

## GENERALIZAÇÃO DE MODELOS ESTILIZADOS PARA LOCALIZAÇÃO DE PONTOS DE PARADA

Hugo Pietrantonio  
Departamento de Engenharia de Transportes - EPUSP

### RESUMEN

Una de las decisiones más simples en el diseño de servicios de Transporte Público Colectivo Regular Urbano de Pasajeros (TPCR/UP) es definir el espaciamiento óptimo entre puntos de parada en una ruta dada.

Este artículo tiene como objetivo presentar una revisión, comparación y generalización de las diversas formulaciones de modelos analíticos genéricos para tratar este problema. Se discute además las limitaciones y la aplicabilidad práctica de estos modelos.

### 1. INTRODUÇÃO

Este artigo tem o objetivo de apresentar uma generalização das formulações baseadas em modelos estilizados para determinação da localização ótima de pontos de parada, uma das decisões mais simples do projeto de Transporte Público Coletivo Regular, Urbano de Passageiros (TPCR/UP).

Em Pietrantonio (1997), foi realizada uma extensa revisão sobre os enfoque propostos para a formulação de modelos normativos, isto é, orientados a propor soluções ótimas (ao invés de simular o efeito de projetos alternativos). Em particular quanto ao projeto de redes de TPCR/UP, foram identificadas duas tradições de formulação de modelos normativos: os modelos estilizados (que admitem representações mais genéricas) e os modelos práticos (que buscam representações mais detalhadas e específicas de cada situação).

O problema de decidir sobre a localização dos pontos de parada em uma rede de TPCR/UP, visto de forma mais geral, tem diversas facetas. Uma primeira faceta é relacionada com a definição das vias a serem servidas pelo TPCR/UP (que serão percorridas por alguma linha de serviço). Uma segunda faceta é relacionada com a localização das paradas ao longo das vias utilizadas nos itinerários das linhas de TPCR/UP. Uma terceira faceta é relacionada com o dimensionamento das paradas definidas, função naturalmente do seu nível de utilização.

Uma análise dos trabalhos técnicos existentes mostra que a segunda questão é a mais simples e mais estudada (considerada independentemente das demais questões), tendo sido formulada no

nível mais abstrato, como o problema de decidir sobre a distância a ser adotada entre paradas sucessivas. Em geral, um modelo estilizado é utilizado para examinar a questão do espaçamento entre paradas de transporte coletivo e pode inicialmente ser formulado examinando um corredor linear com densidade de demanda homogênea e mesma utilização pelas linhas de TPCR/UP, ao longo de toda sua extensão.

A seguir, será apresentada uma versão generalizada dos modelos estilizados que tratam a segunda questão, buscando permitir avaliar comparativamente as diferentes formulações existentes e fornecer diretrizes mais adequadas para aplicação prática. Este esforço teórico foi realizado como parte de um estudo metodológico sobre a aplicabilidade de critérios de projeto baseados em modelos normativos, contido em Pietrantonio (1997), que incluiu tanto modelos estilizados quanto práticos (que serão discutidos em outro artigo).

## 2. FÓRMULAS PARA ESPAÇAMENTO ÓTIMO ENTRE PONTOS

A orientação teórica dos modelos estilizados é o contexto ideal para discutir as relações fundamentais para análise de um problema de projeto, como o da localização dos pontos de paradas, selecionando variáveis a considerar, restrições a observar e objetivos a buscar com o procedimento normativo.

Naturalmente, um menor espaçamento entre pontos de parada ao longo do corredor melhora a acessibilidade para os usuários em sua área de influência, ao reduzir a distância de caminhada desde o acesso ao corredor até a parada mais próxima. Entretanto, existem pelo menos seis efeitos maléficos do aumento do número de paradas no corredor:

- mais paradas representam maior tempo dispendido na viagem para os usuários que estavam embarcados nos veículos já no início do trecho (isto é, pior qualidade de serviço para estes);
- mais paradas representam maior custo operacional, em particular consumo de combustível, decorrente da manobra de aceleração e desaceleração envolvida;
- maior tempo de viagem pode representar uma necessidade maior de frota e horas de operação para atender uma mesma frequência de serviço (isto é, maior custo de operação); e
- maiores custos de operação, em decorrência, podem representar maior tarifa para o serviço (pelo menos quando não há um efeito adicional significativo de aumento de demanda);
- mais paradas representam maior interferência com os demais veículos motorizados (em particular o automóvel), em função do eventual bloqueio de uma faixa de tráfego durante o atendimento aos passageiros no ponto;
- mais paradas representam maior interferência com outras atividades lindéreas ao corredor (isto é, com o uso do solo local), normalmente prejudicadas pela existência dos pontos de parada (mas eventualmente beneficiadas, por outro lado, pela demanda gerada pelos seus usuários). Naturalmente, existiriam outros efeitos que poderiam ser relevantes, especialmente no caso de uma análise global que buscassem estabelecer critérios gerais a serem aplicados no serviço como um todo. Por exemplo, a piora na qualidade do serviço poderia significar uma perda na captação da demanda que possui o automóvel como meio de transporte alternativo e, por este

motivo, produzir custos sociais adicionais relacionados com acidentes de trânsito ou poluição do ar.

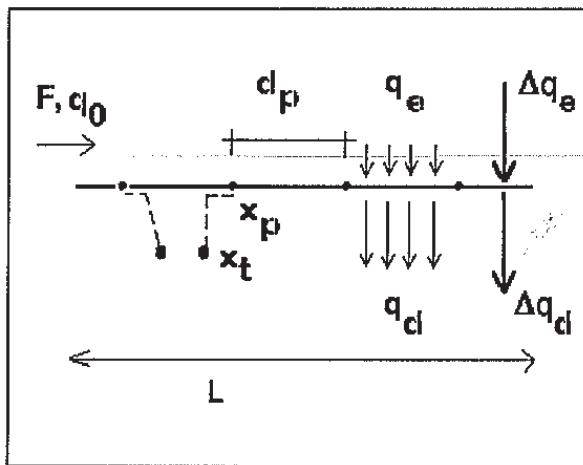


Figura 1 : Esquema de Análise da Distância Ótima entre Pontos de Parada

Um modelo de análise teórica usual, esquematizado na Figura 1, pode partir das hipóteses seguintes:

- i) no início do trecho, a demanda é de  $q_0$  passageiros/hora e a frequência de coletivos é  $F$  viagens/hora, que atravessarão todo o trecho (isto é, sem entrada ou saída de linhas neste trecho do corredor), ou mais detalhadamente  $q_{0Rt}$  e  $F_{Rt}$  por linha R e período t, classificando os períodos em pico ( $t \in P$ , em que a disponibilidade de frota é restritiva) e fora-pico ( $t \in F$ ). A identificação dos períodos de pico e fora-pico está discutida de forma detalhada, no contexto da definição da lotação de projeto ou da frequência de serviço (que é o dado básico que determina a frota necessária à operação, dadas as características de cada linha de serviço) no capítulo 4 de Pietrantonio, 1997. Esta caracterização corresponde a um dia útil típico (diferentes tipos de dia e épocas do ano, de menor demanda, seriam dimensões adicionais, não consideradas de forma específica). A diferenciação entre o atendimento de diferentes tipos de dia, considerando a frota total disponível, e mesmo dos diferentes picos de um mesmo tipo de dia (que poderiam normalmente ser atendidos independentemente, isto é, com frota e equipe operacional específicas) traz algumas sutilezas adicionais que estão discutidas no trabalho citado. A discussão a seguir assume que todos os períodos de pico são igualmente restritivos e utilizam a frota total (em serviço).
- ii) a extensão L do trecho analisado é maior que o espaçamento entre pontos  $d_p$ , sendo que desembarcarão  $q_d$  passageiros/hora (também entram no trecho com os passageiros  $q_0$  que seguirão direto) e embarcarão  $q_e$  passageiros/hora (que seguem adiante), ambos distribuídos homogeneamente, sendo a demanda ao longo do trecho igual a  $q_L = q_d + q_e$  em toda a extensão L (respectivamente  $q_{dRt}$ ,  $q_{eRt}$  e  $q_{LRt}$  por linha e período).
- iii) a probabilidade de uma viagem parar em um ponto no corredor é  $p_p$  (função da demanda média por viagem prevista, para o ponto,  $q_{m_{pv}}$ ), tendo-se então um tempo de parada igual a  $t_o = t_l + t_p \cdot q_{vp}$ , onde  $t_l$  é um tempo fixo (abrir as portas, permitir aproximação dos passageiros),

$t_p \cdot q_{vp}$  é o tempo gasto para movimentar (embarcar/desembarcar) os  $q_{vp}$  passageiros que usam o ponto na viagem ( $t_p$  é o tempo médio gasto por passageiro da viagem no ponto de parada); o valor médio de embarques  $q_{vp}$  é  $q_{m_{pv}}/p_p$ , para os veículos que param (dados que também poderiam ser diferenciados como  $p_{pRt}$ ,  $q_{m_{pvRt}}$  e  $q_{vpRt}$ , por linha e período, da mesma forma que  $t_{IR}$  e  $t_{pR}$  poderiam ser diferenciados por linha, em geral função do tipo de veículo selecionado para operá-la);

- iv) o aumento do tempo de viagem para os passageiros e para o veículo em função de uma parada inclui o efeito da desaceleração e aceleração  $t_{ba} = \frac{V}{2.b} + \frac{V}{2.a}$  (onde  $V_o$  é a velocidade normal de percurso, sem parada,  $b$  a desaceleração e  $a$  a aceleração do veículo), que pode ser diferenciado por período e linha (especialmente em função da velocidade normal de percurso específica de cada período e do tipo de veículo utilizado), acarretando também um aumento de custo direto  $\Delta c_{ba}$  (usualmente associado ao consumo de combustível adicional), que devem ser ponderados pela probabilidade de parar (por período e linha);
- v) o tempo perdido na espera em fila antes de estacionar para atendimento de passageiros no ponto de parada  $t_n$  é função do seu nível de utilização ( $\rho_t = \frac{F_t}{C_{ot}}$ , por período, onde  $F_t = \sum_R F_{Rt}$  é a frequência de viagens, considerando todas as linhas que o utilizam, e  $C_{ot}$  é a capacidade do ponto de parada em ônibus/hora para todos os veículos que passam pelo ponto, considerando o efeito dos veículos que não param);
- vi) a capacidade do ponto de parada depende do número de posições de embarque  $m$  e do tipo de configuração (que determinam, em especial, a possibilidade de bloqueio e ultrapassagem e o uso exclusivo ou compartilhado com o tráfego geral), sendo função do intervalo mínimo entre veículos que param ( $h_{op} = \delta_h + t_o$ , incluindo um intervalo de separação mínima) ou não (o intervalo de passagem  $h_o$ ) e da probabilidade de parada  $p_p$  (além da proporção de tráfego de outros veículos  $p_a$ , com intervalo de passagem  $h_a$ , no caso de uso compartilhado), que pode ser expressa por  $C_o = \frac{k_o}{\bar{h}_{o,min}}$  (ou  $C_{om} = \frac{k_{cm}}{\bar{h}_{o,min}}$  por posição de parada, onde o intervalo mínimo médio pondera todas as linhas que utilizam o ponto de parada e o tráfego compartilhado  $\bar{h}_{ot,min} = \sum_R p_{Rt} \cdot h_{oRt,min} + \frac{p_{at}}{(1-p_{at})} \cdot h_a$ , em cada período; onde  $p_R$  é a proporção na frequência da linha  $R$ );
- vii) a extensão das linhas fora do trecho é representado por  $L_0$  (médio ou representativo, incluindo o sentido oposto), sendo o tempo de ciclo atual igual a  $\frac{L}{V_o} + t_{Tp} + \frac{L_0}{V_{co}}$  (onde  $V_{co}$  é a velocidade media global, com paradas nos pontos, e  $t_{Tp}$  é o tempo total relacionado com as paradas no corredor) e o tempo médio de viagem atual dos passageiros  $t_v$  igual a  $t_{v0} + \frac{L}{V_o} + t_{Tp}$  para os passageiros que atravessam todo o trecho (tendo uma fração de

$\frac{L}{V_o} + t_{Tp}$  para os passageiros que embarcam ou desembarcam no trecho), dados que podem ser diferenciados por linha e período ( $\frac{L}{V_{oRt}} + t_{TpRt} + \frac{L_{0R}}{V_{coRt}}$  e  $t_{v0Rt} + \frac{L}{V_{oRt}} + t_{TpRt}$ ). Esta formulação pode ser generalizada referindo a frequência e a demanda das diferentes linhas a cada ponto de parada, especialmente no caso em que as linhas não percorrem (todas elas) todo o corredor.

- viii) o efeito sobre os automóveis pode ser sintetizado pelo custo adicional  $\Delta\bar{C}_{aa}$  e pelo atraso médio  $\bar{t}_{ap}$  por automóvel (ou  $\bar{t}_{ao} = p_p \cdot t_{ao} = \bar{n}_{ao} \cdot t_{ap}$  por parada, onde  $\bar{n}_{ao}$  é o número de veículos afetados por parada) decorrentes da detenção dos veículos que são bloqueados pelos ônibus atendendo passageiros nos pontos de parada, o que seria função da frequência de paradas e do tempo médio de parada dos ônibus, do fluxo de autos na faixa lindeira e nas faixas adjacentes (que afetam o número de automóveis bloqueados e a facilidade de ultrapassar o veículo parado), podendo representar um efeito localizado ou estrutural (no caso de interferir em um gargalo de capacidade viária do corredor);
- ix) o efeito localizado sobre as atividades lindéiras ao corredor seria relacionada com a perda (ou eventual ganho) de atratividade do negócio decorrente do uso de parte da faixa frontal do imóvel pelo ponto de parada (com a proibição de estacionamento e interferência nos fluxos de entrada e saída de veículos e pessoas), que traduzem-se em perda de valor do imóvel  $\Delta VI_{ul}$  (capitalizando a perda de receita monetária  $\Delta R_{ul}$  diária, função das interferências citadas ou de danos à imagem do negócio, eventualmente somada a outros efeitos de desconforto ambiental ou psicológico decorrentes da vizinhança com o ponto de parada) e pode ser relacionado com o tipo de uso local.

Os modelos estilizados de análise usualmente partem de um espaçamento entre paradas uniforme  $d_p$  para analisar seus impactos na qualidade e custo do serviço, e então calcular o espaçamento ótimo entre paradas (ver Bly y Oldfield, 1974 ou Ebtu, 1987). O número de paradas no trecho é admitido igual a  $n_p = \frac{X}{d_p}$ , inicialmente ignorando a restrição de ter de adotar um número de paradas inteiro e realizando a análise com variáveis contínuas. A mesma análise poderia utilizar  $n_p$  e obter a solução ótima inteira, que para uma função objetivo usual (por exemplo, unimodal) seria um arredondamento (para menos ou para mais) da solução ótima contínua. No entanto, a melhor representação da variável de decisão poderia ser relevante para incorporar à análise a possibilidade de operação com regimes especiais de parada (como *skip-stop* ou paradas alternadas), que permitiriam diferenciar o espaçamento entre paradas por linha (mas mantendo-as como múltiplos do espaçamento entre pontos existente).

A movimentação média de passageiros nos pontos do trecho por viagem é  $q_v = (q_a + q_e)/F$  e por ponto é  $q_p = (q_d + q_e)/n_p$ , que corresponde à média de  $qm_{vp} = q_v/n_p = q_p/F$  por viagem e ponto ou  $q_{vp} = qm_{vp}/p_p$  por viagem e parada no trecho, e tem influência fundamental sobre o tempo de viagem dos usuários no trecho e sobre a capacidade dos pontos de parada. Deve-se notar que, na análise

da decisão sobre pontos de parada, o termo  $q_v = q_L/F$  é uma característica específica, própria do corredor analisado.

Em geral, o efeito total sobre o tempo de viagem poderia ser expresso como  $\bar{t}_{ba} + \bar{t}_n + \bar{t}_o$ , incluindo o efeito da desaceleração e aceleração, da espera do veículo para parar no ponto e do atendimento aos passageiros. Normalmente, assume-se que os efeitos mencionados afetam somente os veículos que param (embora a realidade operacional seja, em geral, menos ideal), de forma que o efeito médio deve ponderar a probabilidade de parar e a operação efetiva dos veículos que pararam.

O tempo médio de atendimento aos passageiros por parada é  $\bar{t}_o \equiv p_p \cdot (t_1 + q_{vp} \cdot t_p) = p_p \cdot t_1 + qm_{vp} \cdot t_p$ , considerando a probabilidade de parar no ponto  $p_p$  (que também é função de  $qm_{vp}$ , a movimentação média de passageiros por ponto e por viagem, em cada parada). A hipótese usual sobre a probabilidade de parar em um ponto, dada a média de passageiros/viagem embarcando  $qm_{evp}$  e desembarcando  $qm_{dvp}$  na parada (ver, por exemplo, Hendrickson, 1978), é expressa pela fórmula de Poisson.

Uma generalização, considerando o efeito da aleatoriedade nas passagens dos coletivos com a hipótese de chegadas poissonianas também para os intervalos entre veículos, implica em  $p_p = q_p/(F + q_p) = qm_{vp}/(1 + qm_{vp}) = q_v/(n_p + q_v)$  (ver, por exemplo, Szasz, 1993). Admitindo a hipótese que as chegadas de usuários e de coletivos têm distribuição poissoniana com taxas médias  $\lambda_p$  pax/h e  $\lambda_f$  ônibus/h, a probabilidade média de parar  $\bar{p}_p = \int p[parar / H = h] \cdot f[H = h] \cdot dh$  é avaliada considerando que  $p[parar / H = h] = 1 - e^{-\lambda_p \cdot h}$  (maior para intervalos maiores) e  $f[H = h] = \lambda_f \cdot e^{-\lambda_f \cdot h}$ , tendo-se  $\bar{p}_p = \lambda_p / (\lambda_f + \lambda_p) = q_p / (F + q_p)$  na notação adotada. Os resultados empíricos são, em geral, intermediários entre a fórmula poissoniana e a de Szasz (que, entretanto, é mais tratável).

A incorporação da probabilidade de não parar, altera a avaliação do efeito correspondente ao acréscimo de tempo de viagem para os usuários no veículo, que seria  $(t_{ba} + t_1 + t_p \cdot q_{pv}) \cdot n_{pv} = (t_{ba} + t_1) \cdot p_p \cdot n_p + t_{pv}$ . Novamente,  $t_{pv}$  é constante e igual à  $t_p \cdot q_v = t_p \cdot q_L/F$  por viagem, e  $t_{pR} = t_p \cdot q_v \cdot F \cdot T = t_p \cdot Q_R$  para todas as viagens e todo o período de operação. O tempo total perdido por viagem nas paradas  $t_{vR}$  (incluindo o tempo fixo de parada  $t_{fv}$ , além do tempo de atendimento aos passageiros  $t_{pv}$ ) é, no entanto, diferente (assim como o tempo total perdido em todas as viagens  $t_{pR}$ ) para cada espaçamento entre paradas, ponderando a influência da probabilidade de parar nos pontos do corredor. Este efeito minora a influência de um menor espaçamento entre paradas (também seria necessário distinguir a distribuição da demanda por linha e período, visto que a movimentação média por viagem pode variar muito entre linhas). Neste caso, tem-se  $t_{fvR} = (t_{ba} + t_1) \cdot p_{pR} \cdot n_p$  como função de  $qm_{vpR} = (q_{dR} + q_{eR})/F_{Rt}$ , específicos de cada linha e período.

(naturalmente,  $t_{fTRt} = t_{fvRt} \cdot F_{Rt} \cdot T_t$  e  $t_{fT} = \sum_{R,t} t_{fTRt}$ ). Em geral, uma análise aproximada poderia ser feita

calculando  $p_p$  com o valor médio  $q_{vp}$  (sem distinguir os períodos de pico e fora-pico, para diferenciar  $p_{pP}$  de  $p_{pF}$ ). Tanto a demanda quanto a oferta são maiores no pico, de maneira que  $q_{vp}$  não é, normalmente, muito maior que  $q_{Fvp}$ . Da mesma forma, a variação entre linhas poderia ser ignorada.

O tempo médio de viagem dos passageiros será majorado, correspondentemente: os  $Q_{T0}$  usuários externos ao trecho terão uma majoração  $(t_{ba}+t_l) \cdot p_{pP} \cdot n_p + t_{pvp}$  no pico e  $(t_{ba}+t_l) \cdot p_{pF} \cdot n_p + t_{pVF}$  fora-pico e os  $Q_T$  usuários que embarcam ou desembarcam no corredor terão uma majoração  $((t_{ba}+t_l) \cdot p_{pP} \cdot n_p + t_{pvp})/2$  no pico e  $((t_{ba}+t_l) \cdot p_{pF} \cdot n_p + t_{pVF})/2$  fora-pico (menor para os usuários que desembarcam no início do corredor que para os que desembarcam no seu final). Estes efeitos também poderiam ser distinguidos por linha e novamente  $t_{pvp} = t_p \cdot q_{vp} = t_p \cdot (q_{dP} + q_{eP})/F_p$  e  $t_{pVF} = t_p \cdot q_{VF} = t_p \cdot (q_{dF} + q_{eF})/F_F$  não dependem do espaçamento entre paradas.

O tempo de atendimento aos passageiros é também fundamental para a capacidade do ponto de parada porque determina o tempo médio ocupado por parada, e por veículo (considerando a probabilidade de não parar) e o tempo de espera para atendimento em um ponto de parada, selecionada uma configuração adequada.

A análise com a relação usual baseada na Teoria de Filas é, no entanto, algebricamente bastante mais trabalhosa. Por exemplo, a fórmula de Pollaczek-Khintchine generalizada é  $t_n = k_{nc} \cdot \bar{h}_{o,min} \cdot \rho / (1 - \rho)$ , onde  $\rho = F / C_o$  é a taxa de utilização da capacidade no ponto e

$C_o = k_c / \bar{h}_{o,min}$  é a capacidade total da parada ( $k_{nc}$  é uma constante de ajuste empírico). Portanto, o

termo fundamental seria  $\bar{h}_{o,min} \equiv t_{ho} + p_p \cdot t_{hp} + t_p \cdot q_v / n_p$ , o intervalo mínimo entre paradas sucessivas de ônibus em uma posição, que é função do espaçamento entre paradas (onde  $t_{ho}$  reúne em um termo os fatores aproximadamente fixos e  $t_{hp}$  reúne os fatores afetados apenas pela probabilidade de parada).

Para o efeito sobre o tráfego geral, expressões preliminares seriam  $\Delta \bar{c}_{aa} = \Delta c_{aa} \cdot F \cdot \bar{t}_o$  e  $\bar{t}_{ap} = t_{ap} \cdot F \cdot \bar{t}_o$  por veículo e ponto de parada, ou seja,  $\Delta \bar{c}_a = p_{ao} \cdot F_a \cdot \Delta c_{aa} \cdot F \cdot \bar{t}_o$  e  $\Delta \bar{t}_a = \bar{q}_{va} \cdot p_{ao} \cdot F_a \cdot t_{ap} \cdot F \cdot \bar{t}_o$  por ponto de parada (onde  $F_a$  é o fluxo de automóveis, ou outros veículos motorizados,  $p_{ao}$  é a proporção do fluxo correspondente na faixa com paradas de ônibus,  $\Delta c_{aa}$  é o custo de operação adicional por parada para automóveis,  $\bar{q}_{va}$  é ocupação média dos veículos,  $t_{ap}$  é um termo relacionado com a dificuldade de ultrapassar o veículo parado, que seria basicamente função do volume global do tráfego geral motorizado e do número total de faixas).

Novamente, as variáveis importantes para a decisão considerada estão em  $\bar{t}_o = p_p \cdot t_l + t_p \cdot q_v / n_p$ , devendo-se distinguir o efeito por período, e o efeito total é  $\Delta \bar{c}_{aT} = \Delta \bar{c}_a \cdot n_p = \Delta c_{aa} \cdot F_{ao} \cdot F \cdot \bar{t}_o \cdot n_p$  e  $\Delta \bar{t}_{aT} = \Delta \bar{t}_a \cdot n_p = \bar{q}_{va} \cdot F_{ao} \cdot t_{ap} \cdot F \cdot \bar{t}_o \cdot n_p$  (onde  $F_{ao} = p_{ao} \cdot F_a$  é o fluxo de automóveis na faixa com paradas

de ônibus). Note que o termo  $F \cdot \bar{t}_o$  corresponde à fração do tempo em que o ponto está ocupado (já ponderando a probabilidade de parar ou não nos pontos) e é tomado nas expressões acima como a probabilidade de um automóvel na mesma faixa ser bloqueado. A forma mais detalhada

seria  $\Delta c_{aa} \cdot \sum_t \left( p_{aot} \cdot F_{at} \cdot \left( \sum_R F_{Rt} \cdot \bar{t}_{oRt} \right) \right)$  ou  $\bar{q}_{av} \cdot \sum_t \left( p_{aot} \cdot F_{at} \cdot t_{apt} \cdot \left( \sum_R F_{Rt} \cdot \bar{t}_{oRt} \right) \right)$ , o que evidencia que a influência das diferentes linhas é considerada calculando  $\bar{t}_{oR}$  como uma média ponderada pela frequência (portanto, apenas os diferentes períodos precisam ser distinguidos).

Para o efeito sobre o congestionamento dos pontos, tem-se o efeito total  $\bar{t}_{ba} + \bar{t}_n + \bar{t}_o$  por parada, com  $\bar{t}_{ba} = p_p \cdot t_{va} = p_p \cdot \left( \frac{V}{2.b} + \frac{V}{2.a} \right)$ ,  $\bar{t}_o \equiv p_p \cdot t_l + t_p \cdot \frac{q_v}{n_p}$  e  $\bar{t}_n = k_{nc} \cdot \bar{h}_{o,min} \cdot \frac{\rho}{1-\rho}$  (onde,

$\bar{h}_{o,min} \equiv t_{ho} + p_p \cdot t_{hp} + \frac{q_v}{n_p} \cdot t_p$  determina a capacidade dos pontos e  $q_v = \frac{q_L}{F}$  é uma característica do corredor), que também deveriam ser distinguidos por período (sem distinguir as características das diferentes linhas que utilizam o ponto, de forma compatível com a hipótese usual de demanda homogênea da Teoria de Filas). A complexidade algébrica desta formulação deriva especialmente do fato de, mesmo com diversas suposições simplificadoras, ter-se

$C_o = \frac{k_c}{\bar{h}_{o,min}}$ , ou seja,  $\rho = \frac{F}{C_o} = \frac{F}{k_c \cdot \bar{h}_{o,min}}$  e então  $\frac{\rho}{1-\rho} = \frac{\frac{F}{k_c} \cdot \bar{h}_{o,min}}{1 - \frac{F}{k_c} \cdot \bar{h}_{o,min}}$  (também função de

$\bar{h}_{o,min}$ ). O reconhecimento da existência de diversas linhas, com características específicas (movimentação média ou tipo de veículo) corresponderia a considerar demandas heterogêneas (aspecto considerado apenas através da contribuição para a variância da distribuição dos tempos de serviço, sem diferenciar os tempos médios de cada linha).

Em função desta complexidade, a suposição de que o tempo dispendido em fila é pequeno e está incorporado no tempo fixo de atendimento aos passageiros seria conveniente e aceitável, com exceção de alguns casos especiais. Uma alternativa adicional seria adotar uma expressão aproximada, do mesmo tipo da empregada para o efeito sobre o tráfego geral, que seria  $\bar{t}_n = t_{op} \cdot F \cdot \bar{t}_o$ , ignorando a relação entre  $t_{op}$  e  $\bar{t}_o$  e os efeitos não-lineares do congestionamento. Neste caso, restaria a questão de escolher um valor representativo, fixo, para  $t_{op}$  (um problema menor que o correspondente ao caso de ignorar totalmente o efeito de congestionamento ou incluí-lo selecionando uma parcela com valor fixo incorporado em  $t_l$ , que é a forma usual).

Entretanto, considerando que este termo deve ser pequeno para a grande maioria dos casos e ponderando que para os casos especiais em que sua incorporação seria relevante, uma análise mais detalhada poderia tratá-lo como um aspecto específico e ser baseada em procedimentos numéricos que ficariam mais próximos do espírito dos modelos práticos (que serão formulados adiante). Neste caso, poderiam ser utilizadas as expressões mais complexas para funções de desempenho (empíricas ou da Teoria de Filas) e mesmo incorporado o problema da seleção de configurações alternativas para os pontos de parada (com seus parâmetros específicos e os custos decorrentes).

Outros aspectos específicos, como o efeito sobre o uso do solo local (função do tipo de atividade lindeira ao ponto) ou a existência de trechos inadequados para localizar paradas (função da interferência em gargalos de capacidade ou de problemas de segurança viária), também poderiam ser incluídos em análises detalhadas desta natureza.

Considerando que a análise tradicional não considera efeitos decorrentes da decisão de espaçamento entre pontos de parada sobre a demanda captada pelo serviço de TPCR/UP, o procedimento usual poderia derivar recomendações de projeto do critério de minimização do custo social. Uma análise mais detalhada poderia eliminar esta hipótese e considerar, em particular, a competição do TCRP/UP com modos de transporte alternativos como o percurso à pé (especialmente para curtas distâncias), com taxi ou lotação (para distâncias maiores). Se a demanda total, considerando todos os modos, ainda for considerada constante, novamente a minimização do custo social poderia ser utilizada como objetivo (incluindo, no entanto, todos os modos e todos os atributos relevantes aos usuários e à comunidade em geral). Entretanto, deve-se notar a interdependência entre a medida de benefício agregado e a estrutura da função de demanda conjunta, discutida em Pietrantonio (1997).

Normalmente, no seu contexto típico de decisão, uma análise deste tipo deveria ater-se a algum corredor específico e teria de supor que a definição de localização perduraria por um tempo considerável, em vista das dificuldades de relocação dos pontos de parada (sobretudo relacionadas com os usos do solo no entorno e, também, com os custos de implantação dos pontos de parada).

As hipóteses tradicionais para análise normalmente adotam suposições mais simplificadas. Entretanto, da discussão anterior, pode-se verificar que tanto o efeito da movimentação média sobre a probabilidade de parar quanto a influência das paradas sobre o tráfego geral poderiam ser consideradas sem gerar dificuldades excessivas (e mesmo uma aproximação para o congestionamento dos pontos de parada).

A valoração dos atributos de qualidade do transporte analisados poderia então ser decomposto nos três efeitos:

- da acessibilidade, que poderia ser estimado por  $VT P \cdot \frac{(x_t + k_p \cdot d_p)}{V_p \cdot q_L \cdot T}$ , onde VTP é o valor dado ao tempo dispendido em acesso à pé (médio ou típico para os usuários do trecho);
- do tempo de viagem dos usuários de ônibus, que poderia ser estimado por  $(VT V_0 \cdot q_{0t} + VTV \cdot \frac{q_L}{2}) \cdot (p_{pt} \cdot (t_{ba} + t_l) \cdot n_p + t_p \cdot q_{vt}) \cdot T_t$  no pico e fora-pico, onde VTV<sub>0</sub> e VTV são os valores atribuídos ao tempo dispendido em viagem no veículo (médio ou típico), distinguidos para os usuários que atravessam o corredor e que embarcam ou desembarcam no trecho;
- do tempo de viagem dos usuários de automóvel e outros veículos motorizados, que poderia ser estimado por  $VTO \cdot \bar{q}_{av} \cdot (F_{av} \cdot t_{apt} \cdot F_t \cdot (p_{pt} \cdot t_l \cdot n_p + t_p \cdot q_{vt}) \cdot T_t)$  no pico e fora-pico, onde VTO é o valor dado ao tempo de viagem de outros usuários da via. Existem poucos estudos mais detalhados à respeito mas seria eventualmente importante distinguir os tempos gastos por motoristas e passageiros e os tempos gastos em movimento ou parado, que podem ter

valoração diferente para os usuários. A valoração de aspectos de qualidade também poderia ser necessária no caso de incorporar o efeito sobre o uso do solo lindeiro, exceto na alternativa de mensurá-la através da capitalização no valor do imóvel (neste caso é usual admitir que todos os aspectos qualitativos já teriam sido considerados pelos clientes diretos ou indiretos e incorporados ao valor do imóvel, hipótese que depende da suposição crítica de informação perfeita que, entretanto, é normalmente adotada na Teoria Econômica tradicional).

Estes efeitos poderiam ser avaliados para a demanda de passageiros e condições de operação atuais do corredor (visto que grandes variações nestas características justificariam também uma revisão da decisão sobre localização dos pontos), a menos de informação existente sobre alterações de curto prazo ou uma projeção simples da tendência recente de evolução da demanda.

A avaliação do aumento nos custos é mais delicada, em vista da existência de indivisibilidades, e também está relacionado com o aumento no tempo de viagem e seu efeito sobre a frota efetiva e as horas de operação necessárias para atender à frequência ofertada.

Tomando uma expressão simplificada usual para o custo total de operação do serviço de TPCR/UP,  $CT = CV \cdot NO + CH \cdot HO + CK \cdot KP$ , onde NF e NO são a frota efetiva e operacional, HO é o total de horas de operação (considerando horas com remuneração normal e horas extras) e KP é o total de quilômetros percorridos, a distinção do efeito específico das paradas transformaria esta expressão em  $CT = CV \cdot NO + CH \cdot HO + CK_0 \cdot KP + \Delta c_{ba} \cdot nP$ , onde  $CK_0$  corresponderia ao custo quilométrico sem paradas e  $nP$  seria o número total de paradas realizadas (onde o termo adicional poderia ser também expresso como  $\Delta \bar{c}_{ba} \cdot NP$ , onde  $NP$  é o número total de pontos de paradas existentes e  $\Delta \bar{c}_{ba} = \bar{p}_p \cdot \Delta c_{ba}$ ). De forma correspondente, o custo de operação para os demais veículos motorizados seria  $CT = Ch \cdot ho + Ck_0 \cdot km + \Delta c_{aa} \cdot na$ , com coeficiente de custo próprios e assumindo a disponibilidade dos veículos (isto é, ignorando o efeito das condições de operação sobre a frota, como seria adequado para os usuários de automóvel particular ou mesmo para os serviços de taxi, que operam com grande ociosidade, mas eventualmente não para os veículos de carga).

A questão principal é analisar a variação de custos decorrentes da decisão que está sendo examinada, ponderando seu escopo e horizonte específicos, em particular no que se refere ao efeito sobre as indivisibilidades.

Considerando que a análise refere-se especificamente a um certo corredor (isto é, um trecho do itinerário das linhas) e a adoção de um horizonte de médio prazo (que corresponde ao ciclo de revisão da decisão), tanto o efeito sobre a frota operacional (e total) quanto sobre o quadro de operadores (incluindo reservas) dependem de uma parcela complementar significativa (correspondente ao trajeto  $L_0$  fora do corredor), que neste contexto de decisão somente poderia ser efetivamente considerada como uma variável aleatória.

O efeito da decisão sobre a frota, por exemplo, que somente se manifesta no limite da indivisibilidade, não poderia ser diretamente associada à decisão de alteração da localização de pontos de parada em um trecho pouco extenso. Além disso, considerando que as restrições tecnológicas usuais admitem o atendimento do perfil da demanda típico dos dias úteis com viagens

em ciclo fechado e que as modificações operacionais feitas ao longo do tempo poderiam alterar esta característica, torna-se necessário relativizar estas restrições de serviço ou ignorar as restrições de inteireza para os valores de frota, decorrentes das indivisibilidades mencionadas (o efeito sobre o quadro de operadores necessário ao serviço é ainda mais flexível, em função da possibilidade de utilizar horas extras).

Portanto, neste contexto, o efeito sobre as indivisibilidades deve ser tratado de uma forma diferente, em comparação com uma decisão que afeta o dimensionamento de recursos de forma imediata e direta e que pode ser reavaliado a cada modificação das condições admitidas (como seria o caso da definição da frequência de viagens ou lotação de projeto).

A consideração de índices de produtividade média nos coeficientes de custo e/ou a eliminação a restrição de inteireza relacionada com as indivisibilidades relativas à frota ou pessoal seriam as formas usuais de lidar com estas características de indeterminação (ou incerteza). Estes efeitos também poderiam ser avaliados, de maneira mais complexa, caracterizando de forma probabilística os diferentes cenários de efeito de indivisibilidades (isto é, cenários sobre  $L_0$ ), mas seria então necessário prever a evolução destes condicionantes em um horizonte de tempo compatível com o ciclo de revisão da decisão (uma informação adicional usualmente difícil de considerar, de maneira apropriada).

As análises usuais adotam ambas as opções mas será inicialmente preferido manter os diferentes termos de custo para frota (operacional) e horas de operação e apenas ignorar a restrição de inteireza (o que também torna a análise matemática mais simples). Adotando os pressupostos discutidos, a avaliação do impacto nos custos pode então ser estimada admitindo que:

- o impacto na frota (assumindo uma proporção média de veículos de reserva) é calculado com a frequência média dos períodos de pico  $F_p \cdot (p_{pt} \cdot (t_{ba} + t_1) \cdot n_p + t_p \cdot q_{vp})$ , determinando um efeito marginal médio sobre a frota operacional necessária para operação. A inclusão dos custos relacionados com a frota operacional nos custos fixos correspondentes à frota total corresponde à suposição de que todos os períodos de pico são igualmente restritivos (que será discutida e examinada no capítulo seguinte). Esta é uma hipótese menos crítica, no entanto, considerando o tratamento em separado dos custos de pessoal de operação, expressos como custos por hora de operação.
- o impacto nas horas de operação em cada período (atendidos de forma combinada por aumento de horas normais e extras, mantendo-se a média de remuneração horária) é calculado por  $(p_{pt} \cdot (t_{ba} + t_1) \cdot n_p + t_p \cdot q_{vt}) \cdot F_t \cdot T_t$ , desprezando a parcela correspondente para outros veículos motorizados;
- o impacto nos quilômetros de operação é nulo, mas há o efeito correspondente ao custo adicional das paradas, calculado por  $\Delta c_{ba} \cdot p_{pt} \cdot n_p \cdot F_t \cdot T_t$  para ônibus e  $\Delta c_{aa} \cdot F_{act} \cdot (p_{pt} \cdot t_1 \cdot n_p + t_p \cdot q_{vt}) \cdot F_t \cdot T_t$  para outros veículos motorizados.

No caso de admitir que a probabilidade de parar nos pontos é  $p_p$ , a medida global dos custos sociais CST para uma distância entre paradas  $d_p$  seria:

$$\begin{aligned}
 CST = & \frac{VTP}{V_p} \cdot Q_{LT} \cdot (x_t + k_p \cdot d_p) + \\
 & + \sum_t \left( VTV_0 \cdot Q_{0t} + VTV \cdot \frac{Q_{L_t}}{2} \right) \cdot (n_p \cdot (t_{ba} + t_l) \cdot p_{pt} + t_p \cdot q_{vt}) \cdot T_t + \\
 & + CV \cdot F_p \cdot (n_p \cdot (t_{ba} + t_l) \cdot p_{pp} + t_p \cdot q_{vp}) + \\
 & + \sum_t \left( CH \cdot (n_p \cdot (t_{ba} + t_l) \cdot p_{pt} + t_p \cdot q_{vt}) + \Delta c_{ba} \cdot n_p \cdot p_{pt} \right) \cdot F_t \cdot T_t + \\
 & + \sum_t VTO \cdot \bar{q}_{av} \cdot F_{aot} \cdot t_{apt} \cdot F_t \cdot (n_p \cdot t_l \cdot p_{pt} + t_p \cdot q_{vt}) \cdot T_t + \\
 & + \sum_t \Delta c_{aa} \cdot F_{aot} \cdot F_t \cdot (n_p \cdot t_l \cdot p_{pt} + t_p \cdot q_{vt}) \cdot T_t
 \end{aligned}$$

em que podem ser separados os termos relacionados ou não com  $d_p$ , tendo-se:

$$\begin{aligned}
 CST = & \frac{VTP}{V_p} \cdot Q_{LT} \cdot k_p \cdot d_p + CV \cdot F_p \cdot (t_{ba} + t_l) \cdot \frac{L}{d_p} \cdot p_{pp} + \\
 & + \sum_t \left( \left( VTV_0 \cdot Q_{0t} + VTV \cdot \frac{Q_{L_t}}{2} + F_t \cdot CH \cdot T_t \right) \cdot (t_{ba} + t_l) + (VTO \cdot Q_{aot} \cdot t_{apt} + \Delta c_{aa} \cdot N_{aot}) \cdot t_l \right) \cdot \frac{L}{d_p} \cdot p_{pt} + \\
 & + \sum_t \Delta c_{ba} \cdot N_t \cdot \frac{L}{d_p} \cdot p_{pt} + CST_0
 \end{aligned}$$

onde  $CST_0$  é o termo fixo (independente de  $d_p$ ) e  $N_t, N_{aot}$  são os totais de viagens de ônibus e de autos na faixa utilizada pelos ônibus (em veículos) nos períodos. Pode-se verificar que o termo fixo é dado por

$$\begin{aligned}
 CST_0 = & \frac{VTP}{V_p} \cdot Q_{LT} \cdot x_t + CV \cdot F_p \cdot t_p \cdot q_{vp} + CH \cdot t_p \cdot Q_{LT} + \\
 & + \sum_t \left( VTV_0 \cdot Q_{0t} + VTV \cdot \frac{Q_{L_t}}{2} \right) \cdot t_p \cdot q_{vt} + \sum_t (VTO \cdot Q_{aot} \cdot t_{apt} + \Delta c_{aa} \cdot N_{aot}) \cdot F_t \cdot t_p \cdot q_{vt}
 \end{aligned}$$

e será importante na comparação com a operação com paradas livres.

A fórmula de probabilidade de parar com irregularidade na chegada de veículos e passageiros é  $p_p = qm_{vp}/(1+qm_{vp}) = q_v/(n_p + q_v)$  e tem a vantagem de permitir obter uma expressão algébrica para o espaçamento ótimo entre pontos de parada que introduz uma correção importante em relação à hipótese usual de paradas em todos os pontos, especialmente nas regiões de menor densidade de demanda (reduzindo, no custo social, o impacto no tempo de viagem, frota e horas de operação sem diminuir o benefício da melhoria de acesso, e permitindo analisar a alternativa de operação com paradas livre).

Simplificações adicionais podem ser obtidas utilizando uma caracterização média dos diferentes períodos de operação e desprezando o efeito das paradas sobre o tempo de viagem dos usuários do corredor (que é similar ao efeito sobre os usuários de passagem), que com

$$n_{pv} = n_p \cdot p_p = n_p \cdot \frac{q_v}{(n_p + q_v)} = \frac{q_v}{\left(1 + \frac{q_v}{L \cdot d_p}\right)},$$

permite exprimir o custo social global como:

$$\begin{aligned} CST = & \frac{VTP}{V_p} \cdot Q_{LT} \cdot k_p \cdot d_p + CV \cdot \psi_p \cdot F \cdot (t_{ba} + t_l) \cdot \frac{q_v}{1 + \frac{q_v}{L \cdot d_p}} + \\ & + \left( VTV_0 \cdot Q_{0T} + F \cdot (CH \cdot T + VTO \cdot Q_{aoT} \cdot t_{ap} + \Delta c_{aa} \cdot N_{aoT}) \right) \cdot (t_{ba} + t_l) \cdot \frac{q_v}{1 + \frac{q_v}{L \cdot d_p}} + \\ & + \Delta c_{ba} \cdot N_T \cdot \frac{q_v}{1 + \frac{q_v}{L \cdot d_p}} + CST_0 \end{aligned}$$

e, então, obter uma fórmula para o espaçamento ótimo entre pontos de parada (que minimiza o custo social global), que seria:

$$d_p^* = \sqrt{\frac{(F \cdot (CV \cdot \psi_p + CH \cdot T) + VTV_0 \cdot Q_{0T}) \cdot (t_{ba} + t_l) + F \cdot (VTO \cdot t_{ap} \cdot Q_{aoT} + \Delta c_{aa} \cdot N_{aoT}) \cdot t_l + \Delta c_{ba} \cdot N_T}{k_p \cdot Q_x \cdot \frac{VTP}{V_p}}} - \frac{N_T}{Q_x}$$

ou

$$d_p^* = \sqrt{\frac{(CV \cdot \psi_p + CH + VTV_0 \cdot q_{v0}) \cdot (t_{ba} + t_l) + (VTO \cdot t_{ap} \cdot q_{ao} + \Delta c_{aa} \cdot F_{ao}) \cdot t_l + \Delta c_{ba}}{k_p \cdot \frac{q_v}{L} \cdot \frac{VTP}{V_p}}} - \frac{L}{q_v}$$

onde  $\frac{L}{q_v} = \frac{N_T}{Q_x}$  é a distância média entre usuários de uma viagem, que serve como termo de correção devido à influência da densidade de embarques e desembarques por viagem sobre a probabilidade de parar em um ponto do trajeto ( $\psi_p$  é o fator relativo de frequência de pico,  $Q_x = Q_{LT}/L$  é a densidade de demanda no trecho em pax/km.dia,  $q_{v0} = Q_{0T}/N_T$  é o carregamento médio da viagem no início do trecho e  $q_v = Q_{LT}/N_T = Q_x/N_T \cdot L$  é a demanda média por viagem no corredor). Uma hipótese usual é a de que o veículo pára todos os pontos do seu percurso (que é irrealista em certos casos). A expressão para o espaçamento ótimo entre pontos de parada neste caso seria:

$$d_p^* = \sqrt{\frac{\left( (CV/T \cdot \psi_p + CH + VTO \cdot t_{ap} \cdot Q_{aoT}/T + \Delta c_{aa} \cdot N_{aoT}/T) + VTV_0 \cdot q_{v0} \right) \cdot (t_{ba} + t_l) + \Delta c_{ba}}{k_p \cdot q_v/L \cdot VTP/V_p}}$$

Com este efeito, uma densidade de embarques e desembarques por viagem pequena (isto é, baixa densidade de demanda relativa à frequência que utiliza o corredor) também justifica um espaçamento entre pontos de parada pequeno. Pode-se inclusive investigar, nestas situações, a conveniência de permitir paradas livres, em qualquer ponto da via, ao invés de utilizar pontos de parada demarcados (observando um espaçamento mínimo). Pelo menos deve-se impor restrições relacionadas com espaçamentos mínimos  $d_{p\min}$  viáveis, visto que a fórmula permite obter espaçamentos negativos, especialmente para menores densidades de demanda  $q_v/L$ .

Neste caso, a regra de decisão corresponde à comparação direta entre as duas situações: o espaçamento ótimo com pontos de parada delimitados e a operação com paradas livre sem demarcação de pontos:  $CST_L < CST^*$ , onde  $CST_L$  é o custo social com a operação com paradas livres,  $CST^*$  é o custo de operação com pontos de parada fixos (eventualmente com a restrição adicional  $d_p > d_{p\min}$ ).

Este seria um critério simplificado, que ignoraria outros critérios para implantar pontos de parada e consideraria que a seleção do tipo de ponto adequado iguala o custo de implantação e manutenção dos pontos de parada, além de outros custos existentes, com os benefícios decorrentes da existência de pontos de parada (como a proteção dos usuários contra intempéries, em especial no caso de pontos de parada cobertos), considerando o tipo de ponto selecionado.

### 3 CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE APLICABILIDADE

Uma primeira questão que pode ser colocada a partir da obtenção de um critério de decisão seria a de verificar a razoabilidade dos resultados propostos (a questão da validação). Na maior parte das vezes, os técnicos em transportes e as partes envolvidas podem avaliar os resultados, pelo menos de sua ótica particular. Na verdade, estas avaliações de usuários e operadores foram incorporadas na formulação e o resultado proposto busca ser uma solução de compromisso entre as preferências de cada parte interessada.

Na verdade, a questão da validação de um modelo normativo parece ser bastante delicada (um aspecto aparentemente não considerado adequadamente até agora). Para evitar discussões extensas, a análise da aplicabilidade dos resultados será feita apenas a partir de uma avaliação técnica subjetiva. Com os parâmetros típicos de custo para o tipo de veículo ônibus comum e de qualidade para o usuário de baixa renda, a fórmula numérica seria:

$$d_p^* = \sqrt{(1,2756 + 0,0536 + 0,0351) \cdot \frac{F}{q_x} + 0,0207 \cdot \left( \frac{q_0}{q_x} + \frac{L}{2} \right) - \frac{F}{q_x}} \text{ (em km)}$$

com  $F$  em viagens/hora (média do dia),  $q_x = Q_x/T$  em passageiros/hora-quilômetro (médio, densidade total),  $q_0 = Q_0/T = F \cdot q_{v0}$  em passageiros/hora (médio, total) e  $L$  em quilômetros. Para os custos unitários foram adotados os valores de 90 US\$/dia e 24 US\$/hora (sem incluir custos quilométricos). Foram assumidos também fator de frequência no pico igual a 1,5 vezes a média no dia, período de operação igual a 20 horas/dia (6 horas seriam pico), tempo fixo perdido por parada de 14 segundos (incluindo desaceleração e aceleração com 7 segundos e o tempo morto na parada, com um pequeno efeito de fila), velocidade à pé igual a 4 km/h, valor do tempo no veículo de 0,5 US\$/hora e à pé de 1,5 US\$/hora, com  $k_p = 0,25$ , para usuários de ônibus. Foram adotados a ocupação média de 1,5 passageiros/veículo, o fluxo de 200 v/h de autos nas faixas com ônibus, o tempo médio de bloqueio de 3 segundos, para todos os casos. O valor adotado para o tempo de viagem foi de 2,0 US\$/hora para outros usuários e os custos por parada foram US\$ 0,50 centavos e US\$ 0,45 centavos, para ônibus e automóvel, respectivamente (a velocidade de percurso dos ônibus e autos, nas faixas com ônibus, também foram mantidas nos valores de 30 e 40 km/h, respectivamente), também para todos os casos.

As parcelas constantes distinguidas na expressão numérica correspondem ao efeito dos custos operacionais, do custo do consumo de combustível correspondente às paradas e da interferência no tráfego geral (que é dominado pelo efeito no consumo de combustível dos demais veículos motorizados). Pode-se verificar que as aproximações usualmente adotadas no Brasil são razoáveis, visto que o termo relacionado com os custos de operação é dominante (devendo incluir, no entanto, a parcela correspondente à alocação dos custos fixos por veículo).

Os impactos sobre os usuários de passagem e sobre os usuários do trecho também podem ser distinguidos (tendo-se admitido o mesmo valor do tempo de viagem para ambas as categorias de usuários) na expressão  $\left( \frac{q_0}{q_x} + \frac{L}{2} \right)$ , que também pode ser escrita  $\left( q_{v0} + \frac{q_v}{2} \right) \cdot \frac{L}{q_x} = \left( q_{v0} + \frac{q_v}{2} \right) \cdot \frac{F}{q_x}$ .

Pode-se ver que o efeito sobre o tempo de viagem dos usuários do trecho pode ser desprezado quando  $q_{v0} \gg q_v$  (o número de passageiros embarcados no início do trecho é maior que o número de passageiros embarcados, por viagem). A comparação da importância relativa entre o efeito sobre os custos e sobre o tempo de viagem também depende basicamente do carregamento por viagem e pode ser relacionado com um efeito da ordem de 10% para cada 6 passageiros embarcados ou 12 passageiros embarcando no trecho. É interessante notar que as Figuras e Tabelas apresentadas consideram um valor fixo de densidade de demanda ( $q_x$ ) e variam a ocupação média do veículo no início do trecho ( $q_{v0}$ ). Portanto, o aumento da frequência corresponde tanto a uma redução do número de usuários locais por viagem ( $q_v = q_x \cdot L/F$ ) quanto o aumento da demanda total que atravessa o trecho ( $q_0 = q_{v0} \cdot F$ ), observação que permite entender melhor o padrão de variação dos resultados obtidos.

Por exemplo, em um corredor em área residencial com extensão de 5 km e densidade de demanda baixa, de cerca de 2,5 pax/h-km, as distâncias ótimas entre paradas em função da frequência de

viagens ofertada e da demanda captada antes do corredor estão mostrados na Tabela 1, que inclui sua variação nos contextos de ênfase na redução de custos/melhoria de qualidade.

**Tabela 1**  
**Valores (em metros) do Espaçamento Ótimo em Áreas Residenciais - Baixa Demanda**

\ F	q <sub>v0</sub>	0,00	5,00	10,00	15,00	25,00	40,00
1,00	373,00	399,38	424,92	449,69	497,18	564,04	
2,00	269,20	307,32	344,17	379,87	448,20	544,21	
3,00	150,00	150,00	192,03	236,04	320,23	438,42	
5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	150,00	
10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Obs.: O valor 0,00 indica paradas livres. As relações importantes são  $q_v = q_x \cdot L/F$  e  $q_0 = q_{v0} \cdot F$  ( $L$  é 5 km).

Essa densidade de demanda é baixíssima (corresponde a uma média de 400 metros entre passageiros em cada hora). Neste contexto, seria interessante incorporar a probabilidade de não parar em um ponto e examinar a alternativa de operar com paradas livres (visto que, na maior parte do tempo, apenas 1 passageiro estará embarcando ou desembarcando).

Para uma densidade de demanda de 10,0 pax/h-km (média de 100 metros entre passageiros em cada hora), já não se verificou a conveniência de utilizar paradas livres (os valores de espaçamento são entretanto bastante menores que os recomendados com fórmulas que ignoram a probabilidade de não parar nos pontos).

Nas áreas centrais, em que tanto a densidade de embarques e desembarques quanto a demanda coletada nos veículos é maior, os resultados são naturalmente diferentes. A Tabela 2 mostra os espaçamentos recomendados para densidade de demanda de 1000,0 pax.hora/km (média de 1 metro entre passageiros em cada hora) com extensão do centro igual a 2 km. Esta é uma densidade de demanda bastante grande e representa, portanto, uma situação extrema (para valores intermediários, até cerca de 50 pax/h-km, observou-se a tendência a recomendar a adoção generalizada do espaçamento mínimo entre paradas).

Na verdade, um resultado mais preciso poderia ser obtido revisando para este contexto específico os parâmetros relacionados com a interferência no tráfego geral, o que não foi realizado em função do efeito reduzido prenunciado e da falta de dados reais sobre os valores característicos a serem utilizados.

Deve-se notar que, entretanto, os valores de espaçamento recomendados crescem significativamente para valores de frequência mais elevados, como os que seriam correspondentes aos fluxos de ônibus que justificariam medidas de tratamento prioritário para o TPCR/UP (isto é,

superiores a 100 on/h), especialmente quando as distâncias percorridas nas áreas centrais são maiores.

**Tabela 2**  
**Valores (em metros) de Espaçamento Ótimo em Áreas Centrais Expandidas - Alta Demanda**

$q_{v0}$	0,00	10,00	25,00	40,00	60,00	100,00
<b>10,00</b>	175,43	180,94	188,92	196,59	206,40	224,78
<b>20,00</b>	199,14	208,41	221,65	234,20	250,02	279,18
<b>50,00</b>	248,24	265,15	288,93	311,15	338,81	388,92
<b>70,00</b>	270,93	291,60	320,55	347,50	380,94	441,29
<b>100,00</b>	296,43	321,78	357,18	390,02	430,66	503,79

Obs.: As relações importantes são  $q_v = q_x \cdot L/F$  e  $q_0 = q_{v0} \cdot F$  ( $L$  é 2 km).

A verificação da operação com paradas livres é também interessante visto que esta foi uma opção considerada recomendável em situações usuais nas áreas residenciais de menor densidade de demanda relativa à oferta. Deve-se notar que a sensibilidade destes resultados, em especial em relação aos valores adotados para os parâmetros de custo (que são os mais importantes), é maior para valores menores de  $q_v$  e, portanto, torna-se necessário tomar uma posição mais conservativa para recomendar paradas livres (visto que o espaçamento mínimo, que vigoraria como alternativa quando as paradas livres não são recomendadas, é definido diretamente como critério da análise técnica).

Uma visão mais global da variação do espaçamento ótimo com os parâmetros específicos de cada corredor pode ser obtido vendo que as expressões fundamentais, com os valores adotados para os parâmetros básicos, podem ser escritas como:

$$d_p^* = \sqrt{1,3642 + 0,0207 \cdot \left( q_{v0} + \frac{q_v}{2} \right) \cdot \frac{L}{q_v} - \frac{L}{q_v}}$$

e

$$\hat{d}_p^* = \sqrt{\left( \frac{L}{q_v} + 0,15 \right) \cdot \left( \frac{L}{q_v} + 0,02 \right) - \frac{L}{q_v}}$$

onde as variáveis mais importantes são  $q_{v0}$  e  $q_v$  (a demanda média por viagem no início do trecho e local ao trecho). Um esboço desta variação global está mostrado na Figura 2 e Tabela 3.

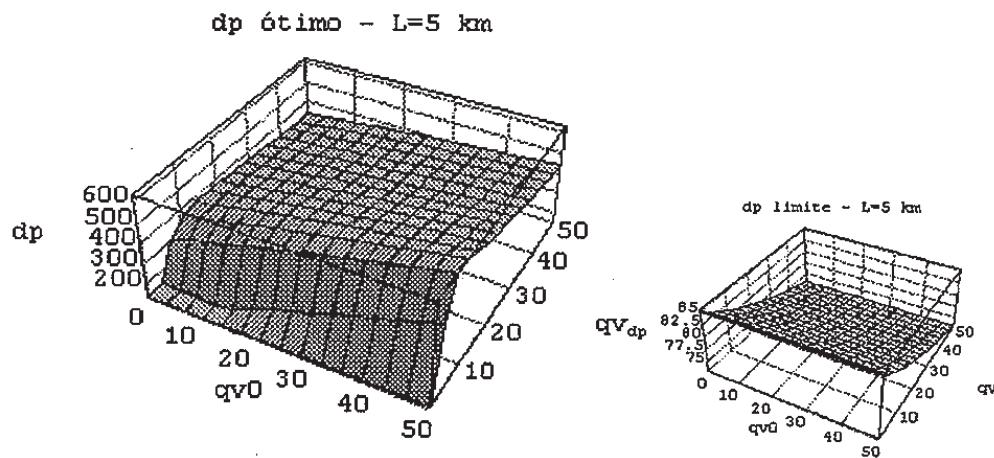


Figura 2: Espaçamento Ótimo - Variação Geral

Tabela 3  
Valores (em metros) de Espaçamento Ótimo - Geral

\ qv	0,00	1,00	5,00	10,00	20,00	50,00
qv	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0	196 / 0
1,00	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0	196 / 0
5,00	352 / 189	358 / 198	379 / 232	405 / 274	455 / 353	590 / 566
10,00	341 / 356	345 / 362	360 / 386	378 / 415	413 / 470	507 / 619
20,00	296 / 376	299 / 380	309 / 397	321 / 416	345 / 454	410 / 557
50,00	234 / 333	235 / 336	241 / 345	249 / 357	263 / 379	301 / 440

Obs.: O valor 0 indica paradas livres. As relações importantes são  $q_x = q_v \cdot F/L$  e  $q_{v0} = q_0/F$  (pares de valores são para L 2 e 5 km)

Os resultados apresentados consideram a opção de utilização de paradas livre e de espaçamento mínimo entre pontos de parada (determinados em função dos valores de  $\hat{d}_p^*$ , conforme anteriormente discutido) e estão incorporadas nas Figuras e Tabelas mostradas acima (admitindo 150 metros como distância mínima entre paradas e 20 metros como extensão da unidade espacial).

A análise considerando o efeito da movimentação de passageiros por viagem nos pontos sobre a probabilidade de parar é importante por alterar de forma significativa os resultados obtidos (que de outra forma recomendariam um espaçamento crescente, monotonicamente, com a frequência de viagem e a distância entre usuários, o que não ocorre na análise revisada).

Por exemplo, o manual de treinamento da Ebtu (ver Ebtu, 1987, adota a fórmula  $d_p^* = \sqrt{(1,0667 + 0,0267 \cdot q_{v0}) \cdot \frac{F}{q_x}}$ , que não considera a influência do pico de demanda na determinação da frota operacional e a probabilidade de não parar em um ponto implantado. Com os parâmetros aqui adotados, a fórmula correspondente seria  $d_p^* = \sqrt{(1,2756 + 0,0207 \cdot q_{v0}) \cdot \frac{F}{q_x}}$ , para a análise da Ebtu,  $d_p^* = \sqrt{(1,3292 + 0,0207 \cdot q_{v0}) \cdot \frac{F}{q_x}}$  para a análise compatível com o CADE-IDEPE, ou  $d_p^* = \sqrt{(1,2756 + 0,0207 \cdot q_{v0}) \cdot \frac{F}{q_x}} - \frac{F}{q_x}$ , segundo a análise compatível com Szasz, 1993.

Tomando uma ocupação inicial de 10 pax/on e uma frequência de 10 on/h, os valores correspondentes para o espaçamento ótimo em metros para os casos examinados (2,5 pax/h-km e 5 km, 10,0 pax/h-km e 5 km, 1000,0 pax/h-km e 1 km, 1000,0 pax-h-km e 2 km) seriam 2310, 1155, 116, 116, segundo a fórmula original de Ebtu, 1987, 2435, 1218, 122, 122, segundo a fórmula de Ebtu, 1987 revisada, 2479, 1239, 124, 124, segundo a fórmula compatível com Szasz, 1993, e -1565 (negativo), 218, 112, 112, segundo a fórmula compatível com o CADE-IDEPE. Os valores obtidos com a análise apresentada são 0 (parada livre), 283, 152, 182 metros.

Este é um exemplo claro da importância de uma formulação teórica adequada, reconhecendo os aspectos mais relevantes do fenômeno estudado, para a obtenção de resultados aplicáveis.

A comparação entre os resultados correspondentes a cada caso analisado indica que as recomendações genéricas obtidas dos modelos estilizados seriam utilizáveis, a menos de especificidades de cada corredor que tornassem inviável adotar soluções próximas das sugeridas. Este é o ponto em que o recurso aos modelos práticos deveria buscar uma solução mais factível e mesmo mais precisa (pela possibilidade de incorporar novos efeitos, como o congestionamento dos pontos de parada, ou novas decisões conjuntas, como a seleção de tipos de configuração para os pontos de parada).

#### 4. CONCLUSÕES

O desenvolvimento de critérios de projeto baseados em modelos normativos é uma linha de trabalho pouco explorada, tanto no aspecto teórico quanto prático.

No aspecto teórico, é importante notar a necessidade de relacionar a formulação dos modelos propostos com o contexto em que as decisões são tomadas e também a importância de selecionar formas de representação, hipóteses de análise e relações funcionais que permitam obter resultados adequados para aplicação, assim como os valores dos parâmetros utilizados.