

UM MODELO PRÁTICO PARA LOCALIZAÇÃO DE PONTOS DE PARADA EM UM CORREDOR

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 un modelo práctico para tratar este problema, que tenga en cuenta las especificidades presentes en situaciones reales, tales como restricciones geométricas, de visibilidad u operacionales y la existencia de puntos de concentración de demanda. El modelo propuesto utiliza técnicas de programación dinámica para establecer la localización precisa de cada parada. Se presenta finalmente una comparación entre el modelo propuesto y un modelo de tipo genérico, sobre la base de una aplicación a un caso real.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem o objetivo de apresentar um modelo para localização de pontos de parada em um corredor de Transporte Público Coletivo e Regular, Urbano de Passageiros (TPCR/UP) que considera as especificidades presentes em situações reais (chamados de modelos práticos ou específicos), em contraste com modelos estilizados (que normalmente avaliam o espaçamento ótimo entre paradas em um corredor caracterizado de forma genérica).

O problema de decidir sobre a localização dos pontos de parada em uma rede de TPCR/UP 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.

Naturalmente, estas três questões identificadas são relacionadas entre si e também com outras questões de projeto de redes de TPCR/UP (como a definição de itinerários das linhas ou a seleção de tipos de veículo, por exemplo) ou do sistema de transporte urbano (por exemplo, em função da interferência mútua com os semáforos que operam nas vias principais). Entretanto, o contexto típico

de um estudo sobre localização de pontos de parada normalmente considera a racionalização da operação em um corredor (eventualmente em dois cenários alternativos: a manutenção da operação atual ou a reformulação simultânea da estrutura do serviço, na forma de atendimento ao corredor).

Com exceção de Spasovic e Schonfeld (1994), que considera as decisões de estruturação do serviço e de localização de paradas, de forma simultânea, em um modelo estilizado, poucos trabalhos enfocam mais de uma das questões mencionadas. Predominam estudos que tratam a segunda questão, com o enfoque genérico dos modelos estilizados, e a terceira questão, normalmente analisando apenas um pontos de parada (com maior detalhe). Do ponto de vista de aplicação, uma abordagem simultânea não deve ser considerada necessariamente mais adequada, visto que é necessário ponderar o escopo usual das aplicações, como discutido em Pietrantonio (1997), Kocur 1986 ou Hasselström 1981).

Dentro deste contexto, a idéia de formular um modelo prático é a de incorporar aspectos específicos de cada situação real e dar uma resposta mais precisa e clara. Uma formulação generalizada para analisar a segunda questão, utilizando modelos estilizados, está apresentada em Pietrantonio (1997) e mostra a importância e a limitação deste tipo de abordagem para a obtenção de resultados realmente aplicáveis. Em resumo, pode-se dizer que este tipo de formulação é essencial para verificar a incorporação das características importantes do problema e para avaliar sua contribuição relativa (isto é, a relevância de cada efeito), mas que a necessidade de obter uma representação genérica e a conveniência de ter uma solução analítica podem tornar difícil representar diversos tipos de efeitos que podem também ser relevantes.

A utilização de procedimentos numéricos de solução para modelos estilizados, o que seria um passo natural na superação de algumas das limitações mencionadas com as possibilidades de extensão das formulações apresentadas (incluindo a análise da segunda e terceira questões identificadas, simultaneamente), apresenta um potencial adicional que tem sido usualmente negligenciado: as possibilidades de incorporação de especificidades de cada corredor, permitindo obter resultados mais práticos (diretamente aplicáveis).

Considerando a diretriz de fornecer uma resposta específica, o recurso a procedimentos de solução numérica é totalmente defensável (eventualmente combinada com resultados de análise de sensibilidade da solução obtida), ao invés de preferir-se soluções analíticas (como é usual na análise de modelos estilizados).

Existem diversas questões metodológicas interessantes relacionadas com a aplicações de modelos normativos em decisões de projeto, que podem ser examinadas de forma mais detalhada examinando a aplicabilidade comparativa de modelos estilizados e modelos práticos. Este tipo de análise, para o contexto usual da decisão sobre localização de pontos de parada, é um sub-produto natural examinado preliminarmente, a seguir, neste artigo.

2. UM MODELO ESTILIZADO BÁSICO

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);
- 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 lindeiras ao corredor (isto é, com o uso do solo local), normalmente prejudicadas pela existência dos pontos de parada (eventualmente beneficiadas pela demanda gerada pelos seus usuários). Naturalmente, existiriam outros efeitos que poderiam ser relevantes, especialmente no caso de uma análise global que buscase 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. Por sua vez, em um enfoque econômico, seria discutível incluir o efeito sobre as propriedades lindeiras como um efeito final (visto que seria normalmente classificada como uma externalidade pecuniária, que apenas transfere renda entre indivíduos e não representaria um uso de recursos). Esta, como diversas outras posições dominantes no contexto da Teoria Econômica tradicional, são bastante discutíveis. De qualquer forma, no contexto usual de decisão sobre localização de pontos de parada, este é um dos efeitos principais a serem considerados pelos decisores.

Exceto este último efeito, que normalmente não poderia ser representado de forma genérica, a análise com modelos estilizados permite incorporar e ponderar a magnitude de cada um, como usualmente sintetizado nas fórmulas de cálculo do espaçamento entre pontos de parada. Por exemplo, considerando um corredor linear com extensão L (maior que o espaçamento entre pontos d_p) onde a demanda de atravessamento é de q_0 passageiros/hora (a frequência de coletivos é F viagens/hora) e os embarques e desembarques tem densidade homogênea $q_x = qL/L$ (com $qL = q_d + q_e$

em pax/h durante o período T, incluindo pico e fora-pico), Pietrantonio 1997 deduz a fórmula generalizada:

$$d_p^* = \sqrt{\frac{(CV/T \cdot \psi_p + CH + VTV_0 \cdot q_{v0}) \cdot (t_{ba} + t_l) + (VTO \cdot t_{ap} \cdot q_{ao} + \Delta c_{aa} \cdot F_{ao}) \cdot t_l + \Delta c_{ba}}{k_p \cdot q_v / L \cdot VTP / V_p}} - \frac{L}{q_v} \quad (1)$$

onde $L/q_v = N_T/Q_x$ 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 ($N_T = F \cdot T$ é o número total de viagens no dia), $Q_x = Q_{LT}/L = q_x \cdot T$ 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).

Os demais parâmetros são os tempos dispendidos nas paradas para aceleração e desaceleração e posicionamento t_{ba} e t_l (o tempo de atendimento por passageiro t_p não precisa ser considerado e o tempo em fila t_n está incorporado no tempo de posicionamento como um termo fixo), os custos unitários por veículo.dia e por hora de operação CV e CH (ψ_p é o fator relativo de frequência de pico), os custos adicionais por parada de ônibus e automóvel Δc_{ba} e Δc_{aa} (o custo durante o tempo parado não precisa ser considerado), os valores atribuídos ao tempo dispendido em viagem no veículo e no trajeto à pé VTV_0 e VTP (médio ou típico, considerando a velocidade à pé V_p na fração de percurso k_p), os fluxos em veículos e pessoas em automóveis na faixa ocupada pela parada de ônibus F_{ao} e q_{ao} . Com a adoção de valores numéricos típicos para os parâmetros usuais, esta fórmula poderia ser expressa em:

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

que permite obter diretrizes valores razoáveis para o espaçamento recomendado entre paradas em cada corredor.

A análise da localização de pontos de parada com modelos estilizados apresentada no capítulo 3 de Pietrantonio (1997) permite também examinar a conveniência de operar com paradas livres, considerando que a probabilidade de parar em um ponto diminui com a redução da demanda média por viagem nos pontos e que há um espaçamento mínimo a ser obedecido.

Embora não forneçam exatamente a indicação da localização dos pontos de parada, os resultados obtidos com fórmulas deste tipo são bastante razoáveis. Ao final deste trabalho, estas fórmulas

genéricas serão aplicadas a uma situação real e as decisões decorrentes serão contrastadas com os resultados obtidos com a aplicação de um modelo prático.

3. FORMULAÇÃO DE UM MODELO PRÁTICO DE LOCALIZAÇÃO DE PARADAS

Embora os modelos estilizados possam percorrer um bom caminho no entendimento de um fenômeno, sua representação genérica pode comprometer a aplicação direta dos seus resultados. Em um contexto prático, existem diversas peculiaridades operacionais que tem de ser consideradas na decisão sobre localização dos pontos de parada e são ignoradas em um modelo estilizado.

Por exemplo, a demanda não é distribuída homogeneamente ao longo dos corredores (concentra-se próximo a grandes geradores de viagens ou a vias transversais importantes), os locais utilizáveis para implantação dos pontos de paradas são restritos (com graus diferentes de conveniência de sua utilização em função de impactos na fluidez ou segurança do tráfego de veículos motorizados ou de pedestres).

A incorporação em modelos formais das características específicas de um trecho (como a existência de locais especiais) e de algumas relações mais complexas (como o congestionamento nos pontos de paradas e a seleção de configurações) normalmente exigiria a solução baseada em procedimentos numéricos e, mesmo assim, ainda teria de ser adaptada pelos técnicos para viabilizar a implantação de suas recomendações.

Uma representação mais realista do corredor em análise poderia descrever as alternativas de localização como pontos discretos ou sub-trechos discretos e a demanda no corredor como densidades por sub-trecho e contribuições pontuais, conforme esquematizado na Figura 1.

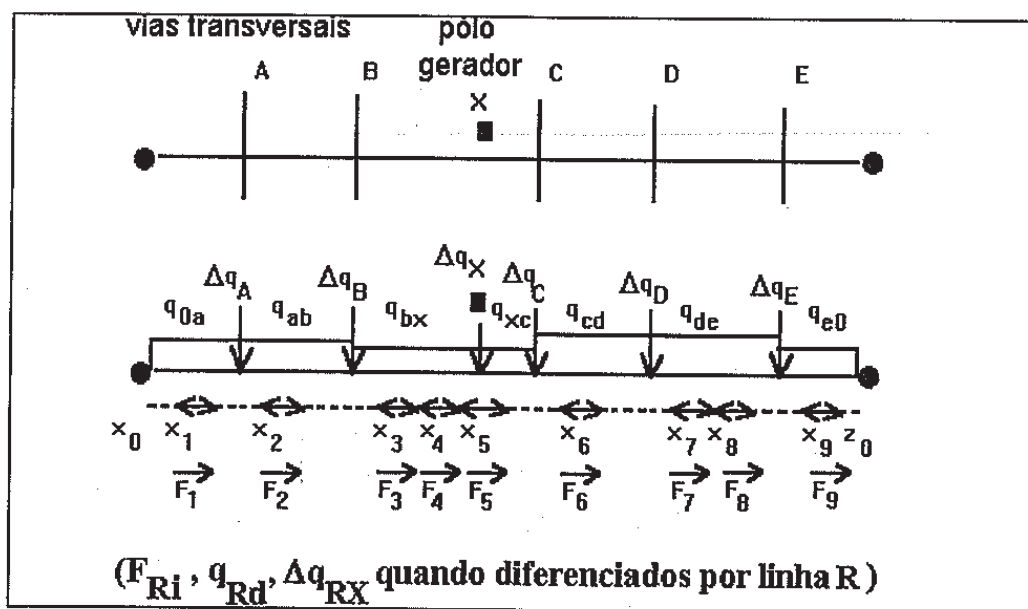


Figura 1. Representação Específica para Localização de Paradas

No caso específico da localização de paradas, o número de pontos intermediários no trecho é naturalmente uma variável inteira. Admitindo que o início e o fim do trecho são definidos por

paradas já localizadas anteriormente, o número de paradas intermediárias seria a $n_p = \frac{L}{d_p} - 1$, onde d_p poderia ser diferente de d_p^* , em função da restrição de inteireza de n_p . Em casos mais gerais, em que a introdução de relações mais complexas transformasse o comportamento da função objetivo (tornando-a multimodal ou não convexa), o número inteiro ótimo de paradas poderia ser distinto do arredondamento da solução contínua.

Entretanto, dado o número inteiro ótimo de pontos, a hipótese de um espaçamento homogêneo entre paradas também não é de forma geral adequada e somente seria aceitável se a hipótese de distribuição uniforme e homogênea da demanda fosse uma aproximação razoável e extensão e a demanda específica do trecho fosse pequena. Na verdade, como o espaçamento ótimo entre paradas é função da ocupação inicial do veículo no trecho (que é acumulada pelos embarques e desembarques em cada ponto), adotar um espaçamento homogêneo seria também contrário ao resultado obtido com modelos estilizados (a menos de haver balanceamento entre embarques e desembarques).

Mesmo considerando casos especiais, em que o cenário admitido na solução dos modelos estilizados estivesse mais próximo da situação real de um dado corredor, muitas vezes existem fatores que impedem a localização das paradas em um local inicialmente considerado adequado (como a proximidade das interseções, por exemplo, especialmente no caso de interseções semaforizadas que sofrem interferência significativa da operação dos pontos de parada e são gargalos estruturais em um corredor arterial).

As recomendações práticas usuais sobre localização de pontos de parada mostram que estas considerações diversas são bastante importantes. Por exemplo, em Ebtu (1983) (ver item 3.3), o espaçamento entre paradas é tratado de forma simples: é recomendado adotar uma distância entre 300 e 500 metros em áreas residenciais e uma distância entre 150 e 350 metros em áreas centrais. Os aspectos práticos, por sua vez, são discutidos extensamente, em particular o posicionamento dos pontos nas quadras (antes ou depois da interseção, no meio de quadra, distância de semáforos) e seus pontos favoráveis e desfavoráveis (em especial quanto à interferência com a capacidade nos semáforos ou com os movimentos de conversão e quanto à segurança ou conveniência para os pedestres), em conjunto com medidas de tratamento prioritário aos ônibus. O dimensionamento dos pontos de parada também é discutido em detalhe, tanto a determinação do número de posições de parada quanto a conveniência de utilizar pontos escalonados (e mesmo operação em comboios).

Em princípio, um modelo prático deveria considerar a maioria destas preocupações e adaptar as recomendações de projeto às peculiaridades de cada corredor. A formulação que será analisada a seguir parte da suposição de que é possível segmentar cada trecho em um conjunto discreto de localizações possíveis em que o número de pontos de paradas a ser implantado seria um ou nenhum (isto é, haveria somente a decisão de localizar ou não um ponto de parada em cada uma das localizações possíveis).

Em princípio, as localizações poderiam ser delimitadas permitindo superposições entre trechos adjacentes, pelo menos quando for pequena a possibilidade de ter dois trechos sucessivos selecionados para conter pontos de parada na mesma solução (por exemplo, com trechos de extensão menor que o espaçamento mínimo, como seria normalmente o caso). Admite-se, em todo caso, que cada localização candidata a ponto de parada pode ser associada a uma coordenada (dada) x_k e que há uma extensão mínima em cada localização que permite acomodar uma parada (eventualmente restringindo o tipo de configuração que pode ser implantada em uma localização específica, quando esta decisão é também considerada).

Note que o trecho L é dividido em sub-trechos com densidade de demanda uniforme (qd entre y_d e z_d , admitindo-se que a fração de desembarques em cada sub-trecho é δd) e com demandas localizadas no seu final (Δq_d em z_d , admitindo-se que a fração de desembarques em cada sub-trecho é Δd).

Pode-se também caracterizar a proporção da demanda, embarcando ou desembarcando, que realiza travessia no corredor, visto que diferentes localizações candidatas podem apresentar características distintas de facilidade de travessia para os pedestres ou de interferência correspondente no tráfego veicular. Pode também haver a caracterização de vinculação de demanda às linhas e das linhas aos pontos (a frequência, dada em cada segmento, varia ao longo do trecho em função de entradas e saídas de linhas no corredor).

Não há correspondência necessária entre estes sub-trechos e localizações candidatas e a distância de acesso desta demanda distribuída ou concentrada ao corredor não é considerada (o que seria um aspecto relevante se os geradores de demanda pudessem optar entre diversos pontos de parada considerando variáveis outras que a distância de acesso percorrida no corredor). Os pontos fixos extremos do trecho como um todo também delimitam sub-trechos, podendo haver demandas localizadas nos pontos fixos ou no trecho adjacente que utilizarão este mesmo ponto de parada e precisam ser consideradas (visto que afetarão o desempenho destes pontos extremos).

A análise teórica do modelo prático, com a utilização do mesmo procedimento aplicado ao modelo estilizado, seria muito difícil. No entanto, como a sua formulação buscou representar características específicas de cada corredor, provavelmente uma análise teórica seria pouco útil em função do maior número de variáveis a estudar (agora existem tantas variáveis quantas são as localizações candidatas) e do efeito significativo das variáveis específicas (por exemplo, a posição de um grande gerador de viagem ou de um trecho extenso em que a implantação de um ponto de parada não é viável). Portanto, neste caso uma análise numérica é plenamente justificável. A formulação de um modelo prático e de um algoritmo numérico para sua solução pode partir das seguintes observações:

- a contribuição da decisão de implantar ou não uma parada em uma localização para o custo da solução depende somente da posição dos pontos de parada adjacentes à localização analisada (e não da decisão para todas as demais localizações, antes ou depois dos pontos de parada adjacentes);
- dada a contribuição ao custo social acumulada até a parada k , com último ponto anterior em alguma localização j dada, anterior a k , a contribuição da decisão de implantar ou não o ponto de

parada na localização k somente pode ser calculada se for conhecido a localização do ponto de parada seguinte.

Ambas as observações sugerem a utilização de um modelo de programação dinâmica ou markoviana, como esquematizado na Figura 2, em que a decisão sobre implantar ou não um ponto de parada em cada localização caracteriza um estágio.

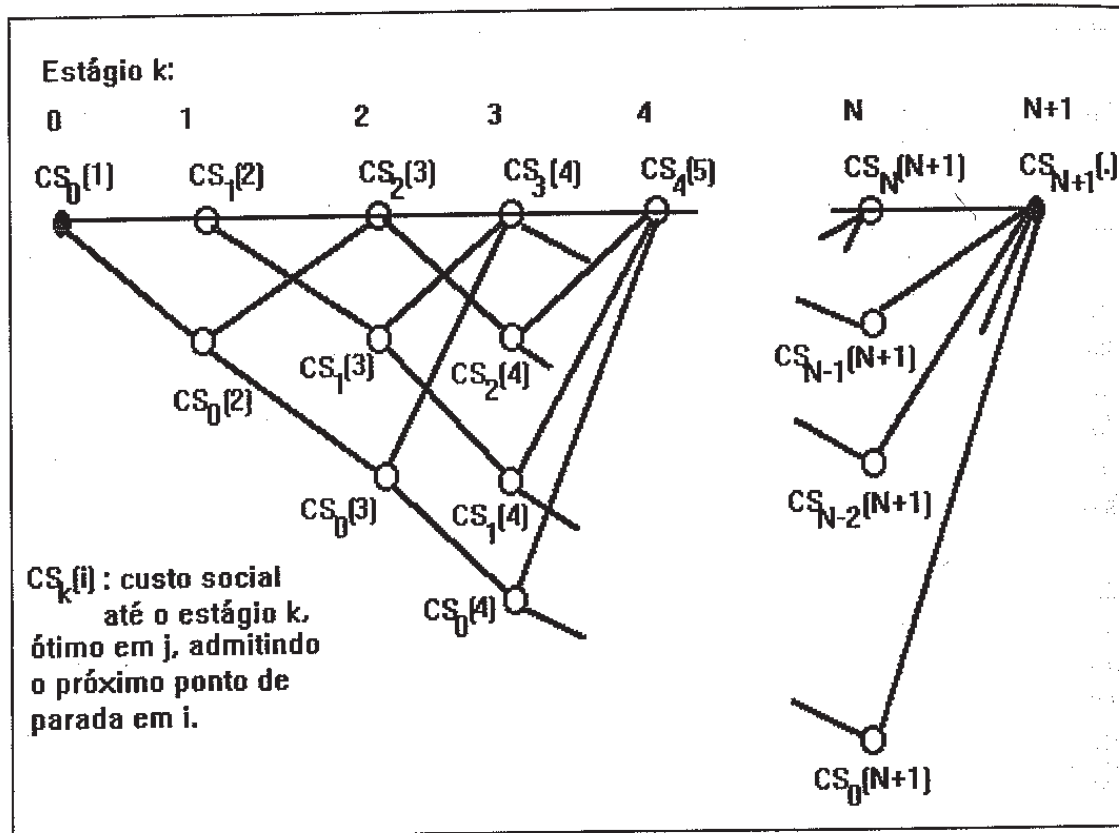


Figura 2. Estratégia de Localização de Pontos de Paradas com Programação Dinâmica

No caso da formulação proposta, o estágio k analisa o atendimento da demanda nos pontos entre 0 e k admitindo a hipótese de um ponto de parada em k . Entretanto, a variável de estado após a decisão no estágio k (o custo social atingido) somente pode ser calculada conjecturando uma dada localização do ponto de parada posterior (considerando que algumas localizações candidatas foram rejeitadas), informação que tem de ser incorporada na descrição de estado no estágio k . O custo da transição pode ser calculado a partir da decisão de implantar ou não ponto de parada nas localizações anteriores, ou melhor, da suposição de que haverá ponto em alguma localização anterior, selecionando-se a melhor opção para este ponto anterior, em cada estágio, que define a solução ótima parcial.

Os pontos de parada inicial (0) e final (N+1) são definidos na delimitação do trecho, havendo N localizações candidatas admissíveis para implantar os pontos de parada intermediários (somente np serão usadas, número não conhecido). Um estágio k pode corresponder à determinação da forma ótima de atendimento da demanda nos pontos de 0 a k .

De maneira geral, a partir de um estágio k , se k não é o último ponto do trecho (isto é, exceto para $k=N+1$), deve-se avaliar o custo social ótimo $CS_k[i]$, de atender a demanda nos pontos de 0 a k com ponto de parada em k e depois somente em i , o que é feito tomando a decisão ótima no estágio k (isto é, verificando a melhor opção entre os pontos de parada anteriores j variando de 0 a $k-1$), para cada i de $k+1$ a $N+1$ (ou seja, para cada conjectura possível para o ponto seguinte).

No caso de $k=N+1$, basta selecionar a melhor parada anterior j , visto que os pontos em $N+1$ e fora do trecho são conhecidos e não serão alterados. Note que a demanda atendida até o estágio k inclui uma parcela dos passageiros gerados após k que o utilizam (que será um termo constante no estágio $N+1$). Esta observação define a relação recursiva:

$$CS_k[i] = \min_{\{j\}} \{CS_j[k] + \Delta CS_k[j, i]\} \quad (3)$$

onde $CS_j[k]$ foi calculado no estágio j , representando o efeito até o ponto j com algum ponto anterior ótimo l , e $\Delta CS_k[j, i]$ é o custo adicionado pelo ponto k , que pode ser calculado a partir do estado anterior (j, k) e da decisão de ter o próximo ponto em i , como ilustrado na Figura 3.

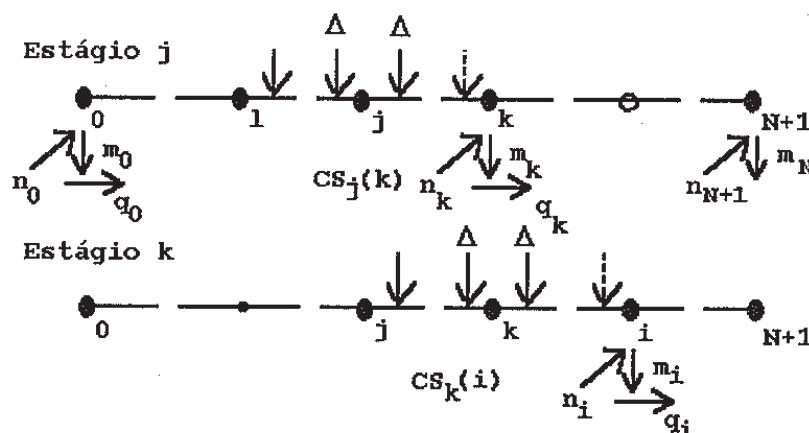


Figura 3 : Avaliação do Custo Social nos Estágios

Portanto, a obtenção do custo social $CS_k[i]$ é feita selecionando o melhor estado anterior j , que incluiu o estado atual k como ponto seguinte (mas sem incluir o efeito em k), e o custo adicional gerado pelo ponto de parada em k com ponto anterior em j , na suposição de ponto de parada seguinte em i .

Note que a transição de $CS_j[k]$ para $CS_k[i]$ mantém o ponto de parada em k , incorporando a definição da ausência de outros pontos de parada entre j e k e adicionando a hipótese de novo ponto de parada em i para calcular o custo social gerado pelo ponto k (condicional ao ponto seguinte ser i). Desta forma, todos os possíveis estados para a configuração de paradas no corredor serão adequadamente examinados e a comparação utiliza dados de custo calculáveis e consistentes (que referem-se ao atendimento da mesma demanda nos pontos de 0 a k quando o ponto seguinte é fixado e, por isso, a demanda que usa k é fixada). Naturalmente, a opção ótima para o ponto anterior

para CSk[i] deve ser anotada em uma variável auxiliar jk[i] para permitir recuperar a solução ao final do procedimento. Note também que o custo CSk[j], por incluir os pontos de 0 a k, garante considerar o custo social total do trecho L ao atingir o estágio final (N+1) e que é preciso ter os dados referentes aos trechos adjacentes aos pontos 0 e N+1, antes e depois do trecho L, para efetuar os cálculos necessários (referente a toda a demanda afetada).

Note que embora o tempo total de atendimento aos usuários some a uma constante (todos os embarques e desembarques do trecho L), a falta de simetria no problema torna importante saber em que ponto as maiores esperas ocorrem (ao contrário do modelo estilizado, que admitia demanda homogênea e, portanto, simétrica) ! Como a probabilidade de não parar é também função da demanda que utiliza o ponto, este termo terá de ser considerado da mesma forma (e também terá uma influência maior).

As formulações de programação dinâmica usualmente definem as funções de transição para calcular o valor da função objetivo de cada estado (k,i) do estágio seguinte k (no caso o custo social CS) nas relações de recorrência, dado a função objetivo em cada estado anterior (j,l) obtido até o estágio precedente k-1 que permite a transição (ver, por exemplo, Minoux 1993, capítulo 9) e o valor incremental acumulado em função da própria transição (no caso, ΔCS no ponto de parada k).

Portanto, o procedimento básico é o cálculo deste custo social incremental, utilizando a função de transição, que adiciona a demanda nos sub-trechos d entre j e i que utilizam o ponto k (e considera a demanda anterior que usa k, acumulada entre os pontos j e k). Esta avaliação depende da alocação da demanda entre pontos adjacentes (genericamente r e s, não necessariamente em localizações adjacentes). Seguindo as hipóteses adotadas anteriormente, os passageiros entre r e s dividem-se de forma que $x_{rs} = (x_r + x_s)/2$ delimita a área de influência de cada ponto de parada, para qualquer sub-trecho d com demanda interna. Pode-se então determinar a fração ou extensão dos usuários de cada sub-trecho que utiliza cada ponto ($\alpha_{dr}^{rs} = x_{dr}^{rs}/(z_d - y_d)$ e $\alpha_{ds}^{rs} = x_{ds}^{rs}/(z_d - y_d)$ para a demanda distribuída e Δq_{dr} e Δq_{ds} para a demanda concentrada), e a suas distâncias médias de acesso (\bar{x}_{dr}^{rs} e \bar{x}_{ds}^{rs} para a demanda distribuída, $z_d - x_r$ e $x_s - z_d$ para a demanda concentrada). Estas frações seriam iguais para todas as linhas, no caso de distinguir sua demanda específica (com uma repartição dada), e períodos.

A demanda do trecho r a s alocada ao ponto de parada r é $q_r^{rs} = \sum_d (x_{dr}^{rs} \cdot q_d + \Delta q_{dr})$, sendo $n_r^{rs} = \sum_d (x_{dr}^{rs} \cdot q_d \cdot (1 - \delta_d) + \Delta q_{dr} \cdot (1 - \Delta_d))$ embarques e $m_r^{rs} = \sum_d (x_{dr}^{rs} \cdot q_d \cdot \delta_d + \Delta q_{dr} \cdot \Delta_d)$ desembarques (note que $q_r^{rs} = n_r^{rs} + m_r^{rs}$ e que uma proporção $(1 - \delta_d) - \delta_d = 1 - 2 \cdot \delta_d$ da demanda distribuída e $(1 - \Delta_d) - \Delta_d = 1 - 2 \cdot \Delta_d$ da demanda concentrada de novos usuários fica embarcada no veículo após r).

A demanda total no ponto de parada r deve considerar a alocação dos dois trechos, anterior $qr0r$ e posterior $qrrs$, e a movimentação média de passageiros por viagem é igual a $qmr = (qr0r + qrrs)/Fr$ (valor a utilizar no cálculo da probabilidade de parada ppr no ponto r e do tempo médio dispendido

por parada atendendo $q_{vr}=q_{mr}/ppr$). O fluxo de passageiros embarcados no veículo antes do ponto r passará de q_{0r} a q_{0s} após o ponto r , em direção ao ponto de parada s , sendo $q_{0s} = q_{0r} + n'_r + n_r - m'_r - m_r$, onde n'_r e m'_r são o total de embarques e o total de desembarques no ponto de parada r do trecho anterior a r (que depende da localização do ponto anterior). Os valores correspondentes do trecho r a s alocados a s são utilizados para calcular estes dados e seriam

$$q_s^{rs} = \sum_d (x_{ds}^{rs} \cdot q_d + \Delta q_{ds}), \quad (4)$$

$$n_s^{rs} = \sum_d (x_{ds}^{rs} \cdot q_d \cdot (1 - \delta_d) + \Delta q_{ds} \cdot (1 - \Delta_d)) \quad (5)$$

$$m_s^{rs} = \sum_d (x_{ds}^{rs} \cdot q_d \cdot \delta_d + \Delta q_{ds} \cdot \Delta_d) \quad (6)$$

Note estes valores serão utilizados para obter o custo social na transição para qualquer ponto seguinte a partir de r a s (como q_{0ss} no estágio $k=s$ na opção de ter $j=r$ como ponto anterior). Deve-se também observar que é necessário incorporar, como dado externo, a demanda nos pontos extremos do trecho: q_0 é o fluxo que entra no trecho, q'_0 é o fluxo de embarques e desembarques do trecho anterior no ponto inicial, sendo n'_0 embarques e m'_0 desembarques, q_{N+1} é o fluxo de embarques e desembarques do trecho posterior ao ponto final $N+1$, sendo n_{N+1} embarques e m_{N+1} desembarques (o carregamento final $q_{0,N+1}$ pode ser fornecido mas seu valor deve ser consistente com a movimentação no trecho). Ambas as informações podem também ser facilmente diferenciadas por linha e período.

A partir destas considerações e das hipóteses utilizadas na análise do modelo estilizado, podem ser calculados, de forma bastante geral, os termos de custo social gerado pelo ponto k $\Delta CS[j,k,i]$ entre os pontos de parada j e i :

- o termo relacionado com acesso aos pontos seria

$$\frac{VTP}{V_p} \cdot \sum_{dt} [x_{dk}^{ki} \cdot q_{dt} \cdot \bar{x}_{dk} + \Delta q_{dk} \cdot (z_d - x_k) + x_{di}^{ki} \cdot q_{dt} \cdot \bar{x}_{di} + \Delta q_{di} \cdot (x_i - z_d)] \cdot T_i, \quad (7)$$

incluindo o acesso de j a i até k (visto que este termo não depende do tempo dispendido adiante);

- o termo relacionado com o tempo de viagem adicional seria

$$\left(\sum_i VTV_0 \cdot q_{0tk} \cdot T_i \right) \cdot ((t_{nt} + t_{ba} + t_l) \cdot p_{ptk} + t_p \cdot q_{v_{tk}}), \quad (8)$$

que depende de j e i em função de q_{0tk} (que acumula automaticamente os passageiros no trecho) e de $q_{v_{tk}}$ e p_{ptk} ;

- o termo relacionado com o custo relativo à frota e horas de operação e ao consumo de combustível nas paradas seria

$$\left(CV \cdot F_{pk} + \sum_i CH \cdot F_{ik} \cdot T_i \right) \cdot \left((t_{ni} + t_{ba} + t_l) \cdot P_{ptk} + t_p \cdot qv_{ik} \right) + \sum_i \Delta c_{ba} \cdot P_{pkt} \cdot F_i \cdot T_i, \quad (9)$$

que depende de j e i em função de qv_{tk} e $pptk$ somente;

- o termo relacionado com o impacto no tráfego geral e usos lindeiros à via (defronte à localização k) seria

$$\left(\sum_i (VTO \cdot q_{aot} \cdot t_{apt} + \Delta c_{aa} \cdot F_{aot}) \cdot F_{ik} \cdot T_i \right) \cdot \left((t_{ni} + t_{ba} + t_l) \cdot P_{ptk} + t_p \cdot qv_{ik} \right) + \Delta R_k, \quad (10)$$

que depende de j e i em função de qv_{tk} e $pptk$ somente.

Todas estas expressões podem ser detalhadas diferenciando também dados por linha. Uma dificuldade particular, neste sentido, decorre do fato de ter linhas com itinerários distintos que abandonam o corredor ao longo de sua extensão. A frequência de viagens, neste caso, seria FRT e assumiria um valor nulo após a interseção de saída das linhas no corredor. Neste caso, teriam de ser considerados os pontos de parada imediatamente fora do corredor, em cada itinerário alternativo. Além de admitir estes pontos como fixos, pontos que substituiriam os pontos adiante e posteriores à saída das linhas do corredor para avaliar de forma adequada o custo social global para cada linha, seria necessário considerar a distância excedente de caminhada da demanda gerada após a interseção de saída do corredor (que poderia ser representada como uma demanda local concentrada).

Para modelos estilizados, a identificação das linhas que servem cada trecho seria um critério natural para delimitar trechos de análise em um corredor (em função de sua formulação, que admite de condições homogêneas, em particular para a oferta de viagens). Para os modelos práticos, além de ser desejável incorporar esta característica, existe um aspecto adicional que tem de ser usualmente analisado que corresponde à conveniência de deslocar os pontos de paradas de parte das linhas (as que saem) para fora do corredor, ao deslocar um ponto de parada para depois da interseção de saída destas linhas (e localizar um ponto alternativo próximo nas vias adjacentes). A análise adequada deste aspecto teria que considerar a possibilidade de alterar o conjunto de linhas eletivas de parte dos usuários e, por esse, a qualidade de serviço experimentada e a repartição de demanda correspondente (considerados fixos até aqui). A seleção do melhor ponto de parada e a previsão da repartição da demanda entre linhas seriam, então, aspectos relevantes para análise adicional.

Estas particularidades são difíceis de representar (exceto de forma aproximada) quando as diferentes linhas não são distinguidas. Note que não há dificuldade para acomodar uma função de desempenho qualquer para os pontos de parada e calcular o tempo médio de espera dos veículos em fila \bar{t}_n , desde que seus parâmetros possam ser obtidos a partir de qv_{tk} e $pptk$ somente (e de dados conhecidos, como a programação dos semáforos adjacentes, por exemplo), mesmo com funções específicas para cada localização candidata. Esta flexibilidade decorre naturalmente da generalidade do método de programação dinâmica.

Este é em geral o caso para uma dada configuração do ponto de parada e permite analisar questões práticas como o efeito de localizar os pontos de parada antes ou depois dos semáforos. Em qualquer caso, mesmo quando não é necessário selecionar entre tipos de configurações, a possibilidade de ter funções de desempenho específicas para cada localização candidata traz o encargo adicional de avaliar ou calibrar os parâmetros aplicáveis a cada local (aspecto para o qual existem poucas formulações teóricas e estudos de campo).

A incorporação da seleção da configuração adequada para os pontos de parada no corredor poderia também ser considerada mas faria crescer o espaço de estados, que teria de ser descrito também pelo tipo de configuração adotado para o ponto k (o que pode não ser um peso muito grande se apenas alguns locais permitem implantar pontos com características especiais). A relação de recorrência com a incorporação da seleção do tipo de configuração p seria

$$CS_k[p, i] = \min_{\{j, o\}} \{CS_j[o, k] + \Delta CS[j, k, p, i]\}, \quad (11)$$

onde o custo social incremental em k não depende das configurações dos demais pontos de parada (a menos de haver uma influência significativa desta variável sobre a repartição da demanda entre pontos adjacentes).

Da mesma forma, nesta formulação não haveria dificuldade em incorporar as restrições ou funções de custo mais diretamente relacionadas com o efeito das indivisibilidades de frota e pessoal (e considerar o aproveitamento da ociosidade na utilização de veículos e operadores). Cada uma destas preocupações geraria uma variável de estado auxiliar que poderia ser calculada e atualizada em cada estágio e para cada transição de estado possível (desde fossem convenientemente expressas e mantivessem a estrutura recursiva). Entretanto, estes efeitos foram excluídos de consideração para o contexto específico de decisão sobre pontos de parada em função da dependência de outras variáveis que flutuam durante o que seria um ciclo típico de revisão desta decisão (especialmente o percurso fora do corredor). Naturalmente ainda existem diversos aspectos tratados de forma pouco detalhado na formulação do modelo prático proposta, notando-se resumidamente os seguintes:

- não considera outras configurações espaciais além do corredor linear (e a seleção entre pontos próximos localizados em vias distintas);
- não considera a relação da vinculação da demanda às linhas de uma forma mais geral (em particular para os pontos de entrada e saída das linhas no corredor e nas suas adjacências).

5. APLICAÇÃO À DEFINIÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DE PONTOS DE PARADA EM UM CONTEXTO REAL: AV. SÃO PAULO-SOROCABA/SP

A questão que se quer analisar neste ponto do trabalho pode ser formulada desta maneira: em que medida os resultados do modelo estilizado são utilizáveis ou o uso de modelos práticos é essencial. Esta é uma preocupação que exige a análise comparativa dos resultados de ambas as formulações (o modelo estilizado e o modelo prático).

Naturalmente, adaptações à solução sugerida pela análise teórica do modelo estilizado podem ser feitas diretamente pelos técnicos, pelo menos quando a diferença entre a solução teórica e uma configuração adequada e viável não é muito grande. Quando este não é o caso, a formulação de um modelo prático, mesmo passível de análise numérica apenas, é fundamental.

Na verdade, a aplicação de modelos quaisquer, estilizados ou práticos, inclui outra faceta de sua validação: tanto a preparação dos dados que o alimentam quanto a utilização dos seus resultados são aspectos fundamentais em uma aplicação e não são de forma nenhuma triviais (na maior parte dos casos).

Embora problemas desta natureza estejam inevitavelmente envolvidos na comparação que será feita a seguir (tornando-a menos objetiva), deve-se observar que o objetivo pretendido é apenas o de obter uma avaliação preliminar da diferença (qualitativa) entre resultados que se pode esperar da aplicação de modelos estilizados e práticos. O resultado desta comparação é, naturalmente, específica para cada problema e para cada formulação utilizada para analisá-lo.

Mesmo para um problema e uma formulação específicos, as conclusões podem ser variadas em diferentes contextos de aplicação (no caso, diferentes tipos de corredores). A análise a seguir deve ser vista, portanto, como um primeiro passo no sentido de avaliar esta questão (em apenas um contexto específico).

Neste caso, o contexto específico da análise é um corredor típico do TPCR/UP em cidades de porte médio, pelo menos no Estado de São Paulo. O corredor da Av. São Paulo, na cidade de Sorocaba/SP, é o acesso principal ao centro de uma das suas maiores áreas residenciais. Este corredor ligasse à Rodovia Raposo Tavares, que segue em direção à São Paulo (distante cerca de 100 km adiante), tendo feito parte do antigo traçado desta rodovia.

- entorno imediato do corredor é ocupado por um significativo comércio setorial e a extensão do corredor abriga uma atividade industrial significativa. Do ponto de vista do TPCR/UP, parte das linhas que percorrem este corredor utilizam apenas uma parcela da sua extensão e dirigem-se para o principal setor industrial de Sorocaba, às margens da Rodovia Senador José Ermínio de Moraes, que por sua vez prolonga-se na direção de São Paulo, pela Rodovia Castelo Branco (cerca de 80 km adiante), de Campinas (pela Rodovia D. Pedro II, cerca de 90 km adiante).

A Figura 4 é uma representação deste corredor no trecho entre o acesso à área central (marcada pela ponte sobre o Rio Sorocaba) e o final da ocupação urbana contínua (e início da área industrial, delimitado pelas instalações da Yashica). Os dados operacionais sobre o corredor foram coletados em final de Novembro de 1996, através de pesquisas de embarque/desembarque em uma amostra de viagens, para os três períodos, em dias úteis. Estes dados foram aferidos e expandidos através de pesquisas de frequência, realizadas no pontos de parada inicial e final do trecho (nestes pontos também foi realizada uma pesquisa específica para verificar a fração da demanda correspondente aos passageiros internos ao corredor).

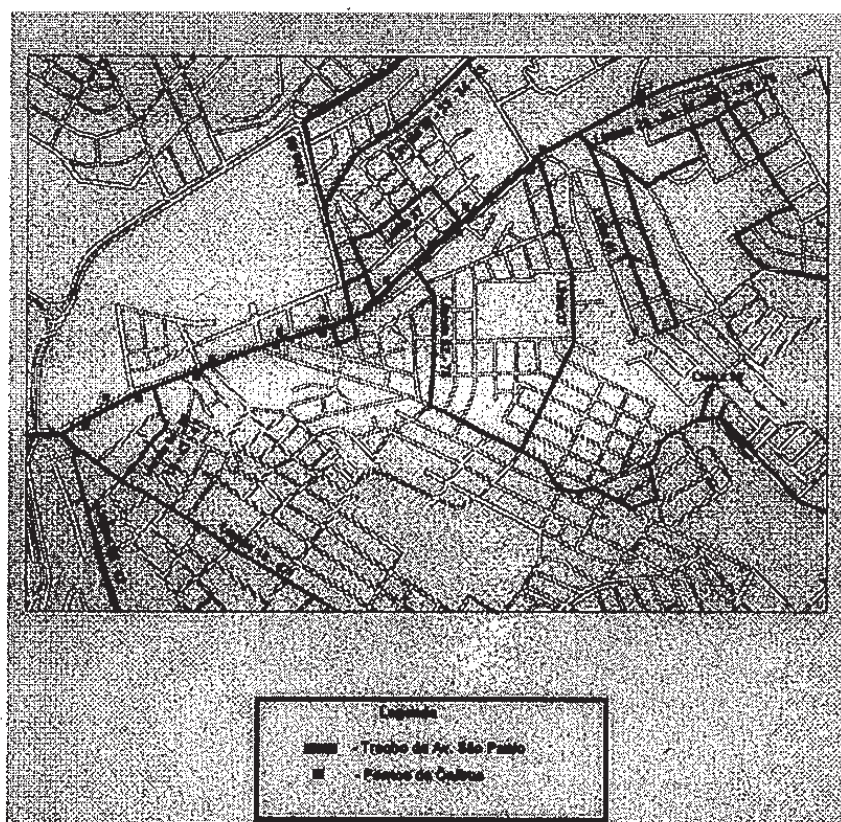


Figura 4 : Corredor Av. São Paulo - Sorocaba/SP

Em relação aos dados admitidos na formulação do modelo prático, não foram obtidos dados sobre demandas geradas por pólos de viagens existentes no corredor e não puderam ser calculadas informações confiáveis ao nível das diferentes linhas que percorrem o corredor. Foram verificados os locais impróprios para localizar pontos de parada e é conhecida a posição das principais interseções do corredor (em que há semáforos que, por um lado, podem sofrer efeitos dos pontos de parada e, por outro lado, podem facilitar a travessia dos pedestres). Não foram considerados, entretanto, tempos fixos adicionais que poderiam representar atrasos em semáforos no percurso paralelo ao corredor (na travessia de vias transversais) ou na sua travessia.

Pode-se verificar que o corredor pode ser dividido em 2 trechos, considerando a densidade de linhas que o percorrem. Os dados referentes a cada trecho e sentido e os espaçamentos atuais e calculados estão mostrados na Tabela 1. Os valores obtidos são significativamente menores que os obtidos com fórmulas alternativas que não consideram a probabilidade de não parar nos pontos. Por exemplo, com a fórmula proposta em Ebtu (1987) (no anexo ao vol.3), e com valores dos parâmetros revisados de acordo com os adotados neste trabalho, as recomendações seriam 639, 701, 565, 830 metros, respectivamente.

Ao invés de tentar definir diretamente a localização dos pontos de parada, preferiu-se antes aplicar o procedimento de análise com o modelo prático (que fornece uma resposta diretamente utilizável, que poderá sugerir critérios para utilização dos resultados do modelo estilizado).

Tabela 1
Dados para Aplicação do Modelo Estilizado

Sentido	Trecho	L (km)	q_{v0}	q_v	d-atual	d-otimo
Ida	C/C'	0,92	25,77	4,39	231	429
	B'/B	0,94	30,09	3,90	315	458
Volta	B/B'	0,98	33,30	4,34	330	463
	C'/C	0,83	16,20	2,90	289	417

Na vistoria realizada em campo, foram identificados como locais impróprios para localizar pontos de parada as extensões com restrições geométricas (afunilamentos da via), de visibilidade (que trariam problema de segurança ao tráfego) ou operacionais (interferência direta com os semáforos principais ou com estacionamento muito intensamente utilizado). A Figura 5 mostra os locais candidatos identificados, admitindo um espaçamento mínimo de 150 metros, as extensões imediatamente adjacentes aos pontos fixos foram ignoradas. A partir deste limite, foram definidos locais viáveis utilizando uma distância de resolução de 20 a 50 metros.

A caracterização dos sub-trechos de demanda foi feita a partir dos dados sobre os pontos de parada atual. Em princípio, admitiu-se a hipótese de divisão equitativa da demanda entre ambos os lados de cada ponto e a hipótese de áreas de influência a meia distância entre os pontos de parada adjacentes. Com estas suposições foram calculadas as densidades de demanda em cada um dos sub-trechos. Apenas para dois locais introduziu-se uma hipótese de existência de demanda concentrada, que teve o objective de testar a sensibilidade do procedimento a dados desta natureza: admitiu-se que 50% da demanda do ponto que atende a Santa Casa de Misericórdia de Sorocaba e 20% demanda junto a interseção de entrada/saída das linhas com itinerário parcial no corredor são concentradas nestes locais (onde hoje há pontos de parada adjacentes).

A solução do modelo prático com base em procedimento numérico pode diferenciar diversos parâmetros específicos para cada local candidato. Em particular, considerando os efeitos específicos sobre o uso do solo lindeiro, sobre o tráfego geral e de operação dos pontos podem ser diferenciados. Além disso, o modelo prático permite considerar o efeito de congestionamento nos pontos de parada de forma mais realista (e permitiria selecionar também a melhor configuração para cada ponto de parada em uma formulação mais geral).

A função de congestionamento não-linear para o tempo em fila dos veículos nos pontos de parada foi incorporada mas os parâmetros específicos não foram diferenciados na obtenção da solução analisada a seguir (que utilizou um procedimento baseado em programação dinâmica, descrito em Pietrantonio 1997).

A análise comparativa dos resultados obtidos com os modelos prático e estilizado será feita analisando apenas a solução obtida no trecho inicial (C/C') do sentido ida (0,92 km). A aplicação do modelo estilizado e do modelo prático consideram que o ponto inicial e final dos trechos são fixos e estes passam a ser os pontos 1 (0,00) e 5 (0,92) do sentido ida em C'/C. Os pontos existentes estão localizados em 0,00 (permanece fixo), 0,19, 0,41, 0,71 e 0,92 (permanece fixo).

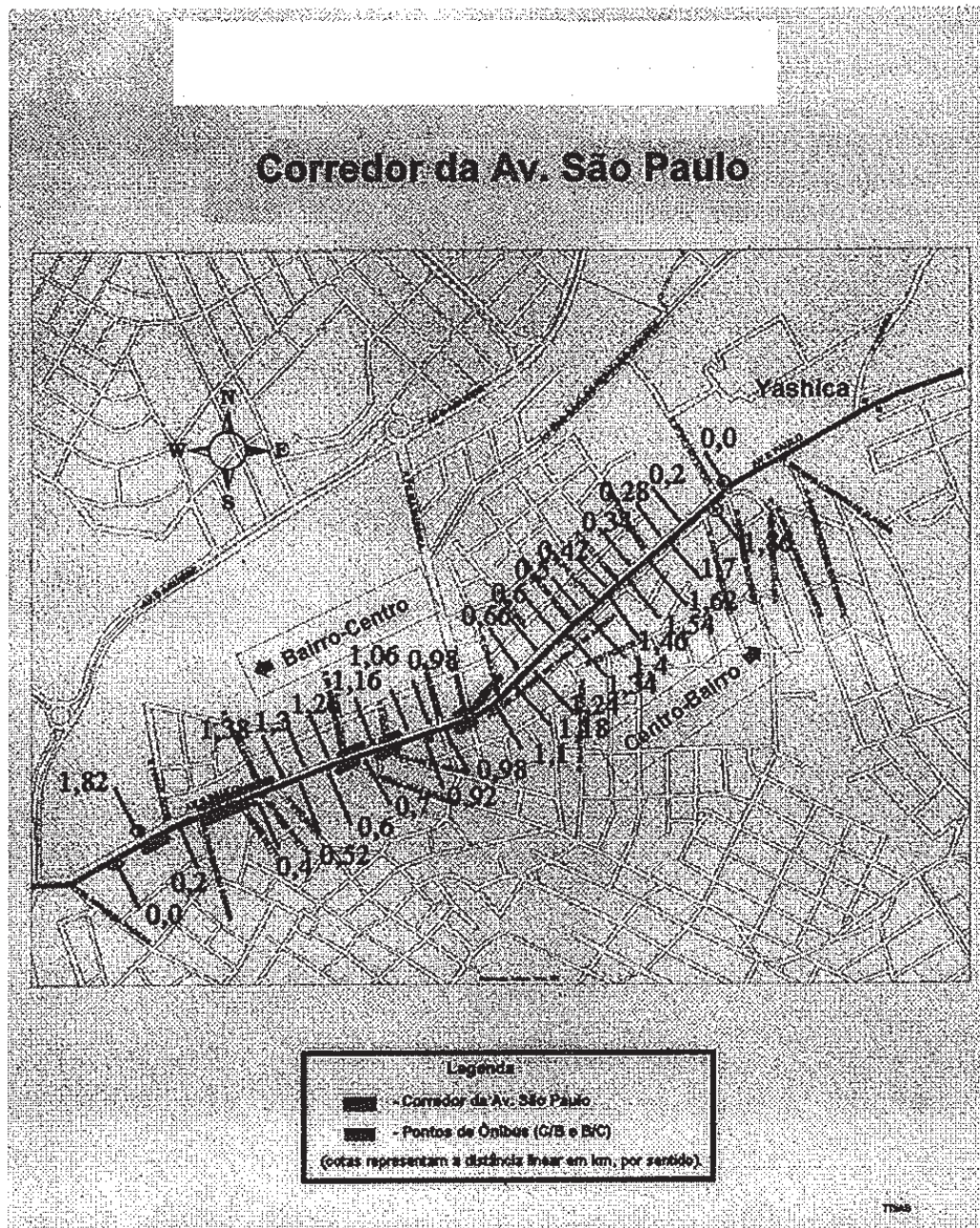


Figura 5 : Locais Candidatos a Pontos de Parada

A solução ótima obtida com o modelo prático indica a localização de um ponto em 0,52 (e a eliminação dos pontos atuais em 0,20 , 0,40 e 0,70). Além desta solução, as opções de ponto em 0,40 ou 0,60 ou 0,40 e 0,70 estão a menos de 5% da ótima, enquanto a configuração atual está a 11,7% da ótima. Portanto, pelo menos a eliminação do ponto em 0,20 seria recomendada.

A solução ótima do modelo estilizado indica um espaçamento de 429 metros, o que corresponde a 2,14 divisões (isto é, 1,14 pontos intermediários) na extensão do trecho. Em vista da necessidade de adotar valores inteiros, os espaçamentos possíveis seriam de 460 metros ou 306 metros (correspondente a 1 e 2 pontos intermediários respectivamente). A comparação entre os

espaçamento viáveis (460 e 306 metros) indica que seria mais adequado adotar o valor maior, que seria localizado próximo ao ponto médio (460 metros), isto é, em 0,40 ou 0,52.

Em um trecho maior, pode haver divergência entre as recomendações em função do fato de que o modelo estilizado admite espaçamentos uniformes (o que não pode ser satisfeito na prática). Isto mostra a necessidade de estudar mais detidamente a aplicação dos resultados dos modelos estilizados, considerando também que outros efeitos foram negligenciados na análise teórica (como o congestionamento nos pontos de parada ou os aspectos distributivos). Como a solução mostrou-se flexível, poder-se-ia recomendar o arredondamento sempre para o maior número de pontos intermediários. Neste caso, as coordenadas dos pontos intermediários ideais seriam 0,306 e 0,712 e, utilizando os pontos mais próximos, seriam escolhidos 0,40 e 0,70 (eliminando-se 0,20).

6. CONCLUSÕES

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

Este trabalho descreve um estudo desta natureza em que foi formulado um modelo prático correspondente às formulações normalmente utilizadas na dedução das fórmulas de espaçamento ótimo entre pontos de parada, em que são incorporados diversos aspectos específicos que podem influenciar a decisão final de localização dos pontos de parada em um corredor.

As recomendações obtidas com modelos estilizados apresentaram-se bastante adequadas para aplicação. Entretanto, esta é uma característica que tem de ser examinada mais detidamente (em diferentes problemas), antevendo-se a possibilidade importante contribuição à técnica de projeto em Engenharia de Transportes.

REFERÊNCIAS

Ebtu, (1983) **Tratamento Preferencial ao Transporte Coletivo por Ônibus 2**. (elaborado pela CET/SP), Brasil.

Hasselströen, D. (1981) **Public Transportation Planning: a Mathematical Programming Approach**, PhD.Thesis, Departament of Business Administration, University of Gothenburg, Suécia.

Kocur, G.; C Hendrickson (1982) **Design of local bus service with demand equilibration em Transportation Science 16**, 149-170.

Kocur, G (1986) **An Extended Optimization Model of an Urban Bus System with Demand Variation em TIMS Studies in the Management Sciences 22** (Swersey, A.J.; Ignall, E.J.; editores - Delivery of Urban Services), Elsevier Science Publishers, USA.

Minoux, M. (1983) **Programmation Mathématique - Théorie et Algorithmes 2**, Dumod, França (traduzido para o inglês em 1986 pela John Wiley; consultada a edição francesa).

Pietrantonio, H. (1997) Modelos Normativos em Transportes Urbanos: Aplicação ao Projeto de Redes de TPCR/UP, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de Transportes, EPUSP.

Spasovic, L.N.; Schonfeld, P.M. (1994) Method for Optimizing Transit Service Coverage em **Transportation Research Record 1402**, Transportation Research Board, USA.