



INFORMAÇÕES GERAIS DO TRABALHO

Título do Trabalho: Aplicação de técnicas de otimização no problema do roteamento do transporte coletivo por ônibus: um estudo na cidade de Bambuí-MG.

Autor(es): Débora Cristina de Souza Rodrigues, Nathan José Mota Garcia, João Flávio de Freitas Almeida e Gabriel da Silva

Palavras-chave: Programação linear inteira mista, Definição de rotas, Janelas de tempo, Otimização.

Campus: Bambuí-MG

Área do Conhecimento (CNPq): 3.00.00.00-9 Engenharias, 1.00.00.00-3 Ciências Exatas e da Terra e 3.08.00.00-5 Engenharia de Produção

RESUMO

Problemas na qualidade da oferta dos serviços de transporte coletivo se destacam em cidades de pequeno porte devido, entre outros fatores, a falta de elaboração de planos de transporte e/ou sua conclusão. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo desenvolver uma metodologia matemático-computacional que permita a definição de rotas, pontos de embarque/desembarque e horários de linhas de ônibus para o transporte coletivo de passageiros em cidades de pequeno porte, tendo como campo de estudo a cidade de Bambuí-MG. Inicialmente, realizou-se uma pesquisa aprofundada com a finalidade de identificar a melhor técnica de roteamento com janela de tempo a ser utilizada e quais são os dados que precisariam ser coletados. Para a obtenção destes foram realizadas entrevistas, observação direta e aplicação de questionários. O modelo matemático-computacional foi elaborado por meio do solver GLPK, na interface gráfica Gusek, e utilizou-se uma ferramenta de geoprocessamento para processar parte dos dados coletados para melhor alimentar o modelo. Após a compilação do modelo, foram gerados relatórios de dados, onde foram obtidas as rotas euclidianas ideais, as janelas de tempo e os pontos de embarque/desembarque adequados para atendimento da demanda pelo serviço de transporte coletivo na cidade de estudo.

INTRODUÇÃO:

O transporte coletivo urbano é uma opção largamente adotada por pessoas que buscam atender suas necessidades de deslocamento, seja por motivos de lazer, trabalho ou estudo, a um baixo custo se comparado a outros meios de transporte. O transporte coletivo realizado por ônibus se destaca como o mais difundido no mundo, devido a sua flexibilidade, simplicidade, tecnologia, facilidade de instalação de serviços, menores custos, entre outros benefícios. Em cidades de pequeno e médio porte, o ônibus é o principal meio de transporte coletivo fornecido (BALASSIANO *apud* SANTOS, 2012).

A Associação Nacional de Transportes Públicos - ANTP, que tem como objetivo garantir o direito ao transporte público de qualidade através de diversas ações, incentivo a pesquisas e estudos para a melhor adequação dos transportes públicos e do trânsito às necessidades da comunidade envolvida que é, afinal, a que mais necessita e entende os problemas da cidade. A estruturação de um órgão para exercer o planejamento e o controle de trânsito e transporte é uma providência básica que a Prefeitura deve tomar, garantindo o atendimento das necessidades de deslocamento da população com segurança e confiabilidade. Este Órgão de Gerência deve organizar, disciplinar e fiscalizar os serviços dos diferentes tipos de transportes e também a circulação de veículos e pedestres (GOUVEIA, 2011).



Porém, mesmo em posse de todos estes direitos, as pessoas que utilizam os transportes coletivos encontram diversas dificuldades. Segundo Neto (2001), entre as principais deficiências percebidas pelos usuários do transporte coletivo por ônibus está o tempo elevado de viagem, sendo este a espera, o período dentro dos veículos, os transbordos ou o tempo consumido nos deslocamentos para acessar o sistema de transportes; e as taxas de ocupação excessivas nos veículos, quando a oferta não é ajustada adequadamente para atender as exigências da demanda.

O problema na qualidade da oferta dos serviços de transporte coletivo se torna mais grave em cidades de pequeno porte devido, entre outros fatores, à falta de elaboração de planos de transporte e/ou sua conclusão. Segundo a Pesquisa de Informações Básicas Municipais (MUNIC, 2012), divulgada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), cidades de pequeno porte (até 100.000 habitantes, segundo IBGE) estão entre as que possuem menor porcentagem de planos de transporte elaborados e concluídos. A cidade de Bambuí-MG possui pouco mais de 23 (vinte e três) mil habitantes segundo o Censo 2010 apresentado no sítio do IBGE, o que a caracteriza como sendo de pequeno porte. Constantemente são ouvidos relatos de insatisfação por parte dos usuários com relação a quantidade de veículos que circulam, do número e dos trajetos das linhas para atender a todos os bairros e da falta de padronização das janelas de tempos, o que justificou a realização desta pesquisa.

O objetivo geral do presente trabalho foi desenvolver um modelo matemático-computacional que possibilite definir rotas, pontos de embarque/desembarque e horários de linhas ônibus para o transporte coletivo de passageiros em cidades de pequeno porte, tendo como campo de estudo a cidade de Bambuí-MG. Acredita-se que os resultados obtidos com o desenvolvimento deste projeto podem contribuir positivamente nas tomadas de decisões referentes ao sistema de transporte coletivo desta cidade, proporcionando uma melhora do serviço prestado.

METODOLOGIA:

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Sistemas Computacionais – LSC do Grupo de Pesquisa em Sistemas Computacionais – GPSisCom do Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG) – Campus Bambuí.

A cidade de Bambuí-MG foi escolhida como campo de estudo, considerando além da malha viária da área urbana, duas regiões importantes localizadas na área rural, conforme ilustra a Figura 1. A primeira é a região onde está localizada a Casa de Saúde São Francisco de Assis, um Hospital da FHEMIG e antigo sanatório de Bambuí. A segunda é a região que pertence ao Campus Bambuí do IFMG. Estas áreas foram contempladas no estudo uma vez que grande parte da população precisa se deslocar diariamente para estas para trabalhar, estudar ou para a realização de tratamentos médicos.

O modelo matemático-computacional foi implementado no solver GLPK (GNU *Linear Programming Kit*). Como dito por Makhorin (2012), o solver GLPK se trata de um kit de programação linear simples e de código aberto. O motivo da escolha do GLPK está não apenas na sua simplicidade ou por ser de código aberto, mas também na sua portabilidade, isto é, funciona e preserva a semelhança da interface, independente do sistema operacional onde está sendo utilizado. A modelagem matemático-computacional foi feita por intermédio da interface gráfica Gusek, cuja linguagem computacional é a AMPL, (*A Mathematical Programming Language*).



Foram redigidos e encaminhados ofícios à prefeitura da cidade de Bambuí-MG e à empresa prestadora do serviço de transporte coletivo da cidade, a fim de solicitar os dados que alimentariam o modelo computacional. Infelizmente nem a prefeitura e nem a prestadora de serviços forneceram os dados solicitados. A alternativa encontrada foi à realização da coleta de dados por meio da pesquisa de campo, onde os pesquisadores utilizaram-se da observação e anotações, entrevistas e aplicação de questionários. Foram aplicados 200 questionários às pessoas na cidade de estudo. Os dados foram coletados pelo preenchimento automático de um formulário eletrônico, acessado via internet 3G a partir de *smartphones*. A aplicação do questionário possuiu caráter aleatório, com a abordagem das pessoas nas ruas de Bambuí sem uma seleção criteriosa. A aplicação dos questionários gerou uma planilha de dados.

Também foram realizadas entrevistas com os motoristas dos ônibus da empresa que possui a concessão do serviço de transporte público na cidade de Bambuí-MG, a fim de identificar as atuais rotas de transporte e os pontos de embarque/desembarque. O material utilizado nesta etapa da pesquisa foi um mapa impresso em folha tamanho A1 das vias da cidade e pincéis para traçar as rotas dos ônibus e os pontos de embarque/desembarque no mapa.

Após a coleta dos pontos principais de embarque/desembarque, foi necessária a obtenção de suas coordenadas geográficas. Para obter essas coordenadas os pontos representados manualmente no mapa impresso foram marcados em um mapa digital através da ferramenta de geoprocessamento QGIS. Foi usada a instância de dados criada no trabalho de Rodrigues, Silva e Silva (2016), referente à malha viária das vias de Bambuí-MG. A partir dos dados coletados durante as entrevistas, foi possível identificar as demandas por novos pontos de embarque e desembarque nas regiões que atualmente não são atendidas e determinar candidatos a novos pontos de embarque e desembarque. Eles também foram dispostos no mapa viário digital de Bambuí no QGIS. Para a definição destes pontos, primeiramente, foi realizado o mapeamento da demanda do serviço de transporte coletivo, a partir das localizações de demanda coletadas no questionário. Esses locais de demanda foram dispostos em uma nova camada, no mesmo mapa onde os pontos atuais foram marcados.

Para identificação de novos pontos de embarque/desembarque, foram traçadas circunferências com um raio de 200 metros¹ ao redor dos pontos já existentes, representando a área de cobertura de cada um dos pontos do serviço de transporte coletivo atual. Os pontos de demanda localizados fora da abrangência da área de cobertura foram considerados locais com carências do serviço de transporte coletivo. A partir daí foram criados os novos pontos candidatos a pontos de embarque/desembarque. Posteriormente, foi realizada a coleta das coordenadas desses pontos candidatos a pontos, os quais também compõem os dados de entrada no modelo matemático.

O modelo matemático-computacional elaborado passou por um procedimento experimental com a inserção dos dados coletados. O intuito foi identificar possíveis falhas que o mesmo poderia ter e, a partir disso, fazer os aprimoramentos para que os problemas fossem sanados. Além disso, foram realizados refinamentos do modelo com o objetivo de simplificá-lo e aperfeiçoá-lo.

RESULTADOS E DISCUSSÕES:

1 Valor obtido a partir de respostas do questionário referentes à distância máxima que os potenciais usuários do TCU estão dispostos a caminhar do ponto de origem até o ponto de embarque ou do ponto de desembarque até o seu destino final.



O modelo matemático-computacional proposto utilizou conceitos e técnicas da Programação Linear Inteira Mista. A escolha se justifica pelo fato do problema ser por demasiadamente complexo, tendo-se a necessidade da elaboração de um modelo inicial simplificado que gradualmente foi incrementado. Definiu-se que os dados de entrada do modelo matemático-computacional desenvolvido seriam: pontos principais de embarque e desembarque com suas coordenadas geográficas (latitude e longitude), candidatos a pontos de embarque e desembarque também com suas coordenadas geográficas, janelas de tempo de cada um dos pontos (horário de chegada e horário de saída dos ônibus), número de ônibus disponíveis para percorrer as rotas de transporte, capacidade dos ônibus, tempo médio de embarque dos passageiros, rotas de ônibus existentes, número médio de passageiros em cada ponto de ônibus, tempo médio de transporte em cada rota, horários de saída da cidade e os de retorno para as rotas que saem da malha viária urbana (FHEMIG e IFMG), horário do ciclo referente ao tempo em que o ônibus percorre sua rota.

Com as informações coletadas foi possível produzir mapas das rotas, mapa dos pontos atuais e um mapa de demanda contendo os candidatos a novos pontos de embarque/desembarque, pode ser observado na Figura 1.

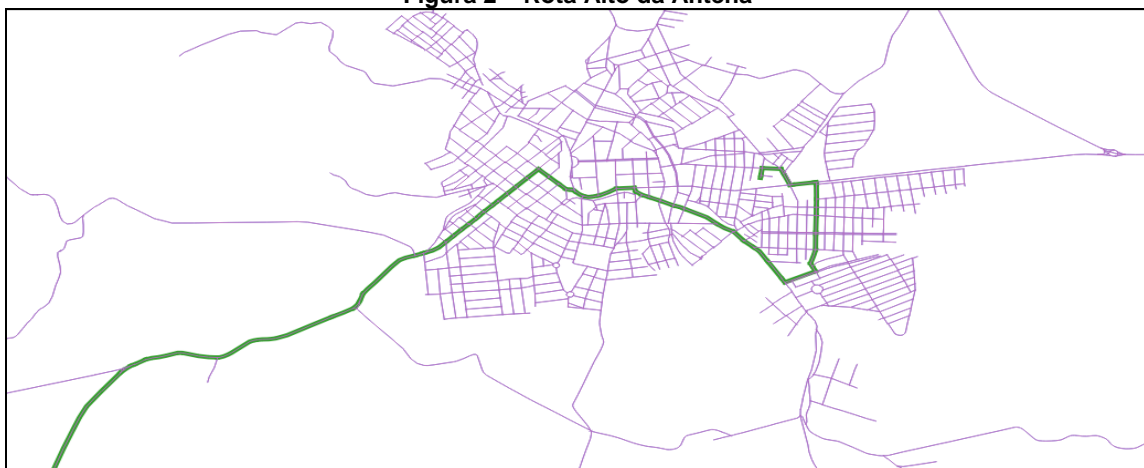
Figura 1 - Candidatos a Novos Pontos de Embarque/Desembarque



Fonte: Os autores (2016)

A parte interna às bolhas em vermelho representa áreas que são atendidas pelos pontos de embarque e desembarque existentes. Os traços em azul correspondem à área de cobertura dos candidatos a novos pontos de embarque/desembarque. Uma das rotas registradas pode ser observada na Figura 2.

Figura 2 – Rota Alto da Antena



Fonte: Os autores (2016)



Para alimentar o modelo, fez-se necessário identificar as janelas de tempo de cada um dos pontos principais. As janelas de tempo correspondem a hora de chegada e de partida do ônibus em cada um dos pontos. Tais dados foram obtidos com o registro das horas de chegada e partida dos ônibus em cada um dos pontos principais e, posteriormente, essas informações foram transferidas para planilhas para facilitar a análise. O Quadro 1 exemplifica as janelas de tempo coletadas para os pontos de uma das rotas existentes.

Quadro 1 - Janelas de tempos para a rota Girassol

Girassol					
Pontos	P_Girassol	C	G	E	P_IFMG
Janela de tempo ida	6:31 -6:35	6:37-6:41	6:40 - 6:44	6:45-6:49	6:52-7:00
Tempo total da ida	30 minutos				
Pontos	P_IFMG	E	G	C	P_Girassol
Janelas de tempo volta	7:10	7:12-7:17	7:17-7:22	7:20-7:25	7:26-7:31
Tempo total da volta	21 minutos				

Fonte: Os autores (2016)

Estes dados compuseram alguns dos conjuntos de dados do modelo matemático-computacional e também alguns parâmetros. No Quadro 2 são apresentados os conjuntos de dados de entrada no modelo e em sequência os parâmetros utilizados no mesmo.

Quadro 2 – Definição dos dados de entrada do modelo

<p>Conjuntos:</p> <p>I = Pontos de ônibus, $i = 1, \dots, n$; J = Ônibus = $\{(o, d)\}$ = duplas (origem e destino); K= Locais; P= Ônibus = $\{(p, o, d)\}$ = triplas (ônibus, origem e destino); N= $\{(p, o), \dots, (p, d)\}$ = duplas (nome e local);</p> <p>Parâmetros:</p> <p>T1i = Janela de tempo referente a chegada no ponto i; T2i = Janela de tempo referente a partida do ponto i; S1 (o, d) = Janela de tempo de ônibus origem, destino (partida); S2 (o, d) = Janela de tempo de ônibus origem, destino (chegada); F1 (o, d) = Janela de tempo de ônibus origem, destino (partida); F2 (o, d) = Janela de tempo de ônibus origem, destino (chegada); LATI = Latitude do ponto; LNGE = Longitude do ponto; Dist (a, b) = Distância do ponto A ao ponto B;</p> <p>Variáveis:</p> <p>$X_{pod} \in \{0, 1\}$; $Y_{pod} \geq 0$; TCh_{od}; TSa_{od}.</p>
--

Fonte: Os autores (2016)

O modelo proposto em sua forma canônica pode ser observado no Modelo 1 disposto na página seguinte. A função objetivo (1) é responsável pela minimização das distâncias percorridas pelos ônibus. As Restrições (2) e (3) são referentes ao Início e Fim das rotas, não permitindo que os ônibus cheguem aos pontos de Início e também que partam dos pontos finais de chegada.

As Restrições de (4) até (7) se referem as redes, que são constituídas pelas rotas de transporte possíveis. A (4) define que cada ponto final recebe um ônibus; a (5) define que para cada ponto inicial deve sair um ônibus; a (6) define que a quantidade de ônibus que saem dos pontos de partida deve ser igual à quantidade dos ônibus que chegam aos pontos finais; por fim a restrição (7) exclui a possibilidade de geração de *loops* infinitos nos próprios pontos.



Modelo 1 – Roteamento do Transporte Coletivo por Ônibus

$Min \sum_p \sum_o \sum_d^N (Dist(a, d) X_{pod})$		(1)
s.a:		
$X_{pod} = 0$	$\forall_{p,o,d} \in INÍCIO;$	(2)
$X_{pod} = 0$	$\forall_{p,o,d} \in FIM;$	(3)
$\sum_p \sum_o^{IUINICIO} (X_{pod} = 1)$	$\forall_d \in IUFIM;$	(4)
$\sum_p \sum_d^{IUFIM} (X_{pod} = 1)$	$\forall_o \in IUINICIO;$	(5)
$\sum_d^{IUINICIO} (X_{pod}) = \sum_d^{IUFIM} (X_{pod})$	$\forall_p \in P, o \in I;$	(6)
$X_{pod} = 0$	$\forall_p \in P, (o, d), o = d;$	(7)
$Y_{pod} \in I * X_{pod}$	$\forall_{p,o,d};$	(8)
$\sum_p \sum_o \sum_d^I (Y_{pod} = I);$		(9)
$\sum_p \sum_d^{IUINICIO} (Y_{pod}) = 1 + \sum_p \sum_d^{IUFIM} (Y_{pod})$	$\forall_o \in I;$	(10)
$TSa_{od} \geq TCh_{od}$	$\forall_o \in I;$	(11)

Fonte: Os autores (2016)

As restrições (8), (9) e (10) são responsáveis pela eliminação de sub-rotas de transporte, sendo a de número (8) limitadora da capacidade das rotas; a (9) aloca os pontos passageiros às saídas e entradas; e, por fim, a restrição (10) a responsável pela minimização dos pontos de embarque/desembarque.

O modelo canônico finda-se com a restrição (11), que refere-se a janelas de tempo, impedindo que a hora de saída em qualquer ponto seja inferior ao tempo de chegada neste mesmo ponto. Com a utilização do Gusek foi possível dispor os dados de entrada sequencialmente ao código do modelo. Para cada um dos pontos principais foram fornecidas a hora de chegada (T1) e hora de saída (T2) do ônibus, lembrando que os valores foram convertidos para decimais, representando porcentagens de hora.

Ressalta-se que na versão atual do modelo, os cálculos da melhor rota utilizaram as distâncias Euclidianas entre os pontos de embarque/desembarque. Estas distâncias são calculadas automaticamente pelo modelo, a partir das coordenadas geográficas dos pontos. Como não foram utilizadas as distâncias reais entre os pontos, isto é, o comprimento das vias por onde os ônibus podem trafegar, o resultado gerado não é suficiente para definição dos pontos de embarque e desembarque ideais em uma situação real.

Entretanto, os resultados obtidos foram suficientes para comprovar a capacidade de solução do modelo desenvolvido. Atualmente, os autores continuam trabalhando no desenvolvimento do projeto, realizando o levantamento e utilização dos valores reais das distâncias entre os pontos e a criação do novo conjunto de dados de entrada para o modelo e no constante aperfeiçoamento do modelo, possibilitando sua utilização como ferramenta de apoio na tomada de decisões referentes ao Roteamento do Transporte Coletivo Urbano (TCU) em pequenas cidades.

CONCLUSÕES:

Acredita-se que os resultados obtidos no presente trabalho servem como base para a continuidade do projeto no desenvolvimento de novos trabalhos. Os autores têm este interesse e já estão trabalhando nestas novas atividades, apesar do fim do período de desenvolvimento do presente projeto de pesquisa.



Além da complexidade inerente ao tema de pesquisa, a recusa do fornecimento de dados pela Prefeitura Municipal e pela empresa Concessionário do Transporte Coletivo por Ônibus em Bambuí-MG, comprometeram bastante o desenvolvimento do projeto.

Quanto aos objetivos propostos no trabalho, pode-se dizer que foram atendidos parcialmente. No que se refere à identificação das demandas de locomoção dos moradores da cidade e ao estabelecimento dos pontos de embarque/desembarque que consigam atender um número maior de usuários, conclui-se que a aplicação do Formulário de Entrevista e a análise dos dados obtidos foram suficientes para atingir estes objetivos. Quanto à identificação das rotas de transporte coletivo atualmente existentes, também foi possível cumprir com este objetivo por meio das entrevistas realizadas com os motoristas dos ônibus.

O principal objetivo, que era construir um modelo matemático-computacional para o roteamento de ônibus com janelas de tempo foi alcançado parcialmente, uma vez que as distâncias consideradas nos cálculos foram as Euclidianas e não as distâncias reais. Já os objetivos referentes à minimização das janelas de tempo das rotas de ônibus e otimização do número de veículos coletivos nas ruas, não puderam ser atendidos.

Espera-se que futuramente tudo que foi desenvolvido nesse projeto, seja utilizado como base para o desenvolvimento de outras pesquisas, visando contribuir para o atendimento pleno dos objetivos e aprimoramento do modelo matemático-computacional e da metodologia desenvolvida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

GOUVEIA, Camilla Ferreira; FERREIRA, William Rodrigues. **Análise do Transporte público coletivo em pequenas cidades: Tupaciguara e Sacramento/MG**. Horizonte Científico, v. 5, 25f, 2011.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Perfil dos Municípios Brasileiros 2012** (Munic). Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/perfilmunic/2012/default.shtm>>. Acesso em 05 de outubro de 2014.

MAKHORIN, Andrew. **GLPK: GNU linear programming kit**. Moscou: Moscou Aviation Institute, 2012. Vol 2.1. Disponível em: <<http://www.gnu.org/software/glpk/>>. Acesso em 01 de dezembro de 2015.

NETO, W. A. P. **Modelo multicritério de avaliação de desempenho operacional do transporte coletivo por ônibus no município de Fortaleza**. 2001. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2001.

RODRIGUES, João Paulo Lemos; SILVA, Ariadne Martins da; SILVA, Gabriel da. **Construção de bases de dados geográficos em SIG: georreferenciamento da malha viária da cidade de Bambuí-MG**. Relatório Técnico-científico. Bambuí: DIPP/IFMG, 2016.

SANTOS, J. P. **Transporte coletivo público urbano na cidade de Santiago-RS: estudo da percepção dos usuários quanto a acessibilidade e nível do serviço prestado**. 2012. 141f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Urbano e Regional) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Santiago. 2012.

Participação em Congressos, publicações e/ou pedidos de proteção intelectual:

Publicação de resumo expandido na VIII Jornada Científica durante a realização da VIII Semana de Ciência