

**APLICAÇÃO DO MODELO BUSWAY NA SIMULAÇÃO DO V.L.T. DA TUNISIA**

F.D. Michel, M.Sc. (\*)  
F. Kuhn, Ing. (\*\*)  
L.A. Lindau, Ph.D. (\*)

18/32

**RESUMO**

Discute-se muito no Brasil a oportunidade da introdução de sistemas tipo VLT (veículos leves sobre trilhos) para solucionar problemas de deslocamento de passageiros urbanos em corredores de média capacidade. Esta discussão, como qualquer outra que envolve uma nova tecnologia de transportes abrange várias dimensões, dentre elas a questão do financiamento, do desempenho do VLT quando confrontado com tecnologias convencionais (tipo, por exemplo, o ônibus), da implantação e operação do sistema (dimensão da participação pública e/ou privada), da integração com outras modalidades complementares, etc.

Esta foi a principal motivação do trabalho conjunto de pesquisa sendo realizado pelo INRETS (Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité - França) e a UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul). O objetivo principal da pesquisa é comparar sistemas VLT e ônibus para fins de determinar o desempenho operacional de uma tecnologia quando confrontada com a outra. O trabalho iniciou com a adaptação, calibração e validação do modelo BUSWAY para condições verificadas ao longo de um sistema VLT, dentro de um contexto existente em países em desenvolvimento. Para tal, foi selecionado o sistema VLT de Tunis, praticamente o único existente em cidade do terceiro mundo operando na superfície com vários trechos implantados ao longo de avenidas urbanas, onde o VLT exerce direito exclusivo de circulação.

Este artigo enfoca os seguintes aspectos:

- a) descrição da rede de VLT de Tunis, com ênfase na linha Sul;
- b) introdução ao modelo BUSWAY;
- c) calibração e validação de BUSWAY para a linha Sul do VLT de Tunis;
- d) resultados do projeto preliminar de experimentos onde é avaliado o impacto de diversos fatores sobre a velocidade comercial do sistema VLT.

O artigo conclui indicando ações que devem ser desenvolvidas para melhorar o desempenho operacional do VLT de Tunis.

(\*) PPGEP/ Escola de Engenharia  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 2 andar, sala 205  
90035-190, Porto Alegre, Brasil  
FAX: 051-2271807

(\*\*) Centre de Recherche et Evaluation des Systèmes de Transports  
Automatisés  
20, rue Elisée Reclus  
59650, Villeneuve d'Ascq, França  
FAX: 20438343

Uma das primeiras etapas deste trabalho conjunto constou da adaptação, calibração e validação do modelo BUSWAY (Lindau, 1983; Lindau, 1988b) para condições verificadas ao longo de um sistema VLT dentro de um contexto existente em países em desenvolvimento. Para tal, foi selecionado o sistema VLT de Tunis, praticamente o único existente em cidade do terceiro mundo operando na superfície com vários trechos implantados ao longo de avenidas urbanas, onde o VLT exerce direito exclusivo de circulação (Baltagi, 1989).

A decisão de utilizar técnicas de simulação para avaliar a potencialidade de sistemas VLT prende-se ao fato de não existir, no mundo, uma linha de bondes modernos na superfície de avenidas urbanas operando em condições de fluxo de passageiros da ordem das encontradas em corredores brasileiros servidos por tecnologia ônibus, qual seja, transportando por volta de 25000 passageiros/sentido durante a hora de ponta (Lindau and Willumsen, 1990).

## 2. DESCRIÇÃO DA REDE DE V.L.T DA TUNISIA

Segundo Baltagi (1989), em 1988, por volta de 1,5 milhões de habitantes moravam nos 16000 ha da superfície urbanizada da aglomeração de Tunis, a capital e principal cidade da Tunisia. A população de Tunis crescia então a um ritmo medio de 3,2 % ao ano. A estrutura viária de Tunis é do tipo radial e, de uma forma geral, a capacidade de transporte da rede é considerada insuficiente para um tráfego que cresce a uma taxa anual superior a 4 %. Belhareth (1984) descreve em detalhes o sistema de transporte coletivo de Tunis.

Existem 3 empresas públicas envolvidas com a questão dos transportes coletivos de Tunis: a SNT (opera por volta de 150 linhas de ônibus que transportam aproximadamente 73% da demanda por transporte coletivo), a SNCFT (que explora 2 linhas ferroviárias que respondem por volta de 7 % do total de passageiros do transporte coletivo) e a SMLT (que, desde 1985, opera o sistema VLT).

Vários autores (Kuhn, 1992; Boukhris e Kuhn, 1993; Allegue, 1993) enfocam as questões financeiras e econômicas do sistema VLT, o impacto do VLT na política urbana, a integração entre o VLT e o sistema ônibus, e os aspectos operacionais do VLT. Neste trabalho, o esforço de descrição do sistema centra-se na questão operacional e no desempenho do VLT.

O sistema VLT que, em 1991, transportou um total de 73,5 milhões de passageiros (Allegue, 1993), tem uma extensão total de aproximadamente 30 km e um traçado básico em forma de Y, onde os eixos principais são o sul, norte e noroeste, conforme representação da figura 1. A concepção do sistema inclui um anel central onde, em sentido único de circulação, é assegurada a ligação entre as diferentes linhas. Este anel é operado pelos mesmos veículos das linhas norte, sul e noroeste. A garagem dos veículos fica na estação de Tunis Marine e os veículos das diferentes linhas têm todos a mesma cor: verde. Afora as linhas norte e sul, as demais operam entre 04:00 e 22:00 h.

A linha Sul foi a primeira a entrar em serviço (outubro 1985) e faz a ligação entre a estação de Tunis Marine (leste) e a de Ben Arous (bairro ao sul da cidade). A linha Norte (colocada em serviço em novembro de 1989) liga a Praça de Barcelone (centro) a estação de Ariana (região ao norte de Tunis). Em julho de 1990, as linhas Oeste e Noroeste são colocadas em serviço para atender os bairros de Le Bardo e Ibn Khaldoun.

As linhas Norte (7,4 km, 12 estações distanciadas, em média, de 670 m, frota de 22 veículos, intervalos de 6 min na hora de ponta e de 12 fora da mesma, operação entre 04:20 e 23:55 h, que atendeu, em 1990, 23,4 milhões de passageiros) e Sul (9,5 km, 12 estações distanciadas, em média, de 850 m, frota de 30 veículos, intervalos de 4 min na hora de ponta e de 12 fora da mesma, operação entre 03:25 e 23:25 h, que atendeu, em 1990, 23,3 milhões de passageiros) são as mais carregadas do ponto de vista de passageiros.

Segundo Boukhris e Kuhn (1993), a velocidade média comercial da linha Sul está em torno de 19 km/h, e na linha Norte, em 18,3 km/h. Estas velocidades resultam da passagem dos veículos pela área central, onde, de uma forma mais acentuada, ocorrem conflitos com pedestres que circulam na via pública. Os autores destacam a grande diferença entre a velocidade comercial que o VLT atinge no centro (13 km/h no período de ponta da manhã) e a velocidade que ele atinge na periferia (26 km/h no mesmo horário).

Estas linhas provém direito exclusivo de circulação aos VLT, através da proteção por grades, na maior parte dos trechos localizados na periferia; em todos os cruzamentos semafORIZADOS o cruzamento com o tráfego rodoviários é sempre feito em nível. No trecho central, a linha é simplesmente desnivelada em relação à calçada ou separada por uma borda que impede os veículos particulares de invadir a faixa reservada ao VLT, mas que não evita o conflito com os pedestres. Em casos extremos, situações de carga e descarga, alguns veículos rodoviários deslocam-se sobre a plataforma dos trilhos do VLT; em algumas ocasiões deste bloqueio resultam reduções localizadas nas velocidades desenvolvidas pelos VLT.

Os trechos centrais desnivelados requerem máxima atenção dos condutores dos VLT com os pedestres. Mesmo nos trechos gradeados ou murados, proteções que variam de 1 m a 2,5 m de altura, alguns pedestres atravessam a linha ou pulando sobre a proteção ou através de buracos nas grades.

As linhas de VLT têm localização variável com relação ao meio fio das vias por onde circulam. Por vezes as 2 linhas paralelas (uma para cada sentido de circulação) encontram-se localizadas, lado a lado, junto a um dos meio fios, em outros casos cada uma das linhas fica junto ao seu respectivo meio fio. Em outras ocasiões, as 2 linhas ficam lado a lado localizadas não junto ao meio-fio, mas a uma certa distância deste de forma a proporcionar uma faixa de via reservada para tráfego rodoviário de caráter local. Esta faixa serve para circulação interna à região pois não proporciona acesso às outras faixas de tráfego situadas do outro lado da linha do VLT, que caracterizam a via principal.

Em alguns poucos casos, como na saída da estação de

prioridade sobre os demais veículos e a interseção apresentando boa visibilidade aos motoristas. Para estas condições, pressupõe-se um tráfego transversal entre 1000 e 2000 uvp diários.

b) Tipo 2 - com semáforo atuado pelo VLT, em interseções que apresentam problemas de visibilidade para os motoristas dos demais veículos. Os volumes diários do tráfego transversal devem ser superiores a 2000 uvp.

c) Tipo 3 - com semáforo (atuado ou não pelo VLT, dependendo das condições gerais do tráfego na interseção no momento de passagem do VLT). Prevalece em interseções que apresentam volumes diários entre 8000 e 10000 uvp.

A lógica da sinalização é apresentada por Glayre (1987). No que trata do cruzamento tipo 3, o VLT é detectado por um sensor colocado sobre a via a aproximadamente 200 m antes da interseção. No momento da detecção, um pedido de prioridade pode ser classificado como demanda prioritária ao VLT (DPVLT) ou demanda não-prioritária ao VLT (DNPVLT). A seleção é feita em função das condições momentâneas. A diferença entre uma DPVLT e uma DNPVLT está no intervalo em que circulam dois VLT sucessivos. Se este intervalo é pequeno, o primeiro receberá uma DPVLT e o segundo uma DNPVLT. Isto acontece pois o programa que controla o semáforo só permite a passagem de um VLT por vez e exige um intervalo mínimo em torno de 30 s entre dois verdes consecutivos para o VLT. Este processo foi introduzido para regular o espaçamento entre VLT sucessivos na linha.

Uma DPVLT faz com que o programa verifique se existe uma fase aberta (luz verde) incompatível com a circulação do VLT. Se esse for o caso, o programa de controle espera a(s) outra(s) fase(s) atingir(em) o tempo mínimo de verde e é dado, em seguida, o direito de passagem para o VLT. No caso contrário, o direito de passagem é dado imediatamente ao VLT. Uma DNPVLT faz com que o programa de controle espere pelo intervalo mínimo de 30 segundos para iniciar a mesma lógica descrita anteriormente para uma DPVLT. Após a passagem do VLT, o programa de controle ajusta os tempos de verde retirados das outras fases para o VLT, aumentando o tempo do ciclo seguinte.

### 3. A LINHA SUL DO V.L.T.

A linha Sul é uma das mais carregadas do sistema. Sua demanda anual de passageiros passou de 17,6 milhões, em 1986, para 23,3 milhões em 1990. A principal contribuição para este aumento deu-se pelo crescimento da integração ônibus-VLT que ficou por volta de 10% ao ano, em contraposição à evolução de 6% do tráfego global na área de influência da linha Sul. Estima-se um carregamento médio diário de 74000 pass, sendo que destes, em torno de 7500 pass/h viajam durante as horas de ponta (da manhã e da tarde, onde a da manhã é ligeiramente mais carregada que a da tarde). Na hora de ponta da manhã, a taxa de ocupação no sentido bairro-centro é de 90% enquanto que no sentido contrário ela fica em torno de 19%. Durante as horas fora de ponta a taxa de ocupação é de 23%.

Esta linha que liga a periferia Sul ao Leste, passando pelo centro da cidade, tem uma extensão total de 9,5 km e 12 estações. Além

corredor submetido à operação ora de ônibus, ora de VLT. Dentre as modificações realizadas ressalta-se:

- a) a introdução de velocidades desejadas por trecho dado que o VLT tem limitações de velocidades impostas pelo trilho que funciona como guia e onde o contato roda-trilho determina, em casos como trechos com curvas de pequeno raio, as velocidades máximas que podem ser desenvolvidas. Ademais, geralmente nos sistemas VLT, ao contrário dos sistemas ônibus, a velocidade máxima que pode ser desenvolvida em um trecho tende a respeitar as condições de segurança impostas pela interface, em trechos sem direito exclusivo de circulação, tanto com pedestres como com outros veículos.
- b) a possibilidade de gerar o tempo morto nas estações a partir de uma distribuição dos mesmos (modificação sendo incorporada).
- c) a atuação semafórica, pois a forma anterior (com tempos de ciclo, fases e defasagens fixas) tende a ser utilizada em corredores de ônibus com alto fluxo mas não em situações de baixo fluxo de veículos, característica de sistemas VLT. A atuação semafórica inserida no BUSWAY é do tipo individual, sendo que o seu princípio de funcionamento permite incorporar a lógica da DPVLT/DNPVLT vigente no sistema sobre trilhos de Tunis.

BUSWAY tende a representar a operação de uma determinada alternativa (combinação de condições geométricas e operacionais para ônibus ou VLT trafegando em corredores exclusivos) durante o período de uma hora. A partir de um volume pré-estabelecido, para todos os veículos que entram no sistema, BUSWAY determina, com base em funções probabilísticas, suas características de desempenho (velocidade desejada, aceleração inicial, posição no comboio, etc) necessárias para simular o comportamento individual de cada veículo a cada segundo.

Além disto, BUSWAY reavalia, também a cada intervalo de um segundo, os tempos semafóricos, a inter-relação entre os veículos que circulam, as condições de embarque e desembarque de passageiros nas estações, etc.

## 5. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE BUSWAY PARA O V.L.T. DE TUNIS

O processo de calibração consta da realização de ajustes em parâmetros do BUSWAY de forma que ele possa representar, com a maior precisão possível, a realidade. Para tanto, foi selecionado um trecho de 450 m entre uma estação e um semáforo da linha Sul do VLT. Este trecho foi dividido em 8 pontos de coleta nos quais uma equipe de 9 pessoas levantou o tempo de passagem de cada VLT durante o período de uma hora consecutiva, no pico da manhã. Os cinco primeiros pontos ficaram, partindo da estação, a um intervalamento de 20 m, o sexto ponto foi colocado na metade do trecho e os outros dois pontos restantes no final, próximos ao semáforo, separados também a uma distância de 20 m. Um dos pesquisadores ficou na estação levantando os tempos de chegada e saída de cada veículo. Os dados coletados em campo foram tabulados e posteriormente digitados.

Durante o processo de calibragem BUSWAY foi configurado para

Em BUSWAY, os tempos de permanência nas estações são determinados a partir do número de usuários que embarcam e desembarcam no VLT, dos tempos médios gastos pelos passageiros nestas operações e dos tempos mortos. Uma comparação dos tempos estimados pelo modelo com aqueles obtidos ao longo de 8 estações na linha Sul revelaram que, em média, os valores simulados (50,75 s) se aproximam dos realizados (48,35 s).

O processo de validação constou da simulação de um trecho da linha Sul, entre Ouardia e Barcelone, compreendendo uma distância de 6 km, 8 estações e 3 semáforos. O período representado foi o do pico da manhã, com os veículos sendo inseridos na simulação a intervalos de 4 minutos.

A simulação, baseou-se nas seguintes hipóteses:

- a) os tempos mortos nas estações foram fixados como 20 segundos.
- b) as velocidades desejadas para cada VLT foram obtidas a partir de uma só distribuição de velocidades desejadas, apesar da variabilidade destes valores em função da geometria de alguns trechos da extensão simulada, onde curvas de pequeno raio limitam a velocidade que os veículos podem desenvolver. O valor médio da velocidade desejada, dos quais foi selecionada a velocidade desejada individual de cada VLT, equivale à velocidade média ponderada derivada de seis levantamentos taquimétricos efetuados ao longo da via.
- c) o tempo médio de passagem de um passageiro pela porta mais carregada foi fixado em 3 segundos e o número de passageiros envolvidos na operação de embarque e desembarque nesta porta, para cada estação, foi estimado a partir de uma matriz de O/D fornecida pela SMLT.

Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 1.

TABELA 1: Comparaçāo entre simulação (BUSWAY) e observaçāo (TUNIS)

	OBSERVAÇÃO		SIMULAÇÃO	
	média	d.padrão	média	d.padrão
velocidade comercial (km/h)	16,6	2,2	16,6	0,4
tempo total nas est. (s)	386,8	212,9	406	29,8
tempo médio nas est. (s)	48,3	26,6	50,7	3,7
tempo de percurso (s)	1231,4	166,2	1153,8	25,7
tempo nos semáforos (s)	45,6	18,2	0	0

De uma forma geral, com base nos resultados apresentados na tabela 1, infere-se que BUSWAY é capaz de representar bem a operação do trecho de via simulado.

As diferenças localizam-se na maior dispersão dos valores observados quando confrontados com a dispersão dos valores simulados. Entretanto, na média, os resultados são muito próximos. A menor variabilidade dos valores simulados resulta da utilização

Representação: tempo médio de passagem de um passageiro pela porta do VLT

Unidade = s

nível baixo = 1,5 s (supondo melhorias nas paradas)

nível alto = 3,0 s (realizado atualmente)

Fator5 = "tmor"

Representação: tempo morto na estação, i.e., o tempo gasto na abertura e fechamento das portas nas paradas.

Unidade = s

nível baixo = 11 s (valor mínimo observado em campo)

nível alto = 50 s (mais representativo que o max. obser. de 240s)

O projeto de experimentos não contemplou repetições, pois assumiu-se que os resultados fornecidos por cada execução do BUSWAY, ao longo de uma hora de simulação, com vários VLT circulando, geraria um valor médio de velocidade comercial representativo das condições simuladas. Para as várias combinações possíveis dos fatores, obteve-se velocidades comerciais que variaram entre um mínimo de 10,3 e um máximo de 20,9 km/h.

Durante todas as simulações, a demanda de passageiros nas estações permaneceu constante. Assim, por exemplo, quando 'flux' passava de 15 a 20 VLT/h, reduzia-se, automaticamente, o número médio de passageiros embarcando por veículo nas estações. Processo similar, porém inverso, ocorria quando se reduzia o comprimento dos VLT de 60 (composição com 2 veículos) para 30 m (VLT com 1 veículo).

Os resultados alcançados ao término do primeiro projeto de experimentos estão descritos no grafico 1.

Os resultados revelam que somente as interações de ordem inferior e igual a um têm influência sobre a velocidade comercial. O gráfico de Pareto ordena os fatores conforme sua importância relativa. A análise estatística demonstrou que as interações AC e CD não são significativas a um nível de 99%.

Quanto maior o valor absoluto do resultado, tanto maior o impacto do fator (ou combinação de fatores) sobre a velocidade comercial. Um sinal positivo indica que, ao passar do nível baixo para o alto; há um aumento na velocidade comercial; um sinal negativo indica que, ao passar do nível baixo para o alto, há uma redução na velocidade comercial. Por exemplo, o efeito de 'tmor' foi estimado como -3,46. Isto implica que, ao se passar 'tmor' de 11 para 50 s, a velocidade comercial sofrerá uma redução de 3,46 km/h.

O fator que apresentou o maior impacto sobre a velocidade comercial foi justamente o tempo morto nas estações. O fluxo horário apresenta impacto proporcionalmente pequeno sobre a velocidade comercial. Este impacto é, inclusive, de sinal positivo (aumentando o fluxo, aumenta a velocidade comercial), e a justificativa para tal é que, ao manter-se a demanda inalterada, uma maior quantidade de VLT circulando fará com que um número menor de passageiros embarque por veículo e, assim, os VLT permanecem menos tempo nas estações. Como este incremento no fluxo ainda resulta uma condição operacional bem abaixo da capacidade viária, a velocidade comercial do sistema simulado aumenta.

## 8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem os auxílios providos pelo CNPq, CAPES, Conselho Britânico e Conseil Régional du Nord-Lille, em diferentes estágios de realização deste trabalho e do desenvolvimento de BUSWAY.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEGUE, H. (1993) Le métro léger de Tunis: 7 ans après la première mise en service. Proceedings CODATU VI, Tunisia, VIII, 21-30.
- BALTAGI, A. (1989) Evaluation du projet du métro léger de tunis. In: Institution of Civil Engineers, 'Rail mass transit for developing countries'. Thomas Telford, London.
- BELHARETH, T. (1984) Le transport collectif dans les grandes villes tunisiennes. Thèse de 3e cycle, Université de Tunis I, 308 pg.
- BOUKHRIS, T. et KUHN F. (1993) L'intégration d'un métro léger dans un réseau de transports collectifs d'une métropole. Proceedings CODATU VI, Tunisia, VIII, 73-76.
- CARN, A.(1992), Les systèmes de priorité aux feux pour le transports en commun. CETUR-Centre d'Etudes des Transports Urbain, Paris, 10 pg.
- CETUR (1986) Prise en compte des transports en commun. Groupe de Travail-Regulation du Trafic, Paris, 89 pg.
- GLAYRE, P.(1987) Régulation des conflits rail-route sur le métro léger de Tunis, TEC, 81, Paris, 29-34.
- GONÇALVES, A.F.M. (1993) O financiamento dos transportes urbanos: a implantação de VLT's no Brasil. Comunicações técnicas - resumos do 9 Congresso Nacional de Transportes Públicos. ANTP, Florianópolis, 152-156.
- GIPPS, P.G. (1981) A behavioural car-following model for computer simulation. Transportation Research, 15B, 105-111.
- KUHN, F. (1992) Les Transports collectifs de Tunis : le métro léger. Rapport no. 92.148, INRETS-CRESTA, Villeneuve d'Ascq, 24pg.
- KRUG, W. (1986) Die Realisierung des Stadtbahnprojektes Tunis. Der Stadtverkehr, 2, 8-18.
- LINDAU, L.A. (1983) High-flow bus operation on urban arterial roads. Ph.D. thesis, Faculty of Engineering and Applied Sciences. University of Southampton, England.
- LINDAU, L.A. (1988a) Planning and operating urban transport with emphasis to light rail: report of a short visit to continental europe. Transport Studies Group, University College London, 11