



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**MODELO PARA ESCOLHA DE UM MÉTODO DE
ROTEIRIZAÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO
POR

ANA FLÁVIA MEDEIROS DIAS

Orientador: Prof. Luciano Nadler Lins

RECIFE, DEZEMBRO / 2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

Departamento de Engenharia de Produção

Curso de Graduação em Engenharia de Produção

Ana Flávia Medeiros Dias

**MODELO PARA ESCOLHA DE UM MÉTODO DE
ROTEIRIZAÇÃO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) com requisito para a graduação no curso de Engenharia de Produção.

Orientador: Luciano Nadler Lins

Recife, 2010

RESUMO

O trabalho tem a finalidade de realizar uma revisão teórica sobre o problema de roteirização de veículos e relacionar seus diferentes tipos com os algoritmos de solução usados em pesquisa operacional, a fim de permitir uma escolha adequada do método a ser utilizado. O problema de roteirização de veículos é um dos mais importante e típico problema de otimização combinatória, com amplas aplicações práticas. O problema de roteirização de veículos procura designar os veículos a rota que otimize a função objetivo. A roteirização influi os custos logísticos, principalmente por decidir sobre uma atividade rotineira, em que pequenos custos são continuamente acumulados, reduzindo a eficiência da empresa. Os problemas de roteirização de veículos podem ter diferentes objetivos e restrições e particularidades, resultando em inúmeros problemas particulares. Para resolver o problema de roteirização de veículos, existe uma grande diversidade de metodologias, baseados em pesquisa operacional, técnicas de programação matemática ou algoritmos heurísticos. A literatura sobre os problemas de roteirização tem muitos métodos adaptados para situações específicas, percebe-se que a maioria dos métodos usa uma combinação com algoritmos heurísticos.

Palavras-chave: otimização combinatória, problema de roteirização de veículos, algoritmos.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	Apresentação do Problema.....	1
1.2.	Justificativa.....	2
1.3.	Objetivo.....	3
1.4.	Metodologia.....	3
2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS	6
3	CLASSIFICAÇÃO DOS PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS.....	11
4	ALGORITMOS DE SOLUÇÃO.....	18
4.1.	Softwares para o problema de roteirização de veículo.....	22
5	RELAÇÃO ENTRE OS PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS E AS ESTRATÉGIAS DE SOLUÇÃO.....	24
5.1.	Modelo para a escolha do algoritmo para o problema de roteirização de veículo	28
6	CONCLUSÕES	31

LISTA DE SIGLAS

ACO	– Otimização da Colónia de Formigas – <i>Ant Colony Optimization</i>
AG	– Algoritmo Genético
CSCMP	– <i>Council of Supply Chain Management Professionals</i>
EMA	– <i>Electromagnetism-like Algorithm</i>
GC	– Geração de Colunas
IRP	– Problema de Estoque e Roteirização
k-PCC	– Problema do k-Carreiro Chinês
MM-k-PCC	– Problema do k-Carreiro Chinês Min-Max
PCC	– Problema do Carreiro Chinês
PCCC	– Problema do Carreiro Chinês Capacitado
PCCD	– Problema do Carreiro Chinês Direcionado
PCCH	– Problema do Carreiro Chinês Hierárquico
PCCM	– Problema do Carreiro Chinês com Arestas Mistas
PCCND	– Problema do Carreiro Chinês Não-Direcionado
PCR	– Problema do Carreiro Rural
PCRD	– Problema do Carreiro Rural Direcionado
PCRM	– Problema do Carreiro Rural com Arestas Mistas
PCRP	– Problema do Carreiro Rural Periódico
PCW	– Problema do Carreiro Chinês ao Vento – <i>Windy Postman</i>
PD	– Programação Dinâmica
PET	– Problema de Escala de Tripulação
PI	– Programação Inteira
PM	– Programação Matemática
PMSC	– Problema da Empilhadeira – <i>Minimum Stacker Crane</i>
PRDV	– Problema de Roteirização Dinâmica de Veículos
PREC	– Problema de Roteirização de Veículos com Entrega e Coleta
PRED	– Problema de Roteirização de Veículos com Entrega Dividida
PREP	– Problema de Roteirização de Veículos com Entrega Prioritária
PREV	– Problema de Roteirização Estocástico de Veículos
PRFH	– Problema de Roteirização com Frota Heterogênea
PRFS	– Problema de Roteirização com Facilidades Satélites

PRPV	– Problema de Roteirização Periódica de Veículos
PRPVJT	– Problema de Roteirização e Programação de Veículos com Janelas de Tempo
PRV	– Problema de Roteirização de Veículos
PRVC	– Problema de Roteirização de Veículos Capacitados
PRVJT	– Problema de Roteirização de Veículos com Janelas de Tempo
PRVMD	– Problema de Roteirização de Veículos com Múltiplos Depósitos
PSO	– Otimização por Enxame de Partículas – <i>Particle Swarm Optimization</i>
PVC	– Problema do Caixeiro Viajante
PVCB	– Problema do Caixeiro Viajante com <i>Backhauls</i>
PVC-B	– Problema do Caixeiro Viajante com Bônus
PVC-C	– Problema do Caixeiro Viajante com Coleta
PVC-CE	– Problema do Caixeiro Viajante com Clientes Estocásticos
PVC-E	– Problema do Caixeiro Viajante Seletivo Euclidiano
PVCG	– Problema do Caixeiro Viajante Generalizado
PVCJT	– Problema do Caixeiro Viajante com Janelas de Tempo
PVCM	– Problema do Caixeiro Viajante Múltiplo
PVC-MC	– Problema do Caixeiro Viajante em Matriz Circulante
PVC-ME	– Problema do Caixeiro Viajante de Máximo Espalhamento
PVC MinMax	– Problema do Caixeiro Viajante com Gargalo ou MinMax
PVC-mP	– Problema do Caixeiro Viajante m-Peripatético
PVC-M ³ S	– Problema do Caixeiro Viajante Min Max-Min <i>Sum</i>
PVC-MTE	– Problema do Caixeiro Viajante Múltiplo com Tempo de Viagem Estocástico
PVC-P	– Problema do Caixeiro Viajante Periódico
PVC-R	– Problema do Caixeiro Viajante com Recompletação
PVCS	– Problema do Caixeiro Viajante Simétrico
PVC-S	– Problema do Caixeiro Viajante Seletivo
PVC-TE	– Problema do Caixeiro Viajante com Tempo de Viagem Estocástico
SA	– Recozimento Simulado – <i>Simulated Annealing</i>
SADE	– Sistemas de Apoio à Decisão Espacial
SIG	– Sistemas de Informação Geográfica
ST	– Busca Tabu – <i>Tabu Search</i>
USP	– Universidade de São Paulo
VMI	– Estoque Gerenciado pelo Fornecedor – <i>Vendor Managed Inventory</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação do Problema

A definição de gestão logística, segundo a *Council of Supply Chain Management Professionals* (CSCMP, 2010)

é a parte da gestão da cadeia de abastecimento que planeja, implementa e controla o eficiente e efetivo fluxo e armazenagem de mercadorias, serviços e informações relacionadas entre o ponto de origem e o ponto de consumo, a fim de satisfazer exigências de clientes.

A logística, segundo Ballou (1993), tem a função de responder por toda a movimentação de materiais e produtos, dentro do ambiente interno e externo a empresa, incluindo sua obtenção, manutenção e transporte. Desta forma, a logística é responsável pela administração do fluxo de materiais e produtos da fonte ao usuário, iniciando pela chegada da matéria-prima até a entrega do produto final ao cliente. O transporte e a manutenção de estoques são as principais atividades logísticas na absorção de custo, agregando os valores de local e tempo respectivamente.

Com o crescimento da competitividade mundial, as empresas estão constantemente em busca da redução de custos a fim de garantir e ampliar sua participação no mercado de consumo, sabe-se que os custos logísticos são em média responsáveis por um terço dos custos de produção. Logo, a redução dos custos logísticos podem trazer vantagens competitivas para empresa, entres esses custos encontram-se os custo da distribuição física que são afetados pela escolha do modal e das rotas (DIAS, 1993). A logística, principalmente o transporte, é responsável por uma grande parte da economia em países desenvolvidos, por isso governos e empresas privadas centram a sua atenção no desenvolvimento de sistemas que podem auxiliar os gestores de logística a reduzirem seus custos e alcançarem uma maior flexibilidade (RUIZ; MAROTO; ALCARAZ; 2004). Outro fator importante é o aumento da flexibilidade de atendimento aos clientes, devido a crescente demanda pela redução de estoques pelo movimento de resposta eficiente ao cliente e a implantação do estoque gerenciado pelo fornecedor (VMI) (BELFIORE; COSTA; FÁVERO, 2006).

Dentre desses sistemas, encontra-se a construção de uma rota de distribuição mais eficiente, resultando em um sistema de roteirização, que pode ser considerado, de acordo com

Goldberg e Luna (2005), como um conjunto de meios organizados com a finalidade de atender a demanda localizada nos arcos ou vértices de uma rede de transporte. A formação de uma rede envolve decisões estratégicas, táticas e operacionais. As decisões estratégicas são realizadas pelo empreendedor, normalmente sem a utilização de um modelo, gerando um impacto sobre todo o sistema de forma duradoura, formando suas características gerais. As decisões operacionais procuram um plano econômico e flexível para o atendimento da demanda. Portanto, quando a logística dá um enfoque operacional ao dimensionamento da distribuição física, que juntamente com a administração de materiais são os dois grandes subsistema de atividades de logística, resulta em um problema de roteirização de veículo (PRV).

1.2. Justificativa

O problema de roteirização de veículo é um dos mais importante e típico problema de otimização combinatória, estudado pela pesquisa operacional, devido a sua ampla aplicação prática na indústria, comércio, setor de serviços, segurança, saúde pública e lazer. A Pesquisa Operacional, de acordo com a definição da SOBRAPO (2010), tem como foco a tomada de decisões, a aplicação de conceitos e métodos de várias áreas científicas na concepção, planejamento ou operação de sistemas, sendo usada para avaliar as linhas de ação alternativas e encontrar as soluções que melhor servem aos objetivos dos indivíduos ou organizações.

Para resolver o problema de roteirização de veículos, diversas metodologias baseadas em pesquisa operacional, técnicas de programação matemática ou algoritmos heurísticos foram propostas pela literatura. Além das metodologias usadas para o tratamento dos problemas variantes do PRV, devido ao acréscimo de restrições para casos específicos (LEUNG *et al.*, 2010). Portanto existe uma grande quantidade de métodos para a solução do PRV, pois o problema de roteirização de veículos pode ter diferentes objetivos e restrições, resultando em tratamentos bastante diversificados, que variam em relação aos algoritmos exatos ou heurísticos utilizados e no tratamento dado a particularidades em cada problema (STEINER *et al.*, 2000).

Um problema de roteirização é caracterizado por possuir decisões, objetivos e restrições, isto é, a roteirização deve decidir em relação à alocação de clientes a serem visitados por um conjunto de veículos, incluindo a programação e o sequenciamento das

visitas, com objetivo de manter o nível de serviço ao mínimo custo e obedecendo as restrições, como capacidade e horários de carga/descarga (NOVAES, 2007). Goldberg e Luna (2005) citam como as mais prováveis variáveis de entrada de um PRV clássico: os clientes servidos pelo depósito, a demanda dos clientes, o tamanho da frota, o tipo de veículo, as regras de carregamento/descarregamento, a capacidade das ligações, o custo operacional e a disponibilidade.

A importância de construir uma rota ótima deve ao fato que uma rota de distribuição não otimizada trará custos maiores e como essas atividades possuem uma alta frequência, a soma desses pequenos custos excessivos acarretará a empresa um grande prejuízo para as empresas. Pereira (2010) acresce que uma roteirização adequada proporciona a utilização eficiente da malha rodoviária e da frota de veículos, reduzindo custos e a poluição provocada pelo transporte. Hollander (1987 *apud* GOLDBARG; LUNA, 2005) diz que um atraso na entrega de um produto internacional, gera um acréscimo de 5% ao custo final do produto por mês de atraso. Devido à existência de diversos métodos de roteirização, a escolha do método a ser utilizado influenciará na qualidade da solução ótima obtida. Então, a existência de um modelo que auxilie na escolha do método que resultará em uma melhor solução para o problema de roteirização.

1.3. Objetivo

O objetivo do trabalho é realizar uma revisão bibliográfica sobre os problemas de roteirização de veículos e os algoritmos utilizados em sua resolução, a fim de relacionar os diferentes tipos de problemas de roteirização com os métodos usados em pesquisa operacional. Em seguida, comparar as diferentes estratégias de solução usadas pelos diversos algoritmos e associá-las aos tipos de problemas. E por fim, construir um modelo que auxilie na escolha do método de solução adequado a ser utilizado em um problema de roteirização específico, através da relação entre as estratégias e as classes de problemas.

1.4. Metodologia

O trabalho caracteriza-se, quanto a sua finalidade, como uma pesquisa pura, pois é fundamentada no conhecimento teórico existente, sem a utilização da observação empírica do

problema de roteirização de veículos. De forma que este trabalho destina-se a ampliar o conhecimento teórico sobre a utilização dos métodos de roteirização. (MARCONI e LAKATOS, 2007) O trabalho é classificado, em relação ao seu objetivo, como descritivo devido ao uso da comparação das características dos diferentes métodos de roteirização, procurando encontrar relações entre as variáveis para o modelo.

O trabalho utiliza o método dedutivo, pois procura formular um modelo a partir da análise das premissas e pressupostos dos métodos de roteirização encontrados na revisão da literatura. Caracterizado o uso do argumento dedutivo que procura extrair conhecimento ao tornar explícitas as informações contidas nas premissas utilizadas, tornado o argumento tão forte quando forem as suas premissas. O método dedutivo propõe-se a ampliar a certeza do conhecimento, reduzindo sua amplitude ao partir do conhecimento geral para encontrar explicações no conhecimento específico.

O trabalho é, em relação a sua natureza, uma pesquisa quantitativa, por utilizar a mensuração de dados que segundo Cauchick Miguel (2010) “no caso da dedução, as variáveis a serem mensuradas são aquelas determinadas pela teoria que norteiam a pesquisa” para obter evidências a fim de construir o modelo. Este trabalho é uma pesquisa axiomática, dirigida a problemas idealizados, cuja preocupação central é obter soluções para o modelo, produzindo conhecimento sobre o comportamento de certas variáveis do modelo, baseada em premissa sobre o comportamento de outras. A pesquisa axiomática normativa desenvolve normas, políticas, estratégias e ações para melhorar os resultados disponíveis na literatura, encontrar uma solução ótima para um problema novo ou comparar o desempenho de estratégias que tratam de um mesmo problema, pois se baseia em modelos que prescrevem uma decisão para o problema (MARCONI e LAKATOS, 2007).

Em relação aos dados, este trabalho é uma pesquisa bibliográfica devido à revisão da literatura acerca do que foi publicado sobre o assunto, ou seja, fontes secundárias, usando a técnica de pesquisa por documentação indireta com a finalidade entrar em contato direto com o que já foi discutido (MARCONI e LAKATOS, 2007). E é também uma pesquisa quantitativa baseadas em modelos matemáticos e de simulação, que são uma representação da realidade, através do desenvolvimento, análise e teste de descrições matemáticas e simbólicas de relações causais definidas entre um conjunto de variáveis de controle e de desempenho.

No processo de modelagem, a realidade é abstraída em um modelo conceitual, que por sua vez é abstraído em um modelo matemático ou de simulação, e a validação exige uma solução coerente com os objetivos e restrições do sistema real. Isto acontece durante as

seguintes etapas do processo de modelagem: a definição do problema, a construção de um modelo, a solução do modelo, a validação do modelo e a implementação da solução.

Na definição do problema determina-se o escopo do problema, suas decisões de interesse e seus objetivos, e o modelo conceitual, descrevendo as alternativas de decisão e as limitações. Essas informações são usadas, na construção do modelo, para desenvolver e avaliar um modelo matemático representativo do problema, através de relações matemáticas, de lógica de simulação ou uma combinação delas. A etapa de solução do modelo utiliza métodos de solução e algoritmos, geralmente com o uso de *software* e *hardware* computacionais, para resolver o modelo; nesta etapa realiza-se uma análise de sensibilidade para verificar a consistência das soluções, é uma etapa central em pesquisa axiomática normativa. Como o objetivo geral do trabalho é a construção de um modelo para escolha de um métodos de roteirização, as etapas de validação do modelo, na qual verifica-se a adequação do modelo diante das hipóteses assumidas, e implementação da solução na prática não ocorreram (CAUCHICK MIGUEL, 2010).

2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS

O problema de roteirização de veículos foi inicialmente estudado por Dantzig e Ramser em 1959, e por Clarke e Wright em 1964, com o objetivo de determinar um conjunto ótimo de rotas para uma frota de veículos usados na distribuição de produtos para clientes com demandas conhecidas, no qual as rotas começam e terminam em um depósito central, e cada cliente é fornecido apenas uma vez por um único veículo, respeitando a capacidade dos veículos e todas as restrições operacionais. De forma a minimizar os custos totais, advindos do número de veículos utilizados e da distância total percorrida. O PRV é um problema de programação inteira que pertence a categoria de problemas NP-árduo (MÜLLER, 2010; RUIZ; MAROTO; ALCARAZ, 2004), ou seja possuem ordem de complexidade exponencial.

Em geral, a malha rodoviária é representada em um grafo, no qual os arcos indicam as vias e os vértices representam os depósitos ou consumidores, o grafo pode ser direcionado ou não direcionado, dependendo da direção em que os arcos são atravessados, e cada arco possui um custo e um tempo de tráfego, possivelmente dependente do veículo ou período (PEREIRA, 2010).

Yurtkuran e Emel (2010) definem o problema de roteirização de veículos, como a designação de um conjunto de rotas usando uma frota de veículos para um conjunto de clientes em que cada rota deve começar e terminar no depósito central, a capacidade de um veículo não deve ser ultrapassada dentro de uma rota, cada cliente deve ser visitado exatamente uma vez, o tempo determinado do percurso não deve exceder o prazo, e o objetivo é minimizar a distância total percorrida e/ou o número total de veículos usados. E concorda que o PRV é um problema NP-árduo de difícil resolução por métodos exatos em tempos computacionais aceitáveis, sugerindo o uso de algoritmos heurísticos que obtêm uma solução suficientemente precisa mais rapidamente.

Segundo Dias (1993), um problema de determinação de rotas ocorre quando queremos ir de um lugar a outro, para isso selecionamos uma entre as diferentes rotas que envolvem os pontos de parada ao longo do percurso. Já Steiner *et al.* (2000) define que o problema de roteamento clássico de veículos necessita de um conjunto de rotas a partir de um ponto de origem para vários pontos de demanda com necessidades de serviços, objetivando minimizar a distância total percorrida pela frota, cujo os veículos tem restrições de quantidade, capacidade e tempo; e retornam ao centro de distribuição de origem.

Belfiore e Yoshizaki (2006) acrescentam que no VPR, os nós tem demanda determinística e cada nó é visitado uma única vez por um único veículo; e objetivo é encontrar o conjunto de rotas com o menor custo. Enquanto Mendes Júnior (2007) define que o problema de roteirização de veículos compreende a distribuição de produtos, em um dado período de tempo, para um conjunto de clientes, através de um conjunto de veículos, que estão localizados em um ou mais depósitos e que são operados por um conjunto de equipes de entrega, utilizando uma rede de rodovias apropriadas.

Ruiz, Maroto e Alcaraz (2004) descrevem o PRV como um conjunto de N clientes ou clientes com demandas conhecidas e determinísticas d_i , i de 1 a N , que devem ser atendidos a partir de um depósito de origem com uma frota t de caminhões de entrega de capacidade conhecida P . Objetivando minimizar a distância total percorrida pelo veículo da frota, ou minimizar os custos da rota.

Segundo Bettinelli, Ceselli e Righini (2010), em muitas aplicações práticas, o problema de roteirização de veículos requer encontrar um conjunto mínimo de rotas de uma frota de veículos com recursos limitados para atender um determinado conjunto de clientes. Quando as rotas iniciam e terminam em um único depósito, com cada cliente sendo atendido por um único veículo de uma frota homogênea com restrição de capacidade, o PRV é clássico. Porém, a maioria das aplicações exige restrições adicionais, como janelas de tempo e empresas com vários depósitos com frota heterogênea com capacidade e custo operacionais diferenciados.

Uma definição mais abrangente para o Problema de Estoque e Roteirização (IRP) é o problema de distribuição de um ou mais produtos, a partir de um ou mais centros de distribuição, que atendem N clientes dentro de um horizonte de planejamento maior. Cada cliente i consome o produto a uma taxa v_i e tem uma capacidade de armazenagem C_i , realizada através de uma frota de veículos homogênea ou heterogênea com capacidade C_v . Com o objetivo de determinar a cada dia quais clientes visitar a fim de minimizar o custo médio diário de distribuição para que não ocorra falta de estoque nos clientes, inserindo custo de falta de estoque ou função de lucro. As decisões de roteamento de veículos e reabastecimento de estoque são rotineiras (BELFIORE; COSTA; FÁVERO, 2006).

Para Goldbarg e Luna (2005) o problema de roteirização de veículos aborda a determinação da sequência de visitas que objetiva atender uma determinada função objetivo. Essas visitas podem ser associadas às ligações (arestas) ou aos pontos (nós) no grafo que

representa as possíveis conexões entre os pontos de visita.

Segundo Enomoto e Lima (2007), um problema de roteirização caracteriza-se como uma forma de escolher percursos ótimos para os veículos, partindo de um ou mais pontos de origem, procurando atender um conjunto de clientes geograficamente dispersos, em locais predeterminados. Situação comum no setor atacadista, parte importante dos canais de distribuição, junto com as restrições como o crescimento das áreas de atendimento, da concentração regional, os horários de atendimento, as vias de acesso, limitações dos veículos, fracionamento das cargas e outros; criam um ambiente operacional complexo. A roteirização é o processo para determinar uma ou mais rotas, caracterizado pelo número de clientes, simbolizados por nós, formando uma rede como representação espacial do movimento dos veículos; e também pelo tamanho e tipo de frota disponível, natureza e localização da demanda e restrição como tempo máximo da rota.

Os problemas de roteirização de veículos são comumente decompostos em duas etapas. Na primeira fase, resolve-se um problema de programação inteira mista para determinar as quantidades a serem entregues aos clientes, os dias de atendimento e a designação de clientes por rotas. E na segunda, determina-se a programação efetiva das rotas a partir dos resultados obtidos na primeira fase (BELFIORE; COSTA; FÁVERO, 2006).

Por problemas de roteirização de veículos, Jozefowicz, Semet e Talbi (2008) refere-se a qualquer problema que envolve a geração de um passeio, ou um conjunto de passeios, em uma rede, ou um subconjunto de uma rede, dado um conjunto de restrições e a necessidade de otimizar um ou mais objetivos. E este pode ser definido em termos dos seguintes componentes: a rede, a demanda, a frota, o custo e objetivo.

- A rede pode ser simétrica, assimétrica ou mistas. É representada como um gráfico, no qual os nós representam as cidades, os clientes ou depósitos, enquanto os arcos representam as ligações reais ou conexões simbólicas. Os valores no gráfico geralmente representam o custo de atravessando um arco. As janelas de tempo associada aos nós ou arcos também podem ser definidas em alguns problemas.
- A demanda pode ser fixa ou estocástica, pode ser associados tanto aos nós como aos arcos, e pode ser dada para um ou vários produtos. Em geral, a demanda aparece como uma distribuição de probabilidade, em que uma certa quantidade de um determinado produto deve ser entregue a determinados nós (os clientes) ou deve viajar ao longo de um arco (passar pela rota). As demandas também indicam os problemas de recolhimento e entrega, na qual exigiu que bens devem primeiro ser pegos em um

local específico e, em seguida, ser entregue em outro lugar.

- A frota cria restrições que afetam a rota. Uma frota pode ser homogênea ou heterogênea. Pode ser composta de um único ou vários veículos, cuja utilização pode, ou não, ser limitada pelo tempo, capacidade ou distância. Também pode haver dependências entre veículos, motoristas, produtos, nós ou arcos.
- Os custos são geralmente fixados para o veículo e variável para sua utilização, em termos de distância ou tempo percorrido. Os custos também podem incluir as punições incorridas quando um cliente recebe com atraso ou um pedido incompleto. Os lucros também podem ser associados a determinados nós ou arcos, como o ganho a ser recolhido quando o nó é visitado ou o arco é escolhido.
- Os objetivos podem ser múltiplos e diversos. A função objetivo pode ser calculada para um único período ou para vários períodos, embora neste último caso, ambos os veículos e as visitas devem ser atribuídos aos diferentes períodos. Os objetivos mais comuns são: a minimização da distância total percorrida, do tempo total necessário, do custo total da excursão, ou do tamanho da frota, e maximizar a qualidade do serviço ou os lucros recolhidos. Porém, quando múltiplos objetivos são identificados, estes diferentes objetivos frequentemente são conflitantes, por essa razão adotar uma função de múltiplos objetivos pode ser vantajoso.

Para Tang, Zhang e Pan (2010), o problema de roteirização de veículos pode ser definido como o problema de indicar as rotas ideais para uma frota de veículos homogêneos a fim de atender alguns clientes geograficamente dispersos para minimizar o custo total de operação. Goldberg e Luna (2005); Leung *et al.* (2010); Pereira (2010); Tang, Zhang e Pan (2010) ressaltam alguns casos especiais do PRV, comumente encontrados em situações reais, tais como:

- O Problema de Roteirização de Veículos Capacitados (PRVC) é uma versão elementar de PRV que considera apenas a restrição de capacidade dos veículos, a demanda é conhecida a priori e existe só um depósito, é o problema com maior concentração de trabalhos.
- O Problema de Roteirização de Veículos com Janelas de Tempo (PRVJT) considera as limitações de tempo para o atendimento de cada cliente, pois existe um intervalo de tempo previsto associados aos clientes, seja em relação ao tempo de chegada, de partida ou a duração do atendimento ao cliente.

- O Problema de Roteirização de Veículos com Múltiplos Depósitos (PRVMD) considera que os veículos podem sair de vários depósitos em vez de um único depósito, portanto os clientes podem obter as suas entregas a partir de diferentes depósitos.
- O Problema de Roteirização Periódica de Veículos (PRPV) considera que o horizonte de tempo para o atendimento como um período maior do que um dia, pois a entrega deve ocorrer apenas em dias específicos.
- O Problema de Roteirização de Veículos com Entrega Dividida (PRED) considera que o cliente pode ser atendido mais de uma vez, pois a necessidade do cliente poderá ser atendida por mais de um veículo, de forma que a demanda do cliente é dividida entre vários veículos.
- O Problema de Roteirização Estocástico de Veículos (PREV) considera que existe alguma variante do problema é uma variável aleatória, como, por exemplo, o tempo de viagem ou o tempo de atendimento do cliente.
- O Problema de Roteirização de Veículos com Entrega Prioritária (PREP) ou *Backhauls* considera o problema de entrega e coleta, no qual os veículos devem primeiro fazer todas as entregas antes de realizar as coletas.
- O Problema de Roteirização de Veículos com Restrição de Distância substitui as restrições de capacidade por restrições de comprimento máximo, isto é, cada rota não deve ultrapassar uma distância T .

3 CLASSIFICAÇÃO DOS PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS

Os problemas de roteirização formam uma família que pode variar do problema do caixeiro viajante, que é o problema de roteirização sem restrição, a problemas mais complexos como problemas de multi-objetivo ou problemas de roteirização dinâmica (JOZEFOWIEZ; SEMET; TALBI, 2008; RUIZ; MAROTO; ALCARAZ, 2004) Algumas classificações encontradas na literatura são descritas a seguir.

Bodin e Golden (1981 *apud* Goldberg; Luna, 2005) classificam os problemas de roteirização de veículos nos seguintes critérios, devido ao grande número de variáveis, restrições e objetivos apresentados no PRV:

- 1) Tempo para servir determinado nó ou arco:
 - a) Tempo especificado e prefixado
 - b) Janela de tempo
- 2) Número de domicílios:
 - a) Um domicílio
 - b) Mais de um domicílio
- 3) Tamanho da frota de veículos:
 - a) Um veículo
 - b) Mais de um veículo
- 4) Tipo de frota disponível:
 - a) Homogênea
 - b) Heterogênea
- 5) Natureza da demanda e parâmetros:
 - a) Determinística
 - b) Estocástica
- 6) Localização da demanda:
 - a) Nos veículos
 - b) Nos arcos
- 7) Grafo do substrato:
 - a) Direcionado
 - b) Não direcionado

- c) Misto
- 8) Restrições a capacidade dos veículos:
 - a) Todos sujeitos às mesmas restrições
 - b) Restrições diferentes
- 9) Tempo de roteirização:
 - a) O mesmo para todos os veículos
 - b) Tempos diversos
 - c) Sem restrições de tempo
- 10) Custos:
 - a) Variáveis (associados à rota escolhida)
 - b) Fixos
- 11) Operação:
 - a) De entrega
 - b) De recolhimento
 - c) Ambas
- 12) Objetivo:
 - a) Minimizar custos fixos
 - b) Minimizar custos de operação na rota
 - c) Minimizar o número de veículos
- 13) Restrições na capacidade dos arcos:
 - a) Impostas a todos os arcos
 - b) Impostas a um subconjunto de arcos
 - c) Sem restrições
- 14) Outras

Enomoto e Lima (2007) observam que embora os problemas de roteirização de veículos apresentem variações, pode-se de um modo geral reduzi-los segundo a origem e destino do trajeto e segundo o tipo de modelagem (nó ou arco). Uma classificação para a roteirização feita em relação aos pontos de origem e destino é quando o problema procura o trajeto em uma rede onde o ponto de origem e destino é único e coincidente, ou existe um ponto de origem e um ponto de destino distintos, ou existem múltiplos pontos de origem e de destino.

Enomoto e Lima (2007) também trazem uma classificação para os problemas de roteirização, segundo as restrições geográfica e espaciais, sendo então os PRV separados em três grupos:

- Problemas de roteirização pura: São problemas espaciais que não consideram as variáveis temporais ou precedências entre as atividades para elaboração dos roteiros de coleta ou entrega. Em alguns casos tem-se apenas a restrição de comprimento máximo da rota. Nesse tipo de problema existe um conjunto de nós ou arcos para serem atendidos que formarão uma sequência de locais, procurando alcançar a minimização do custo total de transporte.
- Problemas de programação de veículos e tripulações: Os problemas de programação podem ser considerados como problemas de roteirização com restrições adicionais relacionadas ao tempo, quando várias atividades precisam ser executadas. Este tipo de problema pode ser dividido em dois casos: Programação de veículos, focado na sequência das atividades para os veículos no espaço e no tempo, e Programação de tripulações, focado na movimentação da tripulação no espaço e no tempo.
- Problemas de roteirização e programação: Os problemas de roteirização e programação envolvem relações de precedência entre as atividades envolvidas e também restrições de janelas de tempo (horário de atendimento e outros). Podem ser considerados como uma combinação de problemas de roteirização e programação. Apresentam restrições mais realistas, onde cada parada pode ter volumes a serem coletados ou entregues. Uma importante variação desse problema é o Problema de Roteirização e Programação de Veículos com Janelas de Tempo (PRPVJT), onde os pontos para atendimento têm uma ou mais janelas de tempo durante o qual o serviço pode ser executado.

Outra classificação proposta por Baita *et al.* (1998 *apud* BELFIORE; COSTA; FÁVERO, 2006) divide os problemas de roteirização segundo algumas características conforme indicado no Quadro 3.1, mas não abrange todas, pois se fossem consideradas o número de combinações seria muito grande. Dentre elas destacam-se o tipo de demanda e o tipo de decisão.

Tabela 3.1 – Elementos de classificação para problemas de estoque e roteirização

Elemento	Atributo	Alternativas		
Topologia da rede de abastecimento	Pontos de abastecimento ou distribuição	Um para um	Um para muitos	Muitos para muitos
Itens a serem entregues	número	Um	Muitos	
Demanda	Tipo	Determinística	Estocástica	
	Comportamento	Constante	Variável	
	Distribuição entre clientes	Uniforme	Não uniforme	
Decisões	Domínio	Frequência de atendimento	Instante de atendimento	
Restrições	Capacidade do veículos	Sim - igual	Sim- diferente	Não
	Capacidade de estocagem	Sim	Não	
	Capacidade de abastecimento	Sim	Não	
	Número de veículos	Fornecido	Variável de decisão	Não restritivo
Custos	Estoque	Manutenção	Falta	Pedido
	Distribuição	Fixo	Proporcional a distância	Proporcional ao número de clientes
Estratégias de solução	Decomposição	Tempo	agrupa-roteiriza	
	Agregação	Tempo	Frequência	Distância
	Algoritmo	Exato	Aproximado	
	Programação matemática	Linear	Inteira	Não linear

Fonte: BELFIORE; COSTA; FÁVERO (2006)

O tipo de demanda pode ser classificado como determinística ou estocástica. Os modelos estocásticos geralmente requerem uma grande quantidade de dados históricos e tratamento estatístico, e os modelos determinísticos têm sido comumente usados para resolução de problemas reais, introduzindo o estoque de segurança e incorporando a sazonalidade a um modelo de previsão de demanda, para absorver o comportamento estocástico.

O tipo de decisão pode ser classificada em frequência de atendimento, tomadas em intervalos regulares com horizonte de planejamento infinito, ou em instante de atendimento, no qual as variáveis de decisão são os instantes de entrega com horizonte de planejamento finito. Os modelos de frequência de atendimento também são divididos em três grupos:

1. Modelos agregados: os modelos analíticos, que desenvolvem ideias qualitativas para sua solução devido ao menor rigor matemático. Nesta categoria encontram-se os modelos que avaliam os *tradeoffs* entre os custos envolvidos no processo de decisão.
2. Modelos de política de partição fixa: neste modelo os clientes são, *a priori*, divididos em regiões de atendimento, se um veículo visita uma região de atendimento, todos os clientes deste grupo também serão visitados.
3. Modelos de frequência discreta: modelo onde os intervalos de atendimento são inteiros ao invés de fracionários.

Esta classificação está apresentada na figura 3.1.

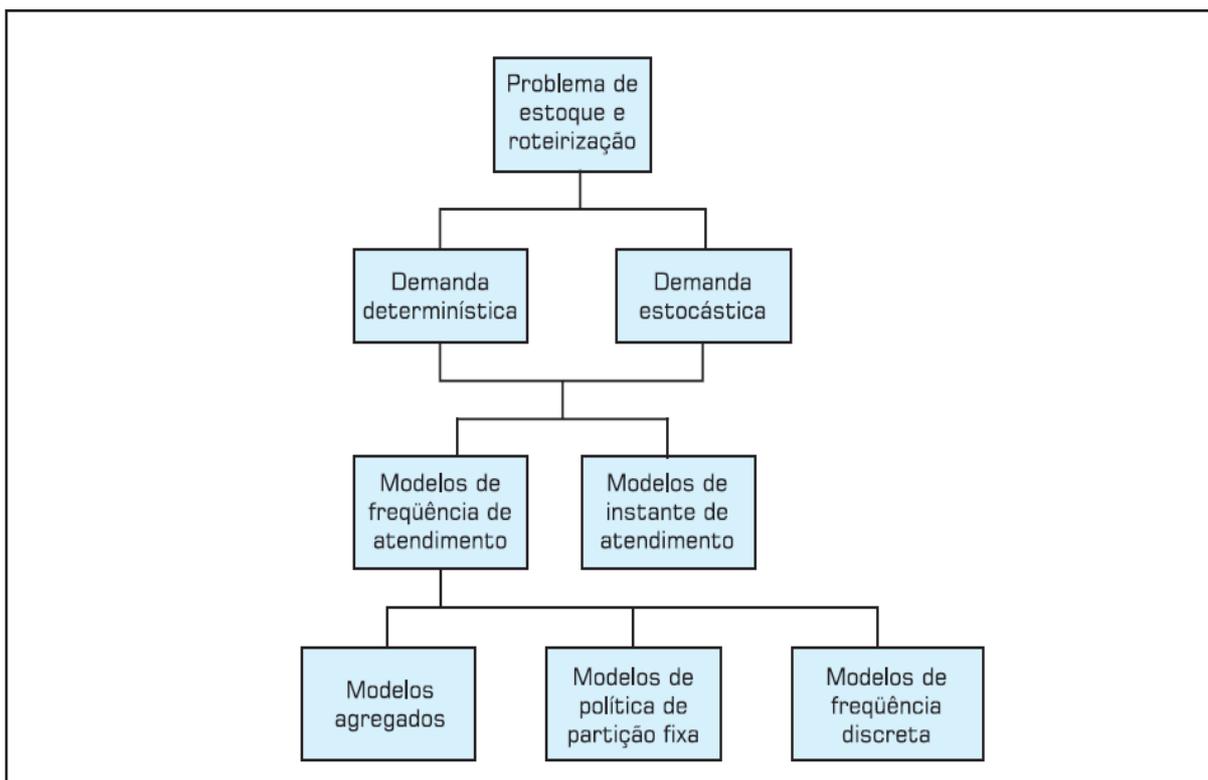


Figura 3.1 – Classificação de Problema de Estoque e Roteirização

Fonte: BELFIORE; COSTA; FÁVERO (2006)

Outra classificação para os problemas de roteirização de veículos é feita por Maganti (1981 *apud* Goldbarg; Luna, 2005) separando o problema clássico de seu variante, colocando-

os em duas grandes classes, as roteirizações em grafos e as roteirização de veículos propriamente dito. A classe das roteirizações em grafo é constituída por dois subgrupos, os problemas de roteirização em nós, relacionados aos ciclos Hamiltonianos, e os problemas de roteirização em arcos, associados aos ciclos Eulerianos. Sendo, o Ciclo Hamiltoniano definido por um circuito que passa por todos os nós do grafo, e o Ciclo Euleriano definido por um ciclo que passa por todas as arestas do grafo.

Dentre os problemas de roteirização em nós encontra-se o Problema do Caixeiro Viajante (PVC), e suas variantes a saber: O PVC Simétrico (PVCS); o PVC Generalizado (PVCG); o PVC com *Backhauls* (PVCB); o PVC com Janelas de Tempo (PVCJT); o PVC Múltiplo (PVCM); o PVC com Gargalo ou MinMax (PVC MinMax); o PVC com Bônus (PVC-B); o PVC Seletivo (PVC-S), o PVC Estocástico, que pode ser em PVC com Clientes Estocásticos (PVC-CE), PVC com Tempo de Viagem Estocástico (PVC-TE), o PVC Múltiplo com Tempo de Viagem Estocástico (PVC-MTE); o PVC Min Max-Min *Sum* (PVC-M³S); o PVC Periódico (PVC-P); o PVC com Coleta (PVC-C); o PVC com Recompletação (PVC-R); o PVC em Matriz Circulante (PVC-MC); o PVC Seletivo Euclidiano (PVC-E); o PVC de Máximo Espalhamento (PVC-ME); o PVC m-Peripatético (PVC-mP); o PVC com Alvos Móveis; o PVC com Mínimo Desvio; o PVC On-Line; o PVC Remoto; o PVC de Mínima/Máxima Latência; o PVC com Custos Dependentes do Tempo; o PVC com Requisitos de Separação; e o PVC Bipartido.

Já entre os problemas de roteirização em arcos, eles podem ser não-capacitados como o Problema do Carteiro Chinês (PCC) e com suas variações: Problema do Carteiro Chinês Não-Direcionado (PCCND), Problema do Carteiro Chinês Direcionado (PCCD), Problema do Carteiro Chinês com Arestas Mistas (PCCM), Problema do Carteiro Chinês Capacitado (PCCC), Problema do k-Carteiro Chinês (k-PCC), Problema do k-Carteiro Chinês Min-Max (MM-k-PCC), Problema do Carteiro Chinês ao Vento (PCW), Problema do Carteiro Chinês Hierárquico (PCCH). Há também o Problema do Carteiro Rural (PCR), com suas variações: Problema do Carteiro Rural Direcionado (PCRD), Problema do Carteiro Rural com Arestas Mistas (PCRM), Problema do Carteiro Rural Periódico (PCRP). E o Problema da Empilhadeira ou *Minimum Stacker Crane* (PMSC).

E entre os problemas de roteirização em arcos capacitados, encontram-se o Problema de Roteirização de Veículos Capacitados (PRVC), o Problema de Roteirização de Veículos com Múltiplos Depósito (PRVMD), o Problema de Roteirização de Veículos com Janelas de Tempo (PRVJT), o Problema de Roteirização de Veículos Estocásticos (PREV), o Problema

de Roteirização Dinâmica de Veículos (PRDV), o Problema de Roteirização Periódica de Veículos (PRPV), o Problema de Roteirização de Veículos com Entrega Dividida (PRED), o Problema de Roteirização de Veículos com Entrega Prioritária (PREP), o Problema de Roteirização de Veículos com Entrega e Coleta (PREC), Roteirização com Frota Heterogênea (PRFH), Roteirização Multi-objetivo, Roteirização com Facilidades Satélites (PRFS), Roteirização com uso múltiplo de veículos, Roteirização com múltiplos veículos de cobertura, Roteirização com número limitado de veículos, Roteirização e programação multiveículos, Roteirização com restrições de combustível, Roteirização com restrição de tempo de operação (*time deadline*), Roteirização com Trailers, Gerenciamento de frota, Roteirização com tarefas no destino (*routing and scheduling*), Problema de Escala de Tripulação (PET) ou *Crew Scheduling*, e Roteirização com coleta de bônus (Goldbarg; Luna, 2005).

Esta classificação está esquematizada na figura 3.2.

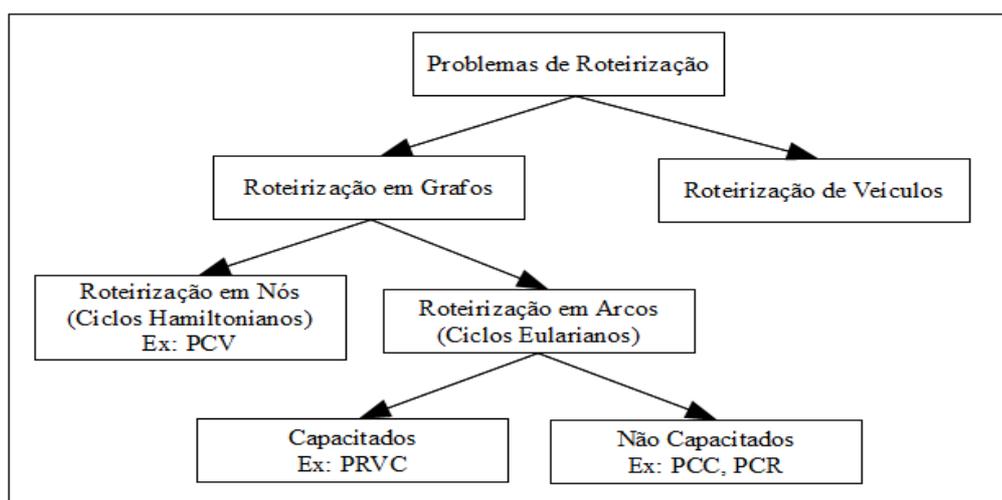


Figura 3.2 – Classificação para o PRV

4 ALGORITMOS DE SOLUÇÃO

Um algoritmo é uma estratégia para a solução de problemas, sendo definido com um procedimento que termina em um número finito de passos. Para solucionar os problemas de roteirização são usados inúmeros algoritmos, que podem ser algoritmos exatos ou algoritmos heurísticos. Para se obter uma solução adequada para um problema de otimização, além da escolha do algoritmo a ser utilizado, deve-se observar a formulação do problema, pois ela tem um grande impacto no desempenho do algoritmo (Goldberg; Luna, 2005). Uma formulação do Problema de Roteirização de Veículos bastante utilizada como base em diversos métodos é feita por Fisher e Jaikumar em 1982, mostrada na figura 4.1:

$$(PRV) \quad \text{Minimizar } z = \sum_{i,j} (c_{ij} \sum_k x_{ijk})$$

sujeito a:

$$\sum_k y_{ik} = 1 \quad i = 2, \dots, n \quad (4.1)$$

$$\sum_k y_{ik} = m \quad i = 1 \quad (4.2)$$

$$\sum_i q_i y_{ik} \leq Q_k \quad k = 1, \dots, m \quad (4.3)$$

$$\sum_j x_{ijk} = \sum_i x_{jik} = y_{ik} \quad i = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, m \quad (4.4)$$

$$\sum_{i,j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subseteq \{2, \dots, n\}, \quad k = 1, \dots, m \quad (4.5)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\} \quad i = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, m \quad (4.6)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad i, j = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, m \quad (4.7)$$

Figura 4.1 – Formulação básica do PRV

Onde:

x_{ijk} é um variável binária que assume o valor de 1 quando o veículo k visita o cliente j imediatamente após o cliente i , e 0 caso contrário.

y_{ik} é um variável binária que assume o valor de 1 se o cliente i é visitado pelo veículo k , e 0 caso contrário.

q_i é a demanda do cliente i .

Q_k é a capacidade do veículo k .

c_{ij} é o custo de percorrer o trecho que vai do cliente i ao j .

As restrições (4.1) garantem que os veículos não visitem mais de uma vez um cliente, as restrições (4.2) assegura que o depósito seja visitado por todos os veículos, as restrições (4.3)

indicam a limitação da capacidade dos veículos, as restrições (4.4) garantem que os veículos não parem suas rotas em um cliente, e as restrições (4.5) indicam as restrições de eliminação de *subtours*.

Goldbarg e Luna (2005) mostram as estratégias utilizadas pela pesquisa operacional na construção de algoritmos para resolver problemas de roteirização de veículos, indicadas na figura 4.2.

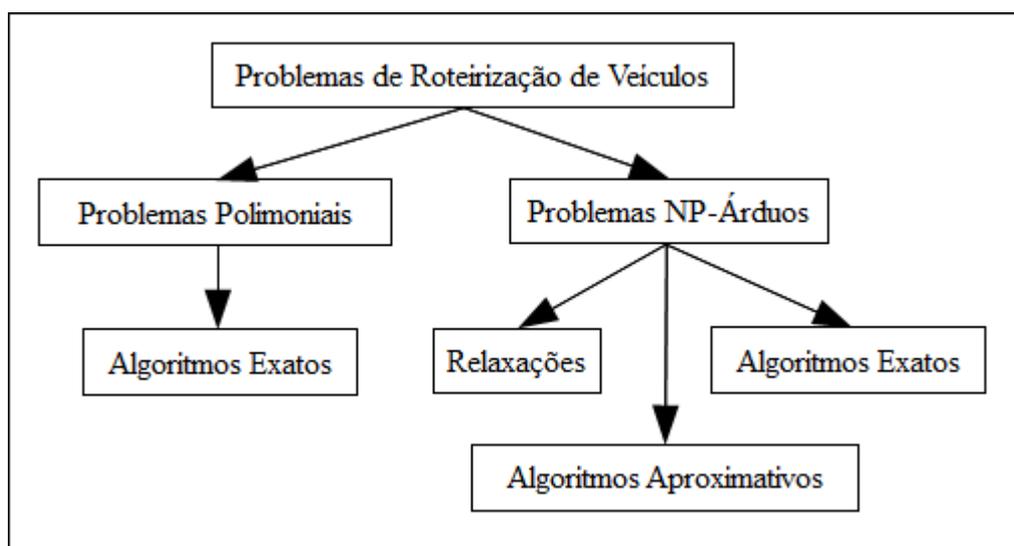


Figura 4.2 – Estratégia para a solução de PRV

Fonte: Goldbarg; Luna (2005)

Os problemas polinomiais exigem a existência de um algoritmo polinomial para a resolução do problema, portanto esta classe de problemas faz o uso de algoritmos exatos, que encontram a solução ótima para o problema da roteirização de veículos. Enquanto os problemas não-polimoniais não podem ser resolvido por um algoritmo polinomial, por isso para esta classe de problemas são usados algoritmos exatos, relaxações ou algoritmos aproximativos.

Segundo Tang, Zhang e Pan (2010), a maioria das variações do PRV clássico, como o Problema de Roteirização de Veículos Capacitados (PRVC), o Problema de Roteirização de Veículos com Janelas de Tempo (PRVJT), o Problema de Roteirização de Veículos com Múltiplos Depósitos (PRVMD), o Problema de Roteirização Periódica de Veículos (PRPV), e o Problema de Roteirização de Veículos com Entrega Dividida (PRED), são formulados como problemas de programação inteira 0-1, problemas de programação inteira mista e modelos de otimização de rede.

Relaxação é uma estratégia que consiste em resolver uma sequência de problemas “fáceis” obtidos a partir de relaxações de restrições do problema original, e com a solução de tais problemas obtém-se os limites para o valor da solução ótima do problema original. Nemhauser e Wolsey (1988 *apud* ESPEJO; GALVAO, 2002) definem uma relaxação do problema (P) como um problema de otimização, (RP), que tem as seguintes propriedades: o conjunto de soluções viáveis de (P) é um subconjunto das soluções viáveis de (RP), e o valor da função objetivo do problema (P) não é menor que o correspondente valor de (RP), isto é, $v(RP) \leq v(P)$ no caso de problemas de minimização. As relaxações Lagrangeana são as relaxações mais utilizadas devido a suas várias aplicações, como no Problema do Caixeiro Viajante ou nos problemas de roteirização (ESPEJO; GALVAO, 2002).

Müller (2010) indica para a solução do Problema de Roteirização de Veículos com Janelas de Tempo (PRVJT) quadro tipos gerais de métodos exatos, são eles: Programação Dinâmica (PD), Geração de Colunas (GC) conhecido como Dantzig-Wolfe, decomposição de Lagrange ou a resolução direta da formulação.

Como os problemas de roteirização de veículos são NP-árduos, Yurtkuran e Emel (2010) dizem que os algoritmos exatos demandam um tempo computacional geralmente inadequado para a sua aplicação em problemas reais. Logo, é preferível o uso de métodos de aproximação, isto é, os algoritmos heurísticos ou meta-heurísticos. Nota-se que os estudos mais recentes para o PRV concentram-se em algoritmos aproximativos, pois estes procuram uma solução próxima da solução ótima. Os algoritmos aproximativos aceitam uma solução que trará resultados tão bons quanto o resultado da solução ótima, reduzindo a certeza da solução em troca de um menor tempo computacional. Os algoritmos aproximativos podem ser divididos em dois grupos: os métodos heurísticos e os métodos meta-heurísticos. Os métodos heurísticos encontram uma solução através de interações, proibindo movimentos que tragam uma piora no valor da função objetivo, por isso, pode ocorrer uma disparidade entre a solução encontrada e a solução ótima ou aproximada conhecida.

Segundo Müller (2010) os algoritmos heurísticos podem ser classificados em métodos de construção de roteiro, como a heurística da economia de Clarke e Wright e a heurística de construção de roteiro II de Solomon; e em métodos de melhoria de roteiro, como o procedimento Or-opt de Or ou o procedimento 2-opt de Potvin e Rousseau, que objetivam melhorar a solução inicial pela troca de cliente dentro ou entre as rotas. De acordo com Novaes (2007), os métodos de construção de roteiro partem de um ou dois pontos e formam um roteiro a partir da inserção de pontos, como o método de inserção do ponto mais distante

ou o método da inserção mais econômica. Enquanto os métodos de melhoria de roteiro partem de uma solução obtida anteriormente por outro método e buscam melhorar o resultado através do uso de uma sistemática predefinida, do qual os mais utilizados são os métodos 2-opt e 3-opt desenvolvidos por Lin e Kernigham. Novaes (2007) ressalta que o método de varredura e o método de Clarke e Wright podem ser usados para roteirização com restrições, no qual é necessário fazer a separação dos pontos a serem visitados em zonas e a roteirização simultaneamente.

Figliozzi (2010) classifica os algoritmos heurísticos para resolver o problema de roteirização de veículo com janelas de tempo, em ordem crescente de qualidade da solução: heurísticas de construção, heurísticas de busca local e meta-heurísticas. As meta-heurísticas possuem soluções com maior qualidade porém ela leva um tempo computacional mais longo, portanto existe uma evidente relação entre o tempo computacional e a qualidade da solução. Os algoritmos de construção realiza a inserção de clientes em rotas parciais até que uma solução viável é obtida. Os métodos de busca local visam melhorar uma solução viável através de trocas dentro da vizinhança, mantendo a viabilidade da solução. E as meta-heurísticas incluem um diversificado conjunto de métodos como o recozimento simulado, algoritmos genéticos, busca tabu, colônia de formigas e programação com restrições.

Goldberg e Luna (2005) classificam os métodos heurísticos usados para o problema de roteirização de veículo em:

- Heurísticas Construtivas: usam variações de construção de rotas sequencial ou paralelo, e de expansão de rotas com critério da economia, expansão radical ou agrupamento de proximidade. Elas podem usar procedimentos de economia e inserção, como a Heurística de Clark e Wright e a Heurística de Mole e Jameson.
- Heurísticas em Duas Fases: procuram reunir os clientes indicando os veículos aos grupos, em uma fase de agrupamento, e encontrando a rota dentro desse grupo, em uma fase de roteirização. Podem usar procedimentos de primeiro agrupar e depois rotear, como a Heurística de Gillet e Miller e o procedimento de Christofides *et al.*, ou usar procedimentos de primeiro rotear e depois agrupar, como o de Newton e Thomas, ou os procedimentos de melhoria ou troca, como o algoritmos de Russel.
- Heurísticas por Aproximação através de Programação Matemática: baseiam-se diretamente nas técnicas de programação matemática, como o trabalho de Fischer e Jaikumar.

- Heurísticas por Otimização Interativa: essa estratégia possibilita absorver um alto grau de interação humano no processo de solução, incluindo a experiência do especialista, como a apresentada por Jarvis e Ratliff.
- Heurísticas de Busca Local: procuram intensificar a qualidade da solução obtida a partir de uma solução inicial, objetivando reduzir a explosão combinatória dos problemas NP-árduos, como a Heurística k-Ótima. Alguns algoritmos construtivos também podem ser classificados como busca local.

Entre os métodos meta-heurísticos, Yurkuran e Emel (2010) citam o Recozimento Simulado (SA), o Algoritmo Genético (AG), Busca Tabu (ST), Otimização da Colônia de Formigas (ACO), Otimização por Enxame de Partículas (PSO) como os métodos usados para o problemas de roteirização de veículos geralmente em conjunto com um método de melhoria de roteiro, como o 2-opt e 3-opt, ou outro método de busca local para melhorar a solução. Eles também indicam o *Electromagnetism-like Algorithm* (EMA), que é relativamente novo, pois foi introduziu por Birbil e Fang em 2003, como um método meta-heurístico para resolver modelos de otimização contínua utilizando variáveis limitadas.

4.1. Softwares para o problema de roteirização de veículo

Uma forma de resolver o problema de roteirização é pelo modelo das rotas mínimas em rede entre as existentes com o menor tempo, custo ou distância, podendo utilizar programação dinâmica ou por estágios. Muitas empresas usam o processamento de dados para o cálculo das rotas, por isso existem vários *softwares* disponíveis no mercado que definem itinerários capazes de reduzir o tempo total de percurso. Geralmente formados por duas partes, um programa de análise da rede, que determinam a distância e tempo de percurso entre dois pontos de entrega, classificam as combinações possíveis em ordem decrescente de economia, usando as distâncias exatas ou das coordenadas; e um programa de planos, que converte em uma lista de itinerários otimizados (DIAS, 1993). Segundo Melo e Ferreira Filho (2001), os *softwares* de roteirização são sistemas computacionais que através de algoritmos, geralmente heurísticos, e uma base de dados encontram soluções para os PRPV com resultados satisfatórios. Atualmente esses sistemas podem considerar inúmeros tipos de restrições, e possuem recursos gráficos importantes para o processo de tomada de decisão. Nos anos 90, muitos sistemas incorporaram Sistemas de Informação Geográfica (SIG), possibilitando uma

perfeita visualização e edição de rotas e paradas em mapas já utilizados pelos motoristas e a identificação dos pontos de atendimento a partir dos endereços dos clientes, formando os chamados Sistemas de Apoio à Decisão Espacial (SADE). Entre os sistemas comercializados no Brasil estão o Trucks, um dos mais antigos disponíveis no mercado nacional e com os maiores registros de utilização; o Truckstops, um método de geração de roteiros iniciais através de uma heurística do tipo vizinho mais próximo; o RoadShow, que trabalha com janelas de tempo rígidas ou flexíveis; o TransCAD, que combinando um SIG e um sistema de modelagem de capacidades de transporte em uma plataforma integrada (SIG-T); o ROTAcerta, desenvolvido pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) em 1993; e o ArcLogistics Route, capaz de atribuir paradas a veículos considerando fatores como tempo, custo, capacidade e produtividade de veículos.

5 RELAÇÃO ENTRE OS PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS E AS ESTRATÉGIAS DE SOLUÇÃO

Entre os vários algoritmos usados para solucionar o problema de roteirização de veículo encontrados na revisão da literatura, algumas estratégias de solução se destacam por serem amplamente utilizados, seja isoladamente ou combinadas para formar um algoritmo adaptado a um problema de roteirização específico. As estratégias mais frequentes utilizadas nos algoritmos exatos são a Programação Matemática (PM), principalmente a Programação Inteira (PI) e a Programação Dinâmica (PD), e Geração de Colunas (GC). A relaxação mais usada é a Relaxação Lagrangeana. Os métodos aproximativos podem ser métodos heurísticos, que por sua vez são separados em métodos de construção de rota, destacando-se o Método das Economia ou método Clark e Wright, e os métodos de melhoria de rota, sendo os mais utilizados os métodos 2-opt, 3-opt e Busca Local. Os métodos aproximativos também podem ser os métodos meta-heurísticos, destacando-se o métodos de Recozimento Simulado (SA), Algoritmo Genético (AG), Busca Tabu (ST), Otimização da Colônia de Formigas (ACO), Otimização por Enxame de Partículas (PSO). A figura 5.1 relaciona esses algoritmos com as estratégias de resolução do problema de roteirização de veículos.

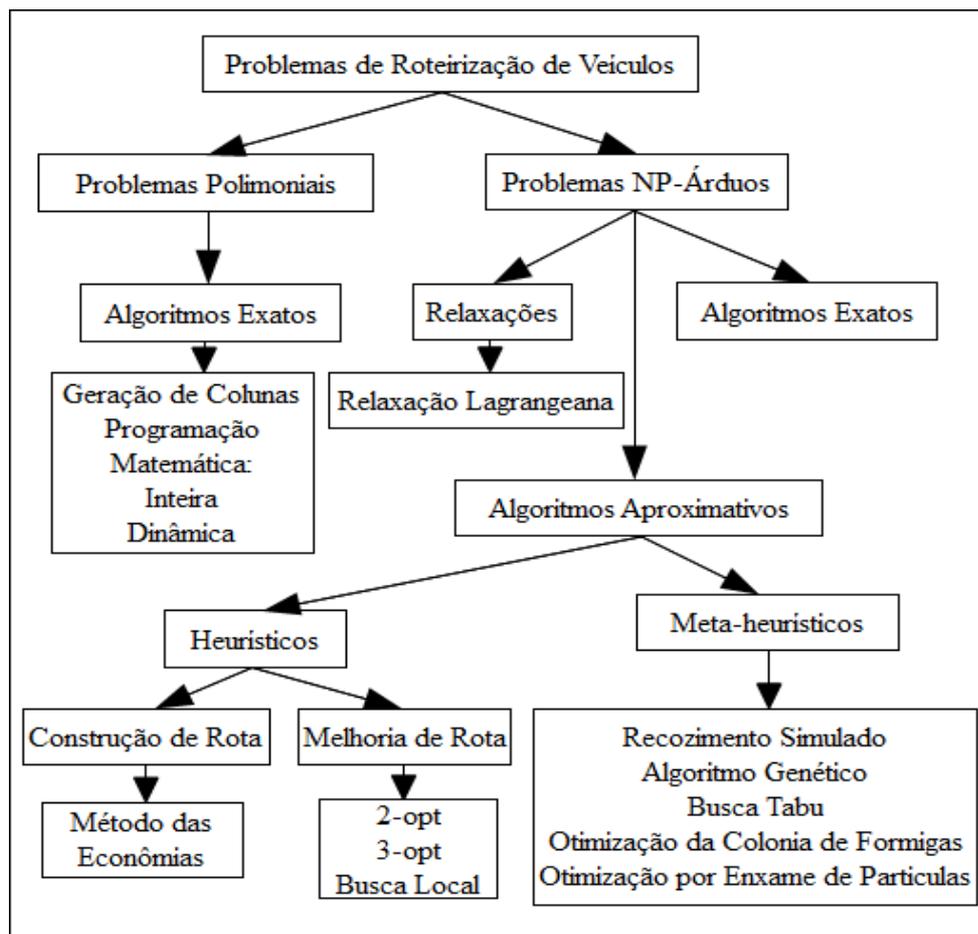


Figura 5.1 – Estratégias e Algoritmos para o PRV

Adaptado de: Goldbarg; Luna (2005)

Quando se analisa quantitativamente os algoritmos utilizados, incluindo as diversas indicações de outros trabalhos, encontradas na revisão bibliográfica, encontra-se 408 trabalhos que indicam algoritmos para a solução do problema de roteirização de veículos. Devido à existência da grande quantidade de algoritmos para a solução do PRV, eles foram agrupados de acordo com as suas estratégias de solução. A figura 5.2 indica a distribuição desses trabalhos nas estratégias de solução. Nota-se que cerca de 66% dos trabalhos usam algoritmos aproximativos, pois estes requerem um menor esforço computacional quando comparados aos algoritmos exatos.

Estratégias de Solução

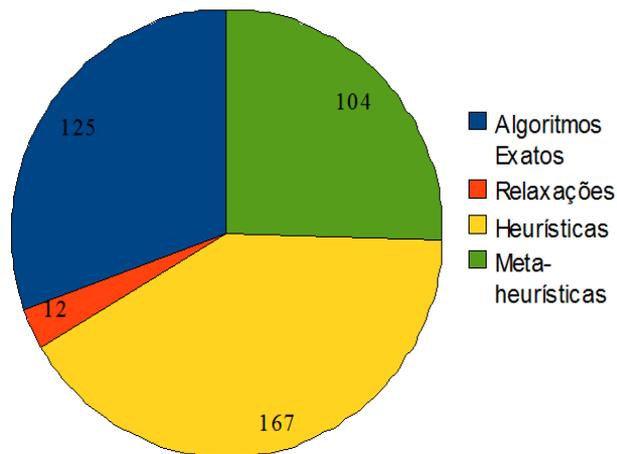


Figura 5.2 – Distribuição das estratégias citadas

Como a estratégia de algoritmos aproximativos tem um número expressivo de casos, alguns algoritmos apresentaram uma maior recorrência, isto é, foram mais frequentemente utilizados para os problemas de roteirização de veículos. A figura 5.3 apresenta esses algoritmos.

Algoritmos mais citados

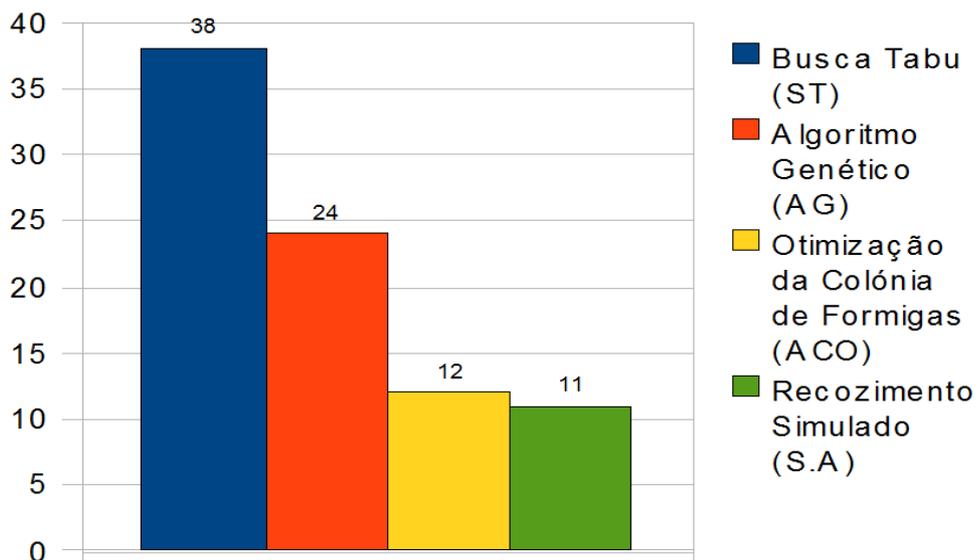


Figura 5.3 – Algoritmos mais citados

Os problemas de roteirização de veículos podem ser formulados com diferentes funções

objetivo e restrições para modelar o problema encontrado na prática pelas empresas, gerando inúmeras variantes do PRV. Esses problemas de roteirização de veículos podem ser classificados de diversas formas, no entanto a classificação proposta por Maganti (1981 *apud* Goldberg; Luna, 2005) utiliza um critério baseado na formulação do problema. Esta classificação divide os problemas de roteirização segundo a sua forma de representação, isto é, se os PRV são representados por grafos, sejam em nós (ciclos Hamiltonianos) ou em arcos (ciclos Eulerianos). Devido a esta classificação não necessitar da definição de especificidades dos problemas de roteirização de veículos, ela foi utilizada para agrupar os trabalhos analisados. A distribuição encontrada está representada na figura 5.4. Percebe-se que os trabalhos concentram-se nos problemas de roteirização em arcos capacitados.

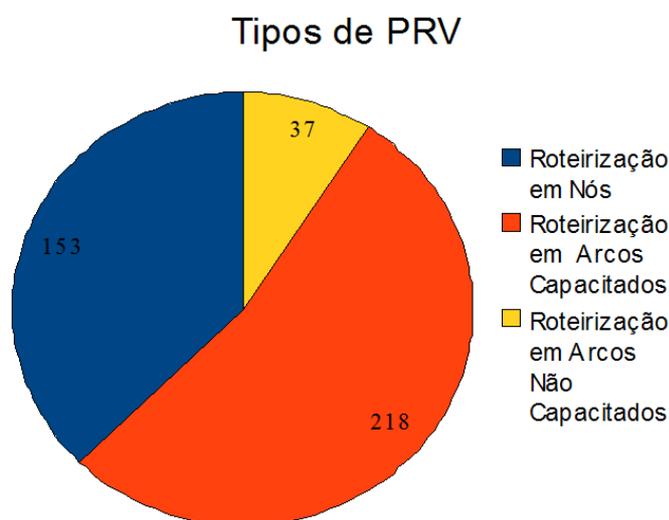


Figura 5.4 - Distribuição dos PRV citados

A associação encontrada entre as estratégias de solução dos algoritmos com os seus respectivos tipos de problemas de roteirização de veículos está indicada na tabela 5.1. Percebe-se que independente da classificação do PRV, os algoritmos aproximativos estão em média com 65% dos algoritmos utilizados, sendo 42% algoritmos heurísticos, 23% meta-heurísticos, e os algoritmos exatos com 33%, em média. Para os problemas de roteirização em arcos capacitados, nota-se uma distribuição mais uniforme entre as diferentes estratégias, com exceção das relaxações. As relaxações possuem apenas 12 casos, indicando que seu uso para problemas de roteirização não é frequente, porém nota-se que seu uso é maior em problemas

de roteirização em nós.

Devido à distribuição homogênea entre as estratégias de solução e os tipos de problemas de roteirização de veículos, não é possível fazer uma correlação entre eles.

Tabela 5.1 - Relação entre os tipos de PRV e as estratégias de solução

Relação entre o PRV e as estratégias	Roteirização em Nós	Roteirização em Arcos Capacitados	Roteirização em Arcos Não Capacitados
Algoritmos Exatos	37	73	15
Relaxações	8	4	0
Heurísticas	75	76	16
Meta-heurísticas	33	65	6

5.1. Modelo para a escolha do algoritmo para o problema de roteirização de veículo

Portanto, para escolher o algoritmo a ser utilizado para resolver um problema de roteirização, deve-se primeiro fazer uma formulação adequada do problema, escolhendo a função objetivo pretendida e as restrições que realmente caracterizam o problema. A modelagem do problema pode representar os clientes em nós ou arcos, dentro de um grafo direcionado, não direcionado ou misto. As características que comumente descrevem um PRV estão descritas na figura 5.5. As características em destaque na figura 5.5 junto com a restrição de capacidade representam um problema de roteirização de veículos clássico, que normalmente é solucionado pelo método das Economias.

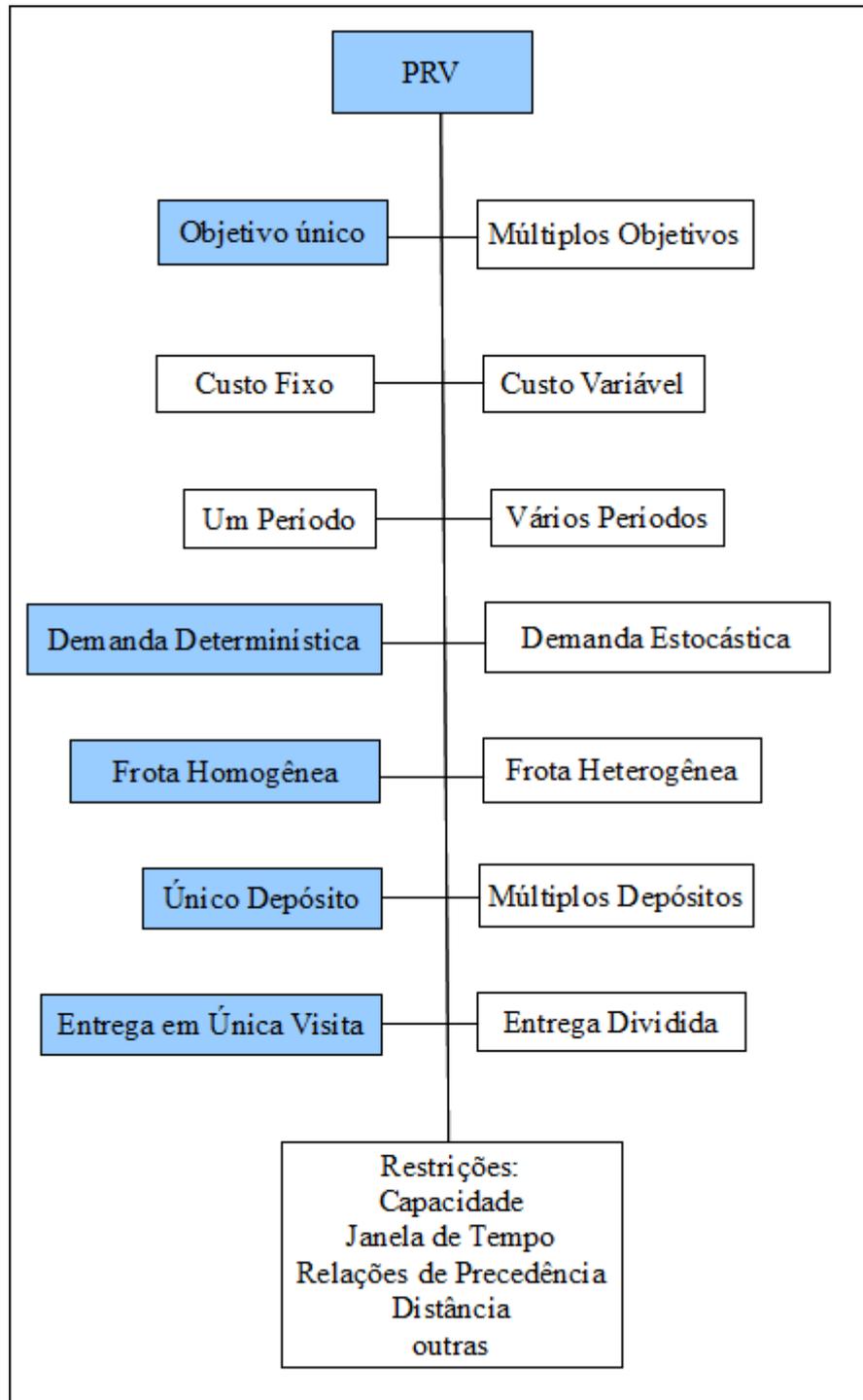


Figura 5.5 - Características que definem um PRV

Depois deve-se determinar qual é o tipo de problema de roteirização de veículos formou-se, pois existe uma vasta literatura sobre as diferentes especificidades para o PRV. Devido à complexidade operacional do PRV, os diferentes tipos de problema de roteirização usam estratégias diversificadas que resultam em soluções com qualidade aceitável, portanto, esses algoritmos não são restritivos a um problema específico. Por exemplo, problemas com

restrição de janela de tempo podem usar algoritmos exatos, *branch-and-cut-and-price*, programação de memória adaptativa, heurísticos de construção de rota, *scatter search*, algoritmo genético ou computação paralela. E problemas com restrição de precedência relacionadas à entrega e coleta podem usar algoritmos exatos, heurísticas de busca tabu, otimização de colônia de formigas, heurísticas paralelas ou de memória adaptativa.

Definido o problema de roteirização e a sua classificação, deve-se encontrar os problemas similares para averiguar se este PRV tem um método de resolução com o tempo computacional adequado, sendo tanto um algoritmo exato ou heurísticos. Se o tempo é aceitável, deve-se fazer as modificações necessárias para o uso do algoritmo. Se o tempo computacional for inadequado, recomenda-se usar uma combinação do método com um algoritmo de melhoria de solução a fim de reduzir o tempo computacional dentro de padrões aceitáveis. Por fim, faz-se a aplicação do algoritmo resultante.

6 CONCLUSÕES

O problema de roteirização de veículos é um problema de decisão encontrado normalmente no nível operacional das decisões de uma organização, porém seus resultados influenciam a eficiência de toda a organização, sendo frequentemente vital para que a empresa atenda a seus objetivos organizacionais. Portanto, o problema de roteirização de veículos é uma otimização combinatória de fundamental importância para muitos setores, principalmente o logístico. Por isso, desde sua formulação em 1959 por Dantzig e Ramser, o PRV permanece foco de muitos estudos que procuram aperfeiçoar cada vez mais seus algoritmos de solução. Por ser um problema operacional, o PRV tem várias características específicas para cada aplicação prática, ampliando assim sua complexidade.

Por isso, a definição do problema de roteirização de veículos, e conseqüentemente, sua formulação tem uma grande variação, formando diferentes tipos de PRV. Além das diferentes definições, o PRV também tem várias classificações, de acordo com suas características específicas, resultando em diferentes algoritmos para a sua solução, que podem ser algoritmos exatos, relaxações, algoritmos heurísticos e meta-heurísticos.

A maioria dos métodos para a solução dos problemas de roteirização de veículos utiliza algoritmos heurísticos adaptados às especificidades dos problemas que está tratando, geralmente uma combinação de um algoritmo heurístico clássico com um método de melhoria da solução ou de busca local. A crescente concentração do uso de algoritmos aproximativos deve-se a busca por uma solução do problema com o menor tempo computacional possível, pois o PRV é um problema NP-árduo, e, portanto, de difícil resolução por algoritmos exatos, resultando em um alto tempo computacional. Geralmente esse tempo é inviável para o uso em decisões rotineiras, pois as decisões de rota são atividades constantes nas organizações, objetivando uma resposta rápida e flexível às mudanças de demanda do mercado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALLOU, R. **Logística Empresarial**: transporte, administração de materiais e distribuição física. São Paulo: Atlas, 1993.
- BELFIORE, P.; COSTA, O.; FÁVERO, L. Problema de Estoque e Roteirização: revisão bibliográfica. **Produção**, v. 16, n. 3, p. 442-454, Set./Dez. 2006.
- BELFIORE, P.; YOSHIKAWA, H. *Scatter Search* para Problemas de Roteirização de Veículos com Frota Heterogênea, Janelas de Tempo e Entregas Fracionadas. **Produção**, v. 16, n. 3, p. 455-469, Set./Dez. 2006.
- BETTINELLI, A.; CESELLI, A.; RIGHINI, G. *A branch-and-cut-and-price algorithm for the multi-depot heterogeneous vehicle routing problem with time windows*. **Transportation Research Part C**, 2010.
- CAUCHICK MIGUEL, P. A. (org.). **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.
- CSCMP. **CSCMP Supply Chain Management Definitions**. Disponível em: <<http://cscmp.org/>>. Acessado em: 7 Jul. 2010.
- DIAS, M. **Administração de Materiais**: uma abordagem logística. 4ª edição. São Paulo: Atlas, 1993.
- ENOMOTO, L.; LIMA, R. Análise da Distribuição Física e Roteirização em um Atacadista. **Produção**, v. 17, n. 1, p. 094-108, Jan./Abr. 2007.
- ESPEJO, L.; GALVAO, R. O Uso das Relaxações Lagrangeana e *Surrogate* em Problemas de Programação Inteira. **Pesquisa Operacional**, v. 22, n. 3, p. 387-402, Jul./Dez. 2002.
- FIGLIOZZI, M. *An iterative route construction and improvement algorithm for the vehicle routing problem with soft time windows*. **Transportation Research Part C**, n. 18, p. 668-679, 2010.
- GOLDBARG, M.; LUNA, H. **Otimização Combinatória e Programação Linear**: modelos e algoritmos. 2ª edição. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.
- JOZEFOWIEZ, N.; SEMET, F.; TALBI, E. *Multi-objective vehicle routing problems*. **European Journal of Operational Research**, v. 189, p. 293-309, 2008.

- LEUNG, S.; ZHOU, X.; ZHANG, D.; ZHENG, J. *Extended Guided Tabu Search and a New Packing Algorithm for the Two-dimensional Loading Vehicle Routing Problem*. **Computers & Operations Research**, v. 38, p. 205–215, 2010.
- MARCONI, M.; LAKATOS, E. **Técnicas de Pesquisa**: planejamento e execução de pesquisas, amostragens e técnicas de pesquisa, elaboração, análise e interpretação de dado. 6ª edição. São Paulo: Atlas, 2007.
- MELO, A.; FERREIRA FILHO, V. Sistema de Roteirização e Programação de Veículos. **Pesquisa Operacional**, v. 21, n. 2, p. 223-232, Jul./Dez. 2001.
- MENDES JUNIOR, P. **Otimizando a Distribuição**: Como integrar Pessoas, Processos e Sistemas na Roteirização de Veículos. Comitê de Logística AmCham: Jun. 2007. Disponível em: <http://www.amcham.com.br/download/informativo2007-06-27g_arquivo>. Acessado em: 7 Jul. 2010.
- MÜLLER, J. *Approximative solutions to the bicriterion Vehicle Routing Problem with Time Windows*. **European Journal of Operational Research**, v. 202, p. 223-231, 2010.
- NOVAES, A. **Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- PEREIRA, D. **Heurísticas e Algoritmo Exato para o Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega Simultâneas**. Tese de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Fev. 2010.
- RUIZ, R.; MAROTO, C.; ALCARAZ, J. *A Decision Support System for a Real Vehicle Routing Problem*. **European Journal of Operational Research**, v. 153, p. 593-606, 2004.
- SOBRAPO. **Pesquisa Operacional**. Disponível em: <http://www.sobrapo.org.br/o_que_e_po.php>. Acessado em: 7 Nov. 2010.
- STEINER, M.; ZAMBONI, L.; COSTA, D.; CARNIERI, C.; SILVA, A. O Problema de Roteamento no Transporte Escolar. **Pesquisa Operacional**, v. 20, n. 1, Jun. 2000.
- TANG, J.; ZHANG, J. PAN, Z. *A scatter search algorithm for solving vehicle routing problem with loading cost*. **Expert Systems with Applications**, v. 37, p. 4073-4083, 2010.
- YURTKURAN, A; EMEL, E. *A new Hybrid Electromagnetism-like Algorithm for capacitated vehicle routing problems*. **Expert Systems with Applications**, v. 37, p. 3427-3433, 2010.