3
Formulações

Neste capítulo são apresentadas formulações para os problemas descritos no capítulo 2. Na seção 3.1 são descritas duas formulações para o PPA, sendo que a primeira delas não restringe a movimentação de veículos em rotas. A seção 3.2 apresenta uma formulação para o PPA-VE. Na seção 3.3 é apresentada uma extensão para a formulação considerada na seção 3.1.2. de forma a atender as exigências do PPAA.

3.1
Formulação para o Problema Planejamento de Atendimento

3.1.1
Hipóteses Consideradas

Informações de demanda como a quantidade em peso e volume demandado para transporte e prazos de entrega são definidos para cada instante do período de planejamento.

Uma demanda pode ser particionada e carregada em diferentes veículos. Demandas podem ser atendidas parcialmente desde que a data de entrega estabelecida para a demanda seja respeitada. Ou seja, considerando que nenhuma das partes transportadas seja entregue com atraso.

Conexões são permitidas. Ou seja, demandas ou partes de demandas podem ser transportadas por um ou mais veículos, utilizando CD's intermediários para realização de operações de reembarque. Entretanto, reembarques geram custos operacionais adicionais que devem ser considerados.

Veículos possuem capacidades em peso e volume comuns.

Custos de transporte não variam com o veículo utilizado para o transporte. Estes dependem apenas da distância a ser percorrida.

3.1.2
Modelo Matemático

O modelo matemático apresentado a seguir é uma formulação para o PPA como Problema de Programação Linear Inteira, considerando um fluxo de recursos disponíveis (veículos) em uma rede espaço/tempo que fornece capacidade para a movimentação de demandas entre os diferentes centros de distribuição existentes durante o período de planejamento considerado. Ou seja, ao se resolver o problema, são geradas rotas para os veículos disponíveis que fornecem capacidade para o transporte de mercadorias entre os centros de distribuição existentes. Rotas são definidas por um instante inicial e por uma seqüência de centros de distribuição com início e fim comum.

Desta forma, veículos devem ser associados a uma decisão de deslocamento ou espera sempre que estiverem em um dos centros de distribuição considerados.

A figura 3.1 ilustra os fluxos de veículos e demandas considerados pela formulação. Arcos representam deslocamentos ou decisões de espera de veículos; ou a movimentação ou estoque de demandas.

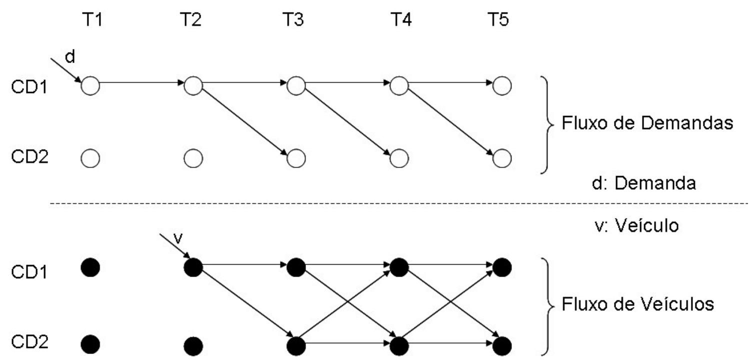

Figura 3.1: Fluxo de veículos e demandas.

Dados de Entrada

- T – conjunto de instantes relevantes (possíveis instantes de saída de veículos dos centros de distribuição) no horizonte de planejamento.
- $CapPeso$ – capacidade em peso de mercadoria para carregamento nos veículos.
- $CapVolume$ – capacidade em volume de mercadoria para carregamento nos veículos.
- $CustoTransporte(i, j)$ – custo para realização do transporte de cargas do CD $i \in C$ até o CD $j \in C$.
- A – conjunto de arestas de custo mínimo entre os centros de distribuição existentes.
- C – conjunto de centros de distribuição considerados no problema.
- $CustoEmbarque(i)$ – custo operacional de embarque por tonelada embarcada no CD $i \in C$.

- $CustoDesembarque(i)$ – custo operacional de desembarque por tonelada desembarcada no CD $i \in C$.
- $CustoConexao(i)$ – custo operacional de reembarque por tonelada reembarcada no centro de distribuição $i \in C$.
- D – conjunto de demandas existentes.
- $Origem(d)$ – CD de origem da demanda $d \in D$.
- $Destino(d)$ – CD de destino da demanda $d \in D$.
- $Densidade(d)$ – densidade da demanda $d \in D$.
- $Frete(d)$ – frete pago por tonelada atendida da demanda $d \in D$.
- $DispInicial(t, i)$ – número de veículos que se tornam disponíveis pela primeira vez no CD $i \in C$ no instante $t \in T$.
- $Coleta(t, i, d)$ – quantidade de carga em peso de mercadoria demanda $d \in D$ que se tornou disponível para transporte no instante $t \in T$ no centro de distribuição $i \in C$.
- $CapEstoque(i)$ – capacidade em peso de mercadoria para estoque no armazém do centro de distribuição $i \in C$.
- $\delta_{i,j}$ – tempo de deslocamento do CD $i \in C$ até o CD $j \in C$.

Variáveis

- $e^t_{i,d} \in \mathbb{R}^+$ – peso total em estoque no CD $i \in C$ logo após o instante $t \in T$ para o atendimento da demanda $d \in D$.
- $xc^t_{i,d} \in \mathbb{R}^+$ – total em peso carregado no instante $t \in T$ no CD $i \in C$ para atendimento da demanda $d \in D$.
- $xd^t_{i,d} \in \mathbb{R}^+$ – total em peso descarregado no instante $t \in T$ no CD $i \in C$ para atendimento da demanda $d \in D$.
- $xt^{i,t}_{j,t',d} \in \mathbb{R}^+$ – total em peso para atender a demanda $d \in D$ saindo no instante $t \in T$ de $i \in C$ e chegando no instante $t' \in T$ em $j \in C$.
- $xw^t_{t',i,d} \in \mathbb{R}^+$ – total em peso da demanda $d \in D$ carregada que se encontra parada no CD $i \in C$ do instante $t \in T$ até o instante $t' \in T$.
- $y^t_{i,d} \in \mathbb{R}^+$ – total em peso da demanda $d \in D$ atendida no instante $t \in T$ no CD $i \in C$.
- $ze^{i,t}_{j,t'} \in \mathbb{N}$ – número de veículos que iniciam a aresta $(i, j) \in A$ no instante $t \in T$.
- $zw^t_{t+1,i} \in \mathbb{R}^+$ – número de veículos que permanecem parados no CD $i \in C$ do instante $t \in T$ até o instante $t + 1 \in T$.

– $vf^t_{i,d} \in \mathbb{R}^+$ – variável de folga que armazena a quantidade da demanda $d \in D$ não atendida pela solução do problema, onde $t = InstColeta(d)$ e $i = Origem(d)$.

Observe que o uso de índices nas variáveis tem por objetivo facilitar a leitura. De fato, De fato, as variáveis descritas utilizam 2 ou 3 índices, i.e. (i, t) corresponde a um vértice na rede espaço/tempo e $((i, j), (t_i, t_j))$ corresponde a um arco.

Função Objetivo

A função objetivo a seguir visa maximizar o atendimento das demandas existentes, minimizando custos com transporte. O primeiro somatório considera a receita obtida com o transporte das demandas realizadas. Os quatro somatórios em seguida consideram despesas com o transporte de carga, custos com embarque, desembarque e com operações de conexão. O último somatório garante a maximização do atendimento das demandas, considerando α o coeficiente de maior ordem de grandeza na função objetivo.

$$
\begin{aligned}
Max \quad & \sum_{t \in T} \sum_{i \in C} \sum_{d \in D} Frete(d).y^t_{i,d} - \\
& \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in A} CustoTransporte(i,j).ze^{i,t}_{j,t+\delta_{i,j}} - \\
& \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} \sum_{\substack{i \in C \\ Destino(d) \neq i}} CustoConexao(i).xd^t_{i,d} - \\
& \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} CustoEmbarque(Origem(d)).xc^t_{Origem(d),d} - \\
& \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} CustoDesembarque(Destino(d)).xd^t_{Destino(d),d} - \\
& \sum_{d \in D} \alpha.vf^{InstColeta(d)}_{Origem(d),d}
\end{aligned}
\tag{3-1}
$$

Restrições

A figura 3.2 ilustra o fluxo de demandas considerado na formulação. Demandas podem ser movimentadas através de veículos ou podem permanecer estocadas em algum centro de distribuição existente. A figura 3.3 exibe uma legenda para os arcos de carregamento/descarregamento, estoque, coleta, atendimento e deslocamento de demandas existente na figura 3.2.

Arcos de deslocamento de demandas consideram tempos gastos com carregamento e descarregamento de mercadorias. No fluxo de exemplo apresentado na figura 3.2, uma quantidade de carga é coletada no instante $T1$, no centro de distribuição C1, e transportada para o centro de distribuição $C2$ onde é descarregada e atendida.

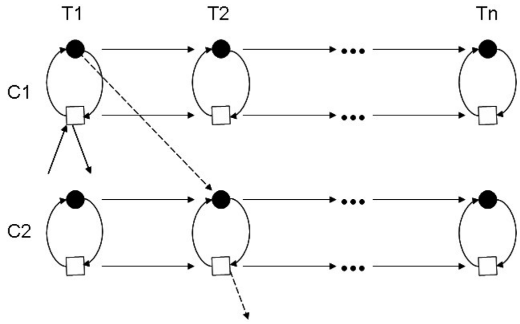

Figura 3.2: Conservação de fluxo de carga.

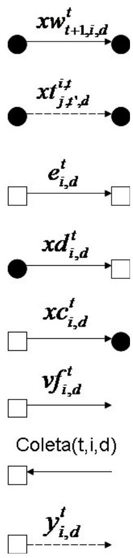

Figura 3.3: Variáveis de fluxo de carga.

Conservação de Fluxo de Carga nos Veículos:

Mercadorias podem ser carregadas, descarregadas, permanecerem paradas junto com os veículos (carregadas em algum veículo) ou serem transportadas pelos mesmos. A figura 3.4 ilustra a conservação do fluxo de carga.

A desigualdade apresentada realiza o controle de conservação de fluxo de carga nos veículos.

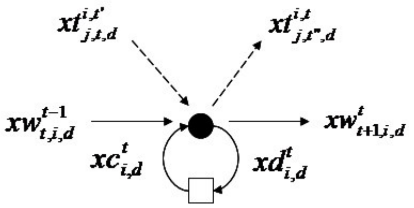

Figura 3.4: Fluxo de carga nos veículos.

$$xw_{t,i,d}^{t-1} + \sum_{\substack{j \in C \\ j \neq i}} xt_{i,t,d}^{j,t-\delta_{j,i}} + xc_{i,d}^{t} - xw_{t+1,i,d}^{t} - \sum_{\substack{k \in C \\ k \neq i}} xt_{k,t+\delta_{i,k},d}^{i,t} - xd_{i,d}^{t} = 0;$$
$$\forall i \in C, \forall d \in D, \forall t \in T \qquad (3\text{-}2)$$

Conservação de Fluxo de Carga em Estoque:

Mercadorias podem ser estocadas, carregadas, descarregadas, coletadas, e atendidas. A figura 3.5 ilustra a conservação de fluxo carga em estoque. A variável vf que aparece na figura e na restrição de fluxo a seguir é uma variável de folga que serve para manter a conservação do fluxo de cargas quando demandas não puderem ser atendidas por completo.

A desigualdade apresentada realiza o controle de conservação de fluxo de carga nos armazéns dos centros de distribuição.

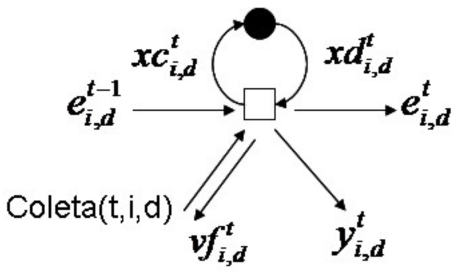

Figura 3.5: Fluxo de carga em estoque.

$$e_{i,d}^{t-1} + Coleta(t,i,d) + xd_{i,d}^{t} - y_{i,d}^{t} -$$
$$xc_{i,d}^{t} - e_{i,d}^{t} - vf_{i,d}^{t} = 0; \;\; \forall i \in C, \forall d \in D, \forall t \in T \qquad (3\text{-}3)$$

Conservação de Fluxo de Veículos:

A cada instante de tempo do período de planejamento, veículos podem se tornar disponíveis, podem iniciar/terminar deslocamentos, ou permanecerem parados. A restrição a seguir, realiza o controle de conservação de fluxo de veículos nos centros de distribuição, considerando as possibilidades existentes.

A figura 3.6 ilustra a conservação de fluxo veículos.

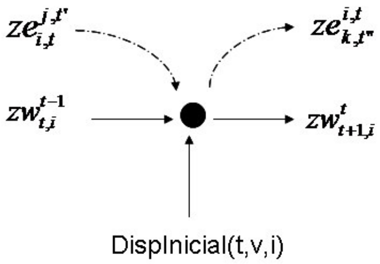

Figura 3.6: Fluxo de veículos nos centros de distribuição.

$$DispInicial(t,i) + \sum_{\substack{j\in C\\ j\neq i}} ze^{j,t-\delta_{j,i}}_{i,t} + zw^{t-1}_{t,i} - \sum_{\substack{k\in C\\ k\neq i}} ze^{i,t}_{k,t+\delta_{i,k}} - zw^{t}_{t+1,i} = 0;\ \ \forall i \in C, \forall t \in T \qquad (3\text{-}4)$$

Capacidade em Estoque:

Assegura que a quantidade de carga armazenada em estoque no centro de distribuição $i \in C$ não ultrapasse $CapEstoque(i)$.

$$\sum_{d\in D} e^{t}_{i,d} \leq CapEstoque(i);\ \ \forall i \in C, \forall t \in T \qquad (3\text{-}5)$$

Capacidade em Peso Carregado para Veículos Parados:

Centros de distribuição possuem capacidades de estoque. Portanto situações em que CD's encontram-se lotados podem vir a ocorrer. Uma forma de poupar espaço em armazém é adiantar o carregamento de mercadorias em veículos, mesmo que estes ainda esperem para iniciar viagem, e/ou retardar a descarga de mercadorias.

Entretanto, limites de capacidade em peso e volume para carregamento nos veículos devem ser respeitados.

Esta restrição assegura que a capacidade máxima em peso de mercadoria carregada em veículos parados no CD $i \in C$ não seja violada.

$$\sum_{d \in D} xw^{t}_{t+1,i,d} \leq CapPeso.zw^{t}_{t+1,i};$$
$$\forall t \in T, \forall i \in C \quad (3\text{-}6)$$

Capacidade em Volume Carregado para Veículos Parados:

Esta restrição assegura que a capacidade máxima em volume de mercadoria carregada em veículos parados no CD $i \in C$ não seja violada.

$$\sum_{d \in D} (1/Densidade(d)).xw^{t}_{t+1,i,d} \leq CapVolume.zw^{t}_{t+1,i};$$
$$\forall t \in T, \forall i \in C \quad (3\text{-}7)$$

Capacidade em Peso para Veículos em Movimento:

Assegura que a capacidade máxima em peso transportado pelos veículos não seja violada.

Na restrição, a variável $ze^{i,t}_{j,t'}$ fornece capacidade em peso para a movimentação de mercadorias na aresta $(i,j) \in A$.

$$\sum_{d \in D} xt^{i,t}_{j,t',d} \leq CapPeso.ze^{i,t}_{j,t'};$$
$$\forall (i,j) \in A, \forall t \in T, t' = t + \delta_{i,j} \quad (3\text{-}8)$$

Capacidade em Volume para Veículos em Movimento:

Assegura que a capacidade máxima em volume transportado pelos veículos não seja violada.

Na restrição, a variável $ze^{i,t}_{j,t'}$ fornece capacidade em volume para a movimentação de mercadorias na aresta $(i,j) \in A$.

$$\sum_{d \in D} (1/Densidade(d)).xt^{i,t}_{j,t',d} \leq CapVolume.ze^{i,t}_{j,t'};$$
$$\forall (i,j) \in A, \forall t \in T, t' = t + \delta_{i,j} \quad (3\text{-}9)$$

3.1.3

Modelo Matemático

Na prática, soluções obtidas com a formulação apresentada na seção anterior não atendem necessidades básicas do Problema de Planejamento de Atendimento.

Mesmo para instâncias pequenas do problema, pode-se perceber, através de experimentos, que o MIP correspondente se torna muito complexo para ser resolvido em tempo considerado razoável.

O que ocorre é que a solução da relaxação linear do problema tende a ser muito fracionária, dificultando muito a busca por soluções viáveis do problema.

Além disso, soluções para o problema utilizando a formulação apresentada costumam sugerir o deslocamento de veículos por toda a malha rodoviária, realizando um número elevado de operações de reembarque. Muitas vezes veículos sequer retornam ao seu centro de distribuição de origem e realizam um número de reembarques considerado inviável na prática.

Utilizando a mesma idéia apresentada na seção anterior, definiu-se uma formulação onde a movimentação de veículos é restrita por rotas previamente definidas. Ou seja, cada veículo ou cada subconjunto de veículos pode realizar um conjunto de rotas determinado.

Desta forma, decisões de deslocamento de veículos passam a estar associadas a uma decisão de início de rota. Uma decisão de início de rota determina instantes e deslocamentos entre os centros de distribuição que compõem a rota para o veículo correspondente.

A figura 3.7 ilustra o fluxo de veículos e demandas considerado pela formulação. Na figura, r representa uma rota que sai de $CD1$, vai para $CD2$ e retorna para $CD1$. Note que uma decisão de início da rota r gera capacidade para as arestas de deslocamento de veículos entre os centros de distribuição, permitindo o transporte das demandas.

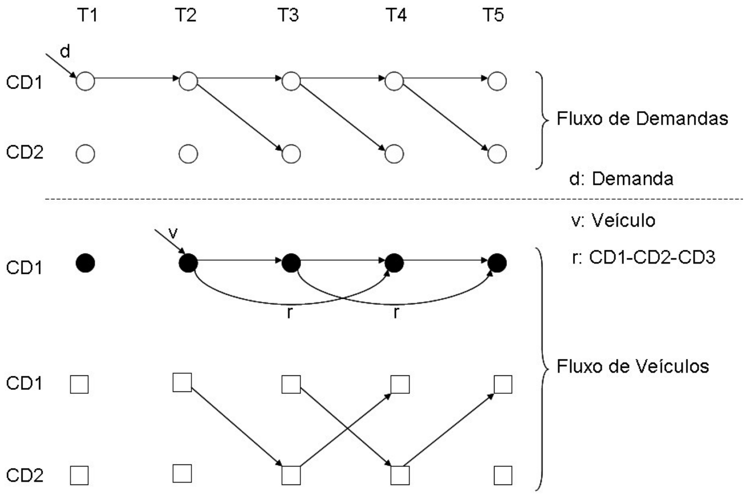

Figura 3.7: Fluxo de veículos e demandas.

Portanto, a complexidade do problema reduz consideravelmente, já que a movimentação dos veículos torna-se bem mais restrita. Naturalmente o número de operações de reembarque também diminui.

Entretanto, é importante notar que a formulação apresentada a seguir se torna equivalente à formulação anteriormente proposta quando todas as possibilidades de rotas são permitidas.

Dados de Entrada

- V – conjunto de veículos existentes.
- R – conjunto de rotas disponíveis para a realização dos transportes. Uma rota $r \in R$ é definida por uma seqüência de centros de distribuição e por um instante de início.
- $R(v)$ – conjunto de rotas que podem ser realizadas pelo veículo $v \in V$.
- $InstInicio(r)$ – instante inicial da rota $r \in R$.
- $InstFim(r)$ – instante final da rota $r \in R$.
- $Origem(r)$ – CD de origem da rota $r \in R$.
- $CustoTransporte(r)$ – Custo para realização do transporte de cargas na rota $r \in R(v)$. Custos de transporte devem estar associados a cada rota. O custo deve ser proporcional à distância a ser percorrida.
- $A(r)$ – conjunto de arcos que compõem a rota $r \in R$.
- $C(r)$ – conjunto de centros de distribuição pertencentes à rota $r \in R$.
- $CDBase(v)$ – CD de contratação do veículo $v \in V$.

– $DispInicial(t, v, i) – \begin{cases} 1, & \text{se o veículo } v \in V \text{ estiver disponível pela primeira} \\ & \text{vez no instante } t \in T \text{ no CD } i \in C. \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

– $\delta_i^{IN}(v, r)$ – instante de tempo em que o veículo $v \in V$, realizando a rota $r \in R$, chega no centro de distribuição $i \in C$.

– $\delta_i^{OUT}(v, r)$ – instante de tempo em que o veículo $v \in V$, realizando a rota $r \in R$, sai do centro de distribuição $i \in C$.

Variáveis

– $e_{i,d}^t \in \mathbb{R}^+$ – peso total em estoque no CD $i \in C$ logo após o instante $t \in T$ para o atendimento da demanda $d \in D$.

– $xc_{i,d}^{t,v} \in \mathbb{R}^+$ – total em peso carregado no veículo $v \in V$ no instante $t \in T$ no CD $i \in C$ para atendimento da demanda $d \in D$.

– $xd_{i,d}^{t,v} \in \mathbb{R}^+$ – total em peso descarregado do veículo $v \in V$ no instante $t \in T$ no CD $i \in C$ para atendimento da demanda $d \in D$.

– $xt_{j,t',d}^{i,t,v,r} \in \mathbb{R}^+$ – total em peso para atender a demanda $d \in D$ saindo no instante $t \in T$ de $i \in C$ e chegando no instante $t' \in T$ em $j \in C$ através do veículo $v \in V$ na rota $r \in R(v)$.

– $xw_{t',i,d}^{t,v} \in \mathbb{R}^+$ – total em peso da demanda $d \in D$ carregada no veículo $v \in V$ que se encontra parada no CD $i \in C$ do instante $t \in T$ até o instante $t' \in T$.

– $y_{i,d}^t \in \mathbb{R}^+$ – total em peso da demanda $d \in D$ atendida no instante $t \in T$ no CD $i \in C$.

– $ze_{j,t'}^{i,t,v,r} \in \{0, 1\}$ – variável binária que indica se o veículo $v \in V$, realizando a rota $r \in R(v)$, inicia a aresta $(i, j) \in A(r)$ no instante $t \in T$.

– $zw_{t+1,i}^{t,v} \in \{0, 1\}$ – variável binária que indica se o veículo $v \in V$ permanece parado no CD $i \in C$ do instante $t \in T$ até o instante $t+1 \in T$.

– $vf_{i,d}^t \in \mathbb{R}^+$ – variável de folga que armazena a quantidade da demanda $d \in D$ não atendida pela solução do problema, onde $t = InstColeta(d)$ e $i = Origem(d)$.

– $zr_{t',i}^{t,v,r} \in \{0, 1\}$ – indica que o veículo $v \in V$ inicia a rota $r \in R(v)$ no CD $i \in C$ no instante $t \in T$ e termina no instante $t' \in T$.

Função Objetivo

A função objetivo a seguir segue a mesma idéia da função objetivo apresentada anteriormente. A única diferença é que custos com transporte passam a estar associados à rota realizada.

$$\begin{aligned} Max \quad & \sum_{t \in T} \sum_{i \in C} \sum_{d \in D} Frete(d).y_{i,d}^{t} - \\ & \sum_{v \in V} \sum_{r \in R(v)} CustoTransporte(r).zr_{InstFim(r),Origem(r)}^{InstInicio(r),v,r} - \\ & \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} \sum_{d \in D} \sum_{\substack{i \in C \\ Destino(d) \neq i}} CustoConexao(i).xd_{i,d}^{t,v} - \\ & \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} \sum_{d \in D} CustoEmbarque(Origem(d)).xc_{Origem(d),d}^{t,v} - \\ & \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} \sum_{d \in D} CustoDesembarque(Destino(d)).xd_{Destino(d),d}^{t,v} - \\ & \sum_{d \in D} \alpha.vf_{Origem(d),d}^{InstColeta(d)} \end{aligned} \tag{3-10}$$

Restrições

Conservação de Fluxo de Carga nos Veículos:

Mercadorias podem ser carregadas ou descarregadas de um veículo, permanecerem paradas junto com o veículo ou serem transportadas pelo mesmo.

A desigualdade apresentada realiza o controle de conservação de fluxo de carga nos veículos.

$$\begin{aligned} & xw_{t,i,d}^{t-1,v} + \sum_{r \in R(v)} \sum_{\substack{j \in C(r) \\ j \neq i}} xt_{i,t,d}^{j,t-\delta_{j,i},v,r} + xc_{i,d}^{v,t} - xw_{t+1,i,d}^{t} - \\ & \sum_{r \in R(v)} \sum_{\substack{k \in C(r) \\ k \neq i}} xt_{k,t+\delta_{i,k},d}^{i,t} - xd_{i,d}^{v,t} = 0; \\ & \forall v \in V, \forall i \in C, \forall d \in D, \forall t \in T \end{aligned} \tag{3-11}$$

Conservação de Fluxo de Carga em Estoque:

Mercadorias podem ser estocadas, carregadas, descarregadas, coletadas, e atendidas.

A desigualdade apresentada realiza o controle de conservação de fluxo de carga nos armazéns dos centros de distribuição.

$$e_{i,d}^{t-1} + Coleta(t,i,d) + \sum_{v \in V} xd_{i,d}^{t,v} - y_{i,d}^{t} - \sum_{v \in V} xc_{i,d}^{t,v} - e_{i,d}^{t} - vf_{i,d}^{t} = 0;$$
$$\forall i \in C, \forall d \in D, \forall t \in T \qquad (3\text{-}12)$$

Fluxo de Veículos:

A figura 3.8 ilustra o fluxo de veículos considerado na formulação. Veículos podem iniciar uma rota disponível ou aguardarem em seu CD de contratação. A figura 3.9 exibe uma legenda para os arcos de espera e deslocamento de veículos na figura 3.8.

O fluxo de veículos ilustrado na parte superior da figura representa as decisões de espera e início de rota. Variáveis de início de rota geram capacidade para o fluxo de veículos na parte inferior da figura. Ou seja, a rota iniciada fixa as variáveis de deslocamento entre centros de distribuição correspondentes.

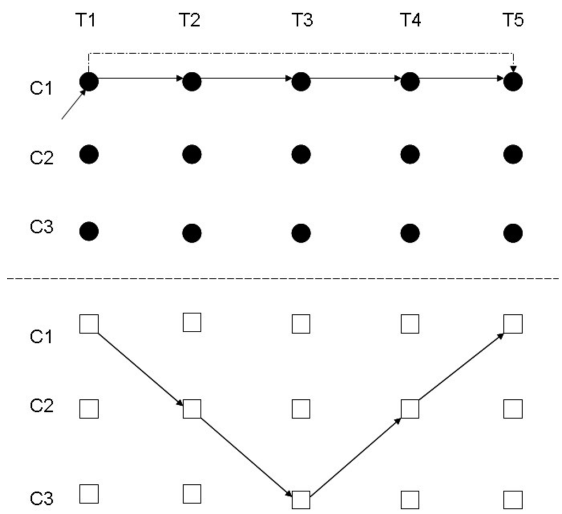

Figura 3.8: Conservação de fluxo de veículo.

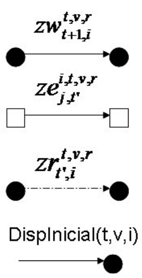

Figura 3.9: Variáveis de fluxo de veículo.

Conservação de Fluxo de Veículos nos Centros de Distribuição:

A cada instante de tempo do período de planejamento, veículos podem se tornar disponíveis, podem iniciar/terminar rotas, ou permanecerem parados. A restrição a seguir, realiza o controle de conservação de fluxo de veículos nos centros de distribuição, considerando as possibilidades existentes.

A figura 3.11 ilustra a conservação de fluxo veículos.

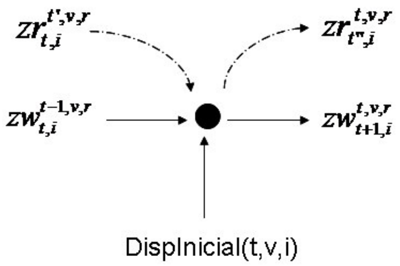

Figura 3.10: Fluxo de veículos nos centros de distribuição.

$$DispInicial(t,v,i) + \sum_{r \in R(v)} zr^{InstInicio(r),v,r}_{t,i} + zw^{t-1,v}_{t,i} - \sum_{r \in R(v)} zr^{t,v,r}_{InstFim(r),i} - zw^{t,v}_{t+1,i} = 0;\ \ \forall i \in C, \forall v \in V, \forall t \in T \quad (3\text{-}13)$$

Conservação de Fluxo de Veículos em Movimento:

A restrição a seguir, atribui valores às variáveis de deslocamento de veículos de acordo com as decisões de rota realizadas. Ou seja, decisões de início de rota fixam variáveis de deslocamento de veículos correspondentes à rota iniciada.

$$ze^{i,\delta_i^{OUT}(v,r),v,r}_{j,\delta_j^{IN}(v,r)} = zr^{t,v,r}_{t',k};\ \ \forall v \in V, \forall r \in R(v), \forall (i,j) \in r, \\ t = InstInicio(r), t' = InstFim(r), k = CDBase(v) \quad (3\text{-}14)$$

Capacidade em Peso Carregado para Veículos Parados:

Esta restrição assegura que a capacidade máxima em peso de mercadoria carregada no veículo $v \in V$ que permanece parado do instante $t \in T$ até o instante $t+1 \in T$ no CD $i \in C$ não seja violada.

$$\sum_{d \in D} xw_{t+1,i,d}^{t,v} \leq CapPeso.zw_{t+1,i}^{t,v};$$
$$\forall v \in V, \forall t \in T, \text{ onde } i = CDBase(v) \qquad (3\text{-}15)$$

Capacidade em Volume Carregado para Veículos Parados:

Esta restrição assegura que a capacidade máxima em volume de mercadoria carregada no veículo $v \in V$ que permanece parado do instante $t \in T$ até o instante $t + 1 \in T$ no CD $i \in C$ não seja violada.

$$\sum_{d \in D} (1/Densidade(d)).xw_{t+1,i,d}^{t,v} \leq CapVolume.zw_{t+1,i}^{t,v};$$
$$\forall v \in V, \forall t \in T, \text{ onde } i = CDBase(v) \qquad (3\text{-}16)$$

Capacidade em Peso:

Assegura que a capacidade máxima em peso transportado pelo veículo $v \in V$ não seja violada. Ou seja, garante que o total em peso transportado pelo veículo v não ultrapasse $CapPeso$. Na restrição, a variável $ze_{j,t',v,r}^{i,t}$ dá capacidade em peso para a aresta $(i, j) \in A(r)$. Desta forma, atribuições de transporte de carga são limitadas.

$$\sum_{d \in D} xt_{j,\delta_j^{IN}(v,r),d}^{i,\delta_i^{OUT}(v,r),v,r} \leq CapPeso.ze_{j,v,r}^{i,t};$$
$$\forall v \in V, \forall r \in R(v), \forall (i, j) \in A(r), \forall t \in T \qquad (3\text{-}17)$$

Capacidade em Volume:

Assegura que a capacidade máxima em volume transportado pelo veículo $v \in V$ não seja violada. Ou seja, garante que o total em volume transportado pelo veículo v não ultrapasse $CapVolume$. Na restrição, a variável $ze_{j,v,r}^{i,t}$ dá capacidade em volume para a aresta $(i, j) \in A(r)$. Desta forma, atribuições de transporte de carga são limitadas.

$$\sum_{d \in D} (1/Densidade(d)).xt_{j,\delta_j^{IN}(v,r),d}^{i,\delta_i^{OUT}(v,r),v,r} \leq CapVolume.ze_{j,v,r}^{i,t};$$
$$\forall v \in V, \forall r \in R(v), \forall (i, j) \in A(r), \forall t \in T \qquad (3\text{-}18)$$

3.2
Problema de Planejamento de Atendimento com Veículos Extras

O Problema de Planejamento de Atendimento com Veículos Extras (PPA-VE) considera a utilização de veículos próprios e veículos extras contratados em mercado. Trata-se de uma extensão para o PPA, onde a contratação de veículos extra é permitidas.

3.2.1
Hipóteses Consideradas

Veículos extras não realizam rotas com início e fim em um mesmo centro de distribuição e portanto podem ser contratados por qualquer dos CD's existentes. Estes veículo realizam rotas de ponto a ponto. Ou seja, rotas realizadas por veículos extras não fazem escalas em outros centros de distribuição.

Veículos extra possuem as mesmas características. Ou seja, possuem a mesma capacidade em peso e volume e cobram os mesmos valores para a realização dos transportes.

Além disso, veículos extras não podem permanecer parados em centros de distribuição com mercadorias carregadas.

3.2.2
Modelo Matemático

Dados de Entrada

– V' – conjunto de tipos de veículos extras.

– R' – conjunto de rotas que podem ser realizadas por veículos extras.

– $DispExtra(v, i, t)$ – número de veículos extras do tipo $v \in V'$ disponíveis pela primeira vez no CD $i \in C$ no instante $t \in T$.

Variáveis

– $e^{t}_{i,d} \in \mathbb{R}^{+}$ – quantidade total em estoque no centro de distribuição $i \in C$ logo após o instante $t \in T$ para o atendimento da demanda $d \in D$.

– $xc^{t,v}_{i,d} \in \mathbb{R}^{+}$ – quantidade carregada no veículo $v \in \{V \cup V'\}$ no instante $t \in T$ no centro de distribuição $i \in C$ para atendimento da demanda $d \in D$.

– $xd^{t,v}_{i,d} \in \mathbb{R}^{+}$ – quantidade descarregada do veículo $v \in \{V \cup V'\}$ no instante $t \in T$ no centro de distribuição $i \in C$ para atendimento da demanda $d \in D$.

- $xt_{j,t',d}^{i,t,v,r} \in \mathbb{R}^+$ – quantidade de carga para atender a demanda $d \in D$ saindo no instante $t \in T$ de $i \in C$ e chegando no instante $t' \in T$ em $j \in C$ através do veículo $v \in \{V \cup V'\}$ na rota $r \in R(v)$.
- $xw_{t',i,d}^{t,v} \in \mathbb{R}^+$ – quantidade de carga da demanda $d \in D$ carregada no veículo $v \in V$ que se encontra parado no CD $i \in C$ do instante $t \in T$ até o instante $t' \in T$.
- $y_{i,d}^{t} \in \mathbb{R}^+$ – quantidade de carga da demanda $d \in D$ atendida no instante $t \in T$ no centro de distribuição $i \in C$.
- $p_{j,t',d}^{i,t,v,r} \in \{0,1\}$ – variável binária que indica se a demanda $d \in D$ é transportada pelo veículo $v \in \{V \cup V'\}$ na rota $r \in R(v)$ do CD $i \in C$ até o CD a$j \in C$ do instante $t \in T$ até o instante $t' \in T$.
- $zz_{j,t'}^{i,t,v,r} \in \mathbb{N}^+$ – variável que indica o número de veículos extras do tipo $v \in V'$ realizando a rota R' iniciada no instante $t \in T$ onde $i = Origem(r)$ e $j = Destino(r)$.
- $zw_{t+1,i}^{t,v} \in \{0,1\}$ – variável binária que indica se o veículo $v \in \{V \cup V'\}$ permanece parado no centro de distribuição $i \in C$ do instante $t \in T$ até o instante $t+1 \in T$.
- $zk_{t',i}^{t,v,r} \in \{0,1\}$ – variável binária que indica se o veículo $v \in \{V \cup V'\}$ realiza manutenção no instante $t \in T$ até o instante $t' \in T$ no CD $i \in C$. Variáveis de manutenção de veículos só podem existir para o CD de contratação do veículo.
- $ze_{j,t'}^{i,t,v,r} \in \{0,1\}$ – variável binária que indica se o veículo $v \in V$, realizando a rota $r \in R(v)$, inicia a aresta $(i,j) \in A(r)$ no instante $t \in T$.
- $vf_{i,d}^{t} \in \mathbb{R}^+$ – variável de folga para restrição de conservação de fluxo de carga em estoque. Tal variável deve ser criada apenas para o instante de coleta $t \in T$ da demanda $d \in D$ em seu CD de origem $i \in C$. Ou seja, $t = InstColeta(d)$ e $i = Origem(d)$. A variável armazena a quantidade da demanda d não atendida pela solução do problema.
- $zr_{t',i}^{t,v,r} \in \{0,1\}$ – indica que o veículo $v \in V$ inicia a rota $r \in R(v)$ no CD $i \in C$ no instante $t \in T$ e termina no instante $t' \in T$.

Função Objetivo

Da mesma forma que no PPA, a função objetivo aqui considerada maximiza o atendimento das demandas existentes, minimizando custos com transporte. A única diferença é que agora custos de transporte com veículos extra são considerados.

$$
\begin{aligned}
Max \quad & \sum_{t \in T} \sum_{i \in C} \sum_{d \in D} Frete(d).y^{t}_{i,d} - \\
& \sum_{v \in V} \sum_{r \in R(v)} CustoTransporte(v,r).zr^{InstInicio(r),v,r}_{InstFim(r),Origem(r)} - \\
& \sum_{v \in V'} \sum_{r \in R'} CustoTransporte(v,r).zz^{Origem(r),InstInicio(r),v,r}_{Destino(r),InstFim(r)} - \\
& \sum_{t \in T} \sum_{v \in V \cup V'} \sum_{d \in D} \sum_{\substack{i \in C \\ Destino(d) \neq i}} CustoConexao(i).xd^{t,v}_{i,d} - \\
& \sum_{t \in T} \sum_{v \in V \cup V'} \sum_{d \in D} CustoEmbarque(Origem(d)).xc^{t,v}_{Origem(d),d} - \\
& \sum_{t \in T} \sum_{v \in V \cup V'} \sum_{d \in D} CustoDesembarque(Destino(d)).xd^{t,v}_{Destino(d),d} - \\
& \sum_{v \in V} \sum_{d \in D} \alpha.vf^{InstColeta(d),v}_{Origem(d),d}
\end{aligned} \tag{3-19}
$$

Restrições

Quase todas as restrições apresentadas na formulação proposta para o PPA devem ser adicionadas nesta formulação ((3-11), (3-13), (3-14), (3-15), (3-16), (3-17) e (3-18)). Para que veículos extras possam ser considerados, restrições de conservação de fluxo e capacidade devem ser criadas para estes veículos. Além disso, variáveis de movimentação de cargas em veículos extras devem ser adicionadas nas restrições de conservação de fluxo de carga.

Portanto, as restrições a seguir devem ser consideradas.

Conservação de Fluxo de Carga nos Veículos:

Mercadorias podem ser carregadas ou descarregadas de um veículo extra, ou serem transportadas pelo mesmo. Entretanto, veículos extras não podem permanecer parados em um CD enquanto estiverem carregados.

A desigualdade a seguir realiza o controle de conservação de fluxo de carga nestes veículos.

$$\sum_{r \in R(v)} \sum_{\substack{j \in C(r) \\ j \neq i}} xt_{i,t,d}^{j,t-\delta_{j,i},v,r} + xc_{i,d}^{v,t} - \sum_{r \in R(v)} \sum_{\substack{k \in C(r) \\ k \neq i}} xt_{k,t+\delta_{i,k},d}^{i,t} - xd_{i,d}^{v,t} = 0;$$
$$\forall v \in V', \forall i \in C, \forall d \in D, \forall t \in T \quad (3\text{-}20)$$

Conservação de Fluxo de Carga em Estoque:

Restrições de conservação de fluxo de carga apresentadas na formulação proposta para o PPA (3-12) devem passar a considerar as variáveis de carga e descarga em veículos extras.

Mercadorias podem ser estocadas, carregadas, descarregadas, coletadas, e atendidas.

A desigualdade a seguir realiza o controle de conservação de fluxo de carga nos armazéns dos centros de distribuição.

$$e_{i,d}^{t-1} + Coleta(t,i,d) + \sum_{v \in V} xd_{i,d}^{t,v} + \sum_{v \in V'} xd_{i,d}^{t,v} - y_{i,d}^{t} -$$
$$\sum_{v \in V} xc_{i,d}^{t,v} - \sum_{v \in V'} xc_{i,d}^{t,v} - e_{i,d}^{t} - vf_{i,d}^{t} = 0;$$
$$\forall i \in C, \forall d \in D, \forall t \in T \quad (3\text{-}21)$$

Conservação de Fluxo de Veículos nos Centros de Distribuição:

A cada instante de tempo do período de planejamento, veículos extras podem se tornar disponíveis e podem iniciar/terminar períodos de espera ou rotas. A restrição a seguir, realiza o controle de conservação de fluxo de veículos extras nos centros de distribuição.

$$DispExtra(t,v,i) + \sum_{r \in R'} zz_{i,t}^{Origem(r),InstInicio(r),v,r} + zw_{t,i}^{t-1,v} -$$
$$\sum_{r \in R'} zz_{Destino(r),InstFim(r)}^{i,t,v,r} - zw_{t+1,i}^{t,v} = 0;$$
$$\forall i \in C, \forall v \in V', \forall t \in T \quad (3\text{-}22)$$

Capacidade em Peso:

A desigualdade a seguir assegura que a capacidade máxima em peso transportado por veículos extras do tipo $v \in V'$ não seja violada.

$$\sum_{d \in D} xt^{i,t,v,r}_{j,InstFim(r),d} \leq CapPeso(v).zz^{i,t,v,r}_{j,InstFim(r)};$$
$$\forall v \in V', \forall r \in R', \forall t \in T,$$
$$\text{onde } i = Origem(r) \text{ e } j = Destino(r) \qquad (3\text{-}23)$$

Capacidade em Volume:

A desigualdade a seguir assegura que a capacidade em volume transportado por veículos extras não seja violada.

$$\sum_{d \in D} (1/Densidade(d)).xt^{i,t,v,r}_{j,InstFim(r),d} \leq CapVolume(v).zz^{i,t,v,r}_{j,InstFim(r)};$$
$$\forall v \in V', \forall r \in R', \forall t \in T,$$
$$\text{onde } i = Origem(r) \text{ e } j = Destino(r) \qquad (3\text{-}24)$$

3.3 Formulação para o Problema de Planejamento de Atendimento Aplicado

Esta seção apresenta uma formulação para o PPAA. Trata-se de um extensão para a formulação apresentada na seção 3.1.2.

3.3.1 Hipóteses Consideradas

Veículos podem realizar manutenções preventivas ou aguardar a chegada de mercadorias para serem carregadas apenas no CD de contratação correspondente.

Veículos possuem capacidades em peso e volume variadas. Além disso, cada veículo possui uma lista de equipamentos de segurança associada.

Custos de transporte variam com a distância a ser percorrida e com o veículo que vai realizar o transporte.

3.3.2 Modelo Matemático

Dados de Entrada

- $V(i)$ – conjunto de veículos que compõem a frota base do centro de distribuição $i \in C$.
- $CapPeso(v)$ – capacidade em peso de mercadoria para carregamento no veículo $v \in V$.
- $CapVolume(v)$ – capacidade em volume de mercadoria carregamento no veículo $v \in V$.
- $CapValor(v)$ – capacidade em valor de mercadoria carregada no veículo $v \in V$.
- $CapValor((i, j), c, v)$ – capacidade em valor de mercadoria do cliente $c \in C$ transportada do CD $i \in C$ até o CD $j \in C$ através do veículo $v \in V$.
- $CustoTransporte(r)$ – Custo para realização do transporte de mercadorias ao longo da rota $r \in R(v)$.
- $Distancia(r)$ – distância percorrida para realizar a rota $r \in R$.
- $C(r)$ – conjunto de centros de distribuição pertencentes à rota $r \in R$.
- $LimiteTransf(i, j, v)$ – limite de transferência de cargas em peso carregado em um veículo $v \in V$ para realizar reembarque no CD $i \in C$ com destino final em $j \in C$.

- $ValorTon(d)$ – valor de mercado da demanda $d \in D$ por tonelada.
- P – conjunto de tipos de produto existentes.
- $P(d)$ – tipo de produto requisitado pela demanda $d \in D$.
- G – conjunto de pares de tipos de produtos incompatíveis para transporte ao mesmo tempo e em um mesmo veículo.
- $\delta(v)$ – tempo médio de manutenção do veículo $v \in V$.

Variáveis

- $e^{t}_{i,d} \in \mathbb{R}^{+}$ – quantidade total em estoque no centro de distribuição $i \in C$ logo após o instante $t \in T$ para o atendimento da demanda $d \in D$.
- $xc^{t,v}_{i,d} \in \mathbb{R}^{+}$ – quantidade carregada no veículo $v \in V$ no instante $t \in T$ no centro de distribuição $i \in C$ para atendimento da demanda $d \in D$.
- $xd^{t,v}_{i,d} \in \mathbb{R}^{+}$ – quantidade descarregada do veículo $v \in V$ no instante $t \in T$ no centro de distribuição $i \in C$ para atendimento da demanda $d \in D$.
- $xt^{i,t,v,r}_{j,t',d} \in \mathbb{R}^{+}$ – quantidade de carga para atender a demanda $d \in D$ saindo no instante $t \in T$ de $i \in C$ e chegando no instante $t' \in T$ em $j \in C$ através do veículo $v \in V$ na rota $r \in R(v)$.
- $xw^{t,v}_{t',i,d} \in \mathbb{R}^{+}$ – quantidade de carga da demanda $d \in D$ carregada no veículo $v \in V$ que se encontra parado no CD $i \in C$ do instante $t \in T$ até o instante $t' \in T$.
- $y^{t}_{i,d} \in \mathbb{R}^{+}$ – quantidade de carga da demanda $d \in D$ atendida no instante $t \in T$ no centro de distribuição $i \in C$.
- $p^{i,t,v,r}_{j,t',d} \in \{0,1\}$ – variável binária que indica se a demanda $d \in D$ é transportada pelo veículo $v \in V$ na rota $r \in R(v)$ do CD $i \in C$ até o CD a$j \in C$ do instante $t \in T$ até o instante $t' \in T$.
- $ze^{i,t,v,r}_{j,t'} \in \{0,1\}$ – variável binária que indica se o veículo $v \in V$, realizando a rota $r \in R(v)$, inicia a aresta $(i,j) \in A(r)$ no instante $t \in T$.
- $zw^{t,v}_{t+1,i} \in \{0,1\}$ – variável binária que indica se o veículo $v \in V$ permanece parado no centro de distribuição $i \in C$ do instante $t \in T$ até o instante $t+1 \in T$.
- $vf^{t}_{i,d} \in \mathbb{R}^{+}$ – variável de folga para restrição de conservação de fluxo de carga em estoque. Tal variável deve ser criada apenas para o instante de coleta $t \in T$ da demanda $d \in D$ em seu CD de origem $i \in C$. Ou seja, $t = InstColeta(d)$ e $i = Origem(d)$. A variável armazena a quantidade da demanda d não atendida pela solução do problema.

- $zr_{t',i}^{t,v,r} \in \{0,1\}$ – indica que o veículo $v \in V$ inicia a rota $r \in R(v)$ no CD $i \in C$ no instante $t \in T$ e termina no instante $t' \in T$.
- $zk_{t',i}^{t,v,r} \in \{0,1\}$ – variável binária que indica se o veículo $v \in V$ realiza manutenção no instante $t \in T$ até o instante $t' \in T$ no CD $i \in C$. Variáveis de manutenção de veículos só podem existir para o CD de contratação do veículo.

Função Objetivo

Da mesma forma que no PPA, a função objetivo para o PPAA visa maximizar o atendimento das demandas existentes, minimizando custos com transporte.

Custos com manutenções preventivas passam a ser considerados assim como prioridades de carregamento para mercadorias de determinados clientes. São estabelecidas bonificações para o atendimento de demandas de acordo com a prioridade de cada cliente. Tais bonificação são adicionadas ao valor de frete pago por cada demanda.

Custos com manutenção preventiva e penalizações para o não atendimento de demandas são considerados.

$$\begin{aligned} Max \quad & \sum_{t \in T} \sum_{i \in C} \sum_{d \in D} Frete(d).y_{i,d}^{t} - \\ & \sum_{v \in V} \sum_{r \in R(v)} CustoTransporte(r).zr_{InstFim(r),Origem(r)}^{InstInicio(r),v,r} - \\ & \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} \sum_{d \in D} \sum_{\substack{i \in C \\ Destino(d) \neq i}} CustoConexao(i).xd_{i,d}^{t,v} - \\ & \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} \sum_{d \in D} CustoEmbarque(Origem(d)).xc_{Origem(d),d}^{t,v} - \\ & \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} \sum_{d \in D} CustoDesembarque(Destino(d)).xd_{Destino(d),d}^{t,v} - \\ & \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} CustoManutencao(v).zk_{t+\delta(v),v}^{t} - \\ & \sum_{v \in V} \sum_{d \in D} \alpha.vf_{Origem(d),d}^{InstColeta(d),v} \end{aligned} \tag{3-25}$$

Restrições

Restrições de conservação de fluxo de carga e capacidade de estoque são exatamente iguais àquelas apresentadas na seção 3.1. Ou seja, devemos incluir nesta formulação as desigualdades (3-5), (3-11) e (3-12).

Capacidades em peso e volume para carregamento nos veículos passam a depender do próprio veículo $v \in V$ de acordo com $CapPeso(v)$ e $CapVolume(v)$. Restrições de capacidade de carregamento para veículos seguem exatamente a mesma idéia das inequações (3-15), (3-16), (3-17) e (3-18) considerando que tais limites em peso e volume podem variar de acordo com o veículo.

Restrições de conservação de fluxo de veículos em movimento (3-14) também devem ser adicionadas na formulação.

Conservação de Fluxo de Veículos nos Centros de Distribuição:

Decisões de manutenção de veículos passam a ser consideradas. Portanto, a cada instante de tempo do período de planejamento, veículos podem se tornar disponíveis, podem iniciar/terminar operações de manutenção, períodos de espera ou rotas. A restrição a seguir, realiza o controle de conservação de fluxo de veículos nos centros de distribuição, considerando as possibilidades existentes.

A figura 3.11 ilustra a conservação de fluxo veículos apresentada a seguir.

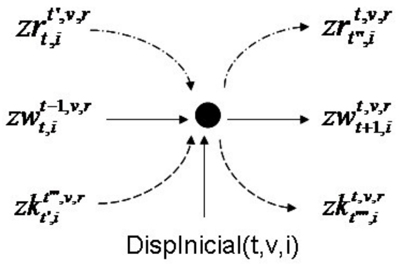

Figura 3.11: Fluxo de veículos nos centros de distribuição.

$$DispInicial(t,v,i) + \sum_{r \in R(v)} zr_{t,i}^{InstInicio(r),v,r} + zw_{t,i}^{t-1,v} + zk_{t,i}^{t-\delta(v),v} -$$

$$\sum_{r \in R(v)} zr_{InstFim(r),i}^{t,v,r} - zw_{t+1,i}^{t,v} - zk_{t+\delta(v),i}^{t,v} = 0;$$

$$\forall i \in C, \forall v \in V, \forall t \in T \tag{3-26}$$

Capacidade em Valor de Mercadoria Transportada:

Capacidades em valor de mercadoria transportadas por veículos são consideradas.

A desigualdade a seguir assegura que a capacidade máxima em valor de mercadoria transportada pelo veículo $v \in V$ não seja violada. Ou seja, garante que o total em valor de mercadoria transportado pelo veículo v não ultrapasse $CapValor(v)$. Na restrição, a variável $ze^{i,t}_{j,v,r}$ dá capacidade em valor de mercadoria para a aresta $(i,j) \in A(r)$. Desta forma, atribuições de transporte de carga são limitadas.

$$\sum_{d \in D} ValorTon(d).xt^{i,\delta_i^{OUT}(v,r),v,r}_{j,\delta_j^{IN}(v,r),d} \leq CapValor(v).ze^{i,t}_{j,v,r};$$
$$\forall v \in V, \forall r \in R(v), \forall (i,j) \in A(r), \forall t \in T \qquad (3\text{-}27)$$

Capacidade em Valor de Mercadoria por Arco:

Capacidades em valor de mercadoria transportada devem atender as exigências estabelecidas para as mercadorias de cada cliente existente.

A desigualdade a seguir garante que a capacidade máxima em valor de mercadoria do cliente $c \in K$ transportada pelo veículo $v \in V$ realizando a rota $r \in R(v)$ na aresta $(i,j) \in r$ não seja violada. Ou seja, garante que o total em valor de mercadoria do cliente c transportada pelo veículo v na aresta (i,j) não ultrapasse $CapValor((i,j),c,v)$. Na restrição, a variável $ze^{t1,t}_{t2,v,r}$ dá capacidade em valor de mercadoria para o transporte de carga na aresta $(i,j) \in A(r)$. Desta forma, atribuições de transporte de carga são limitadas.

$$\sum_{d \in D} ValorTon(d).xt^{i,\delta_i^{OUT}(v,r)}_{j,\delta_j^{IN}(v,r),d} \leq CapValor((i,j),c,v).ze^{i,t}_{j,v,r};$$
$$\forall v \in V, \forall r \in R(v), \forall c \in K, (i,j) \in A(r), \forall t \in T \qquad (3\text{-}28)$$

Tipo de Mercadoria Transportada:

Um tipo de mercadoria $tp \in P$ é associado a um veículo $v \in V$ se e somente se este veículos realiza o transporte deste tipo de mercadoria. Na restrição a seguir, M deve ser maior ou igual à capacidade de carregamento em peso para transporte no veículo. $M = CapPeso(v)$.

$$\sum_{dinD|P(d)=tp} xt^{i,t,v,r}_{j,t+\delta_{i,j}(v),d} \leq M.p^{i,t,v,r}_{j,t+\delta_{i,j}(v),tp};$$
$$\forall tp \in P, \forall v \in V, \forall r \in R(v), \forall (i,j) \in A(r), \forall t \in T \qquad (3\text{-}29)$$

$$\sum_{d \in D | P(d)=tp} xt^{i,t,v,r}_{j,t+\delta_{i,j}(v),d} \geq p^{i,t,v,r}_{j,t+\delta_{i,j}(v),tp};$$
$$\forall tp \in P, \forall v \in V, \forall r \in R(v), \forall (i,j) \in A(r), \forall t \in T \qquad (3\text{-}30)$$

Incompatibilidade de Tipos de Mercadorias:

Assegura que um par de tipos de mercadorias incompatíveis $(tp_1, tp_2) \in G$ não sejam transportados juntos em um mesmo veículo $v \in V$.

$$p^{i,t,v,r}_{j,t+\delta_{i,j}(v),tp_1} + p^{i,t,v,r}_{j,t+\delta_{i,j}(v),tp_2} \leq 1;$$
$$\forall (tp_1, tp_2) \in G, \forall v \in V, \forall r \in R(v), \forall (i,j) \in A(r), \forall t \in T \qquad (3\text{-}31)$$

Limite de Transferência para Conexão:

A quantidade de carga para conexão em um centro de distribuição $i \in C$ para um destino $j \in C$ em um veículo $v \in V$ deve ser menor ou igual a $LimiteTransf(i,j,v)$.

$$\sum_{\substack{d \in D \\ Destino(d)=j}} xd^{t,v}_{i,d} \leq LimiteTransf(i,j,v);$$
$$\forall v \in V, \forall i \in C, \forall j \in C, \in r, \forall t \in T \qquad (3\text{-}32)$$

Tempo com Manutenção de Veículos:

Veículos são obrigados a realizar manutenções preventivas. Manutenções possuem validades dadas por quilômetros rodados. Portanto, o número de quilômetros percorridos entre etapas de manutenção por um veículo $v \in V$ não pode ultrapassar $ValidadeMan$.

$$\sum_{r \in R(v)} \sum_{\substack{t' \in T \\ t' \leq t}} Distancia(r).zr^{t',v,r}_{i} \leq ValidadeMan.(1 + \sum_{\substack{t' \in T \\ t' < t}} zk^{t',v}_{t'+\delta(v),i});$$
$$\forall t \in T, \forall v \in V, \text{ onde } i = CDBase(v) \qquad (3\text{-}33)$$

Manutenção de Veículos

A restrição a seguir garante que veículos não realizarem manutenções seguidas. Para uma janela de tempo pré-determinada $JanelaMan$, um veículo

$v \in V$ só pode realizar manutenção apenas uma vez.

$$\sum_{t'=t}^{t+JanelaMan} zk_{t'+\delta(v),i}^{t',v} \leq 1; \ \ \forall t \in T, \forall v \in V, \text{ onde } i = CDBase(v) \qquad (3\text{-}34)$$