00 as 19:00	8	0,08
7	3	2	5200	10400	sem restrição	7:00 as 19:00	8	0,08
8	3	1	3500	10500	sem restrição	7:00 as 19:00	8	0,08
	4	1	7000					

Para cada um dos cenários foi executado o módulo de roteirização do TransCAD, sendo que para cada um deles o programa gerava três saídas (*outputs*) diferentes. A primeira delas era um relatório geral indicando o número de rotas criadas, duração total em termos de tempo e distância de cada uma delas, capacidade utilizada e ociosa da frota, entre outros. A segunda era a roteirização propriamente dita, contendo, para cada uma das rotas o itinerário do caminhão (seqüência de visitas aos clientes) com tempos e distâncias a serem cumpridos, desde a saída do CD até o retorno ao mesmo. A terceira era um mapa contendo o traçado e as paradas de cada rota. A Tabela 3 apresenta um resumo com os principais resultados da roteirização dos oito cenários, que serão analisados, na seqüência. A título de exemplo, a Tabela 4 apresenta o itinerário da Rota 4 do Cenário 1 e a Figura 2 apresenta o mapa dessa rota, com os clientes e seqüência de atendimento.

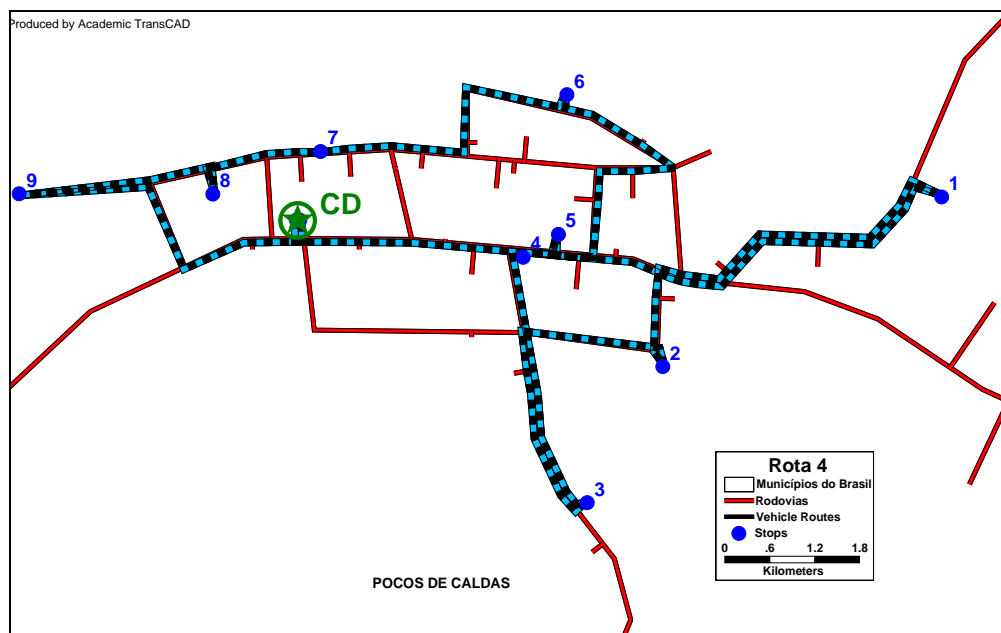
Tabela 3 – Resultados das roteirizações

Cenário	Tempo total da rota (hs)	Tempo de espera (hs)	Tempo líquido da rota (hs)	Distância total (km)	Rotas geradas	Distância por veículo (km)	Clientes não atendidos	Utilização média da frota (%)
1	48,08	--	48,08	949,1	4	237,3	0	73
2	31,92	--	31,92	1344,1	4	336	57	18
3	74,17	--	74,17	2710	11	246,4	3	82
4	38,12	--	38,12	780,9	3	260,3	0	97
5	32,30	--	32,30	438,9	1	438,9	0	94
6	36,03	--	36,03	652,3	2	326,1	0	98
7	56,57	20,37	36,20	669,2	2	334,6	0	98
8	43,26	10,15	33,11	458,0	2	229	0	84

Tabela 4 – Rota 4 do Cenário 1, gerada pelo TransCAD

Itinerary Report			
Route #: 4	Vehicle Type: 1	Capacity: 3500	
Tot Time: 6:03	Tot Dist: 43.9	Tot Load: 2291	
No.	Name	Arrival-Depart	Dist (km) Load (kg)
	CD VILA NOVA	6:50am	
1	URUPE LTD	7:00am- 7:40am	9.6 304.0
2	SUP.POMBI	7:46am- 8:28am	5.8 321.0
3	DANZIGER	8:33am- 9:12am	4.7 286.0
4	ART PAO D	9:16am- 9:42am	4.2 161.0
5	DROGARIA	9:43am-10:23am	0.7 305.0
6	ENALDO FE	10:28am-11:01am	4.8 235.0
7	PEG PAG R	11:06am-12:06pm	4.4 499.0
8	JOTA INDU	12:08pm-12:27pm	1.8 95.0
9	HOTEL NAS	12:30pm-12:49pm	2.9 85.0
	END CD VILA NOVA	12:53pm	4.8

Figura 2 – Mapa da Rota 4 do Cenário 1, gerado pelo TransCAD



4.5 Análise dos resultados

O Cenário 1 buscou reproduzir as condições atuais de entregas da empresa, com janela de atendimento bastante conservadora (das 07:00 às 17:00 hs em todos os clientes), tendo em vista que na prática algumas entregas podem ocorrer após as 17:00 hs. Para essas condições e para as cidades em questão, num primeiro momento foram testados os caminhões com capacidade útil de 3500 kg, tendo em vista que o limite das entregas até às 17:00 hs faz

com que caminhões de maior capacidade apresentem ociosidade dessa capacidade (não há tempo para se fazer mais entregas). O TransCAD indicou a criação de 4 rotas que atenderiam todos os clientes num tempo total de 48,08 hs e distância total de 949,1 km, com utilização média da frota de 73%.

Para o cenário 2 todas as condições foram mantidas, agora impondo uma restrição mais severa de 8 horas de duração máxima da rota, supondo que a empresa não estaria disposta a pagar horas-extras para os motoristas, por exemplo. Para os mesmos 4 caminhões de 3500 kg de capacidade, o resultado seria bastante ruim, pois 57 dos 87 clientes não seriam atendidos. Esse cenário foi interessante para ilustrar um dos princípios de funcionamento do algoritmo de roteirização: o de se atender primeiro o cliente mais distante. Assim, quando não é possível atender todos os clientes, o *software* procura atender primeiro aqueles mais distantes. Para esse cenário, o resultado foi que todas as 4 rotas criadas iriam exclusivamente para Itajubá, com uma enorme capacidade ociosa (utilização média de 18%) e alta distância percorrida (1344,1 km). Vale ressaltar que esse cenário apresenta condições pouco reais, pois na prática os motoristas trabalham em rotas com duração maior que um dia, o que os obriga a pernoitar no caminho e continuar as entregas no dia seguinte a fim de maximizar a utilização da capacidade de carga do caminhão, sem retornar ao CD.

Uma alternativa para se melhorar a utilização média da frota para condições como essas seria a utilização de veículos de menor capacidade. Assim, o cenário 3 testou a hipótese de os mesmos clientes serem atendidos por 11 Vans com capacidade de carga de 1000 kg cada uma. Nesse caso, o atendimento seria efetuado com rotas de até 8 horas para 84 dos 87 clientes, com utilização média da frota de 82,4%, tempo total de viagem de 74,17 hrs e distância total percorrida de 2710 km. Ainda que a distância percorrida viesse a aumentar bastante pelo incremento no número de veículos, o custo maior por quilômetro poderia vir a ser compensado por eventuais custos menores de aquisição e manutenção da frota. Obviamente, a troca da frota não é uma decisão que pode ser tomada em todos os casos, pois o tipo de veículo utilizado pode estar diretamente associado ao tipo de produto que está sendo entregue. Cabe ressaltar que, nos cálculos, para efeito de simplificação, foi considerado apenas o peso dos pedidos, e não o volume. Na prática, esses dois parâmetros devem ser avaliados conjuntamente, pois pode ocorrer a restrição por volume antes do limite de peso ser atingido. Desconsiderando esse fator, esse cenário foi aqui incluído para ilustrar a relação capacidade/restrrição de tempo na roteirização: quanto mais distante o cliente (rota maior), menor a quantidade de carga embarcada, pois menor será o tempo disponível para efetuar as

entregas; quanto mais perto o cliente se encontra (rota menor), maior a quantidade de carga embarcada, pois uma maior capacidade do veículo poderá ser utilizada antes de se atingir a restrição por tempo.

Feitas essas considerações, a idéia era que, a partir do Cenário 4, condições menos restritivas de janelas de atendimento fossem testadas. Assim, o horário de atendimento foi ampliado em 2 horas (das 07:00 as 19:00 hs) e admitiu-se que, por exemplo, um treinamento de funcionários reduziria os tempos de entrega: o fixo de 10 para 8 minutos e o variável de 0,10 para 0,08 minutos por quilo. No quarto cenário, sem restrição de tempo (tal qual o cenário 1), o TransCAD mostrou que as mesmas entregas (todos os clientes atendidos) poderiam ser feitas por 3 caminhões de 3500 kg, aumentando a utilização média da frota para 97%, e diminuindo o tempo total de viagem para 38,12 hrs e a distância total percorrida para 780,9 km.

No cenário 5, para as mesmas condições do 4, foi considerada a hipótese de um único veículo com capacidade maior (11000 kg) realizar todas as entregas. Nesse caso, todos os clientes seriam atendidos e o veículo teria uma utilização de 94% de sua capacidade, tempo total de viagem seria de 32,30 hs e a distância total percorrida de 438,9 km. A distância e o tempo acabam por ser menores por se tratar de um único veículo, todavia, a entrega seria feita em dois dias. Cabe ressaltar que o tempo total calculado é o tempo “líquido” da rota, não incluindo as paradas para descanso, refeições e pernoite. Tal qual o cenário 3, essa solução pode não ser viável na prática, pois veículos maiores podem, por exemplo, apresentar restrições de circulação em trechos urbanos.

O cenário 6 testou a alteração da frota para dois veículos de 5200 kg de capacidade cada um. Todos os clientes seriam atendidos com a criação de 2 rotas, porém, para que os dois veículos voltassem ao CD no mesmo dia, seria necessário que os dois caminhões atendessem as três cidades. Com isso, a distância percorrida e o tempo total de viagem acabariam por aumentar (682,3 km e 36,03 hs, líquido), ainda que a utilização média da frota fosse de 98%. O ideal é que situações como essa não ocorram: seria mais vantajoso que um dois veículos pernoitasse em uma das cidades a serem atendidas e no dia seguinte completasse as entregas, de modo a maximizar a utilização da capacidade do caminhão. Para isso, a solução seria inserir no TransCAD o chamado “tempo de espera”, um parâmetro que indicaria que as entregas em Pouso Alegre fossem todas feitas no segundo dia (dividindo as rotas em dois dias). Isso evitaria que dois veículos se deslocassem para fora de Poços de Caldas, ou seja, um

veículo atenderia Itajubá e Pouso Alegre e o outro atenderia exclusivamente a Poços de Caldas, diminuindo a distância total percorrida.

Isso foi feito no Cenário 7, para os mesmos 2 caminhões de 5200 kg. No entanto, nesse caso, os dois veículos acabaram realizando as rotas em dois dias. Um deles, no primeiro dia, faria todas as entregas em Itajubá e algumas em Pouso Alegre, pernoitando nessa cidade e no dia seguinte realizando lá mais algumas entregas. No entanto, pela capacidade do veículo, seria necessário que o outro caminhão, que havia feito as entregas em Poços de Caldas no primeiro dia, fosse também para Pouso Alegre no segundo dia para completar as entregas. Essas entregas em Pouso Alegre divididas nesses caminhões acabariam por aumentar a distância percorrida (669,2 km) e o tempo total de viagem de (56,57 hs total, 36,2 hs líquido), ainda que a utilização média da frota continuasse em 98%.

A opção testada no Cenário 8 foi de se utilizar um veículo de capacidade maior para uma rota que atenderia Itajubá e Pouso Alegre (7000 kg), cumprindo a rota em 2 dias, e outro menor (3500 kg) exclusivamente para uma rota em Poços de Caldas em um dia. Este cenário atendeu a todos os clientes e gerou utilização média da frota de 84%, tempo total de viagem de 43,26 hs total, 33,11 líquido e distância total percorrida de 458 km. Com isso foi encerrada a fase de simulação de cenários. A seguir, são feitas algumas conclusões, acerca dos cenários gerados de modo mais específico e do trabalho de modo mais amplo.

5. CONCLUSÕES

O objetivo desse trabalho foi apresentar o processo de roteirização de veículos em um Sistema de Informações Geográficas (SIG) para uma rede atacadista do sul de Minas Gerais. A partir de dados de entrega do Atacadista Vila Nova, para o Centro de Distribuição (CD) localizado em Poços de Caldas e clientes das cidades de Itajubá, Pouso Alegre e Poços de Caldas, diversos cenários diferentes de roteirização foram gerados, a partir da variação de alguns parâmetros (horários de atendimento, capacidade e número de veículos, entre outros) na busca de uma solução satisfatória (roteiros alternativos de coleta e/ou entrega de mercadorias).

O módulo de roteirização do *software* utilizado (TransCAD), associado a outras ferramentas de análise espacial do SIG, apresentou no geral um bom desempenho como roteirizador. Os cenários gerados buscaram ilustrar que diferentes políticas de ação podem levar a decisões das mais distintas, com relação, por exemplo, ao tipo de veículo a ser utilizado. Ainda que o objetivo não tenha sido o de quantificar qual dos cenários seria melhor



ou pior que outros, uma vez que essa decisão depende da política adotada pela empresa (reduzir a quilometragem percorrida, diminuir a ociosidade da frota, por exemplo), foi possível identificar entre os cenários gerados alguns com melhor desempenho global (como os cenários 4 e 8, por exemplo).

Apesar do enfoque do trabalho ter sido mais qualitativo do que quantitativo, pôde-se comprovar, através da aplicação em um problema de roteirização, que o SIG é uma valiosa ferramenta de apoio à decisão no planejamento logístico, pela facilidade e rapidez de geração de diferentes cenários alternativos de decisão, contribuindo para uma análise fundamentada dos efeitos dessa decisão sobre a rede logística como um todo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à *FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais* – pelo apoio financeiro concedido ao projeto de pesquisa que deu origem a esse trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALLOU, R. H., 2001. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos**. Editora Bookman, Porto Alegre, 4ª Ed.
- BERTRAND, J. W. M., FRANSOO, J. C., 2002. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241-264.
- BODIN, L. D., GOLDEN, B., ASSAD, A., BALL, M., 1983. Routing and Scheduling of Vehicle and Crews: The State of the Art. **Computers and Operations Research**, v. 10, n. 2, p.63-211.
- BOWERSOX, D. J. e CLOSS, D. J., 1997. Brazilian Logistics: A Time for Transition. **Gestão e Produção**, v. 4, n. 2, p. 130-139.
- BRYMAN, A., 1989. **Research Methods and Organization Studies**, Unwin Hyman, London.
- CALIJURI, M. L., ROHM, S. A., 1995. **Sistemas de Informações Geográficas**. Universidade Federal de Viçosa.
- CALIPER, 1996. **Routing and logistics with TransCAD 3.0**. Newton, Massachusetts, Caliper Corporation.
- CÂMARA, G., 1994. **Anatomia de um SIG**. Fator Gis, Curitiba, n.4, p.11-15, jan./mar.
- CHRISTOFIDES, N., MINGOZZI A., TOTH, P., 1981. Exact Algorithms for the Vehicle Routing Problem, based on spanning tree and shortest path relaxation. **Mathematical Programming**, n. 20, p. 255-282.
- CUNHA, C. B., 1997. **Aspectos Práticos da Aplicação de Modelos de Roteirização de Veículos a Problemas Reais**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes.
- GALVÃO, R. D., 1997. Roteamento de Veículos com Base em Sistemas de Informação Geográfica. **Gestão e Produção**, v. 4, n. 2, p. 159-173.



LIMA, R. S., 2003. **Bases para uma metodologia de apoio à decisão para serviços de educação e saúde sob a ótica dos transportes.** 200p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

NARUO, M. K., 2003. **O estudo do consórcio entre municípios de pequeno porte para disposição final de resíduos sólidos urbanos utilizando Sistemas de Informação Geográficas.** São Carlos, 2003. 283p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

NOVAES, A. G., 2004. **Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição,** Editora Campus, Segunda Edição.

PARTYKA, J. G. e HALL, R. W. (2000). **On the Road to Service.** ORMS Today, v. 27, p. 26-30.

PELIZARO, C., 2000. **Avaliação do Desempenho do Algoritmo de um Programa Comercial para Roteirização de Veículos.** São Carlos. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo.