

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE APOIO AO USUÁRIO DE UM SISTEMA DE TRANSPORTE COLETIVO

Daniel Jorge Caetano

Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Nicolau D. Fares Gualda

Departamento de Engenharia de Transportes
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RESUMO

Este trabalho apresenta resultados de uma pesquisa de mestrado que objetivou o desenvolvimento de um sistema informatizado para o auxílio na escolha modal pelos usuários de transporte público. As alternativas a considerar e soluções geradas devem se basear nas informações fornecidas pelo usuário quanto à origem e ao destino da viagem pretendida. As consultas realizadas são armazenadas e poderão ser usadas para o planejamento tático e/ou estratégico do sistema de transporte considerado. Este problema multimodal foi modelado para solução através do algoritmo de fluxo em rede *Label Correcting* e implementado em uma linguagem de programação orientada a objetos. O sistema foi concebido para utilização pela *internet*. Embora direcionado para um sistema de transporte genérico, foi implementado e testado com base nas alternativas disponíveis e na malha viária da Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira (Campus da Universidade de São Paulo).

ABSTRACT

This work presents results of a master of science research aimed at developing an informatized system to help public transport users to choose among modal alternatives. The alternatives to be considered and the generated solutions are based on the user requests related to origin and destination of the desired trip. The requests are stored and can be used for tactic and/or strategic planning of the concerned system of transport. This multimodal problem was modeled to be solved with the *Label Correcting* network flow algorithm and implemented using an object oriented programming language. The system has been conceived to be utilized through internet. Although addressed to a generic transport system, it has been implemented and tested based on the available transport alternatives and street mesh of the Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira (Campus of the University of Sao Paulo).

1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento dos grandes conglomerados humanos, houve a necessidade de um aumento na disponibilidade de alternativas de transporte. Tal aumento nem sempre ocorreu de forma ordenada, constituindo sistemas viários complexos, como aqueles existentes hoje em cidades como São Paulo (Camargo, 1993), com muitas opções distintas de transporte, sejam elas públicas ou privadas.

Embora a grande oferta de opções de transporte seja positiva com relação à acessibilidade, o crescimento do transporte particular tem se revertido em complexos problemas para o sistema de transporte como um todo (Marques, 1998). Por outro lado, o crescimento da oferta de opções de transporte público, sem um sistema de informações adequado, acaba por confundir o usuário que, sem conhecimento sobre a totalidade das opções de transporte público (Timpf, 2002), pode vir a utilizar este sistema de uma forma ineficiente, fazendo com o que o transporte público perca sua função original (Gray, 1975 apud Strambi, 1991), tornando ainda mais atrativa uma migração para os modos particulares de transporte.

O presente trabalho apresenta um sistema de informações ao usuário de transporte coletivo automatizado como uma ferramenta para atenuar os problemas de transporte das grandes cidades, auxiliando os usuários na escolha da melhor alternativa de transporte coletivo disponível, mitigando os problemas decorrentes da falta de informação sobre a operação do sistema de transporte e seus impactos em termos de custos e níveis de serviço para o usuário.

Além deste nível operacional, onde tal sistema se apresenta como um complemento a medidas de ampliação de malha e opções de transporte, propiciando que o usuário utilize tal sistema de transporte de forma mais eficiente e eficaz, o sistema também pode ser utilizado para decisões de nível tático e estratégico pelo poder público. Tal característica se deve ao fato do sistema registrar as consultas dos usuários, podendo vir a fornecer subsídios para a otimização do sistema de transportes como um todo.

2. METODOLOGIA

O desenvolvimento da pesquisa envolveu diversas áreas do conhecimento, nas quais o conhecimento foi aprofundado de acordo com as necessidades. As etapas da pesquisa e implementação do sistema foram:

- *Pesquisa sobre aspectos gerais do problema e o problema na literatura*, visando uma compreensão do problema a ser resolvido e sua importância na sociedade, bem como soluções já existentes.
- *Pesquisa sobre fluxo em rede e caminho mínimo*, pretendendo obter subsídios para a identificação da melhor rota a ser oferecida ao usuário como alternativa.
- *Pesquisa sobre percepção de qualidade pelo usuário*, objetivando a compreensão das características desejáveis e não desejáveis para o sistema de transporte, bem como compreender a quantificação de tais características.
- *Pesquisa sobre projeto e arquitetura de sistemas e banco de dados*, visando embasar as decisões relativas à estruturação do sistema de *software* como um todo.
- *Projeto do sistema e seus requisitos de funcionamento*, definindo precisamente o sistema a ser implementado.
- *Implementação do sistema e validação*, aplicando o conhecimento obtido para a implementação prática do sistema de informações, verificando se este atende aos requisitos propostos.

2.1. Modelagem do problema

Através da revisão bibliográfica, foi possível perceber que o problema de encontrar a melhor rota para um usuário em uma dada malha de transportes pode ser enquadrado na categoria de problemas de caminho mínimo. Ainda que este tipo de problema possa ser solucionado por técnicas de programação linear como o método *Simplex*, segundo vários autores (Bradley, 1977; Gallo e Palotino, 1984; Giacaglia, 1993) tais problemas também podem ser tratados com sucesso através dos métodos de resolução de problemas de fluxo em rede, que tirem proveito de suas características específicas. Esta última alternativa foi adotada para a modelagem, baseada em conceitos apresentados em diversos trabalhos (Gualda, 1975; Giacaglia, 1993; Silva, 2001), com possibilidade de geração de arcos durante a solução.

2.1.1. Seleção do algoritmo

Para a solução de problemas de fluxo em rede, além do clássico método *Simplex*, foram avaliados algoritmos como o *Network Simplex* (Bradley et al., 1977; Chvatal, 1983; Winston, 1994), método *Out-of-Kilter* (Gualda, 1975; Silva, 2001), *Label Setting* e *Label Correcting* (Bradley et al., 1977, Gallo e Palotino, 1984; Winston, 1994), sendo estes dois últimos variações do algoritmo de Dijkstra (Gallo e Palotino, 1984).

Os algoritmos *Network Simplex* e *Out-of-Kilter*, apesar de serem capazes de resolver o problema, são voltados a problemas mais complexos que o de encontrar um caminho mínimo entre dois pontos. O *Network Simplex* é voltado a problemas com limitações de fluxo nos

arcos, além de tratar problemas de múltiplas fontes e múltiplos sorvedouros. O *Out-of-Kilter* pode ser usado para tratar problemas de características similares aos do *Network Simplex*, mas sua principal utilização é voltada a resolver problemas de circulação.

Por tratarem de problemas mais complexos, tais algoritmos apresentam um desempenho computacional inferior ao tratar de problemas simples de caminho mínimo entre dois pontos, quando confrontados com algoritmos desenvolvidos especificamente para resolver este tipo de problema, como o algoritmo de Dijkstra. Entretanto, nem todas as variações do algoritmo de Dijkstra se prestam a resolução de problemas de caminho mínimo em redes genéricas. A variação conhecida como *Label Setting* tem restrições com relação à existência de ciclos na rede. Entretanto, o algoritmo *Label Correcting* elimina tal restrição, tornando-o o mais atrativo para a presente implementação.

2.1.2. O algoritmo *Label Correcting*

A variação do algoritmo *Label Correcting* implementada pode ser descrita conforme o seguinte algoritmo:

1. Cria-se uma etiqueta em todos os nós, indicando a distância acumulada "0" e "-1" como o nó antecessor. Indica-se também em todas as etiquetas que seus sucessores não precisam ser calculados, com o valor "0".
2. Marca-se o nó 0 (origem) como sendo antecessor de si próprio, indicando "0" em sua etiqueta, distância total acumulada "0" e indicando que este nó precisa ter seus sucessores calculados, indicando "1" na etiqueta.
3. Dentre todos os nós marcados para que seus sucessores sejam calculados, seleciona-se aquele que tem menor distância acumulada. Se não houver qualquer nó com indicação de recálculo de sucessores, fim do processo.
4. Para o nó selecionado, calcula-se a distância total acumulada para todos os nós sucessores deste, sendo esta distância a soma da distância total acumulada até o nó atual com o comprimento do arco que liga este nó ao referido sucessor.
5. Caso o nó sucessor não tenha ainda sido etiquetado com um antecessor ou ainda que a nova distância seja inferior à anteriormente indicada na etiqueta do sucessor, indica-se no nó sucessor a nova distância acumulada, o novo nó antecessor e também se deve indicar que seus descendentes precisam ser recalculados.
6. Voltar ao passo 3.

Embora ligeiramente mais complexo que o *Label Setting*, este algoritmo resolve problemas inclusive em redes com ciclos, ainda que isso provoque um aumento significativo na quantidade de cálculos necessários para a obtenção da solução. Entretanto, na ausência de ciclos, seu desempenho é bastante similar ao do algoritmo *Label Setting*.

Uma outra característica positiva deste algoritmo é que ele permite que novos nós e arcos sejam adicionados na rede, aproveitando-se o resultado da rede já calculada. Para tanto, basta marcar todos os *nós originais* aos quais serão ligados novos arcos de saída para que haja recálculo de seus nós descendentes.

2.1.3. A modelagem da rede

Com base nas necessidades do algoritmo *Label Setting*, definiu-se que a rede chamada *básica* deve representar todos os movimentos possíveis na malha viária, para veículos e deslocamentos a pé, sendo constituída de arcos unidirecionais, utilizando-se de duplas de

arcos quando necessário representar deslocamentos em ambos os sentidos entre dois nós. Cada ponto de entrada e saída da rede básica é representado por um desses nós, bem como os pontos onde pode haver transição entre diferentes modos de transporte.

Entretanto, a utilização de uma rede simples, com representação dos vários modos de transporte como atributos distintos de um mesmo arco da rede, pode trazer alguns problemas. Tais problemas podem ser solucionados pela utilização de um algoritmo de análise preditiva (Horn, 2003) ou com a utilização de redes paralelas, uma para cada modo de transporte, com arcos fictícios de transição entre os modos de transporte interligando-as, técnica esta baseada em soluções adotadas em alguns dos trabalhos pesquisados (Gualda, 1975; Silva, 2001).

Um exemplo do resultado deste tipo de modelagem pode ser visto na Figura 1, onde as principais avenidas e rua da Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira foram modeladas, juntamente com os trajetos dos ônibus circulares, além das conexões entre estas redes, arcos fictícios que representam o custo de espera pelos circulares, custo de transbordo, etc. Esta foi a modelagem selecionada para este trabalho, com as distâncias referentes aos deslocamentos representados pelos arcos associados a atributos dos mesmos.

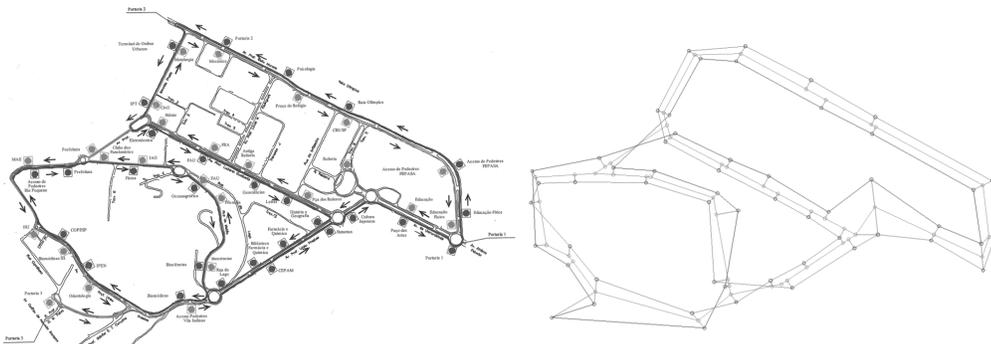


Figura 1: Representação em rede do sistema de transportes da Cidade Universitária (Fonte: LPT-EPUSP)

2.1.4. *Percepção do usuário e Custo Generalizado*

Ainda que a modelagem apresentada seja suficiente para a obtenção de soluções para o problema, apenas ela não garante que as soluções encontradas sejam efetivamente as melhores sob o ponto de vista do usuário. Isto ocorre porque existe diferença entre as medidas físicas que podem ser feitas para a avaliação de uma viagem - como distância, tempo e custo - e a real percepção do usuário com relação a esta mesma viagem (Faria, 1985, 1991).

O conceito de percepção do usuário envolve como cada indivíduo considera fatores ligados ao tempo de viagem (tempo de espera, tempo total de viagem, etc.), ao desempenho do sistema (velocidade média, transferências, etc.) e ao seu próprio conforto (ventilação, acomodações, etc.) (Faria, 1985). Tais considerações são de difícil mensuração, mas é possível estimar quantitativamente a influência destes fatores em valores facilmente mensuráveis, como tempo ou custo financeiro de viagem. Esta possibilidade abre espaço para que se possa avaliar a qualidade e o nível de serviço de um determinado modo de transporte ou de uma determinada viagem, sob o ponto de vista do usuário (Faria, 1985, 1991).

A mensuração da influência destes fatores é feita por meio de pesquisas de opinião, nas quais são determinados coeficientes de uma função que representa a percepção do usuário com

relação a uma dada viagem ou modo de transporte, denominada função de Custo Generalizado (Faria, 1985, 1991; Giacaglia, 1993).

Entretanto, para que coeficientes possam ser aplicados a valores medidos, é necessário que tais valores estejam definidos em cada uma das etapas da viagem. Duas medidas diretas que podem ser obtidas de uma viagem são seu custo financeiro e sua duração. Entretanto, apesar de algumas das etapas de uma viagem possuírem um custo financeiro bem definido, há outras (como a espera por um determinado modo de transporte) que não necessariamente o possuem. Por outro lado, todas as etapas da viagem demandam um certo intervalo de tempo e, por esta razão, é comum a utilização do conceito de Tempo Generalizado com uma posterior conversão para Custo Generalizado, através de um fator expresso em unidade financeira por unidade de tempo, que representa o “valor do tempo” para o usuário.

A soma do Tempo Generalizado de cada um dos trechos de uma viagem constitui o Tempo Total Generalizado de Viagem, sendo esta uma medida que pode ser usada como comparação relativa de soluções diferentes, para uma viagem entre dois pontos, sob o ponto de vista do usuário. A Equação 1 é uma equação típica de avaliação de Tempo Total Generalizado de Viagem que, quando tem sua parcela de custos financeiros (desembolso) desprezada, também é chamado de *tempo percebido*. A Equação 2 converte o Tempo Total Generalizado de Viagem para Custo Total Generalizado de Viagem.

$$TTGV = fc \cdot \sum_i TC_i + fe \cdot \sum_j TE_j + fv \cdot \sum_k TV_k + pt \cdot NT + \frac{fd}{CT} \cdot \sum_l CF_l \quad (1)$$

Onde: TTVG: Tempo total generalizado de viagem (em segundos)

fc: Fator de caminhada (usualmente 1 a 2)

TC_i: Tempo da caminhada i (em segundos)

fe: Fator de espera (usualmente 2 a 3)

TE_j: Tempo da espera j (em segundos)

fv: Fator de deslocamento em veículo (usualmente 1)

TV_k: Tempo da viagem k (em segundos)

pt: Penalidade temporal de transbordo (em segundos)

NT: Número de transbordos

CT: Custo financeiro por unidade de tempo (em \$ por segundo)

fd: Fator de desembolso (usualmente 1)

CF_l: Custo financeiro do trecho de viagem l (em \$)

$$CTGV = TTGV \cdot CT \quad (2)$$

Onde: CTGV: Custo total generalizado de viagem (em \$)

TTGV: Tempo total generalizado de viagem (em segundos)

CT: Custo financeiro por unidade de tempo (em \$ por segundo)

Uma vez que em uma rede multimodal cada arco representa um trecho de viagem em um determinado modo de transporte, a resolução de um caminho mínimo nesta rede, considerando funções deste tipo para o cálculo do custo de cada caminho considerado, é possível determinar um trajeto que se aproxime bastante daquele que seria o considerado como *ideal* sob o ponto de vista do usuário.

2.2. Implementação do sistema de informações ao usuário

Uma vez definido o método de resolução do problema de caminho mínimo, ainda resta definir como as informações devem ser apresentadas para o usuário final e como este terá acesso a elas, bem como estas informações poderão estar disponíveis ao poder público.

2.2.1. Requisitos do sistema

Para um projeto de sistema, é fundamental definir explicitamente quais são seus requisitos, para que seja possível avaliar se o sistema atingiu seus objetivos que, neste caso, são os de informar ao usuário satisfatoriamente e de criar condições de avaliação do sistema. Assim, os requisitos de sistema definidos foram:

- *Ser rápido* para possibilitar a consulta em *tempo real*. Um tempo de resposta de até 10s, após o término da coleta de dados com o usuário, foi adotado como aceitável.
- *Possibilitar a geração de várias alternativas de trajeto*, permitindo ao usuário escolher a que melhor se adapta às suas necessidades.
- *Fornecer trajetos num formato simples*, que contenham as informações necessárias para a realização dos transbordos nos locais adequados.
- *Fornecer informações de apoio à decisão do usuário*, como o tempo da viagem, etc.
- *Estar disponível*, ou seja, é preciso que o sistema seja acessível, por meio de serviços de *internet*, quiosques, celulares etc.
- *Ser de operação simples* para maximizar o número de usuários que possam se beneficiar do mesmo.
- *Registrar as buscas e escolhas realizadas pelos usuários*, para que tais dados possam ser utilizados futuramente.
- *Ser expansível*, para possibilitar a criação de módulos adicionais, como busca personalizada, etc.

2.2.2. Estruturação global do sistema

Em busca da máxima disponibilidade pelo menor custo, foi adotado neste trabalho a utilização da *internet* como principal meio de acesso ao sistema, uma vez que esta é uma mídia interativa de alta disponibilidade e em expansão, sendo acessível através de computadores, telefones celulares, *videogames*, etc.

Uma vez adotada a forma de *web service* para o sistema, uma implementação cliente-servidor do tipo *multi-tier* se torna interessante. Neste tipo de implementação, temos um determinado serviço sendo executado em diferentes unidades de processamento, cada uma melhor adaptada à sua função específica, sendo a comunicação entre elas feita por meio da rede. Este tipo de implementação melhora a eficiência computacional e reduz os custos, na medida em que reduz a sub-utilização dos equipamentos.

De acordo com a função de cada uma destas unidades, foram definidos quatro módulos lógicos: um Servidor de Informações, um Servidor de Cálculo, um Servidor *Web* e o Terminal de Consulta. As interações entre eles podem ser verificadas na Figura 2, em que as setas indicam a direção de circulação de dados.

2.2.3. Servidor de Informações

O Servidor de Informações tem com função prover os dados necessários para o funcionamento dos outros módulos. Trata-se de um servidor de banco de dados que armazena todas as informações sobre o arruamento e logradouros, modos de transporte disponíveis, etc.

Este módulo também é responsável pela troca de informações entre o Servidor de Cálculo e o Servidor *Web*, armazenando as informações das consultas para posterior utilização pelos órgãos gestores do sistema de transporte.

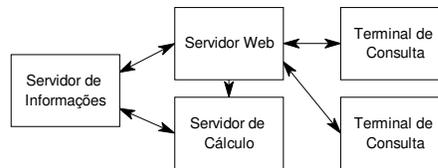


Figura 2: Arquitetura do sistema

Para a implementação deste trabalho, o sistema gerenciador de banco de dados (SGBD) escolhido foi o MySQL, pela sua facilidade de operação e interação com o C/C++ e linguagens de interface do Servidor *Web*. Também tornou-se importante nesta escolha o fato de este ser um produto *open source*, de uso livre para fins não comerciais, bem como sua compatibilidade com o padrão ANSI-SQL, garantindo a portabilidade de informações para outros SGBDs no futuro, se necessário.

2.2.4. Servidor de Cálculo

O Servidor de Cálculo é o módulo onde efetivamente o problema de caminho mínimo é resolvido, baseado nos dados fornecidos pelo Servidor de Informações, quando solicitado pelo Servidor *Web*. Sendo este o módulo que demanda maior capacidade de processamento, o ideal é que ele tenha seu próprio conjunto de equipamentos (desde um único equipamento até um *cluster*), entretanto na implementação deste trabalho, por simplicidade, ele será executado no mesmo equipamento que o Servidor *Web*, atuando como um aplicativo auxiliar.

O software do Servidor de Cálculo foi desenvolvido em linguagem C++, utilizando-se de recursos de orientação a objetos em sua implementação. Sua estrutura de funcionamento pode ser verificada no fluxograma da Figura 3, onde são apresentadas, de forma simplificada, as etapas de operação do servidor, para cada requisição. Vale ressaltar que o aplicativo em questão construirá toda a rede a cada requisição de solução, algo considerado ineficiente para grandes redes, tendo sido implementado desta maneira por simplicidade.

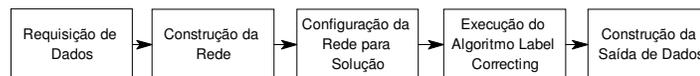


Figura 3: Fluxograma de operação do Servidor de Cálculo

Primeiramente o Servidor de Cálculo requisita ao Servidor de Informações as informações necessárias à construção da rede, utilizando-as em seguida em tal construção, conforme a modelagem apresentada anteriormente. A seguir são solicitados ao Servidor de Informações os parâmetros de configuração fornecidos pelo usuário (origem, destino, modos de transporte desejados, etc.), a rede é configurada com tais informações e o algoritmo *Label Correcting* é executado. Finalmente, a solução é armazenada no Servidor de Informações.

2.2.5. Servidor Web

O Servidor *Web* tem como principal função realizar a comunicação entre os Terminais de Consulta e os Servidores de Cálculo e Informações, além de converter as solicitações do

usuário em parâmetros para configuração do Servidor de Cálculo, bem como converter a solução fornecida pelo Servidor de Cálculo em uma forma de fácil compreensão pelo usuário.

Na implementação realizada, foi utilizado o Apache *Web Server* para administrar as conexões, em conjunção com o módulo de linguagem PHP para realizar as operações de conversão necessárias. Seu funcionamento é bastante simples: o servidor fica em regime de espera, aguardando uma conexão. Quando uma conexão ocorre, ele recebe as informações, processando-as e, em seguida, fornece as informações pertinentes ao usuário.

A interface com o usuário do Servidor Web, programada em PHP, foi modelada como uma máquina de estados finitos (MEF) de três estados, como indicado na figura 4.

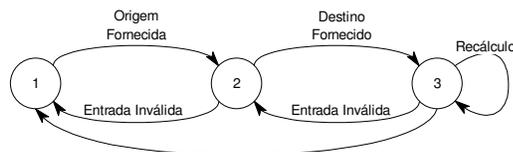


Figura 4: Diagrama de operação da interface com o usuário

- 1- *Estado Sem Origem e Sem Destino:* o sistema deve apresentar um mapa e solicitar que o usuário aponte no mapa (clique) qual é a origem de sua viagem.
- 2- *Estado Com Origem e Sem Destino:* o sistema deve apresentar o mesmo mapa, agora com a origem da viagem assinalada, e solicitar que o usuário indique (clique) o destino de sua viagem.
- 3- *Estado Com Origem e Com Destino:* o sistema deve apresentar a solução no mapa, indicando os modos de transporte a serem utilizados em cada trecho, bem como informações como tempo de percurso e descrição textual do trajeto.

Em todos os três estados deve ser possível ao usuário modificar as opções de modos de transporte disponíveis para o cálculo, permitindo que o usuário tenha a liberdade de escolher quais são os modos que prefere utilizar em sua viagem.

2.2.6. Terminal de Consulta

Uma vez que o meio de comunicação para a utilização do serviço é a *internet*, com o desenvolvimento da interface com o usuário baseado em um Servidor *Web*, o Terminal de Consulta pode ser o mais genérico possível.

Acredita-se que qualquer equipamento atual, capaz de ser conectado à *internet* e acessar à *world wide web*, seja capaz de utilizar o sistema. Uma vez que a interface proposta é do tipo “apontar e clicar”, basta que o usuário possua condições de ler e identificar locais em um mapa para poder utilizar o sistema com sucesso.

3. APLICAÇÃO E RESULTADOS

Realizada a implementação descrita anteriormente, o sistema foi testado. Como plataforma de testes foi selecionado o sistema de transportes da Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira, sendo que tal escolha tem por base algumas características bastante convenientes à avaliação necessária:

- Sistema de pequeno porte, mas com possibilidade para expansão.
- O sistema de transporte interno é parte de um ambiente controlado.
- Os dados sobre o sistema são bem conhecidos e de fácil obtenção.

O sistema foi alimentado com os dados do arruamento e logradouros do campus, bem como as informações dos trajetos e operação das duas linhas de circulares, sendo a rede resultante aquela já apresentada anteriormente, na Figura 1.

Uma vez que ambos os circulares cobrem toda a área da Cidade Universitária, nem sempre é óbvia a decisão de qual é o melhor circular a ser utilizado para fazer uma determinada viagem. Além disso, a velocidade média dos ônibus fica em torno de 10 a 12 km/h e o seu tempo de ciclo varia de 25 a 30 minutos, o que no caso médio gera tempos de espera da ordem de 12 a 15 minutos, mais uma vez criando dúvidas com relação à forma de realizar um trajeto, se a pé ou com a utilização dos circulares.

A fim de possibilitar a modelagem e implementação em tempo hábil, foram realizadas algumas considerações simplificadoras:

- *Usuários jovens*, o que permite considerar uma velocidade de caminhada relativamente alta e fixa, desprezando o relevo do campus.
- *Intensidade de tráfego constante*, o que permite desconsiderar o horário na execução do cálculo, condição necessária para levar em conta os curtos intervalos em que o campus fica congestionado.
- *Velocidade constante do ônibus*, simplificando o cálculo do custo nos arcos da rede.
- *Ônibus sem horários definidos*, permitindo a consideração do tempo de espera médio.
- “Custo” do ônibus como base: o fator de custo de viagem no ônibus foi considerado 1,0, o fator de custo de caminhada foi considerado 2,0 e o fator de custo de espera foi considerado 3,0.

É importante ressaltar que os fatores de custo foram ajustados para que as soluções do sistema fossem similares às da realidade, mas para a obtenção de valores reais seria necessária a realização de uma pesquisa específica, fugindo ao escopo deste trabalho.

3.1. Desempenho do Servidor de Cálculo

Com a implementação do Servidor de Cálculo, uma das preocupações com relação ao seu desempenho se refere ao tempo de resposta. Diversas consultas foram elaboradas para testá-lo em situações variadas, baseadas na rede apresentada a Figura 5, que é a mesma já apresentada na Figura 1, mas numerada de acordo com a convenção do Servidor de Cálculo.

Os testes a foram executados com base nos seguintes pares origem-destino: 1-17; 3-40; 26-46; 39-14; 45-11; 12-40. Os testes foram executados em duas versões distintas do algoritmo de caminho mínimo, uma que realiza uma reordenação de nós (calculáveis / não-calculáveis) e outra que não realiza tal ordenação. Os resultados de ambos os modos, compilados com máxima otimização e executados num computador Pentium 4 2.4Ghz, com 512MB de memória RAM, estão apresentados na Tabela 1.

Como é possível observar, o algoritmo mostra-se bastante eficiente para esta instância do problema, considerando a rede simplificada, sendo que ambas as versões do algoritmo forneceram tempos de cálculo compatíveis com a aplicação, inferiores a 0,12 segundo no caso com ordenação dos nós e inferior a 0,07 segundo no caso sem a ordenação. Vale ressaltar que tais valores foram obtidos para consultas simples (uma única consulta). Os testes de requisição múltipla indicaram a capacidade de atender a até 80 requisições simultâneas, respeitando o tempo de resposta ao usuário de 10s, o que foi considerado satisfatório.

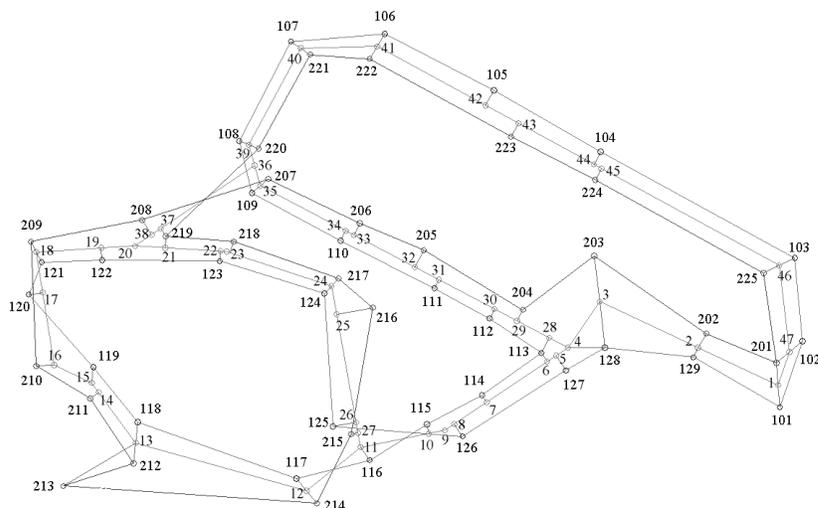


Figura 5: Rede de transporte da Cidade Universitária com nós numerados

Tabela 1: Tempos de resposta de solução pelo Servidor de Cálculo

Origem	Destino	Solução	Tempo de Trajeto	Solução Não Ordenada	Solução Ordenada
1	17	1-201-202-203-204-205-206-207-208-209-18-17	31' 58"	0,059"	0,111"
3	40	3-4-28-29-30-31-32-33-34-35-36-39-40	26' 42"	0,065"	0,109"
26	46	26-125-127-128-129-101-102-103-46	27' 16"	0,057"	0,111"
39	14	39-36-37-38-20-19-18-17-16-15-14	21' 18"	0,058"	0,110"
12	40	12-214-215-216-217-218-219-220-221-40	26' 44"	0,058"	0,110"
45	11	45-44-104-105-106-107-108-109-110-111-112-113-114-115-116-11	35' 22"	0,062"	0,107"

3.2. Desempenho global

Para o teste do desempenho do sistema completo, utilizou-se um único computador baseado no processador AMD K6-2, com 384MB de memória RAM, executando todos os módulos no mesmo equipamento (com exceção do Terminal de Consulta), sendo a comunicação com a *internet* uma conexão de banda larga comum, de 16KB/s, compartilhada com outros serviços.

O tempo de resposta do sistema, a partir de equipamentos conectados pela *internet* em diversos pontos do globo, foi inferior a 3s em todos os casos. Considerando-se que a imagem enviada tem em torno de 50KB, pode-se considerar um tempo de resposta praticamente instantâneo. Este teste foi realizado sem a ocorrência de requisições simultâneas, uma vez que uma única requisição esgota a banda disponível com a transmissão da imagem, sendo que fatalmente haverá grande espera caso sejam realizadas várias requisições simultaneamente.

Nos testes realizados com conexão de 100Mbps (12.5MB/s) ao equipamento executando o sistema de informações, os tempos de resposta foram sempre inferiores a 1 segundo. Nesta configuração foram testadas até 10 requisições simultâneas e os tempos de resposta não superaram 3 segundos, no pior caso.

3.3. Teste de apresentação

Finalmente, foram realizados testes para verificar a qualidade da solução gerada pelo sistema, em comparação com a solução básica “a pé”, em termos de Tempo Total Generalizado de Viagem, a fim de estabelecer uma comparação com relação à percepção do usuário. Note que o TTGV aqui se confunde com o “tempo percebido pelo usuário”, uma vez que no sistema considerado não há custo financeiro (tarifa).

Nesta etapa foram realizados testes similares aos do Servidor de Cálculo, mas com foco nas variações de tempo, de acordo com os modos de transporte utilizados. A Tabela 2 apresenta os resultados de tal comparação em que o *tempo comparativo* é o TTGV apenas caminhando, a não ser quando o TTGV ótimo é obtido apenas caminhando, quando então o *tempo comparativo* utilizado é o melhor TTGV calculado com a caminhada impedida.

Tabela 2: Tabela comparativa de TGTV das solução *a pé* com a solução *ótima*.

Origem	Destino	TTGV Ótimo	TTGV Comparativo	Ganho	Ganho (%)
Portaria 1 (1)	MAE (18)	61' 55"	87' 54"	25' 09"	29,6
Casa de Cultura Japonesa (3)	Terminal de Ônibus (40)	53' 24"	62' 21"	8' 57"	14,4
Acesso FEPASA (46)	Instituto Oceanográfico (24)	73' 30"	75' 55"	2' 25"	3,2
Engenharia Civil (39)	IPEN (13)	48' 36"	60' 51"	12' 15"	20,1
Acesso Vila Indiana (12)	Terminal de Ônibus (40)	54' 44"	68' 42"	13' 58"	20,3
CRUSP (45)	Acesso Vila Indiana (12)	67' 15"	84' 18"	14' 03"	20,2

A Figura 6 mostra a solução apresentada ao usuário para a viagem do CRUSP ao Acesso pedestres Vila Indiana, juntamente com o *tempo real de viagem*: "*Siga a pé pela Av. Prof. Melo Moraes até o ponto Raia Olímpica e pegue o ônibus Circular 2 (Azul). Continue no ônibus Circular 2 (Azul) até a Av. Prof. Lineu Prestes, descendo no ponto Acesso Pedestres Vila Indiana /Biomédicas. Siga a pé até seu destino. Tempo Total Estimado:37min.*".

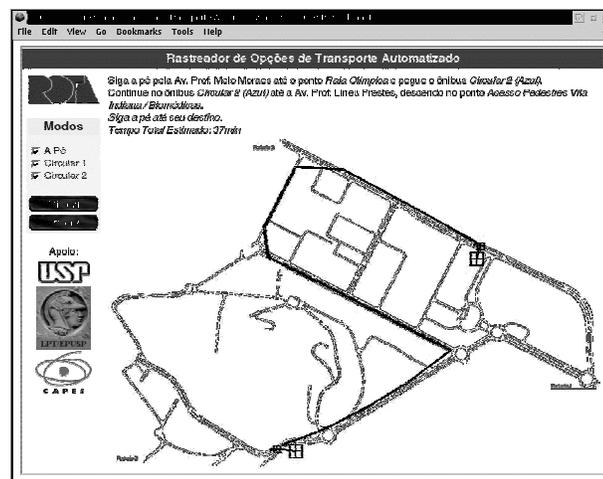


Figura 6: Apresentação de solução ao usuário

4. CONCLUSÕES

A proposta deste trabalho teve como origem o desejo de informar ao usuário sobre o sistema de transporte público coletivo de uma forma simples e objetiva, numa tentativa de minimizar a ansiedade deste usuário, permitindo que ele planeje sua jornada e, como consequência, aumentar a atratividade do transporte público coletivo frente ao transporte particular.

A partir de uma análise dos resultados é possível verificar que as soluções são adequadas, sendo que a apresentação na forma gráfica e textual contribui para a compreensão das mesmas. A possibilidade de opção entre os modos de transporte disponíveis também permite ao usuário uma flexibilidade para adaptar sua viagem a seus desejos pessoais.

De acordo com os requisitos de sistema definidos, o resultado também foi satisfatório. O sistema tem tempo de resposta compatível com a proposta inicial, possibilita a obtenção de

soluções alternativas por parte do usuário, fornece os trajetos num formato adequado, oferece informações de apoio (como o tempo de viagem), é de operação através de uma interface simples e pode estar amplamente disponível, através da *internet*.

Além disso, as buscas são registradas em um banco de dados e a modularidade do sistema facilita sua expansão, permitindo que novos usos sejam desenvolvidos, além da função de informação em “tempo real”. Exemplos destas expansões são a possibilidade de planejamento de viagens personalizadas, a análise das consultas realizadas visando a obter dados para a melhoria do sistema de transporte público, dentre outras.

Diante destes resultados, é possível dizer que a escolha e a implementação da modelagem e do algoritmo de solução foram adequadas com relação ao problema tratado. A utilização do sistema *open source* que combina Apache, PHP e MySQL também se mostrou satisfatória, oferecendo resultados e tempos de resposta compatíveis com a aplicação.

Finalmente, diante dos resultados positivos apresentados, acredita-se que tal sistema representa uma contribuição importante para a melhoria dos sistemas de informação ao usuário de transporte público coletivo brasileiro.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado concedida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRADLEY, S. P.; HAX, A. C.; MAGNANTI, T. L. (1977) *Applied Mathematical Programming*. Addison-Wesley Pub. Co., Reading, Mass.
- CAMARGO, P. (1993) *Desenvolvimento e organização das redes de transporte*. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- CHVATAL, V. (1983) *Linear Programming*. W. H. Freeman, New York.
- FARIA, C. A. (1985) *Percepção do usuário com relação às características do nível de serviço do transporte coletivo urbano por ônibus*. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.
- FARIA, C. A. (1991) *Avaliação do nível de serviço do transporte coletivo urbano sob o ponto de vista do usuário*. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- GALLO, G; PALLOTTINO, S. (1984) Shortest path methods in transportation models. *Transportation Planning Models*, M. Florian, ed., Elsevier Science Publishers. North Holland, 2003, p. 227-256.
- GIACAGLIA, M. E. (1993) *Modelagem de redes de transporte multimodal pela análise orientada a objetos*. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- GUALDA, N. D. F. (1975) *The Out-of-kilter algorithm applied to the analysis of alternative limestone transport systems*. M. Sc. Thesis. The University of Texas at Austin, Austin.
- HORN, M. E. T. (2003) An extended model and procedural framework for planning multimodal passenger journeys. *Transportation Research Part B: Methodological*, v.37, n.7, Agosto de 2003, p.641-660.
- MARQUES, H. N. (1998) *Um sistema de informações para usuários de transporte coletivo em cidades de médio porte*. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.
- SILVA, G. P. (2001) *Uma metodologia baseada na técnica de geração de arcos para o problema de programação de veículos*. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP.
- STRAMBI, O. (1991) *Critérios de eficiência e equidade para análise de estruturas tarifárias para o transporte público urbano*. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- TIMPF, S. (2002) Ontologies of Wayfinding: a Traveler's Perspective. *Networks and Spatial Economics*, v.1, n.2, Março de 2002, p.9-33.
- WINSTON, W. L. (1994) *Operations Research: Applications and Algorithms*. International Thomson Pub.

Endereços dos autores:

Daniel Jorge Caetano
E-mail: daniel@caetano.eng.br

Nicolau Dionísio Fares Gualda
E-mail: ngualda@usp.br