MONOTRILHO – UMA OPÇÃO DE TRANSPORTE PÚBLICO PARA A REGIÃO METROPOLITANA DA GRANDE VITÓRIA

Uarlem Jose de Faria Oliveira
uarlem@gmail.com
Rodrigo de Alvarenga Rosa D. Sc.
rodrigo.rosa@ifes.edu.br
Leandro Colombi Resendo
leandro@ifes.edu.br
Luciano Lessa Lorenzoni
lllorenzoni@ifes.edu.br

IFES – Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Estado do Espírito Santo
Cariacica – Espírito Santo

RESUMO

Este artigo apresenta o problema de mobilidade urbana na Região Metropolitana da Grande Vitória no Estado do Espírito Santo, onde no momento atual, estão sendo discutidas novas opções para complementar, o já saturado sistema de transporte público baseado em ônibus. Neste contexto, o sistema de monotrilho está sendo considerado por diversas cidades que estão passando pelo mesmo problema, devido as suas características técnicas como flexibilidade de construção, boa capacidade de transporte e baixo custo de implantação se comparado com o sistema metroviário. O objetivo deste artigo é descrever os problemas de mobilidade urbana no Brasil, descrever as características técnicas do sistema monotrilho, assim como propor linhas de monotrilho ligando os dois principais terminais de ônibus urbanos da região estudada com apoio de técnicas de otimização do fluxo máximo em redes e determinação do caminho mínimo pelo algoritmo de Dijkstra.

PALAVRAS CHAVE: Monotrilho. Mobilidade urbana. Otimização de fluxo máximo em rede. Área de Interesse: Logística & Transportes

ABSTRACT

This paper features the urban mobility problem at Grande Vitória Metropolitan Region in Espírito Santo State where new alternatives have been analyzed in order to improve the already crowded transportation system by bus. In this context a monorail system has been taken into account by several cities that have similar problems due to their technical characteristics, including building flexibility, good capacity and low costs compared to subway system. The purpose of this article is to assess Brazil's urban mobility, as well as to outline the main technical characteristics of monorail system and finally to propose monorail lines between the two main urban bus stations within the above mentioned region, whose main approach takes into account operational research techniques of max network flow optimization and Dijkstra's algorithm's.

KEYWORDS: Monorail. Urban Mobility. Max network flow optimization. Main Area: Logistics & transport.

1. Introdução

Após 20 anos sem investimentos significativos, e com a certeza de que o sistema atual de transportes públicos chegará em breve a um colapso provocado pela falta de infraestrutura, os gestores públicos, tanto municipais quanto estaduais da Região Metropolitana da Grande Vitória (GV) vêm estudando alternativas ao atual sistema de transporte público, hoje exclusivamente oferecido por meio de ônibus que apesar de algumas melhorias ocorridas nos últimos anos não estão atendendo adequadamente às demandas da população local.

Dados do Instituto Jones dos Santos Neves (IJSN, 2010) e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) mostram que o Estado do Espírito Santo vem apresentando crescimento econômico de 1,5 a 2% acima da média nacional, fato esse que tanto impulsiona positivamente o estado, como também está promovendo um rápido inchaço na infraestrutura de transportes das cidades que compõem a região metropolitana da capital. Esse inchaço possui três origens bem definidas: 1-Grande migração de pessoas de outros estados para trabalharem direta ou indiretamente nas grandes empresas que se instalaram na região nos últimos 20 anos; 2-Elevação da frota de veículos em aproximadamente 150% no estado e de impressionantes 407% na capital, Vitória, nos últimos 10 anos, conforme dados do Departamento Estadual de Trânsito (DETRAN-ES, 2010), decorrente principalmente da elevação da renda e do crédito ocorrida no mesmo período e 3-Falta de investimentos públicos que suportem a elevação da frota de veículos e que promovam uma migração dos usuários do transporte individual para o público.

Em relação à falta de investimentos públicos nos sistemas de transporte da Grande Vitória, ela não só prejudica a mobilidade urbana na região, como também desestimula o uso do sistema de transporte coletivo promovendo assim uma migração dos usuários para meios individuais como motocicletas e automóveis prejudicando ainda mais toda a malha rodoviária da região.

Vária solução em sistemas de transporte público vem sendo discutidas ao longo dos últimos anos para a região, porém a discussão está direcionada especialmente para dois sistemas em especial: corredores exclusivos para ônibus, conhecidos na literatura como VLP (Veículos Leves sobre Pneus) ou BRT (do inglês Bus Rapid Transit) e VLT (Veículo Leve sobre Trilhos), porém conforme Vasconcellos (2000), um sistema de transporte deve ser tratado como um dos meios para melhoria da mobilidade urbana e não uma solução em si, assim, uma avaliação mais ampla do problema deve ser realizada.

Vem ganhando espaço entre os sistemas de transporte sobre trilhos o sistema conhecido como Monotrilho, uma vez que seus custos de implantação e impactos sobre as vias urbanas são comprovadamente mais baixos do que de outros sistemas sobre trilhos, além de ser uma alternativa estrategicamente mais viável do que os corredores de ônibus, conforme descreve Alouche (2007), principalmente se pensado para atender demandas em longo prazo.

Como o funcionamento do Monotrilho segue os mesmos princípios de um sistema de Metrô, este pode ser modelado adequadamente usando as mesmas técnicas, entre elas, modelos de maximização de fluxo em rede para avaliar se o sistema proposto possui capacidade para atender as demandas das regiões. Outro modelo que pode ser utilizado é um algoritmo de avaliação do trajeto mínimo como o algoritmo de Dijkstra que visa obter os caminhos mínimos dentro de uma rede.

A análise do sistema monotrilho como uma opção para a mobilidade urbana na Grande Vitória, assim como a análise por meio de métodos quantitativos das opções propostas para implantação deste sistema são relevantes sob a ótica da logística urbana. Assim, por essa contextualização, a utilização de um sistema monotrilho possui viabilidade técnica e capacidade para melhorar a mobilidade urbana na Grande Vitória? A partir dessa pergunta de pesquisa, este artigo buscou avaliar as características técnicas do sistema monotrilho e propor uma linha troncal ligando os dois principais terminais de ônibus urbanos da Grande Vitória.

Os objetivos específicos desta pesquisa foram: demonstrar o sistema monotrilho, fazer uma

proposta de uma rede de monotrilhos com base em demanda e restrições técnicas e avaliar por meio de modelos de otimização por grafos qual seria o melhor trajeto para apoio à tomada de decisão para um projeto de investimento de grande porte.

2. Metodologia de Pesquisa

A pesquisa se constituiu de três partes: a primeira foi uma revisão bibliográfica sobre o sistema monotrilho e mobilidade urbana, a segunda foi a proposição de linhas de monotrilho integrada a linhas de corredores exclusivos para ônibus com base na análise de dados de demanda fornecidos pela Companhia de Transportes Urbanos da Grande Vitória (Ceturb-GV) e, por fim, foi feita uma avaliação das linhas propostas via modelo de otimização por grafos a fim de verificar se as linhas são as soluções mais adequadas com base em custos e demanda.

A pesquisa foi realizada entre outubro de 2009 a abril de 2010, período em que foram utilizadas duas técnicas de pesquisa operacional para análises iniciais, sendo elas, as técnicas de maximização de fluxo em uma rede e a técnica de definição de caminho mínimo pelo algoritmo de Dijkstra.

3. Mobilidade urbana no Brasil e no Mundo

A mobilidade urbana é um conceito que tardiamente vem sendo discutido no Brasil. Apesar do atraso de um século em relação às nações desenvolvidas, o conceito de mobilidade urbana ganhou maior destaque desde 2007 por meio do projeto de lei 1687-2007 (BRASIL, projeto de lei 1687-2007), que institui as diretrizes da política de mobilidade urbana, que possui como principais princípios o acesso universal, o desenvolvimento sustentável das cidades, a equilidade no acesso dos cidadãos ao transporte público, a qualidade deste transporte, a transparência e a participação social no planejamento e controle da política de mobilidade urbana.

O artigo 6º deste projeto de lei também possui como principais orientações: a integração das políticas de uso do solo e desenvolvimento urbano; prioridade dos meios não-motorizados e do transporte público sobre os motorizados e individuais; complementaridade entre os meios de mobilidade urbana e os serviços de transporte urbano; mitigação dos custos ambientais, sociais e econômicos dos deslocamentos de pessoas e bens na cidade; incentivo ao desenvolvimento científico-tecnológico e ao uso de energias renováveis e não-poluentes e a priorização de projetos de transporte coletivo estruturadores do território e indutores do desenvolvimento urbano integrado.

Infelizmente, o papel e a realidade são bem diferentes. O estado brasileiro negligenciou por muitos anos a mobilidade urbana em que a preocupação sobre esse tema passou a ser somente relevante com a quase completa obsolescência dos sistemas de mobilidade e transporte público e após anos de uso descontrolado do solo conforme descreve Vasconcellos (2000).

Um ponto de discussão é o modelo de financiamento dos sistemas de transporte público. O modelo europeu defendido por autores como Bayliss (1992), Santos e Orrico et al. (1996) é que os sistemas de transporte público devam ser altamente regulados e subsidiados pelo estado a fim de prover um sistema que, além de eficaz, deve ter qualidade e conforto para atrair os usuários de veículos individuais. O modelo europeu prevê também benefícios aos usuários frequentes (por meio de tarifas mais baratas) e desestimulo ao uso de veículos automotores individuais por meio de tarifas mais elevadas para os usuários eventuais, aplicação de pedágios urbanos e proibição da circulação de automóveis em determinados locais das cidades e em dias específicos.

4. Monotrilho

A Monorail Society (2010) define monotrilho como um tipo de veículo leve sobre trilho (VLT) que possui como principal característica a circulação por um único trilho ao contrário dos sistemas ferroviários tradicionais que circulam por dois trilhos.

Outra característica dos monotrilhos é que em sua grande maioria as vias circulantes são construídas de forma elevada apesar de não haver grandes restrições técnicas que impeçam que

sejam construídos ao nível do solo ou em vias subterrâneas. A figura 1 demonstra a diferença entre um sistema monotrilho e ferroviário tradicional.

Figura 1: exemplo de um típico monotrilho (esquerda) e um VLT clássico que circula em dois trilhos. Fonte: Monorail Society (2010)

Kennedy (2007) define como principais vantagens dos sistemas monotrilho: 1-adaptabilidade aos espaços urbanos, 2-reduzida interferência nos sistemas viários existentes por usar em grande parte os espaços de canteiros centrais das avenidas e calçadas; 3-baixo nível de ruído (aproximadamente 65 dB); 4-maior capacidade de subir e descer rampas com gradientes de até 15%; 5-maior capacidade de curva do que os sistemas ferroviários tradicionais com raios de curva que variam entre 60 a 100m; 6-menor risco de descarrilamento do que os sistemas tradicionais de dois trilhos em função dos carros "abraçarem" as vias circulantes; 7-menor impacto sobre a paisagem urbana do que elevados tradicionais rodoviários ou ferroviários; 8-tempo de implantação reduzido se comparado a VLT e metrô; 9-reduzida emissão de carbono por serem normalmente elétricos; 10-baixo risco de acidentes por não terem como sofrerem impactos com veículos automotores e pessoas; 11-vida média dos carros e via circulante (com manutenção apropriada) maior do que de ônibus (30 anos contra 10 anos dos ônibus); 12-os custos de implantação de sistema monotrilho são em média 50% inferiores a implantação de metrô e podem se tornar equiparados à implantação de sistemas VLT e corredores de ônibus em função da baixa necessidade de desapropriações.

Ide (2008) informa como principais desvantagens: 1-o maior impacto sobre a paisagem urbana se comparado a sistemas de metrô subterrâneos, VLT/BRT de superfície; 2-normalmente possuem um maior custo inicial de implantação e das instalações se comparado aos sistemas VLT e BRT; 3-menor velocidade final se comparado ao metrô; 4-maiores dificuldades quanto à evacuação dos veículos; 5-maiores dificuldades para troca de linhas do que os sistemas tradicionais.

Os trilhos guias dos monotrilhos modernos podem ser de vários tipos. As figuras 2 e 3 mostram os tipos mais comuns de trilhos e monotrilhos atualmente utilizados, porém em função dos menores custos de implantação, manutenção e operação há grande predominância dos monotrilhos em vigas de concreto armado e tração dos carros com uso de pneus que elevam o atrito e reduzem o ruído. A figura 4 mostra as principais características de um carro de monotrilho moderno.

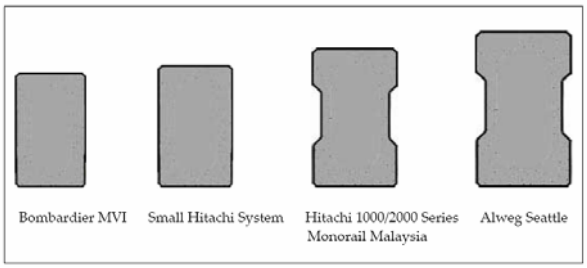

Figura 2: Comparação dos trilhos guia da via circulante dos sistemas de monotrilhos mais comuns atualmente utilizados. Fonte: Monorail Society (2010)

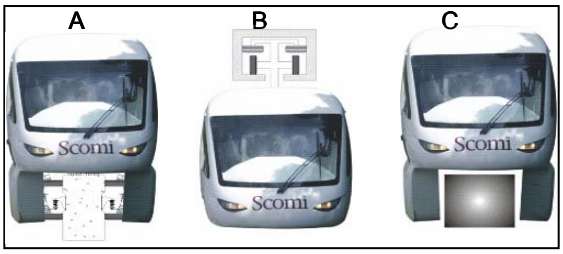

Figura 3: Exemplo de alguns tipos de monotrilho. A- do tipo Stadle Beam (viga em concreto pré moldado), B – Suspenso Invertido e C – Levitação Magnética. Fonte: Scomi Rail Co (2010)

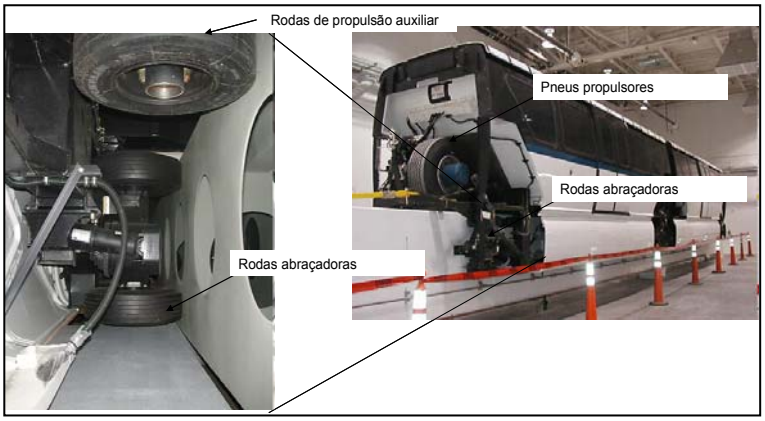

Figura 4: Detalhes de como os carros são presos as vigas de rolamento no sistema monotrilho do tipo Alweg (o tipo mais utilizado). Fonte: Bombardier Transportation (2010)

A Monorail Society (2010) também ressalta o menor impacto na paisagem visual das cidades e os menores custos construtivos das vias elevadas do que de sistemas ferroviários tradicionais ou elevados rodoviários A figura 5 faz um comparativo entre um típico elevado de monotrilho e um elevado ferroviário tradicional. A figura 6 mostra exemplos de monotrilho no mundo.

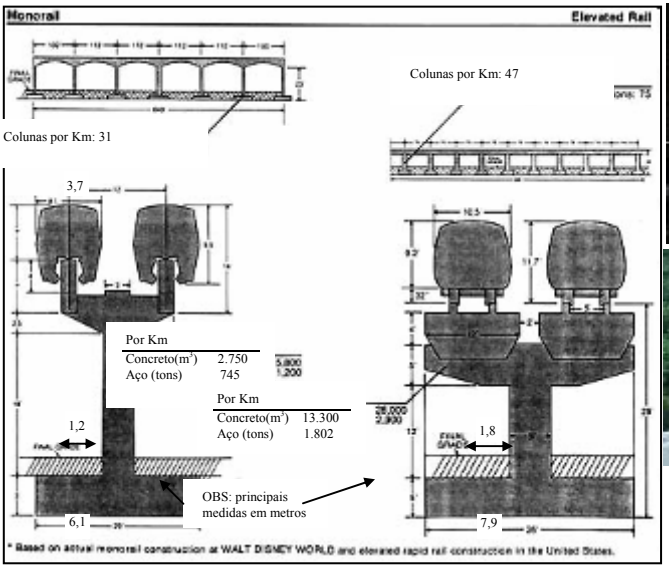

Figura 5: comparativo entre um elevado de monotrilho e um elevado ferroviário, demonstrado o menor espaço horizontal necessário e a menor necessidade de concreto e aço para sua construção. Fonte: Monorail Society (2010)

Figura 6: exemplos de monotrilhos no mundo. A - monotrilho de Sidney (Austrália). B - monotrilho de Kuala Lumpur (Malásia). Fonte: Monorail Society (2010)

Outros comparativos entre as características técnicas dos principais sistemas de transporte público concorrentes são mostrados conforme tabela 1.

Tabela 1 – Comparativa das características técnicas dos principais sistemas de transporte público concorrentes do monotrilho

CARACTERISTICA	BRT (BUS RAPID TRANSIT) CORREDORES DE ÔNIBUS	VLT (VEÍCULO LEVE SOBRE TRILHOS)	MONOTRILHO	METRÔ
Custo médio de implantação (US$/km)	15 a 40	20 a 50	40 a 70	80 a 120
Capacidade típica de transporte (mil passageiroas/ hora)	2 a 15	3 a 40	3 a 60	25 a 80
Velocidade média (km/h)	25 a 60	25 a 40	40 a 60	40 a 90
Ruído (db)	70 a 90	60 a 80	60 a 80	75 a 100
Conforto	Menor conforto (sofre com interferências de freadas e semaforos)	Conforto médio (sofre com a interferência de semáforos e trânsito)	Maior conforto (para somente em estações, menor tempo de trajeto, passageiro pode apreciar a paisagem)	Maior conforto (para somente em estações, menor tempo de trajeto)
Interferência no trânsito	Alta	Alta	Mínima (se elevado)	Mínimo (se subterrâneo)
Custo previsto em desapropriação	Elevado	Elevado	Baixo	Médio
Interferência durante construção	Elevada	Elevada	Média	Baixa
Capacidade de atrair usuários do transporte individual	Baixa	Média	Alta	Alta
Relação emissão de carbono/ passageiro transportado	Alta	Média	Baixa	Baixa

Fonte: adaptado de Kennedy (2007) e Alouche (2007)

5. Métodos Quantitativos Aplicados a Redes de Transporte Público

A Pesquisa Operacional é um ramo da matemática aplicada que faz uso de modelos matemáticos, estatísticos e de algoritmos na ajuda à tomada de decisões e resolução de problemas complexos, como descrevem autores como Lachtermacher (2009), Hillier e Lieberman (1995), tendo sua importância elevada a partir da 2ª Grande Guerra.

Inúmeras técnicas foram desenvolvidas pelas diversas áreas da pesquisa operacional. Tais técnicas, especialmente podem ser aplicadas na tomada de decisão de problemas de transporte.

Para o foco da pesquisa realizada, foram estudados, inicialmente, 2 métodos quantitativos clássicos para resolução de problemas de transporte em redes para auxílio na tomada de decisão quanto ao melhor trajeto a ser adotado para a linha de monotrilho proposta: resolução de problemas de fluxo máximo e técnicas para determinação de caminho mínimo.

No caso de problemas de determinação de fluxo máximo, a análise da visualização da rede de transporte com apoio de uso de representação de grafos é de grande importância para entendimento de parte do problema, como descreve Schulz (1999).

A figura 7 mostra um exemplo de problema de maximização do fluxo em uma rede representando na forma de um grafo.

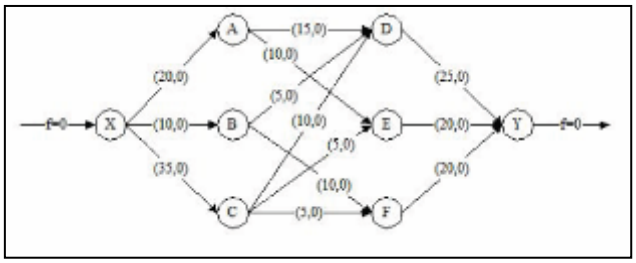

Figura 7: exemplo de um grafo orientado representando uma rede de distribuição com origem no nó "x" e origem no nó "y". Fonte: adaptado de Oliveira (2001)

Diversas técnicas podem ser utilizadas para resolução de problemas de fluxo máximo em redes. Uma das formas de se resolver problemas para encontrar o fluxo máximo em uma rede é criar um

arco artificial entre os nós de destino e origem, sendo assim, a função objetivo será a maximização do fluxo no arco artificial. O modelo da figura 8 e o algoritmo da tabela 2 a seguir foram adaptados de Lachtermacher (2009).

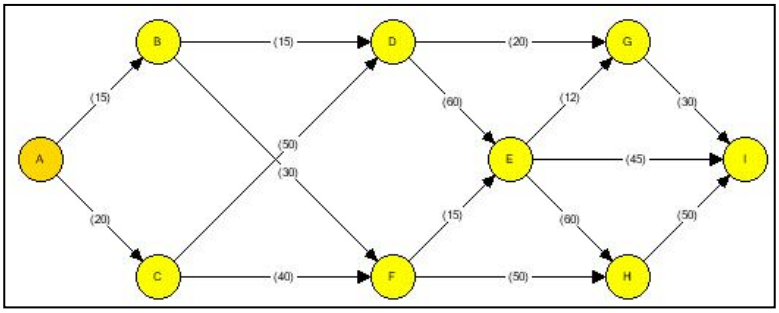

Figura 8: exemplo de grafo com arco artificial que representa o fluxo máximo que pode ser transmitido na rede entre a origem (A) e destino (I). Fonte: adaptado de Lachtermacher (2009)

Tabela 2 – Modelo de Maximização do Fluxo em rede

Modelo		Sujeito a:	Detalhes
Variáveis de decisão	xij -fluxo que passa no arco (i, j), de i para j cij - capacidade do capacidade (i, j) Nó A - Nó de oritem Nó I - Nó de destino	$\sum_j x_{1k} = \sum_j x_{kj}, \forall_k$	restrição de equilíbrio de fluxos nos nós (todo fluxo que chega ao nó + o fluxo gerado no nó = todo fluxo que sai do nó mais + o fluxo que é consumido no nó.
Função objetivo	$\max \quad x_{IA}$	$x_{ij} \leq c_{ij}, \forall_{i,j}$ $x_{ij} \geq 0, \forall_{i,j}$	restrições de capacidade entre os arcos (o fluxo no arco deve ser menor que a capacidade do ar e todo fluxo no arco deve ser maior ou igual a zero).

Fonte: adaptado de Lachtermacher (2009)

Uma adaptação do modelo é a adição do que se considera "transbordo" ao fluxo da rede. O transbordo é definido como a demanda gerada no nó e a demanda que deixa a rede neste mesmo nó.

Essa técnica é apenas uma das diversas formas possíveis para resolução destes problemas que podem ser resolvidos também aplicando outros métodos de solução, inclusive mais precisos e complexos.

Outra técnica de otimização para problemas de decisão em redes e que é muito utilizada em problemas de transporte é a definição do caminho mínimo a ser percorrido. Essa determinação é importante para os administradores públicos e de empresas de transporte a fim de se decidir qual o menor caminho a ser percorrido em uma rede, normalmente a fim de minimizar os custos de distribuição e de construção de transporte ligando duas regiões. Uma técnica para resolução desses problemas é o conhecido algoritmo de Dijkstra. Conforme Peyer et. al. (2009), o algoritmo de Dijkstra é o mais famoso dos algoritmos para cálculo de caminho de custo mínimo entre vértices de um grafo e na prática, o mais empregado.

Uma representação simplificada do algoritmo é mostrada na tabela 3, adaptado de Peyer et al. (2009), onde ao final do algoritmo retornará o menor caminho entre "s" e qualquer outro vértice de G.

Tabela 3 – Descrição simplificada do Algoritmo de Dijkstra

	1º passo	2º passo	3º passo
Descrição	Iniciar os valores	Utilizam-se dois conjuntos: *S*, que representa todos os vértices v onde d[v] já contem o custo do menor caminho e *Q* que contem todos os outros vértices.	é utilizado uma série de relaxamentos das arestas
Código	para todo v □ V[G] d[v]← ∞ π[v] ← nulo d[s] ← 0		enquanto Q ≠ ø u ← extraia-mín(Q) S ← S □ {u} para cada v adjacente a u se d[v] > d[u] + w(u, v) //relaxe (u, v) então d[v] ← d[u] + w(u, v) π[v] ← u
Detalhes	V[G] é o conjunto de vértices(v) que formam o Grafo G. d[v] é o vetor de distâncias de s até cada v. Admitindo-se a pior estimativa possível, o caminho infinito. π[v] identifica o vértice de onde se origina uma conexão até v de maneira a formar um caminho mínimo.		w(u, v) é o peso (weight) da aresta que vai de u a v. u e v são vértices quaisquer e s é o vértice inicial.

Fonte: Adaptado de Peyer et al. (2009)

6. Estudo de caso

O estudo de caso proposto faz parte de uma pesquisa de viabilidade técnica para instalação de um sistema do tipo monotrilho na Região Metropolitana da Grande Vitória no Espírito Santo.

A Região Metropolitana da Grande Vitória é compreendida por 6 cidades, sendo elas: Vitória (a capital do estado), Vila Velha, Serra, Cariacica, Viana, Guarapari e Fundão com uma população de 1.686.045 conforme o IBGE (2009) corresponde a 46% de toda a população do estado. Analisando as 4 principais cidades (Vitória, Vila Velha, Serra e Cariacica) a população atual é de 1.504,251 (IBGE, 2009).

Assim como muitas outras regiões metropolitanas no Brasil, a Grande Vitória vem apresentando constantes problemas de congestionamentos. Um fato peculiar à Grande Vitória é que a capital é uma ilha com poucos acessos e com poucas possibilidades de criação de novas vias para corredores de ônibus ou VLT sem que haja grandes custos de desapropriação, daí parte a ideia de pesquisa do sistema monotrilho pelas suas características técnicas que minimizam as desapropriações e evitam a segregação das já saturadas vias da cidade para criação de corredores de ônibus.

Partiu-se então para a proposição de uma rede de monotrilhos ligando os extremos da capital entre o Terminal de Jardim América (na cidade de Cariacica) e entre o Terminal de Carapina (na cidade de Serra) pelo fato de esses locais apresentarem os maiores fluxos registrados por meio de dados estatísticos fornecidos pela Ceturb-GV no período de janeiro a dezembro de 2009. O Grafo da figura 9 mostra a rede proposta.

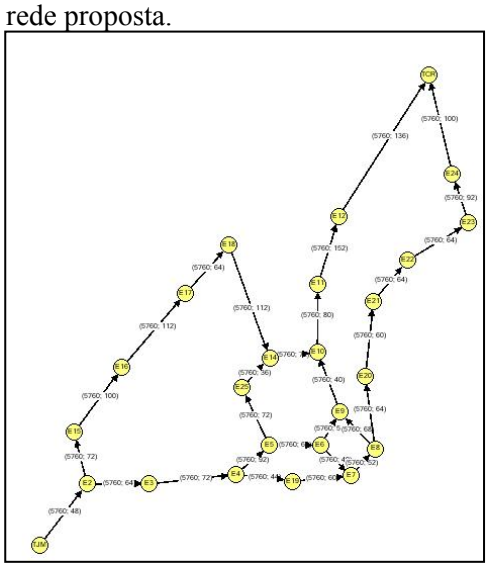

Figura 9: rede proposta de monotrilhos na Grande Vitória

Como os custos construtivos de um sistema de grande porte como o monotrilho são elevados, a criação de uma grande rede atendendo a toda cidade de Vitória seria um projeto demasiadamente elevado para os cofres públicos, assim sendo, o que se passou a avaliar por meio dos modelos de otimização estudados é, qual seria o melhor trajeto a ser implantado, ligando os terminais de Jardim América ao Terminal de Carapina a fim de implantar uma linha que atenda as maiores demandas e com o menor custo possível?

Cada nó representa uma estação onde ocorrem os transbordos (entrada e saída de passageiros) e os arcos representam os caminhos candidatos, primeiramente para a simplificação da análise adotou-se um grafo simplificado correspondente ao grafo da proposta inicial. Neste caso específico, soma-se aos nós que ligam os trechos resumidos as demandas de entrada e saída, assim como se soma os valores de custo dos trechos ao arco resultante a fim de se manter a correspondência entre o grafo completo e o simplificado. Para fim de simplificação do modelo, a análise foi considerada como um grafo unidimensional, considerando-se que tanto o fluxo máximo reverso e o custo são os mesmo em ambas as direções. A tabela 2 mostra os dados da rede de monotrilho proposta. Os dados de pessoas que entram em saem das estações foram analisados conforme dados coletados pela Ceturb-GV (2010), onde se agrupou os dados de entrada e saída dos pontos de ônibus das atuais linhas que seriam substituídas pela rede de monotrilho nos bairros onde se planejam implantar as estações.

Apesar da restrição de que todos os fluxos devam ser positivos, poderão ocorrer fluxos negativos na rede o que significa em termos práticos um arco na qual a oferta não atendeu a demanda no arco, assim para este caso o número de carros de monotrilho é insuficiente para atender à demanda naquele trecho.

Tabela 2 – Definição dos nós e arcos da rede de monotrilho proposta assim como distancias e custos

Nó origem	Nó destino	Tabela de distancias	Distancia (km)	Custo (milhões US$)	Estação	Entram (a pé/ônibus)	Saem (a pé/ônibus)
TJA	E2	T. Jardim america - Rodoviária:	1,2	48	TJA	6900	2500
E2	E3	Rodoviária - Centro	1,6	64	E2	3650	430
E2	E15	Rodoviária - Santo Antônio	1,8	72	E4	1390	2220
E3	E4	Centro - Terminal Dom Bosco	1,8	72	E14	1460	1240
E15	E16	Santo Antônio - Estrelinha	2,5	100	E5	870	1590
E4	E5	Dom Bosco - Ifes/Faesa	2,3	92	E6	2300	2820
E4	E25	Dom Bosco - Praça de Maruípe	2,9	116	E7	1110	1030
E16	E17	Estrelinha - São Pedro	2,8	112	E8	2980	2760
E17	E18	São Pedro - Resistência	1,6	64	E9	1100	2650
E18	E14	Resistência - Quartel da PM	2,8	112	E10	3040	3640
E25	E14	Praça de Maruípe - Quartel da PM	0,9	36	TCR	4300	4320
E5	E6	Ifes-Faesa - Av. Cesar Hilal	1,6	64			
E4	E19	Dom Bosco - Prefeitura	1,1	44			
E6	E7	Av. Cesar Hilal - Praça do Papa-Hortomercado	1	40			
E19	E7	Prefeitura - Praça do Papa-Hortomercado	1,5	60			
E14	E10	Quartel da PM - Av. Reta da Penha 2	1,8	72			
E7	E8	Praça do Papa - Shopping-Assembleia	1,3	52			
E6	E9	Av. Cesar Hilal - Reta da Penha 1	1,4	56			
E8	E9	Shopping-Assembleia - Av. Reta da Penha 1	1,7	68			
E9	E10	Av. Reta da Penha 1 - Av. Reta da Penha 2	1	40			
E8	E20	Shopping-Assembleia - Praça dos Namorados	1,6	64			
E20	E21	Praça dos Namorados - Praia de Camburi 1	1,5	60			
E10	E11	Av. Reta da Penha 2 - Ufes	2	80			
E21	E22	Praia de Camburi 1 - Praia de Camburi 2	1,6	64			
E11	E12	Ufes - Praça de Goiabeiras	3,8	152			
E22	E23	Praia de Camburi 2 - Praia de Camburi 3	1,6	64			
E23	E24	Praia de Camburi 3 - Jardim Camburi(Shopping NS)	2,3	92			
E12	TCR	Praça de Goiabeiras - Terminal de Carapina	3,4	136			
E24	TCR	Jardim Camburi - Terminal de Carapina	2,5	100			
Km total da malha e custo total			54,9	2196			

Para as análises rodando o algoritmo de maximização de fluxo foram utilizados os dados conforme a tabela 3, utilizando três variações possíveis para o monotrilho. A opção de composições de monotrilho com 3 vagões não foi aleatória, ela foi baseada na maior capacidade de curva que este tipo de composição possui em relação a monotrilhos com mais composições o que a torna tecnicamente mais viável para as condições viárias da cidade de Vitória, na qual necessita de trechos com curvas de até 75º em um raio de aproximadamente 60 metros.

Tabela 3 – Opções de monotrilho utilizadas no algoritmo de fluxo máximo com transbordo

Capacidade máxima: monotrilho de 3 vagões	1 composição a cada 5 minutos	1 composição a cada 4 minutos	1 composição a cada 3 minutos
384 pass	12 composições/h máx 4608 pass/sentido	15 composições/h máx 5760 pass/sentido	20 composições/h máx 7680 pass/sentido

Obtido os resultados de rota com fluxo máximo de passageiros, foi realizada a análise de custos por meio do algoritmo de Dijkstra. No caso estudado, a distância entre os nós representa o custo de construção daquele trecho em específico e os resultados de distância mínima foram confrontados com os resultados de fluxo máximo para a tomada de decisão.

7. Resultados

Os resultados obtidos das análises realizadas com o algoritmo de fluxo máximo foram feitos com o auxílio do Microsoft Excel® 2003 e por meio do Lingo® 11.0, os resultados do algoritmo de Dijkstra foram obtidos a partir do software Grafos 1.2.9 (Villalobos, 2009). Estes softwares fazem com que a modelagem seja feita com base no desenho dos grafos ou na inserção de tabelas e linhas de código, facilitando o trabalho de modelagem e cálculo. A figura 10 mostra um exemplo de tela do software Lingo® 11.0 e Grafos 1.2.9.

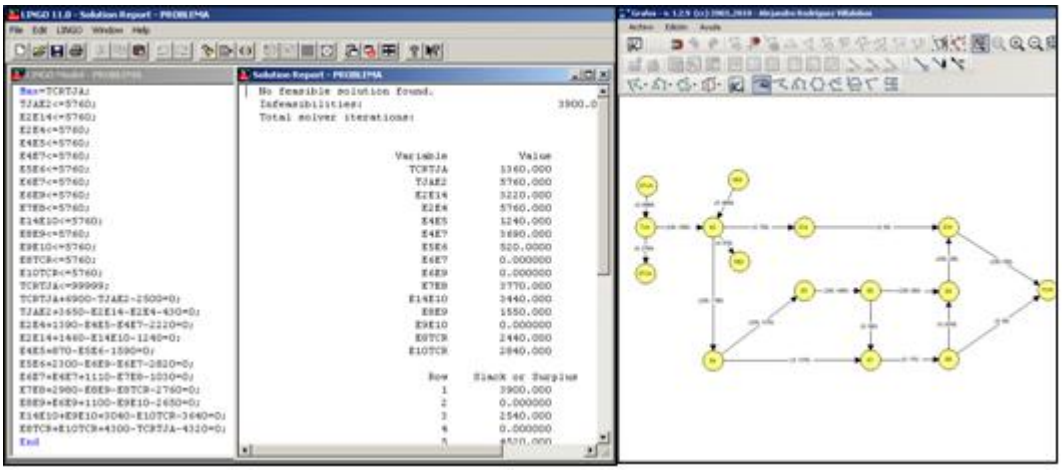

Figura 10: Tela dos softwares Lingo® (esquerda) e do Grafos (direita). Todos os direitos reservados

O modelo proposto para análise do fluxo máximo não encontrou uma solução ótima. Analisando os dados de resposta dos cenários e opções propostas, a melhor solução obtida foi a da utilização de 15 composições a cada 4 minutos o que resulta em uma capacidade máxima de transporte de 5760 passageiros/hora/sentido, uma vez que essa solução permite o atendimento do maior número de rotas e com boa distribuição dos excessos de oferta e demanda e ocupação dos veículos, onde o fluxo máximo resultante ao fim das interações foi 1360 passageiros/hora o que é interpretado como um excesso de capacidade resultante após o fim do trajeto - o que dá uma boa margem para crescimento da demanda no trajeto. A opção de uma composição a cada 5 minutos (4608 passageiros/hora/sentido) apresentou grande número de arcos com fluxo negativo (demanda menor que a oferta) enquanto a opção por composições a cada 3 minutos (7680 passageiros/hora/sentido) possibilita o atendimento a duas linhas, apesar de apresentarem grande capacidade residual, não sendo uma opção financeiramente viável para a demanda atual.

Como resultado do modelo de fluxo máximo, a rota definida pela análise dos resultados é demonstrada conforme figura 11. Vale lembrar que o software de modelagem interrompeu o processo após a 14 interação por não encontrar uma solução ótima.

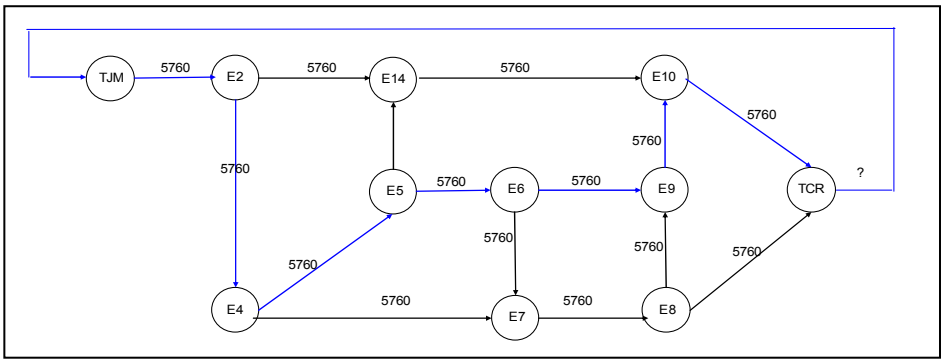

Figura 11: Rota que maximiza o fluxo de passageiros conforme modelo proposto. O arco que liga o nó TCR ao nó TJM é um arco virtual utilizado para resolução do problema

Usando o algoritmo de Dijkstra no programa Grafos 1.2.9 (Villalobos. 2009) com os custos da tabela 2 foi obtido um custo total de US$ 784 milhões, que é o menor custo possível para ligar os terminais de Jardim América ao de Carapina conforme as rotas pré-definidas. A figura 11 mostra o grafo com o caminho mínimo projetado pelo algoritmo gerou.

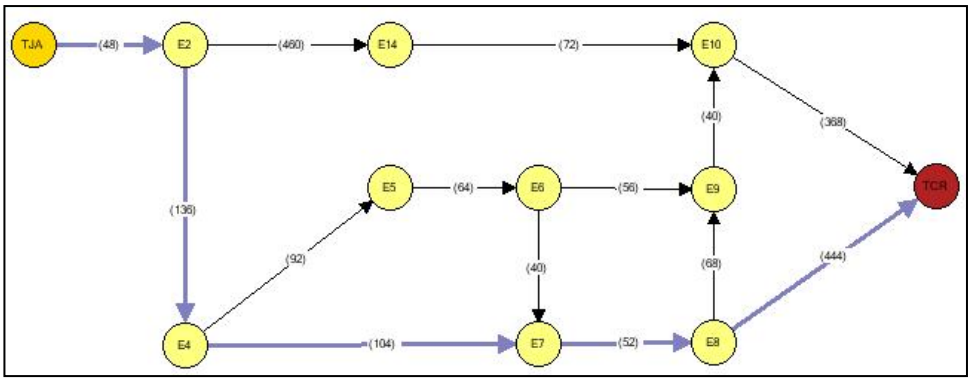

Figura 12: resultado do caminho mínimo calculado pelo algoritmo de Dijkstra

Como pode ser observado nas figuras 10 e 11, as duas rotas propostas não são iguais. Assim sendo, outras técnicas de otimização devem ser utilizadas para melhorar os resultados obtidos e dar maior base para a tomada de decisão, em especial, uma opção que melhor atenda à questão entre atendimento a maior demanda possível versus menor custo de construção.

8. Conclusões

O sistema monotrilho, em uma primeira análise, parece ser tecnicamente viável como uma opção logística para melhorar a mobilidade urbana na região da Grande Vitória.

O modelo de otimização do fluxo máximo não encontrou uma solução ótima para os dados da rede de monotrilho proposta, porém, pela análise dos dados obtidos, observou-se que quanto ao ponto de vista de capacidade, composições com 3 vagões a cada 4 minutos atendem suficientemente bem aos picos de demanda do sistema de transporte público atual, porém o atendimento desta demanda não está em conjunto com a opção menos onerosa para construção de uma linha ligando os dois terminais urbanos, onde, de qualquer forma, os resultados obtidos servem como base inicial para novos estudos no sentido de apoiar na decisão sobre a melhor rota a ser construída.

Outros modelos quantitativos que se utilizem de técnicas mais apuradas devem ser utilizados na continuidade dos estudos, a fim de se obterem resultados mais precisos, uma vez que projetos de grande porte como o proposto por este trabalho, não só afetam a vida de milhares de pessoas da região metropolitana estudada, mas também representam grandes aportes financeiros do poder público.

Referências

Alejandro Rodrigues Villalobos. Grafos. Version: 1.2.9. 2010. Programa eletrônico.
Alouche, L. P. Corredores urbanos de transporte para altas demandas. Trabalho apresentado no Seminário: Soluções Integradas de Transporte, Porto Alegre, 2007. Disponível em: http://www.cbtu.gov.br/eventos/serie/portoalegre/tendencias.pdf. Acesso em: 17 set, 2009.
Bayliss, B. Transport Policy and Planning – an integrated analytical framework. *Development Institute of the World Bank*, Washington, D.C. 68 p, 1992.
Bombardier Transportation. Disponível em < http://www.bombardier.com/en/transportation>. Acesso em: 06 out, 2009.
Brasil. Projeto de lei 1687-2007. Institui as diretrizes da política de mobilidade urbana e dá outras providências. **Ministério das Cidades**. Brasília. Disponível em: http://www.cidades.gov.br/secretarias-nacionais/transporte-e-mobilidade/projeto-de-lei-da-mobilidade-urbana. Acesso em: 17 set, 2009.
CETURB-GV - Companhia de Transportes Urbanos da Grande Vitória. Disponível em: < http://www.ceturb.es.gov.br/>. Acesso em: 16 abr, 2010.
DETRAN-ES – Departamento Estadual de Transito do Estado do Espírito Santo. Estatística de Veículos 2009. Disponível em: http://www.detran.es.gov.br/_conteudo/2010/03/1081-veiculos++2009.html. Acesso em: 06 abr, 2010.
Edmonds, J; Karp, R. Theoretical Improvements in Algorithmic Efficiency for Network Flow Problems, *National Bureau of Standards, Washington D. C. and University of California, Berkeley*. P 31 – 33, 2003.
Hillier, F; Lieberman, G. Introduction to Operations Research. 6ª ed. New York: McGraw Hill, Inc. 1995, 998 p.
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. PIB Brasileiro 2009. Brasília. Disponível em: http://www.ibge.gov.br. Acesso em: 06 abr, 2010.
Ide, **A.** The monorail alternative. *New Australian*, 18 p, 2008.
IJSN - Instituto Jones dos Santos Neves. PIB Trimestral do Espírito Santo 2009-4. Vitória. Disponível em: http://www.ijsn.es.gov.br/pib_estadual.asp. Acesso em: 06 abr, 2010.
Kennedy, R. R. Considering monorail rapid transit for north american cities. *The Monorail Society*, 41 p, 2007.
Lachtermacher, G. Pesquisa operacional na tomada de decisões, São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009, 220p.
Lindo Systems Inc. Lingo. Version: 11.0. 2008. Programa eletrônico.
Orrico, F. F; R. D. et al. (1996). Regulamentação do transporte por ônibus: elementos do debate teórico. In: Orrico Filho et al. Ônibus Urbano: Regulamentação e Mercados. L. G. E., Brasília.
Peyer, S; Rautenbach, D; Vygen, J. A generalization of Dijkstra's shortest path algorithm with applications to VLSI routing, *Journal of Discrete Algorithms,* Vol. 7, nº 4, p 377 – 390, 2009.
Schulz, F. Wagner, D; Weihe, K. Dijkstra's algorithm on-line: an empirical case study from public railroad transport, *Springer-Verlag,* Berlin, p 110 – 123, 1999.
Monorail Society. Disponível em <http://www.monorails.org>. Acesso em: 04 mar, 2010.
Scomi Rail Corporation. Disponível em < http://www.scomirail.com>. Acesso em: 08 abr, 2010.
Vasconcellos, E. A. Transporte urbano nos países em desenvolvimento – reflexões e propostas. São Paulo: Annablume, 2000, 284 p.