4 O Problema da Determinação de Paradas

Neste capítulo, será descrito o *Problema da Determinação de Paradas*, outro problema que surge a partir do *Problema de Planejamento de Atendimento*. Inicialmente será feita a descrição do problema, seguido pelas alterações necessárias à formulação e, por fim, serão exibidos os resultados computacionais.

4.1 Descrição do Problema

Na formulação descrita para o *Problema de Planejamento de Atendimento*, o tempo de percurso de um trem em uma rota é calculado a partir dos tempos de percurso para cada trecho presente na rota em questão. Estes tempos de percurso, de rota e trecho, são utilizados para contabilizar o consumo de alguns recursos existes na malha, as locomotivas e os vagões. Porém, a formulação, da forma que foi criada, não contempla o gasto de tempo que cada trem gera nas operações efetuadas quando este pára em algum pátio. Os únicos tempos que são considerados para os pátios são os tempos de carregamento e descarregamento das demandas, que não são associados aos trens.

Um trem necessita efetuar uma parada em um pátio quando uma demanda tem que ser carregada ou descarregada ou quando existe a necessidade de anexar ou desanexar alguns vagões para estes trocarem de rota. Todas estas operações demandam um tempo, vindo da necessidade de um trem de frear para parar no pátio, acelerar para poder seguir viagem e outros tipos de manobras relativas à anexação e desanexação de vagões.

Este tempo a mais pode se tornar crucial na escolha das demandas a serem atendidas, pois custa mais caro um trem parar em dois pátios distintos para carregar uma demanda em cada pátio do que parar em um pátio e carregar duas demandas somente neste pátio. E, conseqüentemente, custa mais caro transportar uma demanda de um pátio A até um pátio B atravessando três rotas do que transportar uma demanda entre os mesmos pátios por uma rota direta. Assim, a decisão das paradas se torna muito importante para a obtenção de soluções mais aderentes à realidade da malha ferroviária.

4.2 Formulação Matemática

Nos dados do problema, não há como prever quais serão as paradas necessárias para o atendimento das demandas, logo, a formulação deve ser alterada para considerar estes tempos. Aqui surge um problema parecido com o encontrado no Problema da Análise de Congestionamento. Existe uma forma simples de adicionar a determinação das paradas na formulação, junto com a consideração dos tempos gastos. Porém, esta solução implica em uma formulação quadrática, visto que estes tempos de paradas podem existir ou não. A abordagem aqui utilizada consegue obter o resultado esperado sem a necessidade da introdução de elementos quadráticos na formulação.

Inicialmente, três sub-conjuntos do conjunto V são definidos, VP_r, VN_r e VS_r, que contém, respectivamente, para cada rota r, os pátios onde a parada deve ser decidida, os pátios onde se tem certeza que não haverá parada e os pátios onde os trens sempre têm que parar. Com a definição destes conjuntos, as limitações de carregamento e descarregamento de demandas e troca de vagões entre rotas podem ser definidas. Para evitar que os vagões troquem de rota em pátios que não existem paradas, basta criar restrições aos fluxos dos vários tipos de vagões, utilizando as variáveis x_{arc}^{kp}, de forma a obrigar que cada fluxo se conserve dentro de cada rota.

$$\sum_{a\in\delta^+(u)\cap A_r}\sum_{c\in C_r} x_{arc}^{kp} - \sum_{a\in\delta^-(u)\cap A_r}\sum_{c\in C_r} x_{arc}^{kp} = 0 \qquad \forall k \in K \quad \forall r \in R \quad \forall u \in VN_r \quad \forall p \in P \tag{4-1}$$

Desta maneira, os vagões que chegarem por uma rota r em um pátio u só poderão continuar o seu movimento se saírem por esta mesma rota r. Da mesma forma, é necessário limitar o fluxo de produtos das demandas, isto pode ser obtido com a criação de restrições similares à anterior, utilizando as variáveis de fluxo de demandas f_{arc}^{dkp}.

$$\sum_{a\in\delta^+(u)\cap A_r}\sum_{c\in C_r} f_{arc}^{dkp} - \sum_{a\in\delta^-(u)\cap A_r}\sum_{c\in C_r} f_{arc}^{dkp} = 0 \qquad \forall d \in D \quad \forall k \in K \quad \forall r \in R \quad \forall u \in VN_r \quad \forall p \in P \tag{4-2}$$

Estas restrições evitam, também, que qualquer demanda possa ser carregada ou descarregada no pátio u, por trens executando a rota r. Com isto, falta a definição do comportamento para os pátios onde exite a possibilidade de parada.

Para estas alterações, é necessária a definição das variáveis binárias par_{ur}^{p}, que indicam se os trens que percorrem a rota r param no pátio u na parte p. Quando esta variável par_{ur}^{p} for zero para um pátio u, o comportamento esperado dos fluxos deve ser idêntico ao dos pátios onde não ocorre parada, eles devem ser conservados dentro da rota r. Quando o valor desta variável for um, os fluxos não devem ser conservados, podendo trocar de rota ou efetuar carregamentos e descarregamentos de demandas. As restrições que refletem este comportamento são similares para os fluxos de vagões e de demandas.

$$\begin{gathered}\sum_{a\in\delta^+(u)\cap A_r}\sum_{k\in K}\sum_{c\in C_r} x_{arc}^{kp} - \sum_{a\in\delta^-(u)\cap A_r}\sum_{k\in K}\sum_{c\in C_r} x_{arc}^{kp} \leq par_{ur}^{p}.M \\ \sum_{a\in\delta^+(u)\cap A_r}\sum_{k\in K}\sum_{c\in C_r} x_{arc}^{kp} - \sum_{a\in\delta^-(u)\cap A_r}\sum_{k\in K}\sum_{c\in C_r} x_{arc}^{kp} \geq -par_{ur}^{p}.M \\ \forall r\in R \quad \forall u \in VP_r \quad \forall p\in P\end{gathered} \tag{4-3}$$

$$\begin{gathered}\sum_{a\in\delta^+(u)\cap A_r}\sum_{k\in K}\sum_{c\in C_r} f_{arc}^{dkp} - \sum_{a\in\delta^-(u)\cap A_r}\sum_{k\in K}\sum_{c\in C_r} f_{arc}^{dkp} \leq par_{ur}^{p}.qtPedida_{d}^{p} \\ \sum_{a\in\delta^+(u)\cap A_r}\sum_{k\in K}\sum_{c\in C_r} f_{arc}^{dkp} - \sum_{a\in\delta^-(u)\cap A_r}\sum_{k\in K}\sum_{c\in C_r} f_{arc}^{dkp} \geq -par_{ur}^{p}.qtPedida_{d}^{p} \\ \forall d\in D \quad \forall r\in R \quad \forall u \in VP_r \quad \forall p\in P\end{gathered} \tag{4-4}$$

Em um pátio onde a parada for escolhida, a diferença entre os fluxos para este pátio teoricamente poderia assumir qualquer valor, porém, quando isto ocorre, as restrições de conservação originais, tanto para demandas quanto para vagões, limitarão os valores destes fluxos de forma a manter o comportamento original dos mesmos. Diferentemente do ocorrido no Problema da Análise de Congestionamento, aqui não há como evitar a utilização de um coeficiente grande o suficiente (M) para as retrições de fluxo de vagões, como ocorre nas restrições de fluxo de demandas, onde se sabe que a diferença entre os fluxos em um pátio u não pode ser maior que a quantidade pedida para uma demanda d. Uma estimativa para a diferença máxima entre estes fluxos de vagões pode ser feita baseada na quantidade de vagões disponíveis em um período e no número máximo de ciclos que podem ser efetuados em cada rota. Porém, mesmo sabendo que a utilização deste coefiente pode comprometer a obtenção de boas soluções para o problema, este problema é menos sério aqui devido à existência das restrições de conservação de fluxo originais, que mantém os valores das variáveis aqui utilizadas dentro do comportamento esperado.

Para criar a possibilidade de contabilização do consumo dos recursos da malha associados ao tempo, vagões e locomotivas, é necessário saber a quantidade de vagões e locomotivas que param em cada pátio da malha. Com esta informação, é possível a aplicação dos tempos de parada nas restrições de cada recurso. Para os vagões, são introduzidas duas novas variáveis, xp_{ur}^{kp}, xs_{ur}^{kp}, que representam o número de vagões do tipo k que param no pátio u executando a rota r no período p e o número de vagões do tipo k que não param no pátio u executando a rota r no período p, respectivamente. Quando existir uma parada em um pátio da malha, todos os vagões devem parar neste pátio e com isto, as variáveis xs_{ur}^{kp} associadas a este pátio devem ser zeradas. Isto é obtido com a introdução das seguintes restrições à formulação matemática:

$$\sum_{k \in K} xs_{ur}^{kp} \leq \left(1 - par_{ur}^{p}\right).M \quad \forall r \in R \quad \forall u \in VP_r \quad \forall p \in P \tag{4-5}$$

Para a correta distribuição dos vagões que chegam a um pátio entre as variáveis xp_{ur}^{kp} e xs_{ur}^{kp}, deve-se criar outras restrições que associem o número de vagões que chegam a cada pátio, representado por x_{arc}^{kp}, com estas variáveis. Estas restrições indicam que o total de vagões que chegam a um pátio deve ser igual a soma do número de vagões que param e do número de vagões que não param no mesmo.

$$\sum_{a \in \delta^{-}(u) \cap A_r} \sum_{c \in C_r} x_{arc}^{kp} = xp_{ur}^{kp} + xs_{ur}^{kp} \quad \forall k \in K \quad \forall r \in R \quad \forall u \in VP_r \quad \forall p \in P \tag{4-6}$$

Para concluir esta parte de vagões, resta contabilizar o consumo de tempo de vagões, o que pode ser feito introduzindo as variáveis xp_{ur}^{kp} nas restrições de consumo de vagões. Como estas variáveis indicam a quantidade de vagões que chegam em um pátio u e param neste pátio, o consumo associado a esta parada pode ser contabilizado multiplicando este númemo de vagões com o tempo definido de parada para este pátio u, indicado por $tPar_u^r$.

$$\sum_{r \in R} \sum_{a \in A_r} \sum_{c \in C_r} \frac{tCong_c^a}{TP_p} \left(x_{arc}^{kp} + v_{arc}^{kp}\right) + \sum_{d \in D} \frac{g_k}{TP_p} \frac{w_d^{kp}}{Cap_k} + \sum_{r \in R} \sum_{u \in VP_r} \frac{tPar_u^r}{TP_p} xp_{ur}^{kp} \leq N_k$$
$$\forall k \in K \quad \forall p \in P \tag{4-7}$$

Analisando as restrições 4-5, tem-se que quando existe parada no pátio u, todas as variáveis xs_{ur}^{kp} são zeradas e, por conseqüência, as variáveis xp_{ur}^{kp} irão receber o valor da quantidade de todos os vagões que chegam a este pátio. Porém, quando não existe a parada, as variáveis xs_{ur}^{kp} podem assumir qualquer valor positivo e nada impede que as variáveis xp_{ur}^{kp} recebam algum valor. É fácil perceber que com a introdução das variáveis xp_{ur}^{kp} na restrição de consumo de vagões, estas nunca receberão valor positivo quando as variáveis xs_{ur}^{kp} não forem limitadas. Isto ocorre pelo fato destas últimas variáveis não consumirem vagões, obtendo, assim, o comportamento desejado.

Com a conclusão da determinação de paradas para a parte de vagões, falta a introdução de novos elementos na formulação para a contabilização do consumo de locomotivas acarretado pelas paradas. As novas variáveis e restrições para as locomotivas são bastante parecidas com as introduzidas para os vagões, porém como não existe fluxo de locomotivas definido, apenas as restrições de contabilização de consumo são necessárias para as locomotivas.

Desta forma, pode-se definir duas novas variáveis, ttp_{ru}^{tp} e tts_{ru}^{tp}, que, como visto na parte de vagões, indicam o número de trens que chegam no pátio u executando a rota r no período p e param e o número de trens que chegam no pátio u executando a rota r no período p e não param, respectivamente. O número de trens que executam uma certa rota r, representado por tt_{rc}^{tp} pode ser distribuído de forma parecida como foi definido para os vagões, a soma dos trens que param e não param em um pátio u para uma rota r deve ser igual a este número de trens total.

$$\sum_{a\in\delta^-(u)\cap A_r}\sum_{c\in C_r} tt_{rc}^{tp} = ttp_{ru}^{tp} + tts_{ru}^{tp} \quad \forall t\in T \quad \forall r\in R \quad \forall u\in VP_r \quad \forall p\in P \tag{4-8}$$

A seguir, o comportamento destas novas variáveis deve ser definido. Como para os vagões, o comportamento esperado das variáveis tts_{ru}^{tp} para os pátios onde há parada pode ser obtido a partir do valor das variáveis par_{ur}^{p}, com a criação de restrições que zerem as variáveis tts_{ru}^{tp} nestes casos.

$$\sum_{t\in T} tts_{ur}^{tp} \leq \left(1 - par_{ur}^{p}\right).M \quad \forall r\in R \quad \forall u\in VP_r \quad \forall p\in P \tag{4-9}$$

Por fim, a contabilização do tempo de parada para as locomotivas pode ser adicionada às restrições de consumo de locomotivas com a introdução das variáveis ttp_{ru}^{tp} nestas restrições.

$$\sum_{t\in T}\sum_{r\in R}\left(\sum_{a\in A_r}\sum_{c\in C_r}\frac{tCong_c^a}{TP_p}NLoc_l^t.tt_{rc}^{tp} + \sum_{u\in VP_r}\frac{tPar_u^r}{TP_p}NLoc_l^t.ttp_{ru}^{tp}\right) \leq LocoDisp_l$$
$$\forall l\in L \quad \forall p\in P \tag{4-10}$$

É importante notar que todas as alterações efetuadas na formulação não considera o caso onde é certo a parada dos trens em um pátio. Neste caso, uma solução simples, seria considerar estas paradas certas como paradas a serem decididas e na criação das variáveis que indicam a condição de parada em um pátio, par_{ur}^{p}, fixar seu valor com um, indicando assim, que este pátio sempre é um pátio de parada nesta rota. Desta forma, não é necessária a alteração da formulação, nem a introdução de novos elementos na mesma. Mesmo sendo acarretando em um maior gasto de memória, a eficiência da solução não se altera com a criação das variáveis par_{ur}^{p}, xp_{ur}^{kp}, xs_{ur}^{kp}, ttp_{ru}^{tp} e tts_{ru}^{tp} para os pátios com parada certa. Isto ocorre, pois com a fixação das variáveis par_{ur}^{p}, todas as outras possuirão valores bem definidos e, neste caso, as bibliotecas comerciais de otimização conseguem lidar muito bem com este tipo de situação.

Com todas as alterações para o *Problema da Determinação de Paradas* concluídas e sabendo que a função objetivo não se altera, pois todos as variáveis introduzidas são compostas por outras já existentes, a formulação final para o *Problema de Planejamento de Atendimento*, o Problema da Análise de Congestionamento e o *Problema da Determinação de Paradas* encontra-se completa.

$$
\begin{aligned}
MAX \sum_{p\in P}\sum_{d\in D}\sum_{k\in K} tarifa_d.w_d^{kp} - \sum_{p\in P}\sum_{d\in D}\sum_{k\in K}\sum_{r\in R}\sum_{a\in A_r}\sum_{c\in C_r} (custo_k.dist_a)\, f_{arc}^{dkp} \\
- \sum_{p\in P}\sum_{k\in K}\sum_{r\in R}\sum_{a\in A_r}\sum_{c\in C_r} (custo_k.dist_a.tara_k) \,.\left(x_{arc}^{kp} + v_{arc}^{kp}\right) \\
- \sum_{p\in P}\sum_{r\in R}\sum_{a\in A_r}\sum_{t\in T}\sum_{c\in C_r} (cDiesel.consDie_t.dist_a)\, tt_{rc}^{tp}
\end{aligned}
$$

s.a.

$$
\sum_{r\in R}\sum_{a\in\delta^+(u)\cap A_r}\sum_{c\in C_r} f_{arc}^{dkp} - \sum_{r\in R}\sum_{a\in\delta^-(u)\cap A_r}\sum_{c\in C_r} f_{arc}^{dkp} = \begin{cases} w_d^{kp} & \text{se } u = s_d \\ -w_d^{kp} & \text{se } u = t_d \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}
$$
$$
\forall u\in V \quad \forall k\in K \quad \forall d\in D \quad \forall p\in P
$$

$$
\sum_{r\in R}\sum_{a\in\delta^+(u)\cap A_r}\sum_{c\in C_r} x_{arc}^{kp} - \sum_{r\in R}\sum_{a\in\delta^-(u)\cap A_r}\sum_{c\in C_r} x_{arc}^{kp} = 0
$$
$$
\forall u\in V \quad \forall k\in K \quad \forall p\in P
$$

$$
\sum_{d\in D}\sum_{c\in C_r}\frac{f_{arc}^{dkp}}{Cap_k} + z_{ar}^{kp} = \sum_{c\in C_r} x_{arc}^{kp} \quad \forall a\in A_r \quad \forall k\in K \quad \forall r\in R \quad \forall p\in P
$$

$$
\sum_{k\in K} w_d^{kp} \le qtPedida_d^p \quad \forall d\in D \quad \forall p\in P
$$

$$\sum_{d\in D}\sum_{r\in R_a}\sum_{k\in K}\sum_{c\in C_r} f^{dkp}_{arc} + \sum_{r\in R_a}\sum_{k\in K}\sum_{c\in C_r} tara_k.\left(x^{kp}_{arc}+v^{kp}_{arc}\right) \le CapSup_a.DP_p$$
$$\forall a\in A \quad \forall p\in P$$

$$\sum_{r\in R}\sum_{a\in A_r}\sum_{c\in C_r}\frac{tCong^a_c}{TP_p}\left(x^{kp}_{arc}+v^{kp}_{arc}\right)+\sum_{d\in D}\frac{g_k}{TP_p}\frac{w^{kp}_d}{Cap_k}+\sum_{r\in R}\sum_{u\in VP_r}\frac{tPar^r_u}{TP_p}xp^{kp}_{ur}\le N_k$$
$$\forall k\in K \quad \forall p\in P$$

$$\sum_{t\in T}\sum_{r\in R}\left(\sum_{a\in A_r}\sum_{c\in C_r}\frac{tCong^a_c}{TP_p}NLoc^t_l.tt^{tp}_{rc}+\sum_{u\in VP_r}\frac{tPar^r_u}{TP_p}NLoc^t_l.ttp^{tp}_{ru}\right)\le LocoDisp_l$$
$$\forall l\in L \quad \forall p\in P$$

$$\sum_{d\in D}\sum_{k\in K} f^{dkp}_{arc}+\sum_{k\in K} tara_k.\left(x^{kp}_{arc}+v^{kp}_{arc}\right)\le\sum_{t\in T}CapTB^t_{ar}.tt^{tp}_{rc}$$
$$\forall r\in R \quad \forall a\in A_r \quad \forall p\in P \quad \forall c\in C_r$$

$$\sum_{t\in T}\sum_{c\in C_r} tt^{tp}_{rc}\ge MinViagTT_r \quad \forall r\in R \quad \forall p\in P$$

$$\sum_{t\in T}\sum_{c\in C_r} tt^{tp}_{rc}\ge\sum_{k\in K}\sum_{c\in C_r}\frac{f^{dkp}_{arc}}{Cap_k.MaxVag_d} \quad \forall a\in A \quad \forall d\in D \quad \forall r\in R \quad \forall p\in P$$

$$e^p_{uk}=EstIni^u_k \quad \forall u\in V \quad \forall k\in K \quad p=0$$

$$\sum_{u\in V}e^p_{uk}=N_k \quad \forall k\in K \quad p=0$$

$$e^p_{uk}\ge\sum_{d\in DO_u}\frac{g_k}{TP_p}\frac{w^{kp}_d}{Cap_k}+\sum_{d\in DD_u}\frac{g_k}{TP_p}\frac{w^{kp}_d}{Cap_k}+\sum_{r\in R}\sum_{a\in\delta^+(u)\cap A_r}\sum_{c\in C_r}\frac{tCong^a_c}{2TP_p}\left(x^{kp}_{arc}+v^{kp}_{arc}\right)$$
$$+\sum_{r\in R}\sum_{a\in\delta^-(u)\cap A_r}\sum_{c\in C_r}\frac{tCong^a_c}{2TP_p}\left(x^{kp}_{arc}+v^{kp}_{arc}\right) \quad \forall u\in V \quad \forall k\in K \quad \forall p\in P$$

$$\sum_{r\in R}\sum_{a\in\delta^-(u)\cap A_r}\sum_{c\in C_r}v^{kp}_{arc}-\sum_{r\in R}\sum_{a\in\delta^+(u)\cap A_r}\sum_{c\in C_r}v^{kp}_{arc}=e^p_{uk}-e^{p-1}_{uk}+p^p_{uk}-p^{p-1}_{uk}$$
$$\forall u\in V \quad \forall k\in K \quad \forall p\in P$$

$$\sum_{c \in C} cg_{cp}^{r} \leq 1 \quad \forall r \in R \quad \forall p \in P$$

$$\sum_{t \in T} tt_{rc}^{tp} \geq iCong_{c}^{r}.cg_{cp}^{r} \quad \forall r \in R \quad \forall p \in P \quad \forall c \in C_r$$

$$\sum_{t \in T} tt_{rc}^{tp} \leq fCong_{c}^{r}.cg_{cp}^{r} \quad \forall r \in R \quad \forall p \in P \quad \forall c \in C_r$$

$$\sum_{a \in \delta^{+}(u) \cap A_r} \sum_{c \in C_r} f_{arc}^{dkp} - \sum_{a \in \delta^{-}(u) \cap A_r} \sum_{c \in C_r} f_{arc}^{dkp} = 0$$
$$\forall d \in D \quad \forall k \in K \quad \forall r \in R \quad \forall u \in VN_r \quad \forall p \in P$$

$$\sum_{a \in \delta^{+}(u) \cap A_r} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C_r} f_{arc}^{dkp} - \sum_{a \in \delta^{-}(u) \cap A_r} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C_r} f_{arc}^{dkp} \leq par_{ur}^{p}.qtPedida_{d}^{p}$$
$$\sum_{a \in \delta^{+}(u) \cap A_r} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C_r} f_{arc}^{dkp} - \sum_{a \in \delta^{-}(u) \cap A_r} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C_r} f_{arc}^{dkp} \geq -par_{ur}^{p}.qtPedida_{d}^{p}$$
$$\forall d \in D \quad \forall r \in R \quad \forall u \in VP_r \quad \forall p \in P$$

$$\sum_{a \in \delta^{+}(u) \cap A_r} \sum_{c \in C_r} x_{arc}^{kp} - \sum_{a \in \delta^{-}(u) \cap A_r} \sum_{c \in C_r} x_{arc}^{kp} = 0$$
$$\forall k \in K \quad \forall r \in R \quad \forall u \in VN_r \quad \forall p \in P$$

$$\sum_{a \in \delta^{+}(u) \cap A_r} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C_r} x_{arc}^{kp} - \sum_{a \in \delta^{-}(u) \cap A_r} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C_r} x_{arc}^{kp} \leq par_{ur}^{p}.M$$
$$\sum_{a \in \delta^{+}(u) \cap A_r} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C_r} x_{arc}^{kp} - \sum_{a \in \delta^{-}(u) \cap A_r} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C_r} x_{arc}^{kp} \geq -par_{ur}^{p}.M$$
$$\forall r \in R \quad \forall u \in VP_r \quad \forall p \in P$$

$$\sum_{a \in \delta^{-}(u) \cap A_r} \sum_{c \in C_r} x_{arc}^{kp} = xp_{ur}^{kp} + xs_{ur}^{kp} \quad \forall k \in K \quad \forall r \in R \quad \forall u \in VP_r \quad \forall p \in P$$

$$\sum_{k \in K} xs_{ur}^{kp} \leq \left(1 - par_{ur}^{p}\right).M \quad \forall r \in R \quad \forall u \in VP_r \quad \forall p \in P$$

$$\sum_{a \in \delta^{-}(u) \cap A_r} \sum_{c \in C_r} tt_{rc}^{tp} = ttp_{ru}^{tp} + tts_{ru}^{tp} \quad \forall t \in T \quad \forall r \in R \quad \forall u \in VP_r \quad \forall p \in P$$

$$\sum_{t \in T} tts_{ur}^{tp} \leq \left(1 - par_{ur}^{p}\right).M \quad \forall r \in R \quad \forall u \in VP_r \quad \forall p \in P$$

$$cg^r_{cp} \in \{0,1\} \quad \forall r \in R \quad \forall c \in C_r \quad \forall p \in P$$
$$par^p_{ur} \in \{0,1\} \quad \forall r \in R \quad \forall u \in VP_r \quad \forall p \in P$$
$$par^p_{ur} = 1 \quad \forall r \in R \quad \forall u \in VS_r \quad \forall p \in P$$

Todas as outras variáveis são não-negativas e contínuas.

4.3 Resultados Computacionais

Conforme feito no *Problema da Análise do Congestionamento*, as instâncias originais do problema foram alteradas de acordo com as extensões feitas na formulação. No caso do *Problema da Determinação de Paradas*, para as instâcias pequenas foram adicionadas algumas decisões de paradas às rotas, em torno de dez à vinte e os resultados são exibidos na tabela 4.1.

♯	nCols1	nLins1	TT1	nCols2	nLins2	TT2	Att	Gap
1	1396	1142	0,703	5016	1782	0,282	100,00%	0,00%
2	1396	1142	0,735	5129	1799	0,297	100,00%	0,00%
3	1396	1144	0,719	5143	1803	0,266	100,00%	0,00%
4	1396	1145	0,797	5055	1786	0,204	85,74%	0,00%
5	1396	1145	0,734	5055	1786	0,266	75,79%	0,00%
6	1396	1145	0,718	5055	1786	0,282	63,97%	0,00%
7	1382	1145	0,688	5066	1791	0,297	57,50%	0,00%
8	1382	1145	0,672	5051	1788	0,313	51,57%	0,00%
9	1382	1145	0,734	5051	1788	0,266	45,37%	0,00%
10	1382	1145	0,657	5051	1788	0,250	42,97%	0,00%

Tabela 4.1: Resultados computacionais das instâncias simples do *Problema de Planejamento de Atendimento*

Como pode ser visto, o nível do atendimento das demandas sofreu uma queda decorrente do aumento dos tempos das rotas. É importante notar, também, que em todos os testes o ótimo foi atingido.

Para o teste das instâncias reais, foram adicionadas em torno de cem decisões de paradas, obtendo-se os resultados apresentados nas tabelas de 4.2 à 4.4 e consolidados na tabela 4.5.

♯	Per	Dem	nCols1	nLins1	TT1	nCols2	nLins2	TT2	Gap
1	1	49	423010	344463	60,692	1500401	537604	24,451	0,00%
1	2	49	423012	344748	67,344	1506508	538760	35,600	0,00%
1	3	49	423011	344823	65,735	1505872	538591	36,989	0,00%
1	4	49	423012	344763	65,751	1505872	538537	38,379	0,00%
1	5	49	422958	344766	67,687	1506523	538790	37,739	0,00%
1	6	49	423016	344829	67,015	1506801	538867	39,613	0,00%
1	7	49	423018	344835	67,921	1507529	538862	39,316	0,00%
1	8	49	423018	344834	65,454	1507475	538842	39,426	0,00%
1	9	49	423018	344834	66,782	1507474	538847	39,004	0,00%
1	10	49	423018	344834	66,641	1506347	538820	33,477	0,00%
1	11	49	422949	344826	66,532	1505419	538633	33,539	0,00%
1	12	49	423011	344815	65,470	1501941	537974	52,073	0,00%

Tabela 4.2: Resultados computacionais para a instância 1 do *Problema da Determinação de Paradas*

♯	Per	Dem	nCols1	nLins1	TT1	nCols2	nLins2	TT2	Gap
2	1	60	432287	352710	75,915	1596914	596445	126,051	0,00%
2	2	60	432283	353205	87,261	1596051	596328	120,733	0,00%
2	3	60	432282	353056	83,272	1595346	596120	155,318	0,00%
2	4	60	432283	353057	87,350	1597980	596870	150,600	0,00%
2	5	60	432231	353213	86,498	1597882	596953	140,517	0,00%
2	6	60	432287	353210	86,794	1597777	596937	160,094	0,00%
2	7	60	432288	353215	85,032	1596002	596331	143,746	0,00%
2	8	60	432289	353067	87,214	1597258	596747	142,490	0,00%
2	9	60	432289	353217	86,460	1597876	596954	135,008	0,00%
2	10	60	432289	353218	86,564	1598231	597009	148,494	0,00%
2	11	60	432225	353215	85,897	1595977	596338	130,487	0,00%
2	12	60	432289	353070	86,259	1597612	596805	175,883	0,00%

Tabela 4.3: Resultados computacionais para a instância 2 do *Problema da Determinação de Paradas*

♯	Per	Dem	nCols1	nLins1	TT1	nCols2	nLins2	TT2	Gap
6	1	82	640426	463816	117,030	2168520	833521	37,162	0,00%
6	2	82	640429	464319	126,538	2176605	835210	70,667	0,00%
6	3	82	640429	464443	127,275	2175671	834903	106,972	0,00%
6	4	82	640429	464345	126,496	2176571	835023	77,763	0,00%
6	5	82	640353	464353	126,995	2177055	835306	123,366	0,00%
6	6	82	640436	464457	126,907	2177472	835440	72,869	0,00%
6	7	82	640439	464471	125,757	2178025	835577	86,323	0,00%
6	8	82	640439	464475	125,301	2177864	835557	106,975	0,00%
6	9	82	640443	464489	126,039	2177989	835585	97,438	0,00%
6	10	82	640440	464484	124,866	2175874	835449	67,648	0,00%
6	11	82	640341	464464	125,973	2174780	835247	65,047	0,00%
6	12	82	640429	464452	124,953	2169650	834115	50,629	0,00%

Tabela 4.4: Resultados computacionais para a instância 6 do *Problema da Determinação de Paradas*

♯	Dem	nCols1	nLins1	TT1	nCols2	nLins2	TT2	Gap
1	49	5076051	4137370	793,024	18068162	6463127	449,606	0,00%
2	60	5187322	4237451	1024,516	19164905	7159838	1729,421	0,00%
3	50	6599466	4877889	1046,928	23490746	7619916	851,376	0,00%
4	49	5398829	4258163	622,645	19946332	7194834	1663,338	0,00%
5	50	5418317	4299972	968,136	20018330	7265476	2222,197	0,00%
6	82	7685032	5572569	1504,130	26106077	10020934	962,861	0,00%
7	83	6776747	5133245	1596,653	24371961	9441809	1377,237	0,00%
8	93	6114021	4864381	1799,054	22606114	8995852	549,939	0,00%

Tabela 4.5: Resultados computacionais consolidados para as instâncias do *Problema da Determinação de Paradas*