

MODELO DE LOCALIZAÇÃO ÓPTIMA DE ESTAÇÕES FERROVIÁRIAS: A FUTURA LINHA DE ALTA VELOCIDADE LISBOA-PORTO

Hugo M. Repolho

António P. Antunes

Departamento de Engenharia Civil

Universidade de Coimbra

Richard L. Church

Departamento de Geografia

Universidade da Califórnia Santa Barbara

ABSTRACT

Rail transportation reflourished in the last few decades. A very large investment will certainly be made in new railway lines in the years to come – especially in high speed rail lines. The success of such investment is highly dependent on rail ridership, which in turn depends on the location of railway stations. This paper presents a mixed-integer optimization model that determines the optimal location (and number) of stations along a railway line that will be introduced over an existing transportation network. The stations are chosen within a set of possible locations defined a priori according to the objective of maximizing travel cost savings. The model considers the sensitivity of rail ridership to time losses due to stops at intermediate stations, as well as competition from other modes. The practical usefulness of the model is illustrated through an application to the Lisbon-Porto high-speed rail line expected to be built in Portugal in the near future.

RESUMO

Nas últimas décadas assistiu-se ao renascimento do transporte ferroviário. Para os próximos anos estão previstos investimentos avultados, especialmente em linhas de alta velocidade. O sucesso dos investimentos depende fortemente do volume de passageiros captados, o qual depende por sua vez do número e localização das estações ferroviárias. Este artigo apresenta um modelo de optimização inteiro-misto que determina o número e localização óptimos das estações intermédias de uma linha de comboios de alta velocidade. As estações são escolhidas de entre um conjunto de locais possíveis definidos a priori com o objectivo de maximizar a diminuição dos custos de viagens. O modelo tem em conta a sensibilidade da procura ao tempo de viagem perdido nas paragens intermédias, bem como a competição de outros modos de transporte alternativos. Por fim a utilidade do modelo é ilustrado através da aplicação à futura linha de alta velocidade Lisboa-Porto.

INTRODUÇÃO

Após um período de estagnação e até mesmo de retrocesso, o transporte ferroviário renasceu nas últimas décadas, particularmente devido ao interesse crescente nas linhas de alta velocidade. Os primeiros projetos de alta velocidade surgiram no Japão e na Europa. Na Europa, estes projectos foram inicialmente desenvolvidos à escala nacional em França, Alemanha e Itália, tendo depois evoluído para a escala europeia. Com efeito, desde 1996 os projectos de alta velocidade são planeados no âmbito do Programa da Rede Trans-Europeia de Transportes (European Union, 1996, 2001). O investimento em projectos de alta velocidade é hoje uma tendência crescente também na Ásia e na América do Norte e do Sul.

O renascimento do transporte ferroviário deriva deste ser considerado como uma solução para os problemas de congestionamento que actualmente se verificam nas redes rodoviárias e nos aeroportos (Vuchic e Casello, 2002). Para além disso, o transporte ferroviário apresenta-se como uma alternativa ambientalmente mais sustentável (menor consumo de energia e emissão de gases causadores do efeito de estufa) e com um índice de acidentes muito baixo. A alta velocidade, a par com o transporte aéreo, é considerada um dos meios de transporte mais seguros em termos de fatalidades de passageiros por passageiro-quilómetro (Campos e De Rus, 2009). No contexto europeu há ainda uma última razão que favorece a alta velocidade: a necessidade de reduzir o tempo médio de viagem entre capitais europeias, a qual aumentou significativamente depois da inclusão dos diversos países de Leste.

O desenvolvimento de uma rede de alta velocidade é um processo extremamente complexo e dispendioso. O sucesso dos investimentos depende em grande medida do volume de passageiros servidos (De Rus e Nombela, 2007; Campos e De Rus, 2009), em particular da procura captada a outros meios de transporte. A atractividade das linhas de alta velocidade pode ser medida em função da diminuição dos custos de viagem em relação aos meios de transporte existentes, bem como da quantidade de procura gerada. A diminuição dos custos de viagem depende do número e localização das estações. Mais estações implicam menor tempo de acesso aos serviços ferroviários e, consequentemente, atracção de mais procura. Contudo, implica também um maior número de paragens intermédias para as viagens mais longas e, consequentemente, tempos de viagem mais longos devido às fases de travagem, desembarque, embarque e aceleração adicionais. O aumento dos tempos de viagem provoca a diminuição da procura para viagens de longo curso. Em resumo, cada estação adicional aumenta a procura local mas tende a diminuir a procura global.

Este artigo apresenta um modelo de optimização inteiro-misto que determina o número e localização óptimas de estações ao longo de uma linha ferroviária a ser construída sobre uma rede de transportes já existente. Trata-se portanto de um modelo de planeamento estratégico de investimentos ferroviários (Ghoseiri et al., 2004). As estações são escolhidas de entre um conjunto de locais possíveis definidos a priori com o objectivo de maximizar a diminuição dos custos de viagem do sistema. O modelo considera o efeito das perdas de tempo devido a paragens em estações intermédias na procura captada, e a competição de modos de transporte alternativos. O traçado do corredor ferroviário é um dado do problema.

O artigo encontra-se dividido da seguinte forma. A secção seguinte apresenta uma breve revisão da literatura sobre modelos de optimização de localização de estações. De seguida é formulado o novo modelo e aplicado a um estudo de caso envolvendo a futura linha de alta velocidade Lisboa e Porto a ser construída em Portugal. Descrito o estudo de caso, os resultados obtidos são analisados e comparados com as soluções propostas em estudos existentes sobre a nova linha. O artigo termina com uma síntese do trabalho que desenvolvemos e com a identificação de possíveis desenvolvimentos futuros.

1. REVISÃO DE LITERATURA

O planeamento estratégico de investimentos ferroviários aborda dois problemas fundamentais profundamente interligados – a escolha do corredor e a escolha da localização das estações. O estudo destes problemas foi tema de diversos artigos científicos, particularmente no contexto das redes de transportes urbanos rápidos (*rapid transit networks*), de que uma revisão da literatura é fornecida em Laporte et al. (2000). Ainda que similares, as redes de transportes urbanos rápidos e as redes ferroviárias variam no ambiente de aplicação. Enquanto as primeiras se desenvolvem à escala da cidade ou da área metropolitana e são frequentemente bastante densas, as segundas dizem respeito a espaços interurbanos e são normalmente pouco densas (no caso das linhas de alta velocidade pode mesmo tratar-se apenas de uma linha). A revisão bibliográfica que se segue foca apenas estudos sobre modelos de localização de estações, isto é, o traçado do corredor é um dado do problema.

O primeiro artigo relevante sobre este tema foi apresentado por Vuchic e Newell (1968). Nele são tidos em conta todos os ingredientes de um problema de localização de estações – velocidade de acesso às estações, características dinâmicas dos comboios (fase de aceleração, fase de velocidade constante e fase de travagem), tempo de viagem dentro do comboio, e tempo de transferência intermodal nas estações. Contudo, o modelo foi concebido para o caso específico de viagens entre zonas suburbanas e a área central de uma cidade. O modelo

determina através da resolução simultânea de um conjunto de equações diferenciais o espaçamento entre estações que minimiza o tempo de viagem total da população. A procura é dada por uma função contínua da distância ao ponto central da cidade. O mesmo modelo foi proposto em Vuchic (1969) com uma nova função objectivo e considerando a competição de um sistema de transportes contínuo (acessível em qualquer ponto) e paralelo à linha ferroviária. O modelo maximiza o número de passageiros que utilizam a linha ferroviária para as suas deslocações, admitindo que as viagens são feitas pelo caminho mais rápido.

Laporte et al. (1998) abordam o tema formulando um modelo que procura localizar um número fixo de estações ao longo de uma linha ferroviária, de forma a maximizar a procura captada, a qual é estimada em função da área coberta pelas estações. Porém, o modelo não tem em conta o impacto do aumento do tempo de viagem devido à paragem em estações intermédias. O modelo foi ilustrado através da aplicação a uma linha de transportes urbanos rápidos de Sevilha (Espanha).

Outro contributo significativo para o tema foi dado por Hamacher et al. (2001). Os autores deste artigo introduzem dois modelos de localização contínua de estações: o primeiro com o objectivo de maximizar a acessibilidade às estações e o segundo com o objectivo de maximizar a diminuição do tempo total de viagens. O segundo modelo considera os efeitos positivos e negativos de localizar estações adicionais numa linha ferroviária já existente. O acréscimo de tempo de viagem é tido em conta para calcular o tempo total de viagem, mas a sua repercussão na procura é ignorada. Os modelos foram testados para um estudo de caso envolvendo a Alemanha. No mesmo âmbito, Schöbel et al. (2002) apresentam um modelo discreto de cobertura para o problema da minimização do número (custo) de estações adicionais, ao mesmo tempo que garantem a cobertura de toda a procura da rede. Por sua vez, Kranakis et al. (2002) descrevem um modelo de cobertura máxima para um número fixo de estações. Apesar do artigo discutir a necessidade de incluir custos adicionais devido à paragem em estações intermédias, essa necessidade não é reflectida no modelo final. Por último, Schöbel (2005) apresenta uma extensão do trabalho apresentado em Schöbel et al. (2002) formulando um modelo com dois objectivos: maximizar a procura coberta e minimizar o número de estações.

Em suma, existem na literatura vários modelos de optimização para o problema da localização de estações. A grande maioria dos modelos usa a cobertura da procura como indicador do volume de passageiros captados. No entanto, e conforme referido por Marín e Jaramillo (2009), o facto de uma rede de transportes cobrir a procura não significa que ela se ajuste adequadamente ao padrão de viagens dos utilizadores. Alguns modelos focam a questão da diminuição dos custos/tempo de viagem tornando possível a modelação do comportamento dos utilizadores de forma mais precisa. No entanto, não temos conhecimento de nenhum modelo que capte todas as particularidades inerentes ao problema da localização de estações (em particular das implicações do número de paragens intermédias na procura captada). Os modelos originais formulados por Vuchic e Newell (1968) e Vuchic (1969) são aqueles que abordam o problema em estudo de forma mais abrangente, ainda que se refiram ao problema específico de uma rede em que toda a procura tem um único destino (a área central de uma cidade).

2. MODELO DE OPTIMIZAÇÃO

O modelo de optimização apresentado neste artigo pode ser visto como uma generalização dos modelos de Vuchic e Newell (1968) e Vuchic (1969). O modelo considera todas as particularidades abordadas nesses trabalhos, mas generaliza a sua aplicação a qualquer nova

linha ferroviária e assume que a procura está localizada num conjunto finito de centros geradores de tráfego (cidades). O objectivo é determinar onde devem ser localizadas as estações ao longo de um corredor ferroviário previamente definido, de forma a maximizar a diminuição dos custos de viagem decorrente da introdução da nova linha ferroviária. O conjunto de locais possíveis para as estações é definido a priori. O novo serviço ferroviário compete com os meios alternativos que usam a rede de transportes existente. A procura é calculada com base numa matriz origem-destino entre os centros geradores de tráfego tendo em conta os custos de viagem. Esta abordagem, tal como referido em Laporte et al. (2000), é mais realista do que estimar a procura com base no raio de cobertura das estações. Os custos de viagem incluem o tempo perdido devido a possíveis paragens em estações intermédias.

O modelo aplica-se a uma região onde se vai acrescentar uma nova linha ferroviária à rede de transportes existente. A notação necessária para formular o problema é descrita de seguida:

J	Conjunto de centros geradores de tráfego
$M = \{1, \dots, M\}$	Conjunto de localizações possíveis para as estações
R_{mn}	Conjunto das possíveis estações intermédias entre as estações m e n
r_{mn}	Número máximo de estações intermédias entre as estações m e n
d_{mn}	Distância entre as estações m e n pela nova linha ferroviária
c_{ij}	Custo de viagem entre os centros i e j através da rede de transportes existente;
$c_{im}(c_{nj})$	Custo de viagem entre o centro $i(j)$ e a estação $m(n)$;
c_{mn}	Custo de viagem entre as estações m e n através da nova linha ferroviária quando o comboio se desloca à velocidade máxima (o custo é composto pelo preço do bilhete e o custo do tempo de viagem, que inclui a fase de aceleração na estação de origem, m , e a fase de desaceleração junto da estação de destino, n ;
v	Custo unitário do tempo;
t^e	Tempo perdido na mudança de modos de transporte (comboio-carro);
t^s	Tempo perdido em cada paragem intermédia (inclui embarque e desembarque, e as fases de desaceleração e aceleração);
$c_{imnj}^k = c_{im} + c_{mn} + c_{nj} + 2vt^e + kvt^s$	Custo de viagem entre os centros i e j através de uma rota que inclui dois segmentos da rede de transportes existente, im e jn , e um segmento da nova linha ferroviária mn , que contém k paragens intermédias;
$s_{imnj}^k = c_{ij} - c_{imnj}^k$	Valor da diminuição dos custos viagens entre os centros i e j devido à utilização de um segmento da nova linha ferroviária mn .

Um outro tipo de dados necessário à formulação do modelo diz respeito ao número de viagens que se tornam mais económicas se um segmento na nova linha ferroviária for utilizado. Este número é representado por q_{imnj}^k para a rota $i \rightarrow m \rightarrow n \rightarrow j$ com k paragens intermédias, e pode ser estimado em função do custo de viagem da rota (c_{imnj}^k) usando um modelo gravitacional (Ortúzar and Willumsen, 2001). Se o custo de viagem dessas viagens for menor do que o custo das viagens feitas somente através da rede de transportes existente ($c_{imnj}^k < c_{ij}$), o valor de q_{imnj}^k capta ainda as viagens adicionais geradas pela diminuição do custo de viagem. Caso contrário q_{imnj}^k toma o valor zero.

As variáveis de decisão são a localização das estações, y_m , e as rotas escolhidas pelos utilizadores, x_{imnj}^k , ambas variáveis binárias. y_m toma o valor 1 se uma estação m for seleccionada e 0 no caso contrário. x_{imnj}^k toma o valor 1 se a rota $i \rightarrow m \rightarrow n \rightarrow j$ com k paragens intermédias for escolhida e 0 no caso contrário.

Nestas condições, a localização das estações que maximiza a diminuição dos custos de viagem da rede é determinada através do seguinte modelo de optimização:

$$\text{Maximizar } 2 \sum_{i \in J} \sum_{m \in M} \sum_{n \in M} \sum_{j \in J} \sum_{k=0}^{r_{mn}} s_{imnj}^k q_{imnj}^k x_{imnj}^k \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{m \in M} \sum_{n \in M} \sum_{k=0}^{r_{mn}} x_{imnj}^k \leq 1 \quad \forall i, j \in J \quad (2)$$

$$\sum_{i \in J} \sum_{n \in M} \sum_{j \in J} \sum_{k=0}^{r_{mn}} x_{imnj}^k \leq g_m^a y_m \quad \forall m \in M: g_m^a > 0 \quad (3a)$$

$$\sum_{i \in J} \sum_{m \in M} \sum_{j \in J} \sum_{k=0}^{r_{mn}} x_{imnj}^k \leq g_n^e y_n \quad \forall n \in M: g_n^e > 0 \quad (3b)$$

$$y_m + y_{m+1} \leq 1 \quad \forall m \in M: d_{m,m+1} \leq l_{min} \quad (4)$$

$$\sum_{k=0}^{r_{mn}} (r_{mn} - k) x_{imnj}^k \leq r_{mn} - \sum_{u \in R_{mn}} y_u \quad \forall i, j \in J, m, n \in M: x_{imnj}^0 \text{ exists} \quad (5)$$

$$y_1 = 1 \quad (6a)$$

$$y_M = 1 \quad (6b)$$

$$x_{imnj}^k \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in J, m, n \in M \quad (7)$$

$$y_m \in \{0,1\} \quad \forall m \in M \quad (8)$$

onde g_m^a (g_n^e) é o limite superior para o número de rotas que utilizam a estação m (n) como acesso à (saída da) linha ferroviária; e l_{min} é a distância mínima entre estações consecutivas.

A função objectivo (1) maximiza a diminuição dos custos totais de viagem da rede devido à introdução da linha ferroviária (multiplicado por dois para considerar as duas direcções). As restrições de atribuição (2), asseguram que as viagens correspondentes a cada par O/D são atribuídas no máximo a uma rota incluindo um segmento (mn) da nova linha ferroviária. Nesse caso, $x_{imnj}^k=1$ se existirem k estações intermédias entre m e n . Se as viagens forem feitas somente pela rede de transportes existente então $x_{imnj}^k=0$, para qualquer valor de k . As restrições (3) evitam que viagens sejam atribuídas a rotas com o segmento ferroviário mn , salvo se existirem estações em m e n . As restrições (4) garantem a distância mínima l_{min} entre estações consecutivas. As restrições (5) determinam o número de estações intermédias localizadas entre duas estações (como é prática corrente nas fases de planeamento estratégico assume-se que os comboios param em todas as estações existentes). Estas restrições só são formuladas se x_{imnj}^0 existir, isto é, se pelo menos a rota que inclui um segmento da nova linha ferroviária sem estações intermédias ($k=0$) tiver um custo de viagem inferior à melhor rota alternativa que utiliza apenas a rede de transportes existente. As restrições (6a) e (6b) localizam duas estações por defeito uma em cada extremidade da nova linha ferroviária. Finalmente, as expressões (7) e (8) definem o domínio das variáveis de decisão.

Este modelo aborda uma série de questões até ao momento não consideradas (pelo menos simultaneamente) nos modelos existentes na literatura. Entre outros, o modelo considera o

impacto do tempo perdido em paragens intermédias na procura, a competição de meios de transporte alternativos e a geração de tráfego adicional devido à diminuição dos custos de viagem.

3. APLICAÇÃO PRÁTICA

A rede de transportes portuguesa sofreu melhorias consideráveis desde 1986, o ano em que Portugal entrou na Comunidade Europeia (agora União Europeia). Nos primeiros anos os apoios comunitários foram utilizados fundamentalmente para construir uma rede rodoviária moderna. Nos últimos anos, porém, a alta velocidade entrou na agenda nacional. Tal escolha está ligada às directrizes da União Europeia que definiram a integração da Península Ibérica na Rede Trans-Europeia de Transportes como prioritária (Mateus et al., 2007).

A rede de alta velocidade portuguesa foi definida pelo governo português em 2003, após ter acordado com o governo espanhol os corredores internacionais (MOPTH/MF, 2003). A rede é composta por dois corredores nacionais (Lisboa-Porto e Évora-Faro) e quatro internacionais (Porto-Vigo, Aveiro-Salamanca, Lisboa-Madrid e Faro-Huelva).

O modelo anteriormente apresentado foi aplicado à futura linha de alta velocidade Lisboa-Porto. Esta linha é uma componente importante do eixo de alta velocidade do Sudoeste da Europa – está incluída como projecto número 3 entre os 30 projectos prioritários definidos pela Comissão Europeia (2005). A linha atravessa as áreas mais populosas e economicamente desenvolvidas de Portugal, as quais são servidas por uma rede rodoviária moderna que competirá com a linha de alta velocidade. Para além da linha de alta velocidade existe ainda o serviço ferroviário convencional e um serviço de transporte aéreo entre Lisboa e Porto (os voos demoram em média 55 minutos). Estes dois serviços dificilmente poderão subsistir após a introdução da linha de alta velocidade.

O projecto inicial do corredor Lisboa-Porto sofreu nos últimos anos diversas alterações, sendo que o traçado final está ainda por aprovar. Os conflitos existentes na parte Sul do corredor são descritos num estudo feito por ATKEARNEY (2003) por encomenda da empresa responsável pela implementação da alta velocidade em Portugal, a RAVE – Rede Ferroviária de Alta Velocidade S.A. Os conflitos identificados são: a contrução do corredor a Este ou a Oeste da Serra dos Candeeiros e a decisão de passar a linha através de Leiria ou a Este de Leiria. Um outro estudo realizado para a RAVE, SDG (2007), revela existirem ainda duas alternativas para a localização da estação na área de Aveiro: o centro de Aveiro ou em Albergaria-a-Velha, um município 15 km a Este de Aveiro. Em outro estudo da mesma empresa, SDG (2009), faz-se também menção a uma dúvida conceptual acerca da nova linha de alta velocidade. Em causa está a hipótese de combinar a nova linha de alta velocidade com a linha ferroviária convencional. Segundo o estudo, uma nova linha seria construída entre Lisboa e Coimbra. Entre Coimbra e o Porto utilizar-se-ia a linha convencional existente. A incerteza quanto à localização definitiva do novo aeroporto internacional de Lisboa contribuiu também para o aumento das incertezas quanto ao projecto. O último documento disponibilizado pela RAVE aponta para a construção de um corredor entre Lisboa e Porto, com uma extensão de 292 km e com estações intermédias na Região do Oeste (entre Lisboa e Leiria), Leiria, Coimbra e Aveiro/Albergaria-a-Velha (RAVE, 2011).

Para fazer face a estas incertezas e dar um contributo à sua resolução considerámos neste estudo três corredores alternativos a Norte de Coimbra (N1, N2 e N3) e outros três a Sul de Coimbra (S1, S2 e S3), os quais estão representados na Figura 1. O conjunto das seis alternativas contém 32 municípios candidatos à localização de estações. O nome e abreviatura

dos municípios constam da Tabela 1. A combinação dos corredores Norte e Sul dá origem a 9 corredores possíveis entre Lisboa e Porto. A Tabela 2 descreve a configuração de cada corredor e respectiva extensão e ainda o número máximo de estações intermédias possíveis.

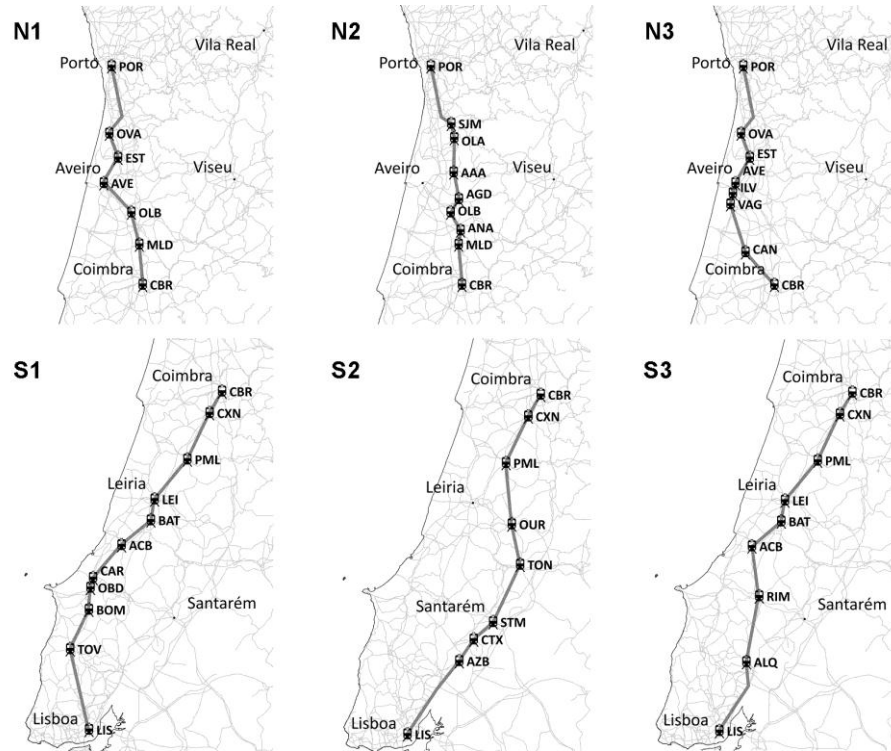


Figura 1: Corredores alternativos a Norte e Sul de Coimbra

Tabela 1: Possíveis localizações de estações

Localização	Abv.	Localização	Abv.	Localização	Abv.
Águeda	AGD	Cartaxo	CTX	Ourém	OUR
Albergaria-a-Velha	AAA	Coimbra	CBR	Ovar	OVA
Alcobaça	ACB	Condeixa-a-Nova	CXN	Pombal	PML
Alenquer	ALQ	Estarreja	EST	Porto	POR
Anadia	ANA	Ílhavo	ILV	Rio Maior	RIM
Aveiro	AVE	Leiria	LEI	Santarém	STM
Azambuja	AZB	Lisboa	LIS	São João da Madeira	SJM
Batalha	BAT	Mealhada	MLD	Torres Novas	TON
Bombarral	BOM	Óbidos	OBD	Torres Vedras	TOV
Caldas da Rainha	CAR	Oliveira de Azeméis	OLA	Vagos	VAG
Cantanhede	CAN	Oliveira do Bairro	OLB		

Tabela 2: Traçado, extensão e número máximo de estações intermédias dos corredores

Corredor	COR1	COR2	COR3	COR4	COR5	COR6	COR7	COR8	COR9
Sul	S1	S1	S1	S2	S2	S2	S3	S3	S3
Norte	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
Extensão (Km)	302	297	302	298	293	299	298	293	298
Número máximo de estações intermédias	17	19	18	15	17	16	15	17	16

A aplicação do modelo de maximização da diminuição dos custos de viagem aos 9 corredores tem o propósito de avaliar e comparar as várias alternativas de configuração da linha de alta velocidade entre Lisboa e Porto. A comparação é feita tendo por base três indicadores: diminuição dos custos de viagem, procura captada e lucro (proveniente dos bilhetes).

4. DADOS DO PROBLEMA

A aplicação do modelo depende essencialmente de dois tipos de dados: custos de viagem e procura potencial da linha de alta velocidade. O cálculo dos custos de viagem e respectiva diminuição foi feito com base nos dados que se seguem:

- O custo de viagem pela rede rodoviária inclui três componentes de custo: operação dos veículos, tempo e portagens.
- O custo de operação dos veículos foi estimado em 16,478 Euros por 100 km por veículo. O valor foi obtido usando a metodologia HDM-4 (World Bank, 2010) e inclui consumo de combustível, desgaste de pneus, manutenção e depreciação do veículo.
- O valor do tempo foi estimado em 12 Euros por hora.
- Os custos de portagem correspondem aos valores reais em vigor na rede.
- A velocidade de circulação na linha de alta velocidade foi estimada em 250 km/h (excepto na fase de aceleração e desaceleração).
- O custo dos bilhetes Lisboa-Porto para o serviço de alta velocidade foi estimado em 0.16 Euros/km, isto é, entre 46,88 e 48,32 Euros dependendo da extensão do corredor. O valor usado no estudo SDG (2009) foi de 49 Euros.
- O tempo perdido em cada transferência intermodal (t^e) foi estimado em 12 min.
- O tempo perdido em cada paragem intermédia (t^s) foi estimado em 9 min (3 min para as fases de aceleração e desaceleração e 6 min para o desembarque e embarque). Este valor é consistente com o estudo SDG (2009) onde a diferença entre uma viagem directa Lisboa-Porto e outra com duas paragens intermédias é de 18 min.

O cálculo da procura foi feito através de um modelo gravitacional com função de impedância do tipo potência. Esta função (comparada com a exponencial) apresenta geralmente melhores resultados para viagens interurbanas (Fotheringham e O'Kelly, 1989). A procura após a introdução da nova linha de alta velocidade é dada pela seguinte expressão:

$$q_{imnj}^k = \alpha \frac{w_{im} w_{nj}}{(c_{imnj}^k)^\beta} \quad (9)$$

onde w_{im} (w_{nj}) é o parâmetro de massa que reflecte o peso do município i (j) como centro gerador de tráfego quando as viagens com origem (destino) nesse município são feitas através de uma estação localizada em m (n), e α e β são parâmetros de calibração.

A massa de um município, i , para viagens originadas nesse município acedendo à linha de alta velocidade na estação m , foi calculada multiplicando o valor da população do município por um factor de redução que reflecte a distância entre o município e a estação e o raio de cobertura da estação, d_{max} , isto é:

$$w_{im} = p_i \left(1 - \frac{d_{im}}{d_{max}} \right), i \in \mathbf{J}, m \in \mathbf{M} : d_{im} \leq d_{max} \quad (10)$$

O cálculo de w_{nj} para viagens destinadas a um município, j , passando pela estação n é feito com recurso à mesma expressão substituindo os índices i e m pelos índices n e j .

O raio de cobertura das estações (d_{max}) foi estimado em 50 km. O mesmo valor foi usado no estudo SDG (2007). Por fim, definiu-se 30 km como a distância mínima entre estações consecutivas, l_{min} . Este valor foi estabelecido de forma a garantir a não degradação do serviço de alta velocidade até ao nível de um serviço convencional, pois são necessários cerca de 20 km para acelerar até à velocidade de 250 km/h e depois desacelerar até parar.

5. RESULTADOS

O modelo de optimização foi aplicado aos nove corredores descritos através de um computador com processador Intel Core 2 Quad Processor Q9550 2.84 GHz e 4 GB de RAM usando o *software* de optimização FICO Xpress 7.0 (FICO, 2009). Os resultados obtidos com respeito à diminuição dos custos totais de viagem por dia, à procura captada por dia, ao lucro de bilheteira por dia e à localização das estações intermédias estão sintetizados na Tabela 3, de que consta também informação sobre o esforço computacional necessário para obter as soluções.

De entre os corredores analisados o COR 8 foi aquele que apresentou a melhor solução. Proporciona a maior diminuição de custos de viagem, capta o maior volume de passageiros e apresenta os maiores lucros de bilheteira. A solução selecciona três estações intermédias localizadas em Leiria, Coimbra e Oliveira de Azeméis. Comparando com a solução proposta pela RAVE existem duas diferenças: a estação da Região do Oeste não é seleccionada; e a estação de Aveiro é substituída por uma estação em Oliveira de Azeméis. Nesta solução o número de passageiros captados é de 26334 por dia (cerca de 6,8 por cento superior ao número de 24658 estimado no estudo SDG, 2009). A comparação é razoável uma vez que para uma solução com as mesmas localizações de estações da RAVE (COR 1) o número de passageiros servidos por dia, 24974, é semelhante.

Tabela 3: Resultados da aplicação do modelo à linha Lisboa-Porto

COR	Diminuição dos custos de viagem (Euros/dia)	Procura captada (pax/dia)	Lucros de bilheteira (Euros/dia)	Localização das estações intermédias	CPU (segundos)
1	291063	24974	845827	LEI-CBR-OVA	762
2	316069	25860	855938	LEI-CBR-OLA	3855
3	287043	24900	845688	LEI-CBR-OVA	809
4	301673	22946	793832	TON-CBR-OVA	1334
5	325455	23794	804016	TON-CBR-OLA	1472
6	297849	22874	793414	TON-CBR-OVA	1077
7	310797	25432	847883	LEI-CBR-OVA	8054
8	336126	26334	858195	LEI-CBR-OLA	2128
9	306750	25352	847486	LEI-CBR-OVA	807

As soluções óptimas obtidas para todos os corredores contemplam apenas três estações intermédias, sendo que uma delas é sempre Coimbra e a Região do Oeste nunca é seleccionada. A construção (ou não) de uma estação em Leiria foi classificada nos estudos iniciais da RAVE como sendo uma questão essencialmente política. Contudo, neste estudo e excepto nos corredores onde Leiria não era opção (COR4, COR5, e COR6), Leiria foi sempre seleccionada. Já Aveiro, que é incluída em todos os estudos da RAVE (incluindo SDG, 2007 e 2009), nunca foi seleccionada neste estudo, sendo substituída por Oliveira de Azeméis ou Ovar. A justificação prende-se com o facto das áreas de Oliveira de Azeméis e Ovar serem muito mais populosas do que a área de Aveiro, atraindo mais passageiros.

6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Por forma a aprofundar o estudo da linha de alta velocidade Lisboa-Porto foi efectuada uma análise de sensibilidade ao preço do bilhete e à decisão crítica de construir ou não uma estação em Aveiro.

6.1 Preço do bilhete

O preço pago pelo serviço de alta velocidade representa uma fracção relevante do custo da viagem. Donde, pequenas variações nesse custo podem ter implicações na atractividade do serviço de alta velocidade em relação às alternativas.

De forma a avaliar o efeito das variações do preço dos bilhetes na solução óptima do problema de localização de estações, aplicámos de novo o modelo ao COR8 (o melhor para os dados de base) considerando uma gama de preços de bilhete entre 0,06 e 0,26 Euros por Km. Os resultados obtidos estão sintetizados na Figura 2.

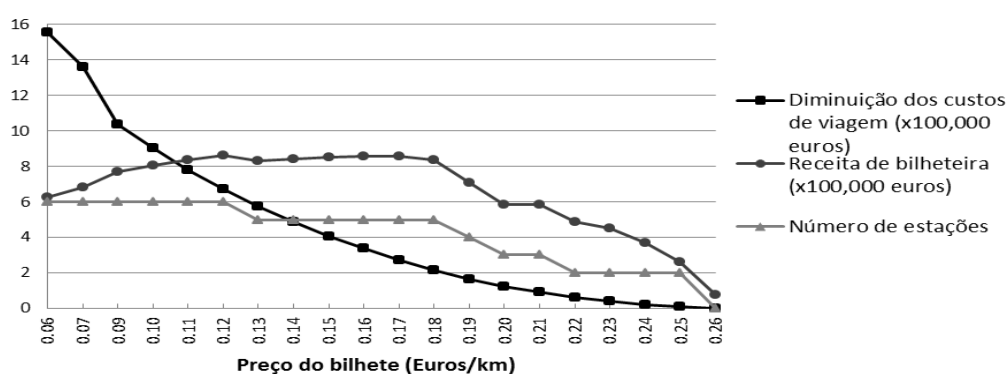


Figura 2: Relação entre diminuição dos custos totais de viagem, preço do bilhete e número de estações localizadas

A diminuição do custo dos bilhetes implica o aumento da diminuição dos custos totais de viagem da rede e o aumento do número de estações intermédias localizadas, o qual tem como valor máximo 6 quando o preço do bilhete é 0,06 Euros (mesmo que o preço do bilhete fosse nulo o número óptimo de estações não seria maior). Os maiores lucros de bilheteira são obtidos quando o preço dos bilhetes é 0,12 e 0,16 Euros por quilómetro (respectivamente 861180 e 858195 Euros por dia). No entanto as variações são mínimas para a gama de valores de preço do bilhete entre 0,11 e 0,18. Uma vez que o número de estações localizadas é maior para 0,12 do que para 0,16 (implica um investimento maior), este último será o mais favorável do ponto de vista do operador. Na verdade, 0,16 Euros por quilómetro é um valor muito próximo do valor considerado nos últimos estudos da RAVE.

6.2 Localização da estação na área de Aveiro

A área de Aveiro (seja no centro da cidade ou na cidade vizinha de Albergaria-a-Velha) é apontada em todos os estudos efectuados por iniciativa da RAVE como local certo para a construção de uma estação da futura linha de alta velocidade Lisboa-Porto. Contudo, de acordo com os resultados obtidos neste estudo, a opção de localizar uma estação nesta área nunca se revelou vantajosa. De maneira a quantificar as implicações de localizar uma estação na área de Aveiro aplicámos de novo o modelo aos nove corredores, impondo a localização de uma estação em Aveiro (COR1, COR3, COR4, COR6, COR7, e COR9) ou em Albergaria-a-Velha (COR2, COR5, e COR8). Os resultados estão sintetizados na Tabela 4.

Os resultados mostram que a localização de uma estação na zona de Aveiro implica uma redução entre 2,01 e 3,10% da diminuição dos custos de viagem da rede em relação aos resultados obtidos quando não há imposição de localização de estações. As melhores soluções com uma estação localizada em Aveiro e Albergaria-a-Velha são respectivamente obtidas para os corredores COR7 e COR8. Se comparados com a melhor solução do estudo (COR8 sem imposição de localizações), estas soluções representam perdas diárias de 31855 e 9575 Euros no que respeita à diminuição dos custos de viagem e 3875 e 1779 Euros em termos de receita de bilheteira. Conclui-se ainda que de entre as duas localizações possíveis na área de Aveiro, Albergaria-a-Velha é mais vantajosa.

Tabela 4: Resultados do modelo quando se impõe uma estação na área de Aveiro

COR	Diminuição dos custos de viagem (Euros/dia)	Percentagem perdida de diminuição de custos de viagem	Lucros de bilheteira (Euros/dia)	Percentagem de diminuição dos lucros de bilheteira	Localização das estações intermédias
1	284794	2.15	832131	1.62	LEI-CBR-AVE
2	306278	3.10	843928	1.40	LEI-CBR-AAV
3	280724	2.20	831790	1.64	LEI-CBR-AVE
4	295608	2.01	780976	1.62	TON-CBR-AVE
5	316544	2.74	793256	1.34	TON-CBR-AAV
6	291863	2.01	780683	1.60	TON-CBR-AVE
7	304271	2.10	833976	1.64	LEI-CBR-AVE
8	326551	2.85	847077	1.30	LEI-CBR-AAV
9	300315	2.10	833594	1.64	LEI-CBR-AVE

7. CONCLUSÕES

Este artigo apresenta um novo modelo de localização de estações ferroviárias e os resultados da sua aplicação à futura linha Lisboa-Porto, uma componente importante do eixo de alta velocidade do Sudoeste Europeu. O objectivo do modelo é maximizar a diminuição dos custos totais de viagem da rede promovidos pela introdução de uma nova linha de alta velocidade. O modelo combina uma série de aspectos até agora nunca abordados simultaneamente. Em particular, considera: o impacto do tempo perdido nas paragens intermédias na procura, a competição de meios de transporte alternativas, e a geração de procura adicional devido à diminuição dos custos de viagem. Outras características como a velocidade de acesso às estações, as características dinâmicas dos comboios, o tempo de paragem dos comboios nas estações e o tempo de transferência intermodal, são também contempladas. A aplicação à futura linha Lisboa-Porto ilustrou bem o tipo de resultados que se podem obter através do modelo, e permitiu uma análise aprofundada não só do problema de localização das estações bem como do melhor traçado para a futura linha. Os resultados evidenciam que a solução apresentada nos documentos mais recentes da RAVE não é a mais vantajosa.

O modelo apresentado é de natureza estratégica. No entanto, Bussieck et al. (1997) referem que alguns aspectos de ordem tática devem também ser tidos quando as decisões estratégicas relativas ao investimento ferroviário são tomadas. Em particular, o modelo deveria incluir o planeamento da frota de comboios e do serviço prestado (nomeadamente uma tabela horária). Como trabalho futuro, os autores pretendem desenvolver um modelo que aborde simultaneamente os aspectos estratégicos incluídos no modelo e os aspectos táticos mencionados.

Agradecimentos

Hugo Repolho agradece o apoio da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (bolsa SFRH/BD/28781/2006).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ATKEARNEY (2003) *Visão Estratégica para a Rede Ferroviária de Alta Velocidade em Portugal: Caracterização dos Corredores Analisados*. Lisboa, Portugal.
- Bussieck, M.R.; T. Winter e U.T. Zimmermann (1997) Discrete optimization in public rail transport. *Mathematical Programming* 79(13), 415-444.
- Campos, J. e G. De Rus (2009) Some stylized facts about high-speed rail: A review of HSR experiences around the world. *Transport Policy* 16(1), 19-28.
- De Rus, G. e G. Nombela (2007) Is investment in high speed rail socially profitable? *Journal of Transport Economics and Policy* 41(1), 3-23.
- European Commission (2001) *European Transport Policy for 2010: Time to Decide*. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- European Commission (2005) *Trans-European Transport Network: TEN-T Priority Axes and Projects 2005*. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- European Union (1996) Decision No. 1692/96/CE of the European Parliament and of the Council of 23 July 1996 on the Community guidelines for the development of the trans-European transport networks. *Official Journal of the European Communities* 39, L228, 9 September 1996, 1-104.
- FICO - Fair Isaac Corporation (2009) *Getting Started with Xpress - Release 7*. Warwickshire, UK.
- Fotheringham, A.S. e M.E. O'Kelly. (1989) *Spatial Interaction Models: Formulations and Applications*. Kluwer, London, UK.
- Ghoseiri, K.; F. Szidarovszky e M.A. Asgharpour (2004) A multi-objective train scheduling model and solution. *Transportation Research Part B* 38(10), 927-952.
- Hamacher, H.; A. Liebers; A. Schöbel; D. Wagner e F. Wagner (2001) Locating new stops in a railway network. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science* 50(1), 1-11.
- Kranakis, E.; P. Penna; K. Schlude; D. Taylor e P. Widmayer (2002) Improving customer proximity to railway stations. Technical report, ETH Zurich, Switzerland.
- Laporte, G.; J.A. Mesa e F.A. Ortega (1998) Locating stations on rapid transit lines. Centre for Research on Transportation (Publication CRT-98-22), Montreal, Canada.
- Laporte, G.; J.A. Mesa e F.A. Ortega (2000) Optimization methods for the planning of rapid transit systems. *European Journal of Operational Research* 122(1), 1-10.
- Marin, Á.G. e P. Jaramillo (2009) Urban rapid transit network design: Accelerated benders decomposition. *Annals of Operations Research* 169(1), 35-53.
- Mateus, R.; J.A. Ferreira e J. Carreira (2007) Multicriteria decision analysis (MCDA): Central Porto high-speed railway station. *European Journal of Operational Research* 187(1), 1-18.
- MOPTH/MF - Ministério das Obras Públicas, Transportes e Habitação e Ministério de Fomento (2003) *Memorando de Entendimento da XIX Cimeira Luso-Espanhola sobre Transportes*. Figueira da Foz, Portugal.
- Ortúzar, J.D. e L.G. Willumsen (2001) *Modelling Transport*. Wiley, Chichester, UK.
- RAVE (2011) *The Portuguese High-Speed Railway Project*. Lisbon, Portugal.
- Schöbel, A. (2005) Locating stops along bus or railway lines: A bicriteria problem. *Annals of Operations Research* 136(1), 211-227.
- Schöbel, A., H. Hamacher, A. Liebers, D. Wagner (2002), The continuous stop location problem in public transportation networks. *Technical Report* 81, Wirtschaftsmathematik, University of Kaiserslautern, Germany.
- SDG - Steer Davies Gleave (2007) *Modelo Integrado de Procura de Passageiros - Relatório 2: Estimativas de Procura de Passageiros e Receitas*. Londres, Reino Unido.
- SDG - Steer Davies Gleave (2009) *Análise Custo-Benefício da Ligação de Alta Velocidade Ferroviária entre Lisboa e Porto - Relatório Final*. Londres, Reino Unido.
- TIS.pt (2007) *Análise Custo-Benefício das Linhas de Alta Velocidade Lisboa-Porto e Lisboa-Madrid – Relatório Final*. Lisboa, Portugal.
- Vuchic, V.R. (1969) Rapid transit interstation spacing for maximum number of passengers. *Transportation Science* 3(4), 214-232.
- Vuchic, V.R. e G.F. Newell (1968) Rapid transit interstation spacing for minimum travel time. *Transportation Science* 2(4), 303-339.
- Vuchic, V.R. e J.M. Casello (2002) An evaluation of maglev technology and its comparison with high speed rail. *Transportation Quarterly* 56(2), 33-49.
- World Bank (2010) *HDM-4 Road Use Costs Model Version 2.00 Documentation*. Washington DC, USA.