2
Descrição do Problema

Este capítulo descreve problemas relacionados a roteamento de veículos com restrições de janela de tempo e múltiplos depósitos. Na seção 2.1 é descrito e definido o Problema de Planejamento de Atendimento (PPA). Na seção 2.2 é apresentada uma extensão para o PPA de forma a considerar necessidades comuns no dia a dia de empresas transportadoras. Trata-se do Problema de Planejamento de Atendimento Aplicado (PPAA). Na seção 2.3 define-se o Problema de Contratação de Veículos Extras (PCVE).

Estes problemas cobrem as diferentes necessidades de planejamento: atendimento de demanda com diferentes níveis de qualidade (rapidez de atendimento), dimensionamento da frota para uma qualidade pré-definida, atendimento ótimo para recursos pré-definidos: orçamento e recursos (CD's e frota).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611929/CA

2.1
Problema de Planejamento de Atendimento

Podemos entender o PPA como um problema de planejamento da movimentação de veículos para o atendimento de demandas de diversas origens para diferentes destinos, respeitando restrições de janela de tempo para o atendimento das mesmas.

Considerando uma rede composta por vértices representando centros de distribuição de demanda e arestas representando caminhos entre os centros, a idéia é movimentar veículos de forma a maximizar o atendimento das demandas, minimizando custos com transporte.

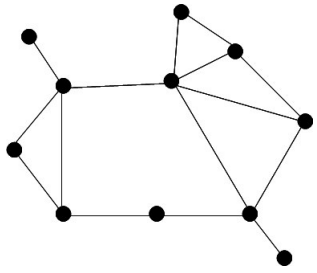

Figura 2.1: Exemplo de malha rodoviária.

Centros de distribuição possuem capacidades de estoque em peso de mercadoria armazenada.

Arestas são definidas por um CD de origem e um CD de destino retratando a rede considerada. Associado a cada aresta existe um tempo médio de transporte.

Veículos possuem limites em peso e volume para carregamento. Além disso, custos fixos para a contratação de veículos são determinados de acordo com a distância a ser percorrida pelo mesmo. Todo veículo possui um conjunto de rotas disponíveis para realizar. Uma rota é definida por uma seqüência de centros de distribuição e devem possuir início e fim comuns. A figura 2.2 exibe 3 exemplos de rota (R1, R2 e R3).

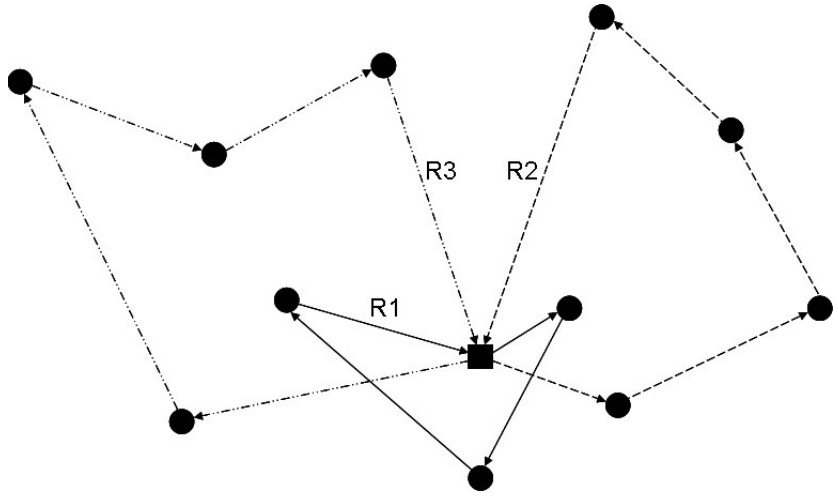

Figura 2.2: Rotas disponíveis.

Demandas são disponibilizadas para transporte em um instante de coleta e em um centro de distribuição determinados, devem possuir um centro de distribuição de destino e um prazo limite para atendimento. Demandas só podem ser estocadas, transportadas ou entregues após estarem disponíveis para transporte e enquanto o prazo limite de atendimento associado não estiver vencido. Toda demanda deve possuir quantidades em peso, uma densidade média associada e um valor de frete pago por tonelada transportada.

Demandas podem ser particionadas em vários veículos considerando que nenhuma das partes seja entregue com atraso. Atendimentos só poderão ocorrer dentro de uma janela de tempo definida de acordo com a demanda correspondente. Ou seja, podem ser parcialmente atendidas e diferentes partes de uma mesma demanda podem ser entregues em instantes diferentes.

Conexões são permitidas. Ou seja, demandas ou partições de demandas podem ser transportadas por mais de um veículo realizando operações de reembarque em outros centros de distribuição. Operações de reembarque

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611929/CA

possuem um custo associado que varia de acordo com a quantidade em peso a ser reembarcada.

O objetivo do problema se resume a realizar o planejamento da alocação de cargas aos veículos e suas viagens entre os centros de distribuição existentes, de forma a maximizar o atendimento das demandas, minimizando gastos com transporte.

2.1.1 Definição

Considere um grafo orientado $G(C, A)$, onde C é o conjunto de vértices de G representando os centros de distribuição considerados no problema e A o conjunto de arcos representando os caminhos de custo mínimo entre os vértices do grafo.

V representa o conjunto de veículos considerados. Veículos possuem capacidades em peso e volume para carregamento dadas por $CapPeso$ e $CapVolume$ respectivamente. Ou seja, tem-se um frota homogênea em capacidade em peso e volume. Cada veículo pode realizar um subconjunto $R(v)$ das rotas disponíveis no problema R. Rotas possuem custos de transporte associados dados por $CustoTransporte(r)$ que variam de acordo com a quilometragem a ser percorrida.

D representa o conjunto de demandas previstas para cada centro de distribuição durante o período de planejamento definido. Uma demanda $d \in D$ é definida por um CD de origem $Origem(d)$, por um CD de destino $Destino(d)$, por um instante de coleta $InstColeta(d)$ e por um prazo limite para o atendimento $PPE(d)$. Além disso, demandas possuem uma quantidade em peso $Peso(d)$, uma densidade associada dada por $Densidade(d)$ e um valor de frete $Frete(d)$ pago para a realização do transporte.

Demandas podem ser particionadas e carregadas em vários veículos considerando que nenhuma das partes seja entregue com atraso. Atendimentos só poderão ocorrer dentro do intervalo $[InstColeta(d), PPE(d)]$ (restrição de janela de tempo). Ou seja, demandas podem ser parcialmente atendidas e diferentes partições de uma mesma demanda podem ser entregues em instantes diferentes.

T representa o conjunto de instantes de tempo relevantes para a saída de veículos dos centros de distribuição durante o período de planejamento considerado.

2.1.2

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611929/CA

Complexidade

Para se provar que o PPA é NP-Difícil, é necessário demonstrar que o problema pertence à classe NP e em seguida reduzir um problema NP-Completo a ele.

Pode-se dizer que o PPA pertence a classe de problemas NP, já que é possível verificar, em tempo polinomial, um certificado para o problema.

Um certificado para o PPA seria uma alocação de veículos a rotas e de cargas a veículos considerando todo o período de planejamento.

Claramente é possível verificar o certificado para o problema em tempo polinomial.

1. as capacidades em peso e volume de cada veículo devem ser respeitadas. Tal verificação pode ser realizada em $O(|V| \,.\, |T|)$;

2. nem toda a seqüência de centros de distribuição corresponde a uma rota válida. Tal verificação pode ser realizada em $O(|V| \,.\, |T|)$;

3. limites de estoque de carga nos centros de distribuição devem ser respeitados. Tal verificação pode ser realizada em $O(|C| \,.\, |T|)$;

4. veículos devem estar associados a algum deslocamento ou devem estar parados em algum dos centros de distribuição existentes. Tal verificação pode ser realizada em $O(|V| \,.\, |T|)$;

5. demandas devem estar em algum centro de distribuição ou devem estar sendo transportadas por algum veículo.Tal verificação pode ser realizada em $O(|D| \,.\, |T|)$;

6. demandas podem ser atendidas, transportadas ou estocadas apenas se estiverem disponíveis para transporte e atendimento. Tal verificação pode ser realizada em $O(|D| \,.\, |T|)$;

Sabendo que o PPA pertence à classe NP, falta apenas demonstrar a redução de um problema NP-Completo em PPA.

Para se reduzir o VRP em PPA deve-se imaginar uma instância simplificada do PPA onde existam demandas tendo como destino apenas um depósito, onde devem estar localizados todos os veículos disponíveis para os atendimentos. Deve existir apenas uma demanda com origem em cada centro de distribuição considerado. Demandas possuem prazos de entrega definidos pelo instante final do período de planejamento e possuem quantidades em peso e volume inferiores à capacidade dos veículos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611929/CA

Desta forma, encontramos o conjunto de rotas para os veículos que maximiza o atendimento dos clientes, minimizando custos com transporte para esta instância do PPA, se e somente se, encontramos o conjunto de rotas ótimo para os veículos no VRP.

Assim, reduzimos o VRP ao PPA.

2.2 Problema de Planejamento de Atendimento com Veículos Extras

Na formulação apresentada para o PPA, apenas veículos próprios são considerados. Entretanto, em determinadas épocas de maior demanda por transporte, é comum não ser possível atender todas as mercadorias dentro dos prazos de entrega determinados. Como conseqüência disso, a contratação de veículos extras acaba sendo necessária.

O Problema de Planejamento de Atendimento com Veículos Extras (PPA-VE) surge como forma de suprir a necessidade de contratação de veículos extras em épocas de grande volume de demandas.

O problema se diferencia do PPA pela possibilidade de contratação destes veículos para a realização de transportes entre os centros de distribuição existentes.

Todas as restrições atribuídas a veículos próprios no PPA são consideradas para veículos extras. Veículos extras costumam ter custos muito maiores para a realização de transportes e normalmente não possuem compromisso de retorno para o CD de contratação. Ou seja, tais veículos podem realizar transportes com origem em qualquer CD existente e normalmente não retornam imediatamente ao CD de contratação.

O objetivo do problema é realizar o planejamento para a movimentação de veículos próprios e extras de forma a maximizar o atendimento das demandas, minimizando custos com transporte.

2.3 Problema de Planejamento de Atendimento Aplicado

Com o objetivo de atender necessidades práticas no que se refere à dinâmica operacional de empresas de transporte rodoviário de cargas, esta seção descreve uma adaptação para o problema descrito na seção 2.1.

A idéia é considerar restrições muito comuns no dia a dia de empresas transportadoras, de forma que seja possível, através da abordagem proposta, aumentar a lucratividade e a eficiência do serviço prestado por empresas de transporte rodoviário de cargas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611929/CA

Portanto, considerando a operação de empresas de transporte rodoviário de cargas, o problema pode ser visto como um planejamento da movimentação da frota de veículos destinados às operações da empresa, para a realização do transporte de encomendas em uma malha rodoviária, durante um período de tempo pré-definido.

Uma malha rodoviária é definida por um conjunto de filiais da empresa, e pelas rodovias que ligam as filiais. Filiais atuam como centros de distribuição de cargas da empresa.

Normalmente, CD's são localizados em posições estratégicas de acordo com estudos de demandas por transporte de carga de cada região. A idéia é que os CD's da empresa estejam preferencialmente localizados em regiões que sejam origem e/ou destino de um grande volume de carga. O principal objetivo de um centro de distribuição é atender demandas por transporte de carga de um grupo de localidades próximas.

Cunha e Silva (CS05) propõem heurísticas baseadas em algoritmos genéticos para se determinar configurações de malha rodoviária para empresas de transporte de carga no Brasil.

Demandas são definidas por uma origem (centro de distribuição onde a carga foi coletada), por um destino (centro de distribuição a partir do qual a carga vai ser entregue em sua localidade final), por um cliente, por tipo de mercadoria, por um instante de coleta (instante a partir do qual a carga se encontra disponível para ser transportada) e por um prazo de atendimento.

Demandas devem ser previstas com base no histórico de atendimento de clientes de empresas transportadoras para o período de planejamento definido. Em particular, para as instâncias testadas neste trabalho, as previsões de demanda têm como base o histórico de atendimento de clientes de uma empresa transportadora brasileira de grande porte.

Empresas transportadoras de carga não costumam possuir uma frota de carretas. O negócio da empresa se resume a conquistar e manter clientes, realizar a distribuição e coleta de cargas a serem transportadas e garantir a qualidade do transporte através da contratação e controle dos veículos.

Entretanto, o que ocorre na prática é que cada CD costuma possuir um grupo de veículos que trabalham exclusivamente para a empresa transportadora (veículos próprios). Tal acordo costuma ser favorável tanto para o motorista, que passa a ter demandas bastante freqüentes por transporte, quanto para a empresa transportadora, que, por conta disso, passa a ter maior poder de negociação para contratação de viagens a custos mais baixos.

Portanto, cada centro de distribuição possui o que chamamos de uma frota base. A frota base de um CD nada mais é que o conjunto de veículos

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611929/CA

dedicados ao atendimento das demandas com origem no próprio CD. Entretanto, isto não quer dizer que tais veículos não possam realizar o transporte de cargas com origem em outros centros de distribuição. Para que isso ocorra, tais veículos devem estar ociosos ou com espaço desocupado ao transitar.

Como conseqüência disso, conexões são permitidas. Ou seja, uma demanda pode utilizar mais de um veículo para o seu atendimento. Entretanto, nem todas os CD's permitem operações de reembarque.

Veículos não necessariamente possuem as mesmas características. Estes podem possuir capacidades diferentes e equipamentos de segurança diferentes.

Veículos que compõem a frota base de um centro de distribuição não devem ficar muito tempo afastados do mesmo. Para isso, cada CD define um conjunto de rotas que podem ser realizadas por sua frota base. Assim, todas as demandas por transporte de carga atendidas pela frota base de um centro de distribuição específico devem ser transportadas através de rotas pré-determinadas.

Entretanto, nem todos os veículos realizam qualquer das rotas disponibilizadas. Normalmente, motoristas aceitam apenas cumprir rotas que não se distanciem muito da cidade onde moram.

Com isso, em determinados momentos, há a necessidade de se contratar veículos extras no mercado. Apesar de normalmente serem mais custosos, tais veículos costumam realizar qualquer viagem e não necessariamente têm compromisso de retorno para o CD que realizou sua contratação. Ou seja, tais veículos se tornam importantes para o atendimento de regiões que costumam ser destino de cargas e que raramente são origem de demanda por transporte de mercadorias.

O PPAA se preocupa apenas em realizar o planejamento da alocação de veículos próprios. Veículos que possam vir a ser contratados em mercado para suprir eventuais necessidades de frete são considerados pelo Problema de Planejamento de Atendimento com Veículos Extras descrito na sessão 2.3.

2.3.1 PPAA: PPA Estendido

Algumas regras deixadas de lado pelo PPA consideradas essenciais para a operação de empresas transportadoras são descritas nesta seção.

Veículos

Limites em peso e volume de carregamento são determinados de acordo com as características e condições dos veículos. Custos fixos para a contratação do veículo costumam ser negociados com cada motorista. Tal remuneração

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611929/CA

costuma variar com a quilometragem a ser percorrida e com o tipo de serviço a ser realizado (entrega urgente ou normal). Além disso, veículos devem compor a frota base de apenas um centro de distribuição.

Regras impostas por apólices de seguro costumam limitar o total em valor de mercadoria transportada. Tais limites normalmente são definidos considerando-se os equipamentos de segurança que compõem cada veículo.

Fatores limitantes para o transporte de carga:

- Limite em Peso;
- Limite em Volume;
- Custo do Transporte;
- CD Base – centro de distribuição cuja frota base o veículo pertence;
- Equipamentos de Segurança – lista de equipamentos de segurança (sensores, atuadores e rastreadores) que fazem parte do veículo.

Manutenção de Veículos

Veículos são obrigados a realizar manutenções preventivas de tempos em tempos. Manutenções são realizadas apenas no CD de contratação do veículos. Cada manutenção preventiva realizada possui uma validade em quilômetros que deve ser respeitada e um custo associado. O tempo médio gasto com operações de manutenção em veículos são considerados.

Fatores limitantes para o transporte de carga:

- Tempo de Manutenção – tempo médio gasto para realizar manutenção no veículo;
- Custo de Manutenção – custo médio de manutenção do veículo;
- Validade da Manutenção – validade dada em quilômetros.

Motoristas

Informações sobre motoristas também costumam ser um fator relevante para se determinar limites em valor de mercadoria transportada. Normalmente, motoristas são classificados com base em indicadores como o tempo de experiência do motorista, seu histórico de acidentes, e pelo número de viagens realizadas pela transportadora.

Fatores limitantes para o transporte de carga:

- Número de Viagens – número de viagens pela transportadora;
- Histórico de Acidentes – número de acidentes em que o motorista se envolveu;
- Tempo de Experiência – anos de experiência com o transporte de cargas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611929/CA

Operações de Reembarque

Um centro de distribuição pode enviar cargas para realizar reembarque em outros centros de distribuição da empresa. No entanto, o total em peso a ser reembarcado em um CD costuma ser limitado.

Veículos possuem limites de carregamento para realização de conexão que variam de acordo com a origem da carga, com o destino da carga e com o centro de distribuição onde deverão ocorrer as operações de reembarque.

Em cada veículo, o peso total de carga com origem no centro A, destino em B e conexão em C possui um limite em peso pré-determinado. Por exemplo, o total em peso de mercadoria com origem em São Paulo, e destino em Recife para fazer conexão em Salvador , a ser transportada em um veículo, costuma ser limitado em 3000 Kg.

Demandas e Clientes

Normalmente, um grupo de clientes importantes costuma ter prioridade de transporte. Clientes costumam ser classificados de acordo com esta ordem de prioridade. Tal classificação torna-se importante no momento de se decidir a composição do carregamento dos veículos. Portanto, cada demanda deve possuir um cliente e um total em valor de mercadoria associado.

Restrições de seguro são definidas como forma de garantir a segurança da carga transportada. A seguinte regra de seguro é definida:

Para cada combinação de cliente e trecho "Origem/Destino", são estabelecidas faixas de valores que exigem a utilização de veículos mais equipados ou menos equipados. Por exemplo, para a combinação do cliente Motorola e do trecho "São Paulo/Rio", a seguinte regra é estabelecida:

- Veículos com carregamentos de R$0,00 até R$100.000,00 devem estar equipados com sensores do tipo Sa, e atuadores do tipo Ab;
- Veículos com carregamentos de R$100.000,00 até R$900.000,00 devem estar equipados com sensores do tipo Sa e Sb, e atuadores do tipo Ab;
- Veículos com carregamentos de R$900.000,00 até R$1.500.000,00 devem estar equipados com sensores do tipo Sa e Sb, e atuadores do tipo Ab e Ac.

Fatores limitantes para o transporte de carga:

- CD de Origem – centro onde ocorreu a coleta da demanda;
- CD de Destino – centro a partir do qual a demanda deve ser encaminha para sua localidade final;

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611929/CA

- Instante de Coleta da Carga – instante a partir do qual a carga se encontra disponível para ser transportada;
- Prazo para Atendimento da Demanda – prazo para entrega da carga;
- Peso;
- Volume;
- Frete – valor pago para a realização do transporte da demanda;
- Valor por Tonelada – valor de mercado para cada tonelada a ser transportada;
- Cliente – cliente associado à demanda.

Tipos de Mercadoria

Informações de tipos de mercadoria são necessárias unicamente para se identificar mercadorias que não podem ser transportadas em um mesmo veículo e ao mesmo tempo. Para isso, é definido um grupo de pares de demandas que apresentam conflitos por tipo de mercadoria e que não podem ser carregadas juntas em um mesmo veículo. Normalmente, não é permitido o transporte alimentos junto com produtos químicos por exemplo.

2.3.2 Definição

Como forma de considerar alterações necessárias para adaptar o PPA de acordo com as necessidades comuns a empresas transportadoras, definiu-se o Problema de Planejamento de Atendimento Aplicado. A idéia é considerar restrições muito comuns no dia a dia de empresas transportadoras que foram deixadas de lado pelo PPA.

Considere uma malha rodoviária descrita pelo grafo $G(C, A)$, onde C representa o conjunto de centros de distribuição de uma empresa transportadora de carga e A representa o conjunto de arcos entre os centros de distribuição existentes.

Cada centro de distribuição $i \in C$ define um conjunto de rotas que podem ser realizadas a partir dele próprio e um conjunto de veículos $V(i) \subseteq V$ dedicados ao transporte das demandas coletadas no próprio CD.

Veículos possuem limites em peso e volume para carregamento dados por $CapPeso(v)$ e $CapVolume(v)$ respectivamente. Veículos possuem limites em valor de mercadoria transportada dados por $CapValor(v)$. Tais limites variam de acordo com as características de cada veículo e com o motorista associado.

D representa o conjunto de demandas previstas para cada CD durante o período de planejamento definido. Previsões de demanda são obtidas com base

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611929/CA

em um histórico de atendimento de clientes. Cada demanda $d \in D$ possui um cliente associado.

K representa o conjunto de clientes da empresa transportadora. Clientes são classificados como Estratégicos, Corporativos ou Empresariais. Dependendo da classificação associada ao cliente, prioridades de carregamento são determinadas. Além disso, regras considerando classificações para os clientes determinam restrições que exigem limites em valor de mercadoria transportada para determinadas rotas ou trechos de rotas determinados. Tais limites são determinados por $CapValor((i,j),k,v)$, onde $(i,j) \in A$, $k \in K$ e $v \in V$.

Outro tipo de restrição muito comum no dia a dia de empresas transportadoras garante que tipos de produtos específicos não sejam transportados em um mesmo veículo ao mesmo tempo. Portanto, G representa o conjunto de pares de demandas que possuem tipos de mercadoria incompatíveis entre si.

Veículos dedicados exclusivamente à empresa transportadora são chamados veículos próprios. Veículos próprios devem realizar manutenções preventivas. Operações de manutenção possuem um custo associado dado por $CustoManutencao(v)$ e uma validade dada em quilômetros determinada por $ValidadeMan$.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611929/CA