

# PLANEAMENTO SUSTENTÁVEL DE REDES RODOVIÁRIAS INTERURBANAS ATRAVÉS DE UMA ABORDAGEM MULTI-OBJETIVO

**Bruno Filipe Santos**

**António Pais Antunes**

Departamento de Engenharia Civil  
Universidade de Coimbra, Portugal

## RESUMO

Neste artigo apresenta-se uma abordagem multi-objetivo para o planeamento de longo prazo de redes rodoviárias interurbanas. A abordagem é coerente com a estrutura de planeamento do manual americano *Highway Capacity Manual*, recorrendo ao conceito de nível de serviço para avaliar as condições de tráfego. Os eixos rodoviários são classificados de acordo com uma hierarquia e as soluções podem ser encontradas com recurso a dois tipos de ações: a construção de um novo eixo de determinado nível hierárquico e o melhoramento de eixos existentes para um nível hierárquico superior. A rede rodoviária principal do Estado do Paraná, Brasil, é usada para demonstrar a aplicabilidade da abordagem e para ilustrar as diferenças entre soluções de planeamento que tenham por objetivo apenas a eficiência da rede e soluções que visem um planeamento mais sustentável ao incluírem objetivos de equidade e de consumo energético.

## ABSTRACT

This article presents a multi-objective approach to long-term interurban road network planning. The approach is consistent with the planning framework of the Highway Capacity Manual, using the concept of level of service for assessing traffic flow conditions. Road segments are classified according to a hierarchy and, in the search of solutions, two types of action are considered: the construction of a new link of a given hierarchic level; and the upgrading of an existing link to a higher level. The main road network of the State of Paraná, Brazil, is used to show the applicability of the approach and to illustrate the differences between efficiency-oriented solutions and more sustainable solutions where equity and energy consumption objectives are also taken into account.

## 1. INTRODUÇÃO

As economias modernas são fortemente dependentes dos sistemas de transporte. As redes rodoviárias interurbanas, na medida em que constituem uma componente importante daqueles sistemas, desempenham um papel essencial no respectivo desenvolvimento. Enquanto nos países mais desenvolvidos a principal preocupação é com a conservação das redes existentes, em países como a China, Índia, Brasil e na maioria dos países da Europa do Leste as redes necessitam de ser substancialmente melhoradas. Com efeito, as elevadas taxas de crescimento económico que caracterizaram estes países nos últimos anos dificilmente poderão ser mantidas sem um forte investimento nas redes rodoviárias. Dadas as significativas implicações sociais e os elevados custos financeiros envolvidos, as decisões a tomar pelas autoridades de transporte no que diz respeito à construção de novas estradas e ao melhoramento de estradas existentes devem ser planeadas com todo o cuidado.

Na prática, o planeamento de redes rodoviárias interurbanas é habitualmente feito com recurso a abordagens de tentativa-e-erro, recorrendo a técnicas de simulação baseadas no modelo clássico dos transportes para a avaliação de cada tentativa (ver Daly, 2000). As abordagens de tentativa-e-erro não permitem, no entanto, uma exploração completa das soluções de planeamento possíveis. Tal pode apenas ocorrer com a utilização de abordagens de otimização. Contudo, a aplicação de tais abordagens em casos reais é ainda problemática, pois os modelos correspondentes – frequentemente considerados como sendo dos modelos de otimização mais complexos – são extremamente exigentes em termos computacionais. Esta situação está actualmente a mudar graças a evoluções recentes tanto ao nível do software como ao nível do hardware.

Apesar de existirem escassas aplicações práticas reportadas na literatura, nos últimos 30 anos têm sido dedicados esforços importantes ao desenvolvimento de modelos de otimização para o planeamento (e dimensionamento) redes rodoviárias. A grande maioria destes esforços foi direcionada para dois modelos: o modelo de planeamento discreto de redes rodoviárias (DRND) e o modelo de planeamento contínuo de redes rodoviárias (CRND). O primeiro tem por objeto a adição de novos eixos a uma rede rodoviária, enquanto o último se dedica à expansão (contínua) da capacidade dos eixos existentes. Um modelo relacionado que aparece na literatura é o modelo de planeamento misto (MRND), que resulta da combinação do modelo DRND com o modelo CRND. Entre os artigos mais conhecidos que tratam destes modelos estão LeBlanc (1975) e Boyce e Janson (1980) em relação ao modelo DRND e Abdulaal e LeBlanc (1979) e Friesz et al. (1992) em relação ao modelo CRND. Uma aplicação interessante deste tipo de modelos a uma rede rodoviária nacional encontra-se em Ben-Ayed et al. (1992). Para uma revisão desta literatura, ver Yang e Bell (1998).

Independentemente do modelo em causa, os objetivos mais frequentes para este problema de otimização são os de eficiência, tais como a minimização de custos para os utilizadores ou a maximização dos benefícios (medidos, por exemplo, pelo excedente do consumidor). Outros objetivos importantes que foram tratados em estudos anteriores incluem a robustez (Lo e Tung 2003) e a equidade (Meng e Yang, 2002). Diversos artigos tratam de modelos multi-objetivos. O primeiro modelo deste tipo referido na literatura é o de Friesz e Harker (1983). Mais recentemente, Friesz et al. (1993) e Tzeng e Tsaur (1997) contemplaram simultaneamente os custos de utilização e de construção como objetivos de minimização (o primeiro também considerou a minimização da distância de viagem e a minimização da área de expropriações). Ukkusuri et al. (2007) consideraram um objetivo de robustez para além de um objetivo de eficiência (minimização do tempo de viagem), enquanto Feng e Wu (2003) consideraram objetivos de equidade horizontal e vertical e Cantarella e Vitetta (2006) incluíram objetivos ambientais (minimização de emissões de CO<sub>2</sub>).

Apesar de serem extremamente apelativos do ponto de vista teórico, nenhum dos modelos anteriormente referidos trata de um aspecto muito importante no planeamento de redes rodoviárias reais: a natureza discreta das expansões de capacidade. De facto, a capacidade aumenta significativamente quando uma estrada é melhorada para um nível superior (ou substituída por uma estrada melhor, ou complementada com uma nova estrada). Quando uma estrada é melhorada de um perfil 2x1 para um perfil 2x2 (autoestrada), a sua capacidade mais do que duplica. Este tipo de factor raramente tem sido contemplado nos modelos de otimização para o planeamento de redes rodoviárias. Para além do trabalho que tem sido desenvolvido pelos autores deste artigo (e.g., Antunes et al., 2003 e Santos et al., 2009), o único exemplo de modelos de níveis múltiplos do qual temos conhecimento é Janson et al. (1991).

A abordagem de otimização multi-objetivo para o planeamento das redes rodoviárias interurbanas apresentada neste artigo foi desenvolvida com o intuito de apoiar as autoridades de transporte na definição de estratégias de desenvolvimento a longo prazo (20 anos) de uma rede nacional ou regional. Trata o melhoramento dos eixos viários de acordo com uma hierarquia e considera a procura elástica, isto é, dependente das decisões tomadas.

A aplicabilidade da abordagem é demonstrada através de uma aplicação à rede principal do Estado do Paraná, Brasil. Este estudo de caso é também usado para ilustrar as diferenças entre soluções de planeamento envolvendo apenas um objetivo de eficiência, o objetivo primordial na avaliação de investimentos, e soluções que atendam também a objetivos mais sustentáveis, como é o caso da maximização da equidade e da minimização do consumo energético. De facto, através do melhoramento das estradas as autoridades de transporte desejam utilizar o seu orçamento da melhor forma para aumentar a acessibilidade. No entanto, as mesmas autoridades também desejam (ou deviam desejar) que os benefícios sejam distribuídos de forma justa pelas diferentes partes de um país ou região, de acordo com os princípios do desenvolvimento sustentável. Além disso, o aumento da dependência do petróleo nas sociedades modernas e os compromissos assumidos internacionalmente em relação às emissões de gases com efeito de estufa levam (ou deviam levar) a que as autoridades de transporte se preocupem cada vez mais com o consumo de petróleo.

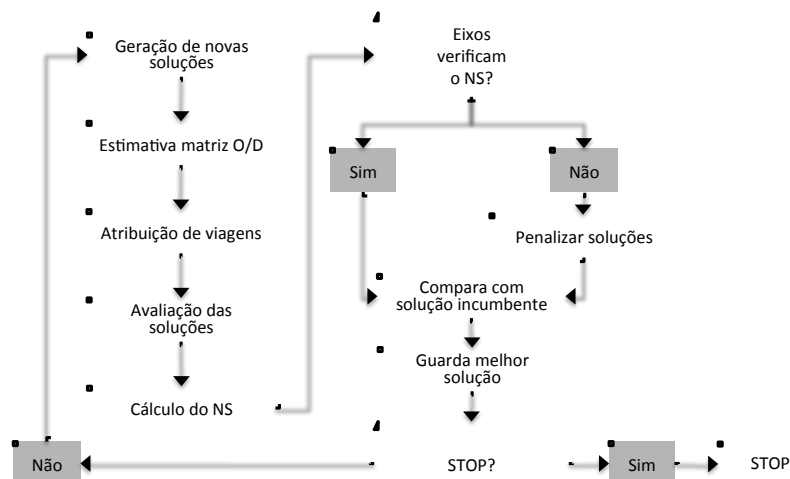
O presente artigo está organizado da seguinte forma. Na próxima secção são descritas as características essenciais da abordagem de planeamento proposta. Depois, é apresentado o modelo no qual se baseia a abordagem. Posteriormente, a abordagem é testada com o estudo de caso e são analisados os impactes de se adoptarem objetivos mais sustentáveis no planeamento de redes rodoviárias. Na secção final são tiradas algumas conclusões.

## **2. ABORDAGEM PROPOSTA**

A abordagem ao planeamento a longo prazo de redes rodoviárias que se propõe no presente artigo é baseada nos seguintes princípios:

- Os eixos viários são definidos de acordo com uma hierarquia (e.g., eixos 2x1 lentos, eixos 2x1 rápidos, autoestradas).
- As decisões de planeamento envolvem a construção de novos eixos de um determinado tipo (ou nível) ou o melhoramento de eixos existentes.
- As decisões de planeamento consideram simultaneamente vários objectivos (eficiência, equidade, consumo energético).
- O nível dos eixos rodoviários existentes ou a construir em áreas ambientalmente sensíveis pode estar sujeito a limitações.
- A despesa total associada às decisões de planeamento não pode exceder o orçamento disponível.
- A procura de viagens é elástica, dependendo das alterações na rede rodoviária.
- As decisões de planeamento são consistentes com a estrutura de planeamento adoptada no Highway Capacity Manual - HCM (TRB, 2000). Este manual, publicado pelo United States Transportation Research Board, é uma referência importante para os engenheiros de transportes em todo o mundo, e as soluções de planeamento que sejam consistentes com a estrutura de planeamento do HCM serão, em princípio, mais facilmente aceites e adoptadas em situações reais.

Para a implementação destes princípios, desenvolvemos uma abordagem que envolve um processo iterativo com sete passos em cada iteração (Figura 1).



**Figura 1:** Representação esquemática da abordagem

Em primeiro lugar, gera-se um conjunto de soluções para o melhoramento da rede rodoviária consistente com as preocupações ambientais e as restrições orçamentais. Cada solução especifica os eixos a construir ou a melhorar, bem como os níveis rodoviários a atribuir a esses eixos. A cada nível rodoviário está associado um nível de serviço (NS) que tem de ser garantido. O nível de serviço é uma medida qualitativa das condições operacionais de uma infraestrutura rodoviária (TRB, 2000) e é caracterizado por um volume máximo de tráfego, uma densidade máxima de tráfego e uma velocidade média máxima. Entre outras alternativas, o NS de uma estrada pode ser medido através do rácio volume-capacidade, que é dado pelo quociente entre o volume de tráfego e a capacidade da estrada. Para a geração de soluções pode-se recorrer a algoritmos de procura local ou evolucionários (ou à combinação de ambos).

Em segundo lugar, aplica-se um modelo gravitacional sem restrições para estimar a matriz O/D da rede melhorada (Ortúzar e Willumsen, 2001). Aquele modelo define o número esperado de viagens entre dois centros populacionais como sendo proporcional à dimensão desses centros (e.g., população, emprego) e inversamente proporcional ao custo (generalizado) de viagem entre os dois centros. Assume-se que os condutores optam pelo percurso de menor custo e que viajam à velocidade média máxima associada aos NS definidos para os eixos pertencentes ao percurso.

Em terceiro lugar, atribui-se a matriz O/D à rede rodoviária melhorada. Tal pode ser feito assumindo o princípio do equilíbrio do utilizador. No entanto, muitos dos condutores que circulam numa rede rodoviária interurbana não têm conhecimento das alternativas de percurso existentes – seguindo apenas os sinais de trânsito e/ou, cada vez mais frequentemente, instruções de navegação por GPS. Assim sendo, optou-se por considerar (do lado da segurança) que os condutores escolhem o percurso de menor custo considerando a velocidade média máxima correspondente ao NS imediatamente inferior ao dos eixos incluídos no percurso (Santos et al., 2009).

Em quarto lugar, avaliam-se as soluções em relação aos objetivos considerados. No caso da aplicação ao Paraná, avaliaram-se as soluções em relação a objetivos de eficiência, equidade e consumo energético.

Em quinto lugar, efectua-se uma avaliação multi-objetivo utilizando o método da ponderação. De acordo com este método, o valor global de uma solução é calculado através da aplicação de pesos (ou prioridades) aos valores normalizados das soluções para os diferentes objetivos. Os valores das soluções têm de ser normalizados porque o grau de satisfação dos objetivos é avaliado em unidades e/ou escalas diferentes.

Em sexto lugar, verifica-se se os NS requiridos em cada eixo (que dependem do nível hierárquico do eixo) são satisfeitos. Se assim não for, a solução é não admissível e é aplicada uma penalidade ao valor da solução. A penalidade a aplicar é proporcional à soma das diferenças entre o volume máximo de tráfego e o volume de tráfego estimado para os eixos nos quais o NS não é satisfeito.

Em sétimo lugar, comparam-se as soluções avaliadas na iteração corrente com a melhor solução obtida anteriormente – a solução incumbente. Se a melhor das novas soluções for melhor do que a solução incumbente, a nova solução torna-se a solução incumbente e uma nova iteração é iniciada. Caso contrário, depois de um determinado número de iterações em que se não verifiquem melhorias na solução incumbente, o processo iterativo termina.

### 3. MODELO DE OTIMIZAÇÃO

A aplicação da abordagem de planeamento descrita pressupõe a resolução de um modelo de otimização em cada iteração. Os ingredientes essenciais desse modelo são:

$$\max V = w_i \times \frac{\eta_i(y) - \eta_i^0}{\eta_i^B - \eta_i^0} \quad (1)$$

sujeito a,

$$T_{jk}(y) = \theta \times P_j \times P_k \times C_{jk}(y)^{-\beta}, \forall j, k \in N \quad (2)$$

$$Q_l(y) = \sum_{j \in N} \sum_{k \in N} T_{jk}(y) \times x_{ljk}, \forall l \in L \quad (3)$$

$$\sum_{m \in M_l} y_{lm} = 1, \forall l \in L \quad (4)$$

$$Q_l(y) \leq \sum_{m \in M_l} Q_{\max_m} \times y_{lm}, \forall l \in L \quad (5)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{m \in M_l} e_{lm} \times y_{lm} \leq b \quad (6)$$

$$T_{jk}, Q_l \geq 0, \forall j, k \in N, l \in L \quad (7)$$

$$x_{ljk}, y_{lm} \in \{0, 1\}, \forall j, k \in N, l \in L, m \in M \quad (8)$$

em que (por ordem de aparência)  $V$  é o valor normalizado da solução;  $w_i$  são os pesos associados a cada objetivo considerado;  $\eta_i$  é o valor da solução de acordo com o objetivo  $i$ ;  $\eta_i^0$  é o valor da solução inicial de acordo com o objetivo  $i$ ;  $\eta_i^B$  é o valor da melhor solução de acordo com o objetivo  $i$ ;  $T_{jk}$  é o volume de tráfego estimado entre o centro  $j$  e o centro  $k$ ;  $\theta$  é um parâmetro de escala;  $P_j$  é a população do centro  $j$ ;  $C_{jk}$  é o custo (generalizado) de viagem entre os centros  $j$  e  $k$ ;  $y = \{y_{lm}\}$  é uma matriz de variáveis binárias que tomam o valor um se o eixo  $l$  for do nível hierárquico  $m$ , e o valor zero em caso contrário;  $\beta$  é um parâmetro de calibração (normalmente denominado por fator de impedância);  $N$  é o conjunto de centros populacionais;  $Q_l$  é o fluxo estimado no eixo  $l$ ;  $x_{ljk}$  são variáveis binárias que tomam o valor

um se o eixo  $l$  pertencer ao percurso de menor custo entre os centros  $j$  e  $k$ , e igual a zero em caso contrário (que é obtido resolvendo o problema de nível inferior do modelo de otimização - ver Yang e Bell, 1998);  $L$  é o conjunto de eixos;  $M_l$  é o conjunto de níveis hierárquicos possíveis para o eixo  $l$ ;  $Q_{max_m}$  é o volume máximo de serviço para um eixo de nível hierárquico  $m$ ;  $e_{lm}$  são os custos de melhorar um eixo do tipo  $l$  para o tipo  $m$ ; e  $b$  é o orçamento disponível.

A função objetivo (1) deste modelo de otimização combinatória não linear representa a maximização do valor normalizado da solução de planeamento. A normalização é feita de forma a reflectir a importância de cada objetivo em consideração. Os valores da solução para os vários objetivos, e da mesma forma os valores normalizados, dependem das decisões adoptadas para o nível hierárquico dos eixos (que é representado pela variáveis  $y$ ). A procura de viagens é calculada de acordo com as restrições (2) e o número de viagens em cada eixo é calculado de acordo com as restrições (3). As restrições (4) são usadas para garantir que a cada eixo será associado um, e apenas um, nível hierárquico. Para alguns eixos, por razões de proteção ambiental, poderá ser desejável limitar os níveis hierárquicos admissíveis. Por esse motivo o conjunto de níveis admissíveis ( $M_l$ ) encontra-se indexado ao eixo. As restrições (5) são incluídas para assegurar que o fluxo de tráfego em cada eixo não ultrapassa o volume máximo de serviço associado ao nível hierárquico do eixo. A restrição (6) é usada para garantir que o orçamento disponível não é ultrapassado. As expressões (7) e (8) definem o domínio das variáveis de decisão.

O modelo de otimização descrito é extremamente difícil de resolver até a um ótimo global. Com exceção de instâncias de dimensão reduzida, terá de ser resolvido com recurso a métodos heurísticos. Existe uma grande variedade de heurísticas disponíveis referidas na literatura (ver, e.g., Gendreau e Potvin, 2005 e Michalewicz e Fogel, 2004). Para resolver o modelo proposto foram desenvolvidas três heurísticas diferentes: um algoritmo greedy; um algoritmo de pesquisa em vizinhança variável; e um algoritmo genético melhorado em vários aspectos relativamente à versão clássica. Foi este último o algoritmo que apresentou o melhor desempenho quando comparado com os restantes num conjunto de problemas-teste gerados aleatoriamente. Em Santos et al (2005) é facultada informação pormenorizada sobre os algoritmos, a sua calibração e o seu desempenho. Os resultados apresentados neste artigo foram obtidos com recurso ao algoritmo genético melhorado.

#### 4. ESTUDO DE CASO

O tipo de resultados que se pode obter com a abordagem proposta será ilustrado com uma aplicação académica à rede rodoviária principal do Estado do Paraná, Brasil. Com base em dados disponibilizados pelo Ministério dos Transportes Brasileiro (DNIT, 2010), estimou-se que em 2007 esta rede tinha uma extensão total de 5965 km (441 km de estradas não pavimentadas, 3183 km de estrada 2x1 lentas, 1971 km de estradas 2x1 rápidas e 370 km de autoestradas 2x2). Adicionalmente, foram considerados 817 km de estradas planeadas (não existentes) que poderão ser construídas no futuro.

Para a aplicação da abordagem, a rede foi representada por 76 nós (39 centros populacionais no Estado de Paraná, 11 centros populacionais fora deste estado e 26 intersecções) e 133 eixos (100 internos e 33 externos). A Figura 2 apresenta uma representação esquemática da rede.



**Figura 2:** Rede principal do Estado do Paraná, Brasil, em 2007

A aplicação consistiu em determinar a melhor forma de aplicar um orçamento de 40 mil unidades monetárias (que representa um orçamento equivalente a construir 1000 km de autoestradas) para melhorar a rede existente. As características dos vários tipos de estrada são descritas na Tabela 1. Os custos relativos de melhoramento das estradas são apresentados na Tabela 2. Estes custos são referentes a zonas de orografia plana. Em zonas montanhosas foi considerada uma penalização de 30 a 60 por cento. O custo generalizado de viagem foi calculado tendo por base a distância de viagem e o tempo de viagem entre cada par de centros. Foi considerado um fator de impedância  $\beta$  igual a 1,4.

**Tabela 1:** Características dos diferentes tipos de estrada (TRB, 2000)

| Tipos de estrada | Velocidade livre [km/h] | Capacidade [uvl/h/via] | Nível de serviço | Volume de serviço [uvl/h/via] | Velocidade de serviço [km/h] |
|------------------|-------------------------|------------------------|------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Não pavimentado  | 40                      | 900                    | F                | 135                           | 30                           |
| Via 2x1 lenta    | 70                      | 1700                   | D                | 255                           | 50                           |
| Via 2x1 rápida   | 90                      | 2100                   | C                | 1428                          | 89                           |
| Autoestrada 2x2  | 120                     | 2400                   | B                | 1320                          | 120                          |

**Tabela 2:** Custos relativos de melhoramento das estradas

| De/para       | N.Pavimentado | 2x1 lenta | 2x1 rápida | Autoestrada |
|---------------|---------------|-----------|------------|-------------|
| Planeada      | 0,5           | 1         | 2,5        | 4           |
| N.Pavimentada | 0             | 0,5       | 1,5        | 3           |
| 2x1 lenta     | 0             | 0         | 1          | 2           |
| 2x1 rápida    | 0             | 0         | 0          | 1,5         |

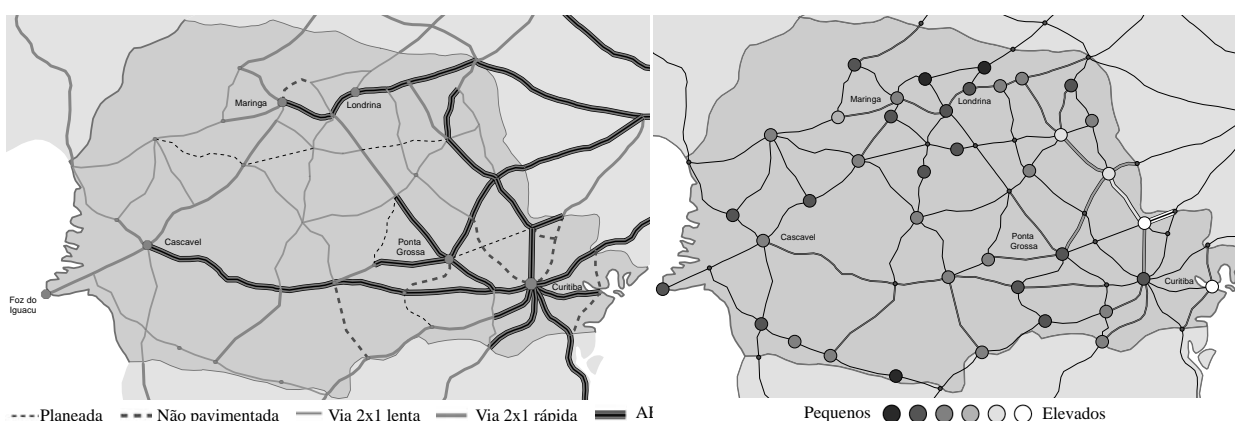
#### 4.1 Resultados para a maximização da eficiência

Como solução de referência, considerou-se apenas o objetivo de eficiência correspondente à maximização da acessibilidade agregada de todos os centros (Keeble et al. 1982):

$$\eta_l(y) = \sum_{j \in N} P_j \times A_j(y), \text{ com } A_j(y) = \sum_{k \in N \setminus j} \left( \frac{P_k}{C_{jk}^\beta(y)} \right) \quad (9)$$

em que  $\eta_l$  é a acessibilidade agregada (objetivo de eficiência) e  $A_j$  é a acessibilidade do centro  $j$ .

A solução obtida para este objetivo é apresentada na Figura 3 (esq.). Em comparação com a rede de 2007, a extensão total de autoestradas (AE) aumenta de 370 km para 1892 km, enquanto a extensão das estradas 2x1 rápidas e lentas decresce de 1971 km para 1304 km e de 3183 km para 2442 km, respectivamente (Tabela 3). As principais mudanças seriam: uma AE a ligar Curitiba a Londrina e Maringá; uma nova AE fazendo a ligação entre Curitiba e a fronteira sul do Estado do Paraná; uma ligação por AE entre Foz do Iguaçu e Cascavel; uma estrada rápida atravessando o estado pela zona oeste, passando por Cascavel e Maringá; e a construção de 115 km de estradas planeadas, todas na zona este de Curitiba. Em resultado destes melhoramentos da rede quem mais beneficia são os centros populacionais mais próximos de Curitiba (Figura 3 - dta.). Por contrário, as localidades mais periféricas, junto às fronteiras norte e sul, são as que menos beneficiam do investimento efectuado. A cidade de Curitiba também beneficia pouco com esta solução dada a sua já boa acessibilidade na situação inicial, em 2007. O aumento verificado na acessibilidade agregada foi de 4,1% (de 2,406 para 2,505).



**Figura 3: (esq.) Solução 1 – maximização da acessibilidade agregada; (dta.) Ganhos de acessibilidade na Solução 1 em comparação com a rede inicial**

#### 4.2 Impacto de adicionar um objetivo de equidade

De seguida adicionou-se ao objetivo de eficiência um objetivo de equidade, de maneira a ter em conta a distribuição geográfica dos benefícios introduzidos com o melhoramento da rede. Para avaliar a equidade, foi utilizado um indicador muito usado em estudos económicos e sociais – o índice de Gini. Este índice mede a diferença relativa entre uma dada solução e uma solução de perfeita equidade, definindo-se da seguinte forma (Santos et al., 2008):

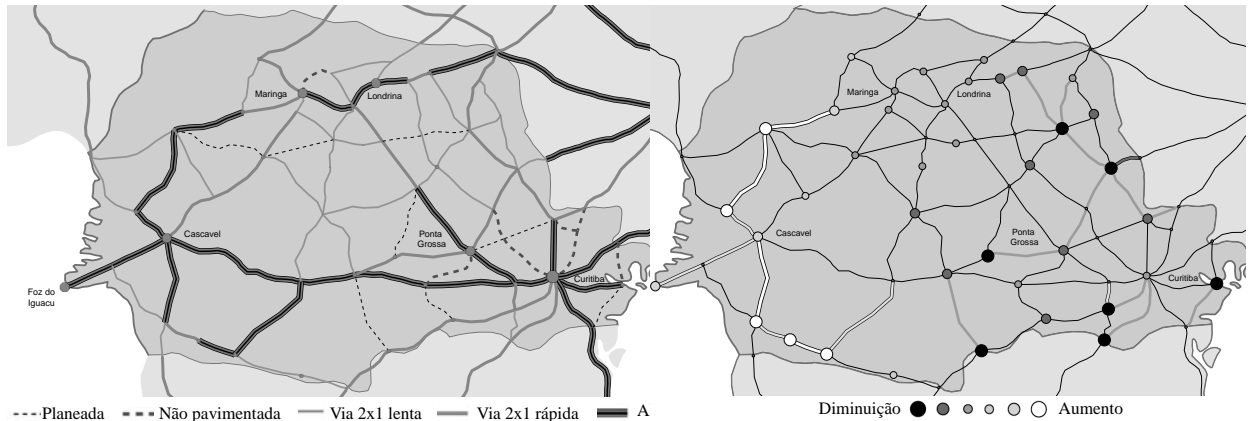
$$\eta_2(\mathbf{y}) = \frac{\sum_{j \in N} \sum_{k \in N} |A_j(\mathbf{y}) - A_k(\mathbf{y})|}{2N^2 \bar{A}} \quad (10)$$

em que  $\eta_2$  é o índice de Gini (objetivo de equidade);  $N$  é o número de centros populacionais; e  $\bar{A}$  é a acessibilidade média. Este valor assume valor entre [0,1] e quanto menor for o valor obtido mais próxima a solução se encontra da solução de perfeita equidade.

Quando considerados os objetivos de eficiência e de equidade simultaneamente, com um peso de 2/3 para a eficiência e 1/3 para a equidade, obteve-se a solução apresentada na Figura 4 (esq.). Em comparação com a Solução 1, a extensão total de AE diminui ligeiramente (menos 39 km), enquanto a extensão das estradas 2x1 rápidas aumenta de 1304 km para 1651 km e a



extensão de estradas lentas diminui de 2442 km para 2134 km (Tabela 3). São ainda construídas mais 166 km de vias planeadas. Em termos da distribuição de acessibilidade por centros populacionais, nota-se um aumento significativo dos ganhos nos centros da zona oeste do estado em detrimento da zona leste, nomeadamente dos centros próximos de Curitiba (Figura 4 - dta.). Com esta solução, o valor do índice de Gini obtido é igual ao valor para a rede inicial. Isto significa melhorar a equidade em 5,4% relativamente à Solução 1 (o índice de Gini passa de 0,147 para 0,139). Em resultado disso, a acessibilidade agregada baixa de 2,505 para 2,493, significando uma redução de 4,8%.



**Figura 4:** (esq.) Solução 2 – maximização da acessibilidade agregada e minimização do índice de Gini; (dta.) Comparação da Solução 2 com a Solução 1

### 4.3 Impacte de adicionar um objetivo de consumo energético

Posteriormente, substituiu-se o objetivo de equidade por um objetivo de consumo energético (e, consequentemente, de emissões de CO<sub>2</sub>), definido da seguinte forma:

$$\eta_2(\mathbf{y}) = \frac{\sum_{j \in N} \sum_{k \in N} |A_j(\mathbf{y}) - A_k(\mathbf{y})|}{2N^2 \bar{A}} \quad (11)$$

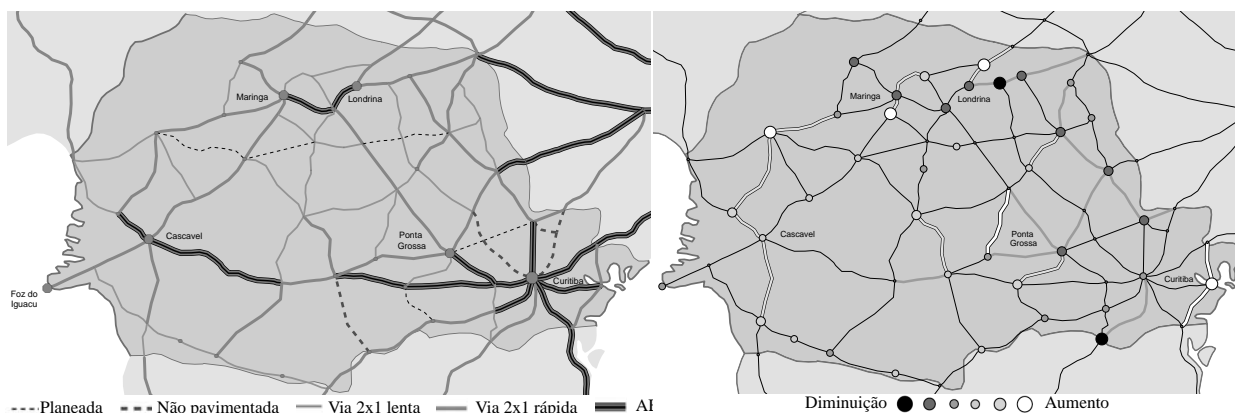
em que  $\eta_3$  é o consumo energético médio na rede, medido em g/km de equivalente de petróleo (objetivo de consumo energético);  $F_l$  é o consumo médio no eixo  $l$ ; e  $L_l$  é o comprimento do eixo  $l$ . O cálculo do consumo médio em cada eixo foi calculado com recurso ao software COPERT (European Commission, 1999) tendo em conta a frota do Estado do Paraná. A função quadrática resultante foi a seguinte:

$$F_l = 97,055688 - 1,273995 \times S_l + 0,008036 \times S_l^2 \quad (12)$$

onde  $S_l$  é a velocidade no eixo  $l$ .

Quando considerados os objetivos de eficiência e de consumo energético simultaneamente obteve-se a solução apresentada na Figura 5 (esq.). Em comparação com a Solução 1, nota-se que esta solução apresenta bastante mais estradas 2x1 rápidas, pois são estas que permitem gamas de velocidades mais económicas em termos energéticos. Na verdade, há um aumento da extensão desta vias de 1304 km para 2800 km (Tabela 3). Para compensar os gastos nestas vias, há uma redução na extensão das AE, de 1892 km para 1061 km, e na extensão das estradas 2x1 lentas, de 2442 para 2108. Em termos da distribuição de acessibilidade por centros populacionais, há alguns centros populacionais que beneficiam nesta solução relativamente à Solução 1, pois como há uma maior rede de estradas 2x1 rápidas alguns centros vêem a sua acessibilidade às cidades vizinhas melhorada (Figura 5 - dta.). Com esta

solução o valor do consumo médio de energia diminui em 9,5% relativamente à Solução 1 (de 58,08 g/km para 52,58 g/km). Em termos de acessibilidade verifica-se apenas uma ligeira redução de 0,4% (de 2,505 para 2,495).

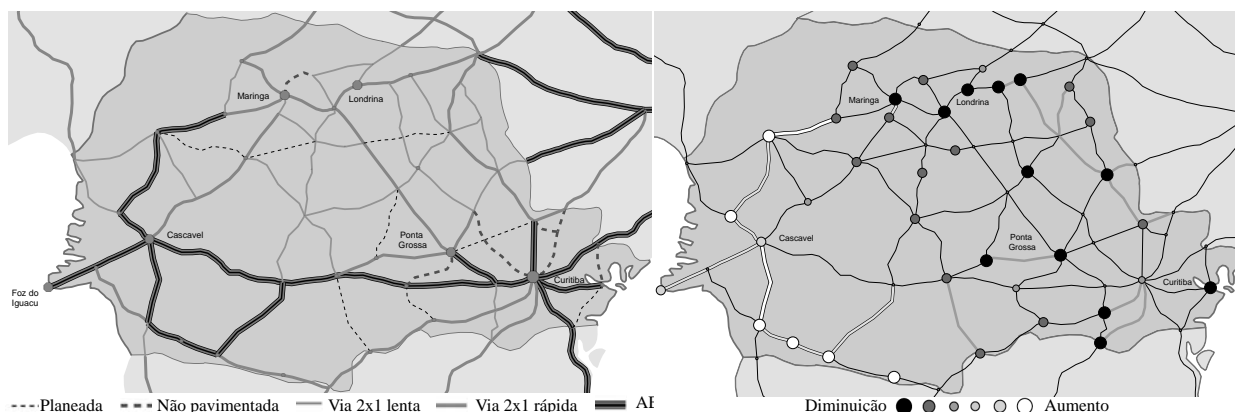


**Figura 5: (esq.) Solução 3 – maximização da acessibilidade agregada e minimização do consumo de energia; (dta.) Comparação Solução 3 com a Solução 1**

#### 4.4 Resultados para objetivos de eficiência, equidade e energéticos

Por último, consideraram-se os três objetivos ao mesmo tempo – podendo dizer-se que incorporando um objetivo económico (eficiência), um objectivo social (equidade) e um objectivo ambiental (consumo energético, emissões de CO<sub>2</sub>), a solução obtida será mais sustentável do que as soluções anteriores, em particular, do que a Solução 1.

Admitindo um peso de 2/3 para a eficiência, 1/6 para a equidade e 1/6 para o consumo energético, obteve-se a solução apresentada na Figura 6 (esq.). Esta solução é, como se poderia esperar, uma combinação das soluções anteriores. Comparativamente à Solução 1, esta solução tem uma ligação por AE entre Curitiba e a cidade de Foz do Iguaçu. Por sua vez, a ligação entre Curitiba e a zona de Londrina e Maringá efectua-se por estrada 2x1 rápida. Há uma redução da extensão de AE, passando de 1892 km para 1805 km, e de estradas 2x1 lentas, passando de 2442 km para 2105 km (Tabela 3). Pelo contrário, verifica-se um aumento de estradas 2x1 rápidas, (1729 km em vez de 1304 km) e de estradas planeadas que são construídas (662 km em vez de 561 km). Relativamente à distribuição dos ganhos de acessibilidade, verifica-se uma melhoria da acessibilidade dos centros a oeste e sudoeste do estado (Figura 6 - dta.). Relativamente à Solução 1, esta solução resulta num melhoramento do índice de Gini em 4,1% (assumindo o valor de 0,141) e de uma diminuição do consumo médio de energia em 4.5% (assumindo o valor de 55,47). A acessibilidade sofre uma redução de apenas 0,24% (assumindo o valor de 2,499).



**Figura 6: (esq.)** Solução 4 – maximização da acessibilidade agregada e da equidade e minimização do consumo de energia; **(dta.)** Comparação Solução 4 com a Solução 1

**Tabela 3:** Sumário dos resultados para as diferentes soluções (variações em comparação com a situação inicial)

| Extensões e Objectivos |                        | Inicial | Solução 1 |          | Solução 2 |          | Solução 3 |          | Solução 4 |          |
|------------------------|------------------------|---------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
|                        |                        | Valor   | Valor     | Variação | Valor     | Variação | Valor     | Variação | Valor     | Variação |
| Tipo                   | Projectada             | 817     | 561       | -31,3%   | 727       | -11,0%   | 471       | -42,4%   | 662       | -19,0%   |
|                        | Não pavimentada        | 441     | 583       | 32,2%    | 417       | -5,4%    | 342       | -22,4%   | 481       | 9,1%     |
|                        | Eixo 2x1 lenta         | 3183    | 2442      | -23,3%   | 2134      | -33,0%   | 2108      | -33,8%   | 2105      | -33,9%   |
|                        | Eixo 2x1 rápida        | 1971    | 1304      | -33,8%   | 1651      | -16,2%   | 2800      | 42,1%    | 1729      | -12,3%   |
|                        | Autoestrada            | 370     | 1892      | 411,4%   | 1853      | 400,8%   | 1061      | 186,8%   | 1805      | 387,8%   |
| Objectivos             | Eficiência             | 2,406   | 2,505     | 4,1%     | 2,493     | 3,6%     | 2,495     | 3,7%     | 2,499     | 3,9%     |
|                        | Equidade               | 0,139   | 0,147     | 5,8%     | 0,139     | 0,0%     | 0,145     | 4,3%     | 0,141     | 1,4%     |
|                        | Consumo energia (g/km) | 54,19   | 58,08     | 7,2%     | 55,53     | 2,5%     | 52,58     | -3,0%    | 55,47     | 2,4%     |

## 5. CONCLUSÃO

Neste artigo apresenta-se uma abordagem multi-objetivo para o planeamento de redes rodoviárias interurbanas. A abordagem é aplicável a redes de múltiplos níveis, assumindo a procura de viagens como elástica e considerando as indicações do manual americano *Highway Capacity Manual*, nomeadamente com o recurso ao conceito de nível de serviço para avaliar as condições de tráfego.

A abordagem tem como objetivo apoiar os decisores nas suas reflexões estratégicas relativamente ao planeamento de longo prazo de redes rodoviárias nacionais ou regionais. A rede principal do Estado do Paraná foi usada para demonstrar a aplicabilidade da abordagem. Este estudo de caso foi ainda usado para ilustrar as diferenças entre soluções de planeamento envolvendo apenas um objetivo de eficiência, o objetivo primordial na avaliação de investimentos, e soluções que atendam também a objetivos mais sustentáveis, como é o caso da equidade e do consumo energético (e consequentemente de emissões de CO<sub>2</sub>). Os resultados obtidos ilustram bem as diferenças introduzidas com uma perspectiva mais sustentável. Embora ambas as soluções apresentem uma extensão semelhante de autoestradas, na solução com a perspectiva mais sustentável existe uma menor concentração de autoestradas junto das maiores cidades, em particular junto a Curitiba. Verifica-se ainda nesta solução uma maior rede de estradas 2x1 rápidas e a construção de um maior número de estradas projetadas (não existentes inicialmente). Em resultado destas diferenças, a solução mais sustentável é 4,1% mais equitativa e 4,5% menos consumidora de energia. Em troca, é apenas 0,24% menos eficiente do que a solução que maximiza a eficiência da rede.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdulaal, M. e Leblanc, L. J. (1979) Continuous Equilibrium Network Design Models. Transportation Research

- Part B-Methodological, 13(1), 19-32.
- Antunes, A., Seco, A. e Pinto, N. (2003) An Accessibility-Maximization Approach to Road Network Planning. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 18(3), 224-240.
- Ben-Ayed, O., Blair, C. E., Boyce, D. E. e LeBlanc, L. J. (1992) Construction of a Real-World Bilevel Linear Programming Model of the Highway Network Design Problem. *Annals of Operations Research*, 34, 219-254.
- Boyce, D. E. e Janson, B. N. (1980) A Discrete Transportation Network Design Problem with Combined Trip Distribution and Assignment. *Transportation Research Part B-Methodological*, 14(1-2), 147-154.
- Cantarella, G. E. e Vitetta, A. (2006) The Multi-Criteria Road Network Design Problem in an Urban Area. *Transportation*, 33(6), 567-588.
- Cohon, J. L. e Rothley, K. (1997) Multiobjective Methods. In: C. S. Revelle and A. E. McGarity (eds.) *Design and Operation of Civil and Environment Engineering Systems*. Wiley, New York, USA.
- Daly, A. (2000) National Models. In: D. A. Hensher and K. J. Button, (eds.) *Handbook of Transport Modelling*. Elsevier Science, Oxford, UK.
- DNIT (2010). Departamento Nacional de Infraestruturas de Transporte, Ministério dos Transportes Brasileiro – [www.dnit.gov.br](http://www.dnit.gov.br) (acedido em Março de 2010).
- European Commission (1999) Meet-methodology for calculating transport emissions and energy consumption. European Commission, COST 319 - Estimation of Pollutant Emissions from Transport. Brussels, Belgium.
- Feng, C. M. e Wu, J. Y. J. (2003) Highway Investment Planning Model for Equity Issues. *Journal of Urban Planning and Development-ASCE*, 129(3), 161-176.
- Friesz, T. L. e Harker, P. T. (1983) Multi-Objective Design of Transportation Networks - the Case of Spatial Price Equilibrium. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, 209, 86-93.
- Friesz, T. L., Hsun-jung, C., Mehta, N. J., Tobin, R. L. e Anandalingam, G. (1992) A Simulated Annealing Approach to the Network Design Problem with Variational Inequality Constraints. *Transportation Science*, 26(1), 18-26.
- Gendreau, M. e Potvin, J. Y. (2005) Metaheuristics in Combinatorial Optimization. *Annals of Operations Research*, 140(1), 189-213.
- Janson, B. N., Buckels, L. S. e Peterson, B. E. (1991) Network Design Programming of United-States Highway Improvements. *Journal of Transportation Engineering - ASCE*, 117(4), 457-478.
- Jara-Diaz, S. e Friesz, T. L. (1982) Measuring the Benefits Derived from a Transportation Investment. *Transportation Research Part B-Methodological*, 16(1), 57-77.
- Keeble, D., Owens, P. L. e Thompson, C. (1982) Regional Accessibility and Economic-Potential in the European-Community. *Regional Studies*, 16(6), 419-431.
- Leblanc, L. J. (1975). Algorithm for the Discrete Network Design Problem. *Transportation Science*, 39(1), 63-79.
- Lo, H. K. e Tung, Y. K. (2003) Network with Degradable Links: Capacity Analysis and Design. *Transportation Research Part B-Methodological*, 37(4), 345-363.
- Meng, Q. e Yang, H. (2002) Benefit Distribution and Equity in Road Network Design. *Transportation Research Part B-Methodological*, 36(1), 19-35.
- Michalewicz, Z. e Fogel, D. B. (2004) *How to Solve It: Modern Heuristics*. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Ortúzar, J. D. e Willumsen, L. G. (2001) *Modelling Transport*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England.
- Santos, B., Antunes, A. e Miller, E. J. (2005) Solving an Accessibility-Maximization Road Network Design Model: A Comparison of Heuristics. *Advanced OR and AI Methods in Transportation*, Poznan, Poland, 692-697.
- Santos, B., Antunes, A. e Miller, E. (2008) Integrating Equity Objectives in a Road Network Design Model, forthcoming *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2089
- Santos, B., Antunes, A. e Miller, E. (2009) A Multi-Objective Approach to Long-Term Interurban Multi-Level Road Network Planning. *Journal of Transportation Engineering - ASCE*, Vol. 139, No. 9.
- TRB. (2000). *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., USA.
- Tzeng, G. H. e Tsaor, S. H. (1997) Application of Multiple Criteria Decision Making for Network Improvement. *Journal of Advanced Transportation*, 31(1), 49-74.
- Ukkusuri, S. V., Mathew, T. V. e Waller, S. T. (2007) Robust Transportation Network Design under Demand Uncertainty. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 22(1), 6-18.
- Yang, H. e Bell, M. G. H. (1998) Models and Algorithms for Road Network Design: A Review and Some New Developments. *Transport Reviews*, 18(3), 257-278.