

## Eficiência Energética do Transporte na Cidade

Pedro Álvaro Szász

Informe apresentado pela Companhia de Engenharia de Tráfego – CET (São Paulo) à Comissão de Circulação e Urbanismo da ANTP.

O consumo de combustível em transportes numa cidade é a soma dos gastos das viagens individuais e por isso um estudo detalhado deste consumo envolve número de variáveis e complexidade tão grandes quanto as usuais em modelos de uso do solo e transportes.

O objetivo deste ensaio é, simplificando esta realidade, extrair alguns parâmetros das nossas cidades que se correlacionem com seu consumo de combustível.

### PARÂMETROS DE DEFINIÇÃO

Este consumo pode ser assim expresso para uma viagem:

$$C_c = \frac{d \cdot \left( K_1 + \frac{K_2}{v} \right)}{n} \quad (1)$$

- $C_c$  = consumo de combustível médio em uma viagem
- $d$  = distância percorrida numa viagem (quilômetros)
- $K_1$  = coeficiente consumo de combustível por quilômetro
- $K_2$  = coeficiente consumo de combustível por hora rodada
- $v$  = velocidade média da viagem
- $n$  = ocupação média do veículo que efetua o transporte (pass/veíc)

A fórmula simplificada acima mostra quais os principais fatores que determinam o consumo de combustível de uma viagem.

Considerando, agora, não uma viagem mas o consumo global de uma cidade, escreveríamos:

$$C_g = \sum_i C_{ci} \cdot q_i \quad (2)$$

onde:

- $C_g$  = consumo global de combustível em uma cidade
- $i$  = modo de viagem (ônibus, carro, trem, a pé)
- $C_{ci}$  = consumo de combustível médio no modo de transporte  $i$
- $q_i$  = quantidade de viagens do modo  $i$

As equações (1) e (2) definem o consumo de combustível em transporte de pessoas numa cidade. As ações visando a redução deste consumo podem ser classificadas segundo o parâmetro que pretendem alterar.

### $d$ – Distância Média das Viagens

É função básica do tamanho da cidade: quanto maior, maior a distância média entre origens e destinos. O tamanho da cidade é considerado em função da sua população (número de habitantes) e da sua densidade demográfica.

Além do tamanho da cidade, influi na distância média das viagens a sua organização estrutural.



**$K_1$  e  $K_2$  — Coeficiente de Consumo de Combustível por Quilômetro e por Hora, respectivamente**

Depende do tipo de veículo utilizado e sua melhoria abrange aspectos tecnológicos não pertinentes a este estudo.

**v — Velocidade Média**

Este fator adquire importância maior apenas nas cidades de certo porte, onde o consumo de combustível nos congestionamentos representa parcela considerável do total. O aumento da velocidade, se por um lado reduz o consumo de combustível, por outro induz um número maior de viagens (que aumenta o consumo).

**n — Ocupação Média por Veículo**

É função principal do tipo de veículo. É neste fator que se concentram as diferenças entre a eficiência energética dos diferentes tipos de transporte, pois varia de 1,5 para o carro a cerca de 30 para o ônibus comum.

**Cci — Consumo Final de Combustível por Viagem**

É função principal do modo de transporte. Tipicamente o coletivo consome de 6 a 10 vezes menos.

**qi — Quantidade de Viagens por Modo de Transporte**

Considerando o total de viagens ( $\sum qi$ ) constante, a distribuição destas viagens entre os diferentes modos de transporte se constitui no fator mais importante quanto a eficiência energética das cidades.

**DETALHAMENTO DOS FATORES**

Passemos a estudar cada fator em maior detalhe, verificando ainda quais os dados obtíveis para cada cidade.

**d — Distância Média das Viagens**

Nas cidades que tenham efetuado uma pesquisa O-D (origem-destino), este dado está disponível ainda que não atualizado.

A última tese da Comissão de Circulação e Urbanismo, no III Congresso da ANTP, dedicou especial atenção ao problema do adensamento, ou melhor, à falta de adensamento que provoca o aumento desta distância.

Além do combustível, existe outra série de fatores (como tempo de viagem e infra-estrutura em geral) diretamente dependentes deste maior ou menor adensamento, tornando este parâmetro mais importante.

**— Adensamento**

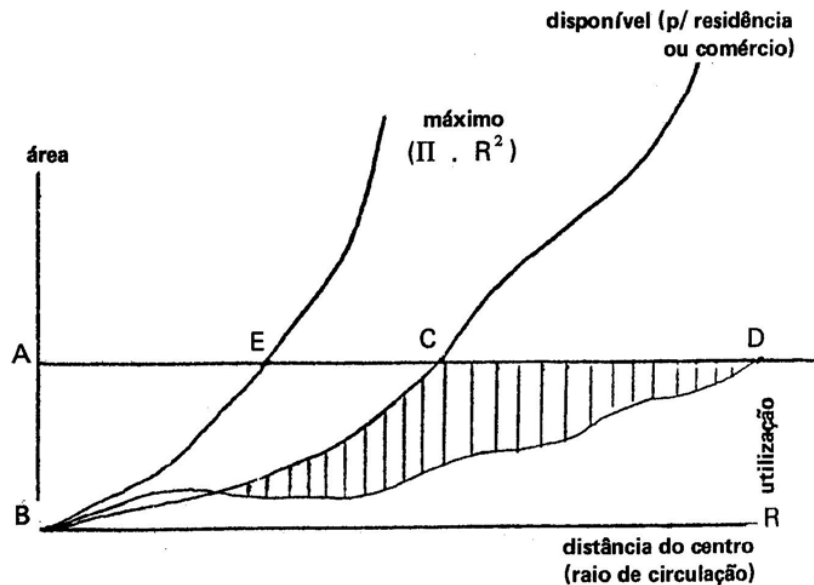
É definido pelo número de pessoas (ou de empregos) por área da cidade. O problema de adensamento pode de forma simplificada ser dividido em duas partes:

1. Densidade das áreas ocupadas (microdensidade)  
Definida pelo número de pessoas (ou empregos), dividido pelo total de terrenos construídos. Esta densidade por sua vez, depende do número de habitantes por residência e número de residências por área de terreno.
2. Relação entre áreas ocupadas e áreas disponíveis (macrodensidade)  
Verificam-se, comumente, profundas descontinuidades na área urbanizada, com vilas residenciais separadas da cidade com extensas áreas não urbanizadas, determinando uma baixa densidade final.

### — Obtenção de Dados

Microdensidade — o total da população dividido pela soma de terrenos construídos dá uma idéia desta microdensidade. Embora estes dados estejam disponíveis nas prefeituras, para efeito de arrecadação — e apesar de estarem em arquivos suscetíveis ao processamento eletrônico de dados — sua obtenção exigiria certo esforço e boa vontade do órgão municipal responsável.

Macrodensidade — assumindo que existe um centro da cidade, poderíamos verificar para diferentes circunferências concêntricas, qual o total de terrenos disponíveis e qual o total de terrenos ocupados.



Observa-se no gráfico que, caso houvesse ocupação por igual, sem vazios, da cidade, ao invés dela se espalhar até D, a superfície do raio AC seria suficiente.

Supondo-se que a viagem média e os serviços em geral partem do centro (ou melhor, que sejam radiais), a área BCD representaria, em termos simplificados, o acréscimo de viagens e recursos de infra-estrutura devido a ocupação desigual da cidade.

Uma definição de macrodensidade seria a área ABC dividida pela área ABD.

A obtenção dessa macrodensidade exigiria:

- a divisão da cidade em áreas geográficas;
- a verificação em cada área da possibilidade de aproveitamento residencial (ou comercial), isto é, se a área é ou não urbanizável;
- a obtenção do coeficiente de aproveitamento em cada área (lotes ocupados/total de lotes); e
- o levantamento das curvas BC, BD e a definição de macrodensidade.

A macrodensidade varia entre 0 e 1, esta última correspondendo a uma cidade "racionalmente ocupada".

Como resultante da macro e microdensidades temos a distância d, média das viagens.

Um terceiro fator a ser estudado é a relação entre o total de áreas disponíveis a certa distância e o máximo dado pela área do círculo ( $\Pi \times R^2$ ). Esta relação (sempre menor ou igual a 1) mostra a disponibilidade geográfica da cidade. A relação entre as áreas AE, AEB e EBC dá uma idéia (para o tamanho atual da cidade) da sua disponibilidade geográfica.

Por exemplo, as cidades marítimas com centro em ponta como Salvador, Recife, Porto Alegre, têm coeficientes da ordem de 0,5.

Como produto destes três fatores chegaríamos a:



$$D = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{d_{mic}} \cdot \sqrt{d_{mac}} \cdot \sqrt{d_{geo}}} \cdot \frac{1}{\Pi} \cdot \frac{2}{3}$$

onde:

D = distância média das viagens ao centro

P = população

$d_{mic}$  = microdensidade

$d_{mac}$  = macrodensidade

$d_{geo}$  = disponibilidade geográfica

#### v – Velocidade Média das Viagens

Embora seja fator importante no consumo de combustível, a obtenção de dados é difícil em termos quantitativos. Poderíamos tentar avaliá-la através da identificação de áreas e horários congestionados, estimando-se que fração representa do total do tráfego.

#### n – Número Médio de Passageiros por Veículo

No caso do transporte público um dado aproximado pode ser obtido conhecendo-se o comprimento das linhas, o total de viagens de ônibus, e o total de passageiros transportados. Para o transporte individual o dado, embora de fácil obtenção por pesquisa direta, dificilmente estará disponível.

#### $C_c$ – Consumo de Combustível por Viagem

De uma série de medidas em algumas cidades, julgamos que o consumo por quilometro/passageiro  $\left( \frac{K_1 + K_2}{n \cdot v} \right)$  não apresenta entre di-

ferentes cidades, grandes variações para o mesmo modo de trans-

porte (há exceções como Brasília), sendo o mais importante a distância média de cada viagem (d).

#### Consumo Total

O total de viagens é função principalmente da população

$$q = M \cdot P$$

onde:

q = viagens por dia

P = população

M = mobilidade

A mobilidade é função principalmente da renda média.

Evidentemente, quanto menos viagens menor o consumo de combustível.

Não vamos neste estudo entrar na comparação dos diferentes índices de mobilidade.

$$q = \sum q_i$$

$$C_g = \sum C_{ci} \cdot q_i$$

Supondo apenas ônibus e carro, após transformação das equações acima, teríamos uma equação final tipo

$$C_g = K \cdot q (1 - 0,85 DM)$$

onde:

DM = número de viagens por ônibus sobre o total de viagens



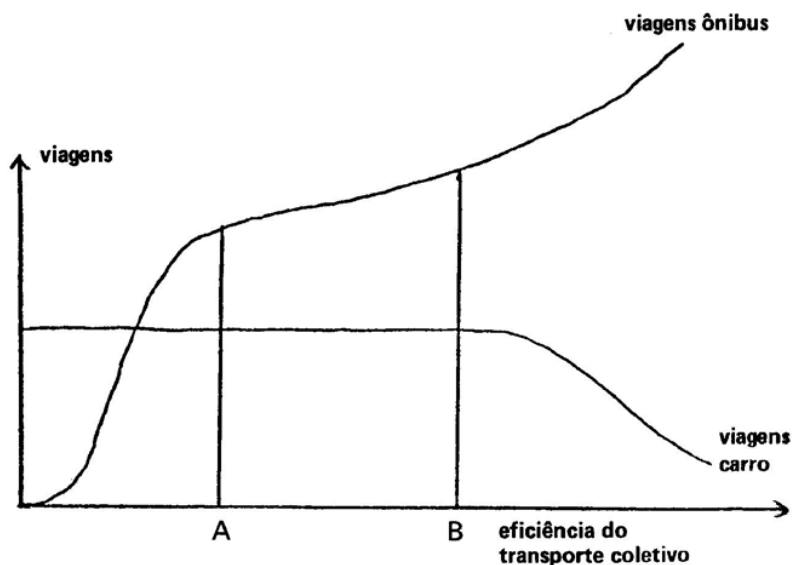
www.antp.org.br

O consumo final de combustível depende (mantido  $q$  constante) principalmente da distribuição modal, pois o ônibus é 6 vezes mais econômico do que o carro por passageiro/quilômetro transportado.

Se levássemos apenas isto em conta, concluiríamos que as cidades mais ricas são as menos eficientes no consumo de combustível, pois é onde há mais viagens de carro.

Numa análise mais profunda, visando conhecer a eficiência do transporte coletivo comparado ao carro, deve-se estimar quantas pessoas deixariam de andar de carro para usar o ônibus, não apenas pelo preço da gasolina, mas também pela existência de um serviço adequado de transporte coletivo.

De forma simplificada poderíamos colocar o total de viagens de carro e de ônibus em função da eficiência do sistema de transporte coletivo.



No gráfico, a partir de B alguns usuários passam para o ônibus. Ao mesmo tempo, a demanda do ônibus aumenta porque os próprios usuários cativos do sistema (sem carro) passam a utilizá-lo mais.

Como existe uma série de outras variáveis importantes que também influem no total de viagens de ônibus e de carro, uma avaliação apenas destes dois totais pode não espelhar bem a eficiência do sistema. Portanto, seria necessário levar em conta também o tamanho da cidade, a renda média e o índice de motorização.

Em cidades com a mesma população, renda média e índice de motorização, poderíamos concluir que as de maior porcentagem de viagens de carro são as de transporte coletivo menos eficiente.

