

MOBILIDADE URBANA E TRANSPORTE PÚBLICO: MODELOS E PERSPECTIVAS A PARTIR DA PESQUISA OPERACIONAL

Everton da Silveira Farias^{ab*}, Denis Borenstein^b

^aUniversidade Federal do Pampa – UNIPAMPA, Rio Grande do Sul-RS, Brasil

^bUniversidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Rio Grande do Sul-RS, Brasil

Resumo

Este trabalho tem por objetivo apresentar e discutir características dos modelos que tratam a Mobilidade Urbana e o Transporte Público em uma perspectiva mundial. A pesquisa bibliográfica foi realizada em importantes periódicos internacionais priorizando a aplicação da Pesquisa Operacional nos campos operacional, tático e estratégico para solução de problemas da Mobilidade Urbana. Ademais são apresentados trabalhos que incorporam aspectos de sustentabilidade ambiental aos sistemas de transporte urbano. Foram selecionados e analisados em profundidade 17 trabalhos, dos 61 pesquisados, em sua maioria artigos recentes. Esta pesquisa possibilitou identificar as principais características e a relevância destes trabalhos para o desenvolvimento de soluções para o transporte urbano, indicando oportunidades e necessidades de pesquisas neste campo de ampla aplicação prática para a Pesquisa Operacional.

Palavras-Chave: Mobilidade Urbana, Transporte Público, Pesquisa Operacional

Abstract

This paper aims to present and discuss characteristics of the models that treat the Urban Mobility and Public Transportation in a global perspective. A literature search was performed in important international journals prioritizing the application of Operational Research at the operational, tactical and strategic fields for solution of urban mobility problems. Further studies that incorporate aspects of environmental sustainability to urban transport systems are presented. This work selected and analyzed in depth 17 papers, of the 61 searched, in their most recent articles. This research allowed to identify the main characteristics and the relevance of these studies to develop solutions for urban transport, indicating research opportunities and needs in this field of wide practical application for Operational Research.

Keywords: Urban Mobility, Public Transport, Operational Research

*Autor para correspondência: e-mail: esfarias@ea.ufrgs.br

1. Introdução

O desenvolvimento social e econômico proporciona um fenômeno de intensa e rápida concentração das pessoas e suas atividades em centros urbanos, particularmente marcado pelo surgimento das grandes metrópoles com dinâmicas evolutivas distintas (COSTA, 2003). A expansão urbana, impulsionada pela dependência do automóvel (CHIN, 2010), se deu através de processos não planejados e, conseqüentemente, desorganizados que geraram grandes dificuldades de transporte para as pessoas que vivem nestes grandes centros urbanos.

Kersys (2011) afirma que os congestionamentos de trânsito são formados devido à irracionalidade da comunicação das instalações nas cidades e de sistemas de tráfego não apropriados (cruzamentos indevidos em ruas de tráfego intenso, ausência de vias principais de alta velocidade, falta de estacionamentos alternativos, etc.). Neste sentido, se reconhece que o aumento dos congestionamentos, da poluição do ar, do consumo de energia e dos acidentes de trânsito é produzido pelo grande aumento do tráfego de automóveis individuais (CIPRIANI, GORI e PETRELLI, 2012). O uso continuado do modelo de transporte individual é simplesmente insustentável dada a combinação de ineficiência energética, conseqüências ambientais pelo uso de combustíveis fósseis e congestionamentos causados pela não adequação dos diferentes modos de transportes (CHIN, 2010).

Em 1960, as pessoas viajavam em média de 1.820 quilômetros de carro, ônibus, trem ou avião. Três décadas depois, a distância percorrida anualmente aumentou para 4.390 quilômetros, sendo que o crescimento populacional foi de 75% e a mobilidade motorizada absoluta aumentou em 4 vezes (SHAFER, 1998). Dentro desta mesma perspectiva o pesquisador acrescenta que mais importante, sem considerar a evidente saturação do tráfego, é a demanda por viagens que continua a aumentar em taxas de 4% ao ano de acordo com a OCDE (*Organisation for Economic Co-operation and Development*) e a taxas de quase o dobro nos países em desenvolvimento. Este crescimento provocou uma série de impactos nos sistemas de transporte, no meio ambiente e na qualidade de vida, conduzindo uma necessidade mundial de implementação de estratégias para reduzir os problemas na mobilidade urbana.

Neste ambiente de rápido desenvolvimento econômico com aumento da renda, da motorização e a crescente urbanização, é natural que as políticas governamentais se concentrem para resolver os congestionamentos e problemas relacionados pelo uso de automóveis (PENG, ZHU e SONG, 2008). Governos e agências reguladoras têm elaborado políticas e legislações específicas para incentivar e fomentar projetos de mobilidade urbana apropriados com as novas demandas.

A mobilidade urbana também desempenha um papel importante no campo da sustentabilidade, visto que o mundo experimenta crises de energia e expressa preocupação com questões ambientais (SUSNIENÉ, 2012). Atualmente, a sustentabilidade energética e ambiental está entre os principais objetivos para o desenho de sistemas de mobilidade (FALVO *et al.*, 2011). Conforme Kepaptsoglou *et al.* (2012), nas últimas duas décadas, o transporte sustentável tem atraído o interesse da comunidade acadêmica e de profissionais que atuam no desenvolvimento de sistemas de tráfego. Com isso, a busca por transportes sustentáveis afetou metas e objetivos do processo de planejamento de transporte introduzindo novas estratégias para resolver esta questão. Na verdade, é demonstrado que o uso eficiente da energia e um sistema de transporte ambientalmente sustentável são essenciais para o desempenho de alta qualidade dos modernos sistemas econômicos (FALVO *et al.*, 2011).

O transporte urbano é tão importante para a qualidade de vida da população quanto são os serviços de abastecimento de água, coleta de esgoto, fornecimento de energia elétrica e telefonia (COSTA, 2008). Zhang e Zhai (2013) afirmam que o transporte público não é somente um componente da cidade, mas uma importante ferramenta os cidadãos. Em função destes aspectos, proporcionar uma mobilidade adequada para a população se constitui em uma ação essencial para o processo de desenvolvimento econômico e social das cidades.

Apresentado este breve esboço que permeia os aspectos relacionados à mobilidade urbana, esclarece-se que este trabalho teórico pretende apresentar e discutir as potenciais contribuições da modelagem matemática na construção de sistemas e operações que proporcionem serviços de qualidade com baixos custos para a sociedade. Esta revisão não pretende ser exaustiva, mas sim identificar importantes questões relacionadas à mobilidade urbana e transporte público que possam servir de campo de estudo para a área de Pesquisa Operacional.

A pesquisa bibliográfica foi realizada em importantes revistas científicas, a partir do portal de periódicos do *Web of Science*TM, tais como: *Annals of Operations Research*, *International Journal of Sustainable Transportation*, *Transportation Science*, *Transportation Research*, *European Journal of Operational Research*, *Electric Power Systems Research*, *Journal of Technology Management for Growing Economies* e outras. Complementarmente, ainda realizou-se buscas de publicações nacionais para o embasamento teórico da pesquisa.

A coleta englobou os artigos publicados nas últimas duas décadas, nos periódicos citados, que envolvessem os temas ligados as palavras: “mobilidade urbana” (*urban mobility*)

ou “transporte público” (*public transport*), aliadas a “sustentabilidade” (*sustainability*) e a “pesquisa operacional” (*operations research/operational research*).

No primeiro momento, um total de 61 artigos foram selecionados a partir da identificação de convergência e adequação das palavras pesquisadas com os temas da pesquisa. No segundo momento, foram selecionados 17 artigos que, além dos temas relacionados, apresentam diferentes características que possibilitam ampliar e diversificar os estudos sobre a mobilidade e transporte urbano a partir da pesquisa operacional englobando temas como: qualidade do serviço, satisfação do usuário, integração de modos de transporte, adequação de infraestrutura etc. Desta forma, os 17 artigos analisados em profundidade possibilitam visualizar diferentes problemas da mesma área de pesquisa evidenciando suas aplicações nos níveis operacional, tático e estratégico.

Nesta discussão, buscou-se enfatizar os desafios da mobilidade urbana em relação ao transporte público urbano, visto que a modelagem da estrutura urbana tem, historicamente, incorporado a infraestrutura de transportes em suas formulações (SRINIVASAN, 2005). Além disso, Desaulniers e Hickman (2007) afirmam que problemas na área de transporte público e mobilidade urbana têm atraído o interesse da Pesquisa Operacional devido à complexidade destes problemas e da importância em casos práticos da vida moderna. Neste sentido, destaca-se que a Pesquisa Operacional tem sido bem sucedida para resolver uma grande variedade de problemas de otimização no transporte público (DESAULNIERS e HICKMAN, 2007).

Com base nestas considerações, na próxima seção são apresentados importantes estudos que tratam da mobilidade urbana em diversos campos de pesquisa, sendo uma síntese apresentada na Quadro 1. Na sequência, aspectos relacionados à sustentabilidade aplicados a estudos sobre mobilidade urbana e transporte público são evidenciados. Posteriormente, contribuições da Pesquisa Operacional são levantadas, trazendo seus principais focos de pesquisa na área de transporte público dentro do campo estratégico, tático e operacional. Por fim, a última seção apresenta oportunidades de pesquisa relacionadas à modelagem matemática para o desenvolvimento de trabalhos que abordem a mobilidade urbana e o transporte público em um contexto prático.

2. Mobilidade Urbana e Transporte Público: Estudos e Áreas de Pesquisa

A mobilidade urbana se tornou uma questão de importância internacional, e vários países se uniram em diferentes frentes, tais como a assinatura de acordos internacionais e o desenvolvimento de projetos para estabelecer novos padrões para os níveis de mobilidade e do

desenvolvimento de sistemas de transporte para o futuro (FAGIN, 1963). Neste sentido, questões referentes à mobilidade urbana têm tido forte aporte acadêmico na construção de soluções para questões problemáticas do dia a dia relacionadas a transportes e deslocamentos.

Wu, Florian e Marcotte (1994) afirmam que a modelagem de congestionamento nos sistemas de trânsito é uma área de pesquisa onde os resultados teóricos e estudos empíricos são relativamente escassos. Em seu trabalho, os autores tratam o Problema de Atribuição para o Equilíbrio do Trânsito (*Transit Equilibrium Assignment Problem – TEAP*) no qual a escolha de passageiros em uma rede de trânsito está sujeita a congestionamentos. O comportamento dos usuários de trânsito é modelado usando o conceito de estratégias (*hyperpaths*) em uma rede definida, que é obtida a partir da rede rodoviária e das linhas de trânsito considerando arcos de caminhos, de tempo de espera, de veículos, de transferências e de desembarques. O custo de espera é uma função tanto da frequência das linhas de trânsito como dos efeitos das filas devido aos congestionamentos. O modelo foi formulado como um problema de desigualdade variacional, no espaço de fluxos dos *hyperpaths*. Métodos de linearização e de projeção foram utilizados para encontrar as soluções. Os algoritmos propostos neste trabalho exigiram uma quantidade considerável de armazenamento para problemas de larga escala (WU, FLORIAN e MARCOTTE, 1994).

Shafer (1998), baseado em um conjunto de dados históricos (1960-1990) relativos ao volume de veículos, apresenta os quatro principais meios de transporte: automóveis, ônibus, trens e aeronaves. Segundo o autor, a escolha dos meios de transporte no futuro será limitada pelos trajetos que dependem das lentas mudanças da infraestrutura de transporte. Além disso, a demanda por transportes públicos é parcialmente determinada pela densidade populacional urbana e pela ocupação dos espaços urbanos. Neste sentido, é apresentado um modelo que projeta o volume de tráfego e a participação dos diferentes modos de transportes para 11 regiões no mundo até 2050 (SHAFER e VICTOR, 2000). Os resultados apresentam um fenômeno de mudança de lentos modos de transporte para modos mais rápidos, assim como o aumento da demanda por mobilidade. Conforme Shafer e Victor (2000), as variações entre as regiões, em grande parte, reflete o legado histórico das infraestruturas, que refletem parcialmente a densidade populacional, políticas e costumes. Desconsiderando essas diferenças, o autor sugere que os sistemas de transporte comportam-se em padrões determinísticos. Ademais, no longo prazo, os modos de transportes são selecionados pela velocidade do serviço, não necessariamente pela política de mobilidade. No entanto, ao longo do tempo esses sistemas de transporte tendem a recuperar sua dinâmica natural (SHAFER e VICTOR, 2000).

Zheng e Gerolimis (2013) desenvolvem um modelo para representar a dinâmica de tráfego do sistema de transporte multimodal de duas regiões de uma cidade. Neste trabalho, o objetivo é otimizar o espaço viário (rede) do sistema de transporte urbano para minimizar o tempo total de viagens dos passageiros. No método utilizado a região está dividida em sub-regiões, cada uma contém um tipo específico de modo de transporte, por exemplo, ele pode ser dedicado a corredores de ônibus, faixas de tráfego misto, somente pistas de carros etc. As demandas de utilização de cada modal são conhecidas e proporcionou que o modelo desenvolvido apresentasse consistência com as características operacionais do sistema.

Li et al. (2014) tratam a rede de transporte urbano desenvolvendo algoritmos para resolver o problema *Multi Modal Shortest Path Problem (MM-SPP)*. Neste trabalho a rede de transporte urbano é composta por múltiplos modos de transportes (multimodais), tais como: automóvel, ônibus, trem/metrô, etc. O objetivo é minimizar o custo total de viagem considerando que os passageiros possam utilizar diferentes modos de transporte. Os algoritmos desenvolvidos utilizam a “janela de tempo”, ou seja, o tempo de parada ou tempo de troca do modal de transporte para definir uma alternativa viável considerando o modo de transporte disponível dentro deste limite de tempo. Os algoritmos desenvolvidos podem ser aplicados em problemas análogos, tal como problemas de transporte de cargas considerando multimodais.

Srinivasan (2005) examina os aspectos no uso das áreas urbanas e sua relação com a infraestrutura de transporte no contexto do planejamento da mobilidade na cidade de Nova Délhi (Índia). Neste trabalho, o modelo de urbanização das áreas é estimado a partir de dois diferentes processos. Autômato Celular (*Cellular Automaton*) e Modelos de Markov são utilizados para entender as mudanças em escala regional e modelos discretos para prever a mudança em nível local. Um Autômato Celular é uma entidade que pode variar, de forma independente, seu estado baseado em seu estado anterior e de seus vizinhos imediatos, de acordo com uma regra específica. Já um processo de Markov permite prever o estado de um sistema a partir de um estado anterior. O resultado deste modelo apresenta, em seu mapeamento, a expansão dos limites da cidade e a intensificação das áreas urbanas. O trabalho conclui ainda que a localização das indústrias e das áreas comerciais são significativas para as alterações no uso das áreas urbanas. Adicionalmente, a falta de dados confiáveis é uma grande dificuldade para o planejamento em Nova Délhi e na maioria das outras cidades indianas (SIRINIVASAN, 2005).

Marín e Jarmillo (2009) apresentam a modelagem para a rede urbana de trânsito rápido que consiste em determinar a localização das estações de embarque/desembarque e as rotas de

trânsito considerando diferentes modais de transporte. O desafio do trabalho foi maximizar a demanda de transporte público usando a nova infraestrutura, considerando a limitação do orçamento e o número de rotas de trânsito. O problema de localização também incorpora a opção dos usuários em escolher o modo de transporte para as viagens. Em casos reais, este problema é complexo para ser resolvido devido às milhares variáveis de decisão binárias e restrições envolvidas, não podendo ser resolvidos de forma eficiente através das técnicas exatas como *Branch and Bound*, por exemplo. Por este motivo, alguns algoritmos com base em Decomposição de Bender foram propostos para a solução do problema.

O modelo proposto é resolvido através do método de Decomposições de Bender incorporando o método clássico de *Branch and Bound*. As soluções dos submodelos são obtidas utilizando Algoritmo do Caminho Mais Curto, sendo que esta combinação proporcionou a redução considerável do tempo de solução. Algoritmos de *Branch and Bound* e Decomposições de Bender foram implementados através da linguagem de programação GAMS e resolvidos através do CPLEX versão 9.0. Para futuras pesquisas, foi recomendada a inclusão de técnicas de aceleração tais como Cortes Ótimos de Pareto (MARÍN e JARMILLO, 2009).

Estudos de integração de transportes têm orientado o desenvolvimento das estratégias de transporte desde 1990. A partir disto, o conceito de transporte integrado tem se tornado importante guia para construção de políticas institucionais em muitos países (NIA *et al.* 2011). Neste sentido, Nia *et al.* (2011) apresentam um modelo utilizando Algoritmos Genéticos para propor a combinação ideal para uma estratégia de política de transporte integrado. Os Algoritmos Genéticos foram empregados para desmembrar as interações dos fatores considerados no modelo proposto. Segundo os autores, uma política integrada de transportes inclui quatro dimensões: investimentos, preços, regulamentação e gestão. Neste trabalho, alguns resultados mostram que a melhoria dos problemas de transporte urbano depende de políticas de transportes integrados que visem reduzir os custos e a demanda por investimentos. O objetivo deste projeto foi desenvolver um novo *framework* para facilitar a avaliação multidimensional das políticas de transportes integrados.

A modelagem integrada de transportes e da ocupação de áreas urbanas envolve a análise contínua das escolhas individuais. Isto inclui, no longo prazo, as escolhas como a localização residencial/profissional, no médio prazo, escolhas tais como a aquisição de um automóvel, e no curto prazo a escolha pelo tipo de transporte a ser utilizado (PINJARI *et al.* 2011). Desta forma, o planejamento de mobilidade urbana, abordando a integração de diferentes modais de

transporte, representa um complexo sistema de operações que exige sofisticadas modelagens e métodos de solução.

Pinjari *et al.* (2011) desenvolve uma metodologia mista multidimensional para modelagem integrada, para o planejamento de transporte urbano que aborda quatro diferentes dimensões:

- I. Localização residencial: considerada uma variável de longo prazo que impacta diretamente no uso das áreas urbanas;
- II. Propriedade de veículos: alternativa de médio prazo considerada determinante no planejamento da mobilidade urbana;
- III. Propriedade de bicicleta: pode ser vista como opção de médio ou curto prazo em relação à utilização da bicicleta como meio de transporte;
- IV. Deslocamento de trabalho: dimensão importante devido à ocorrência nos horários de “pico” e contribuem fortemente para congestionamentos.

Os resultados são apresentados a partir do estudo de caso em uma área da cidade de São Francisco (EUA), e demonstram a necessidade de modelar dimensões de múltipla escolha de forma independente. No entanto, para os efeitos de correlação, ou seja, na escolha das dimensões, percebe-se a preferência por localizações residenciais de acordo com o estilo de vida, assim como por alguns tipos de transporte (bicicletas e automóveis). Ademais, o artigo propõe integrar componentes adicionais ao modelo, tais como escolha do local de trabalho no âmbito de modelagem proposta (PINJARI *et al.* 2011).

Cipriani, Gori e Petri (2012) apresentam o procedimento para configuração da rede de trânsito para uma área urbana de grande porte na cidade de Roma (Itália), caracterizada por uma rede de estradas de complexa topologia, um sistema público de transporte multimodal (sistema de trens rápidos, ônibus e linhas de bonde), e uma demanda de trânsito tipo *many to many*. O procedimento de solução consiste em dois estágios:

- I. Um Algoritmo de Geração Heurística de Rotas (*Heuristic Route Generation Algorithm - HRGA*) que gera um grande conjunto de rotas viáveis através de diferentes critérios e regras práticas;
- II. Um Algoritmo Genético (AG) para encontrar a rede de rotas ideais e suas frequências.

A aplicação de diferentes critérios na geração do Algoritmo de Geração Heurística de Rotas (HRGA) apresentou um conjunto consistente, diversificado e completo de rotas. O Algoritmo Genético implementado em paralelo provou ser robusto e eficaz na produção de boas

soluções. Ao final do trabalho, os autores apontam a necessidade de esforço adicional para especificação dos componentes e pesos na função objetivo em relação ao transporte. Adicionalmente, é recomendado o aperfeiçoamento do Algoritmo Genético ou a utilização de outras Metaheurísticas para redução do tempo computacional.

Para evitar a redução no número passageiros do transporte público, as autoridades de trânsito têm focado em melhorar a pontualidade das rotas de transporte. Salicrú, Fleurent e Armengol (2011) apresentam um novo modelo para a criação de tabelas de horários que visam maximizar a pontualidade e promover a transparência em relação ao cumprimento dos horários no sistema público de transporte metropolitano da cidade Barcelona (Espanha). O trabalho utiliza dados históricos de uma pesquisa anterior para programar os horários das frotas de ônibus. O método utilizado é composto das etapas de refinamento de dados, segmentação das faixas de horários, análises estatísticas, validação e simulação da programação de saída de veículos. O resultado deste trabalho foi extremamente positivo em rotas de ônibus nas quais o método foi testado, podendo o modelo apresentado ser facilmente adaptado a qualquer realidade urbana (SALICRÚ, FLEURENT e ARMENGOL, 2011). Desta forma, tornou-se possível planejar as necessidades de cada rota de maneira individual e considerar indicadores para identificar as causas de impontualidade que eram desconhecidas ou ignoradas antes da utilização do novo modelo. Zhang e Zhai (2013) apresentam um método de pesquisa operacional baseado em programação de metas para configuração da tabela de horários de despacho de ônibus. O resultado deste modelo multi-objetivo são tabelas de horários que atendem o interesse de ambos os envolvidos: dos passageiros, que desejam aguardar o menor tempo possível para utilizar o transporte público, e das companhias de transporte que, por sua vez, querem implementar a operação utilizando a menor quantidade de veículos possível.

As cidades devem estar preparadas para atender às demandas de mobilidade urbana de forma eficiente, de acordo com as exigências de sua população. Interessado na previsão da demanda por viagens urbanas, Souche (2010) apresenta as variáveis estruturais determinantes para calibrar um robusto método econométrico aplicado na área de transportes. A literatura mostra diversas variáveis estruturais para mensuração da demanda por viagens urbanas como, por exemplo, o custo de realização de uma viagem, a renda das famílias que viajam (Schafer; Victor, 2000), a disponibilidade dos serviços de transportes e fatores espaciais tais como a densidade da população. Os resultados deste trabalho mostram que duas variáveis são estatisticamente significativas: o custo de utilização do transporte (o automóvel particular e o transporte público), e a densidade urbana. Adicionalmente, as viagens urbanas de carro

aumentam quando o custo médio da utilização do carro e a densidade urbana diminuem. De outra forma, a combinação destas duas variáveis, com a redução no custo médio de transporte público, encoraja o uso deste último.

Rajput, Agarwal e Mahajan (2011), ao analisarem o transporte público da cidade de Pune (Índia), identificaram que o congestionamento do tráfego é o principal problema do trânsito e afeta todos os modos de transporte. A partir disso, os autores sugerem algumas propostas para solução da crise no transporte urbano, tais como a construção de novas vias com aprimoramento das calçadas e do espaço para viajantes não motorizados, o incentivo ao uso de bicicletas, o aperfeiçoamento do serviço de transporte público através da renovação da frota de ônibus, a implementação de sistemas de estacionamentos para veículos de passeio, o redesenho das rotas de trânsito para ônibus evitando congestionamentos, e a utilização de tecnologia para gestão do tráfego em tempo real.

Frente a esta variedade de aspectos relevantes que tratam da problemática de mobilidade urbana e transportes públicos, podemos destacar a preocupação mundial com estes temas em diferentes dimensões da sociedade. Não há um problema específico sendo tratado, assim como não há uma metodologia de pesquisa predominante. Desta forma, esta breve revisão evidencia a importância dada à questão da mobilidade urbana em relação a diversas áreas do conhecimento.

3. A Mobilidade Urbana e Transporte Público sob a Perspectiva da Sustentabilidade

O crescimento do consumo de energia, o aumento pelo interesse na sustentabilidade ambiental e a evolução tecnológica, levam à necessidade de rever os critérios de planejamento de sistemas de mobilidade urbana nas grandes cidades e áreas metropolitanas (FALVO *et al.*, 2011). Neste sentido, o transporte é uma parte essencial do desenvolvimento econômico nacional, social e sustentável, que pode produzir efeitos positivos e negativos sobre o meio ambiente e a qualidade de vida (SUSNIENÉ, 2012). Neste sentido, Kersys (2011) afirma que o interesse por sistemas urbanos de transportes sustentáveis e mobilidade urbana estão crescendo no mundo, devido ao incremento da população e pela busca de melhoria na qualidade de vida. No entanto, a mobilidade urbana é resultado de um conjunto de políticas de transportes e circulação que proporcionam o amplo acesso aos espaços urbanos através da priorização de modos de transporte coletivo.

Kepaptsoglou *et al.* (2012) propõem um sistema que auxilia as cidades em projetar, desenvolver, implementar, avaliar e melhorar o gerenciamento da mobilidade baseado em

princípios da Gestão da Qualidade Total. A gestão da qualidade está relacionada com a atividade de transporte e mobilidade, e concentra-se em ajudar os operadores de transporte a adotar ferramentas e políticas de gestão da qualidade no desenvolvimento destes serviços (KEPAPTSOGLU *et al.*, 2012). Neste trabalho, é apresentado o Sistema de Gestão da Qualidade para a Gestão da Mobilidade (*Quality Management System for Mobility Management – QMSMM*), o qual representa um conjunto de medidas estruturadas em forma de ciclo (baseadas no ciclo de Deming) com o objetivo de auxiliar os tomadores de decisão numa abordagem sistemática para concepção, planejamento, implementação e avaliação das atividades no gerenciamento sustentável das práticas de transporte. O sistema de gestão foi aplicado na cidade de Kortrijk (Bélgica) e os resultados apresentados pela auditoria destacaram pontos fortes e fracos na Gestão da Mobilidade Sustentável. No entanto, verificou-se que a Gestão de Mobilidade foi compatível, de forma geral, com a proposta, enquanto a Gestão da Mobilidade Sustentável foi específica em algumas medidas mensuradas pelo sistema de gestão.

Contribuindo para sistemas de mobilidade sustentáveis, o trabalho de Falvo *et al.* (2011) apresenta uma proposta de arquitetura para o sistema de energia integrado. A ideia é focada na integração da mobilidade urbana através de dois sistemas: o sistema de trânsito de metrô e um sistema de veículos elétricos. Os autores realizaram uma análise para avaliar a energia de frenagem de uma linha de metrô como energia para abastecimento de veículos movidos a eletricidade. A simulação foi aplicada num caso real utilizando os dados de uma linha de metrô da cidade de Roma (Itália). A integração proposta prevê a solução de problemas de energia em relação aos dois sistemas e, em geral, pode garantir a minimização do impacto ambiental, bem como a otimização do serviço através da maximização da oferta de transporte. Além disso, esta proposta apresenta mínimos impactos econômicos, devido à otimização logística e a aplicação tecnológica de uma “usina” de energia já existente.

Interpretações modernas de desenvolvimento urbano sustentável exigem a redução do uso de carros particulares através da melhoria da qualidade dos serviços de transportes públicos (SUSNIENÉ, 2012). Portanto, identificar as ineficiências do sistema de transporte público contribui para a melhoria da gestão de serviços, ampliando a cobertura e aumentando a atratividade de serviços de transportes públicos. Susniené (2012) afirma que a chave para a prestação de serviço eficaz ao cliente é a determinação precisa das necessidades do cliente e de respostas consistentes para garantir a sua satisfação. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é obter uma melhor compreensão através do método SERQUAL desenvolvido por Parasuraman *et al.* (1994), a fim de identificar os fatores determinantes para satisfação dos usuários e adaptar

aos serviços de transportes públicos. Este trabalho foi realizado utilizando métodos estatísticos de análise, tais como a aplicação de estatística e análise de confiabilidade na Lituânia. Os resultados desta pesquisa evidenciam que o conjunto de vantagens dos transportes públicos incluem uma maior mobilidade, a redução da dependência do uso de automóveis, bem como a diminuição das necessidades de expansão de rodovias. Adicionalmente, aumentar a utilização dos transportes públicos a nível regional é essencial para impedir o encolhimento de rotas de serviço público de transporte, diminuir o tempo de viagem, cobrir áreas mais amplas e melhorar a qualidade do serviço para assegurar a satisfação dos clientes.

Kersys (2011) ressalta que a política de trânsito é um aspecto pouco explorado para atender as demandas de transporte. As necessidades de deslocamento foram resolvidas, em primeiro plano, através da concessão de subsídios econômicos para veículos de motorização individual. Corroborando a isso, tem-se na economia mundial a utilização do petróleo como principal fonte de combustível. O pesquisador investiga o desperdício de tempo com o fluxo do tráfego urbano, principalmente em relação aos congestionamentos. A perda de tempo e as despesas com os engarrafamentos são oriundos de parâmetros e pressupostos físicos, ou seja, pela falta de instalações e estruturas adequadas a atender as exigências de mobilidade (KERSYS, 2011). Um sistema urbano sustentável, para reduzir os custos de tráfego com congestionamento, deve basear-se, a longo prazo, em políticas claras que considerem o desenvolvimento estável.

Desta forma, considerando-se uma maior ênfase em sustentabilidade e diminuição dos impactos negativos sobre a sociedade e o meio ambiente, o transporte público está na vanguarda para resolução dos principais problemas das regiões urbanas e sistemas de transporte modernos (SUSNIENÉ, 2012). Devido ao longo tempo de vida das infraestruturas de transporte, as estratégias de planejamento requerem uma projeção futura confiável sobre a mobilidade motorizada (SHAFER, 1998). É importante destacar que o elevado custo social pode ser enfrentado mediante a introdução de políticas de gestão da mobilidade na busca pela mudança da distribuição modal do transporte público. Este tipo de transporte faz uma melhor utilização dos meios terrestre, aéreo e de fontes de energia do que o modo de transporte individual (CIPRIANI, GORI e PETRELLI, 2012).

Analisando as pesquisas apresentadas nesta seção, percebe-se a necessidade de políticas que desenvolvam a sustentabilidade de forma efetiva, sendo necessário estudos e aprimoramentos. Cabe ressaltar que estes estudos foram realizados em países como Espanha, Itália, Lituânia, Estados Unidos, Índia, Brasil, Bélgica, China e Portugal, sendo que cada um

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

trata de diferentes preocupações em relação ao problema de mobilidade urbana e transporte público, com enfoque especial na sustentabilidade. O Quadro 1 apresenta uma síntese dos artigos analisados e proporciona uma visão geral em relação aos campos de estudo ligados aos temas abordados neste trabalho.

Quadro 1 - Resumo dos Artigos Analisados

Artigo / Autores	Objetivos / Propostas	Metodologia Aplicada / Ferramentas de Análise	Contribuições, Resultados e Observações
Wu, Florian e Marcotte (1994)	Desenvolve a modelagem de congestionamento nos sistemas de trânsito através de uma rede rodoviária e linhas de tráfego considerando a escolha dos passageiros.	Propõe algoritmos, métodos de linearização e projeção para encontrar soluções.	Tratam do <i>Transit Equilibrium Assignment Problem (TEAP)</i> . Modelam o comportamento dos usuários de trânsito através do conceito de estratégias dentro de uma rede definida.
Shafer (1998)	Afirma que a demanda por transportes públicos é determinada, parcialmente, pela densidade populacional urbana e pela ocupação destes espaços.	A partir de um conjunto de dados históricos (1960-1990) apresenta os principais meios de transporte utilizados (automóvel, ônibus, trem e aeronaves).	A escolha dos meios de transportes depende das lentas mudanças nas infraestruturas de transporte.
Shafer e Victor (2000)	Projeta o volume de tráfego e a participação dos diferentes modos de transporte para 11 regiões até 2050.	No longo prazo, os modos de transportes são selecionados pela velocidade do serviço, não pelas políticas de mobilidade.	Em grande parte as regiões refletem o legado histórico das infraestruturas, que dependem da densidade demográfica, as políticas e costumes. Afirma que os sistemas de transporte comportam-se em padrões determinísticos.
Srinivasan (2005)	Analisa os aspectos em relação ao uso das áreas urbanas e sua relação com a infraestrutura de transporte.	A modelagem é estimada em dois diferentes processos: <i>Cellular Automation</i> e Modelos de Markov.	Conclui que a localização das indústrias e das áreas comerciais, na cidade Nova Délhi (Índia), contribui para a ocupação das áreas urbanas. A falta de dados confiáveis é um grande problema para o planejamento urbano nas grandes cidades.
Marín e Jarmillo (2009)	Determina a localização das estações de embarque e desembarque, considerando diferentes tipos de modais.	Utiliza Algoritmos de <i>Branch and Bound</i> e Decomposições de Bender. Resolvido pelo CPLEX versão 9.0	Busca maximizar a demanda de transporte público através da modelagem da rede urbana de trânsito rápido considerando a limitação orçamentária, o número de rotas e a opção de escolha do tipo de modal pelos usuários.
Nia et al. (2011)	Desenvolve um novo <i>framework</i> para facilitar a avaliação multidimensional das políticas públicas de transportes integrados.	Apresenta a modelagem através de Algoritmos Genéticos para propor a estratégia de integração.	Propõe que uma política integrada de transportes possui quatro dimensões: investimentos, preços, regulamentação e gestão. A melhoria do transporte público depende de políticas para reduzir custos e a demanda por investimentos.

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Quadro 1 - Resumo dos Artigos Analisados (Continuação...)

Artigo / Autores	Objetivos / Propostas	Metodologia Aplicada / Ferramentas de Análise	Contribuições, Resultados e Observações
Pinjari et al. (2011)	Desenvolve uma metodologia mista multidimensional para a modelagem integrada no planejamento de transporte urbano.	Estudo de caso em uma área da cidade de São Francisco (EUA) demonstra a correlação da localização das residências em relação a tipos de transporte.	O modelo aborda quatro diferentes dimensões: localização residencial (longo prazo), propriedade de veículo (médio prazo), propriedade de bicicleta (médio e curto prazo), e deslocamento p/ o trabalho.
Falvo et al. (2011)	Apresenta uma proposta de arquitetura para o sistema de energia integrado de mobilidade urbana. Propõe a utilização da energia de frenagem dos vagões de uma linha de metrô como energia para abastecer veículos elétricos.	Integração do sistema de metrô e do sistema de veículos elétricos. A simulação é aplicada num caso real utilizando dados de uma linha de metrô da cidade de Roma (ITA).	A integração destes sistemas propicia a solução de problemas de abastecimento de energia elétrica, otimização do serviço através da maximização da oferta de transporte elétrico, além de redução de impactos ambientais e econômicos.
Kersys (2011)	Investiga o desperdício de tempo com o fluxo de tráfego com foco nos congestionamentos.	Utiliza o método de investigação avaliando o valor do tempo para o tráfego de tempo de pessoas e mercadorias. A função de fluxo de velocidade depende das características das instalações, topografia, condições de tempo, estrutura de rede e possíveis alternativas de Otimização é realizada com o objetivo de minimizar o total de horas de passageiros viajarem (PHT) para atender a demanda total redistribuindo o espaço viário entre os modos de viagem.	Propõe que um sistema urbano sustentável deve se basear no longo prazo, em políticas que considerem o desenvolvimento estável. Ressalta que a política de trânsito é um aspecto pouco explorado para atender as demandas de mobilidade e transportes. Todas as etapas de estimativa dependem da dinâmica de variação do sistema de transporte, qualidade dos dados disponíveis e avaliação do tempo.
Salicrú, Fleurent e Armengol (2011)	Desenvolve a modelagem da tabela de horários para maximizar a pontualidade de transporte público de ônibus.	O método utiliza etapas de refinamento de dados, segmentação de faixas de horários, análises estatísticas, validação e simulação da operação.	O modelo utiliza dados históricos da cidade de Barcelona (ESP), no qual foram testados. É de fácil adaptação para qualquer realidade urbana.
Rapjput, Agarwal e Mahajan (2011)	Propõe um conjunto de soluções para a crise do transporte público.	Analísaram o transporte público da cidade Pune (Índia). Congestionamento é o principal problema do trânsito em todos os modos de transporte.	Sugerem: construção de vias com amplo calçamento e espaço para viagens não motorizadas, implementação de sistemas de estacionamentos públicos, utilização de tecnologia para gestão do tráfego em tempo real.
Cipriani, Gori e Petri (2012)	Implementa a configuração da rede urbana de trânsito considerando multimodais.	O procedimento de solução é dividido em duas partes: um algoritmo de geração heurística de rota (HRGA) e um algoritmo genético.	Aplicado na cidade de Roma (ITA), em uma rede de estradas de complexa topologia. Sistema multimodal (trens, ônibus e bondes).

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Quadro 1 - Resumo dos Artigos Analisados (Continuação...)

Artigo / Autores	Objetivos / Propostas	Metodologia Aplicada / Ferramentas de Análise	Contribuições, Resultados e Observações
Kepaptsoglou et al. (2012)	Desenvolve um sistema para auxiliar as cidades em projetar, desenvolver, implementar, avaliar e melhorar a gestão da mobilidade sustentável.	Utiliza princípios da Gestão da Qualidade Total. Desenvolve o Sistema de Gestão da Qualidade para Gestão da Mobilidade baseado no Ciclo de Deming.	Afirma que a gestão do transporte e da mobilidade necessita adotar ferramentas e políticas de gestão da qualidade. O sistema foi aplicado na cidade de Kortrijk (Bélgica).
Susniené (2012)	Identifica os fatores determinantes para a satisfação dos usuários de transporte público.	Utiliza o método SEQUAL desenvolvido por Parasuraman et al. (1994). Utiliza dados estatísticos da Lituânia.	Os resultados desta pesquisa apontam que aumentar a utilização dos transportes públicos a nível regional é essencial para diminuir o tempo de viagem, a redução da dependência do automóvel e cobrir áreas mais amplas.
Zheng e Gerolimis (2013)	Minimiza o total de horas de viagem de passageiros através da redistribuição do espaço viário considerando o transporte multimodal.	Utiliza o método de <i>Diagrama Macroscópico Fundamental (Macroscopic Fundamental Diagram – MFD)</i> para a dinâmica do sistema de tráfego. Os critérios para particionamento de uma região são: a distribuição homogênea do congestionamento, as características topológicas e os tipos de modais.	São investigadas estratégias de preços para proporcionar a utilização de modos de transportes mais eficientes. O estudo desenvolvido é realizado em duas regiões de uma cidade considerando a rede urbana de tráfego. Apresenta um modelo de dinâmica física para subsidiar estratégias de distribuição de espaço para formulação de diferentes políticas de mobilidade.
Zhang e Zhai (2013)	Propõe uma tabela de horários para transporte de ônibus baseada no interesse dos passageiros e das empresas de transporte.	Desenvolve um modelo matemático multi-objetivo para programação do despacho de ônibus para operação de transporte público considerando tabela de horários.	O modelo matemático desenvolvido é aplicado em uma operação específica de transporte considerando as aplicações práticas e teóricas. O método de pesquisa operacional é baseado em programação de metas.
Liu et al. (2014)	Minimiza o tempo total de viagem, em que o através de paragem de transferência e a janelas de tempo que chega de destino considerando o custo total de viagem na rede de trânsito urbano.	Aplicação do método multicritério que determina um conjunto de variáveis de decisão dentro de uma possível região para minimizar um vetor de funções objetivo que, geralmente, entram em conflito uns com os outros. Dois algoritmos são projetados para resolver o <i>Multi Modal Shortest Path Problem (MM-SPP)</i>	Os algoritmos apresentaram resultados computacionais exatos para as instâncias utilizadas. Nos algoritmos propostos são considerados não apenas o transporte multimodal na rede de transporte urbano, mas também a aplicação em problemas análogos. Neste sentido, estes algoritmos podem ser aplicados, por exemplo no transporte de carga multimodal.

4. Abordagens da Pesquisa Operacional para Mobilidade Urbana e Transporte Público

Por várias décadas, a Pesquisa Operacional tem sido bem sucedida para resolver uma grande variedade de problemas de otimização em transporte público (DESAULNIERS e HICKMAN, 2007). Consequentemente, diversos sistemas e softwares utilizados para o planejamento e execução das operações de trânsito são desenvolvidos através das técnicas de Pesquisa Operacional. Neste sentido, problemas na área de transporte público e mobilidade urbana têm atraído o interesse de pesquisadores da Pesquisa Operacional devido à complexidade destes problemas e da importância em casos práticos da vida moderna (DESAULNIERS e HICKMAN, 2007). Considerando isto, o problema global é tido como de difícil tratamento. Desta forma, os problemas são divididos em um conjunto de subproblemas que são normalmente resolvidos sequencialmente em fases distintas do processo de planejamento (estratégico, tático e operacional), e mesmo durante as operações (controle em tempo real).

4.1. Planejamento Estratégico

No nível estratégico, o planejamento de trânsito considera a projeção da rede e das rotas para atender a demanda de passageiros. Considerando que a demanda baseia a configuração da rede, o problema para projetar a rede depende fortemente do método que determina a escolha das rotas a partir de suas origens até seus destinos. Conforme Desaulniers e Hickman (2007), destacam que o planejamento estratégico pode apresentar dois tipos de problemas abordados na Pesquisa Operacional: configuração da rede e a atribuição de passageiros.

No transporte público o problema de projeto de rede (Network Design) é mais complexo que um problema tradicional de rede, pois além de determinar quais arestas incluir na rede, a configuração de rede de trânsito necessita da estruturação destas arestas de forma fixa e a determinação da frequência do serviço em cada rota. Desta forma, o resultado do projeto de rede deve incluir um conjunto de rotas e suas frequências. De forma geral, o problema é formulado através de um gráfico de nós, arestas e rotas. Seja $G = (N, A)$ um grafo com N , o conjunto de nós, e A , o conjunto de arestas, e R representa o conjunto de rotas. Os nós representam intersecções, mas também pode representar uma zona de centróides onde uma zona geográfica pode ser representada por um único ponto (um centróide). A ligação entre nós representa um modo particular de transporte entre estes nós, e uma rota representa uma sequência de nós e ligações de um único modo (DESAULNIERS e HICKMAN, 2007).

Um dos principais desafios do projeto de rede está na especificação da função objetivo. Normalmente, o objetivo é minimizar o custo ou o tempo total de viagem. O custo pode ser encontrado através da aplicação de diferentes pesos na função objetivo para os diferentes componentes de tempo de viagem, tais como tempo de deslocamento, tempo de espera inicial, tempo de transferência e o tempo de saída separadamente. Algumas formulações incluem também o número de transferências como um componente no custo generalizado. Ademais, os custos de operação do trânsito também podem ser considerados (DESAULNIERS e HICKMAN, 2007).

Uma das questões críticas em planejamento estratégico é determinar a demanda em cada rota e outras medidas de consumo de serviços. As medidas estratégicas de desempenho, do ponto de vista do passageiro, referem-se, principalmente, à quantidade de tempo e dinheiro gasto pelos passageiros viajando pela rede. Assim, a dimensionar a demanda de passageiros (*Passenger Assignment*) é um problema crítico para determinar o desempenho do sistema de trânsito.

Considerando o dimensionamento de passageiros em redes sem congestionamentos, podemos utilizar métodos de atribuição baseados em algoritmos do menor. Nestes casos, a demanda total de cada par é designada ao caminho mais curto. No entanto, as variações existentes de métodos de menor caminho baseiam-se em duas exceções: os tempos de espera e linhas comuns na rede (DESAULNIERS e HICKMAN, 2007). Para tratar uma rede considerando congestionamentos é preciso examinar os efeitos da limitação das capacidades para caminho na rede. Isso proporciona um maior tempo de espera em condições de superlotação. Desta forma, o atraso que cada passageiro impõe aos outros passageiros deve estar contemplado no modelo. Em geral, o efeito de aglomeração e/ou da capacidade dos veículos é incorporada na modelagem por meio do impacto da espera adicional ou pelo tempo de transferência, pois não é possível embarcar em um veículo quando ele está cheio. No entanto, nestes modelos é importante notar que o efeito dos congestionamentos não é simétrico por fluxos de arcos.

4.2. Planejamento Tático

No planejamento tático há a preocupação com as etapas intermediárias do processo de planejamento em que as frequências de rotas são construídas e o modelo do serviço é determinado. Para Desaulniers e Hickman (2007) o planejamento tático inclui a definição de

frequências (*Frequency Setting*) e o agendamento de horários (*Timetabling*) os quais são responsáveis pela estrutura e nível de serviço aos usuários.

Considerando que um conjunto de frequências é um produto necessário da configuração da rede, devemos observar que os administradores do sistema devem determinar as frequências das rotas, assim como ajustá-las de acordo com a variação do padrão de operação e da demanda. Neste sentido, o problema de ajuste de frequências pode ser abordado de diversas maneiras diferentes. O principal objetivo é selecionar as frequências que maximizam o serviço aos passageiros, sujeito a um número de restrições.

A tabela de horários (*Timetabling*) é o processo de conversão da frequência do serviço desejado em cada rota através de uma programação. As informações necessárias para estruturar este processo incluem a estrutura das rotas, a frequência do serviço, as paradas necessárias e os horários de folga. O resultado é um conjunto de viagens e os horários programados nos terminais e para os importantes pontos da rota. Na maioria dos métodos de planejamento de trânsito, o cronograma de horários (*Timetabling*) é considerado uma atividade do planejamento operacional, pois ocorre com frequência a cada necessidade de ajuste dos serviços, por exemplo a cada 3-6 meses (DESAULNIERS e HICKMAN, 2007).

4.3. Planejamento Operacional

Dado um conjunto de viagens agendadas para operar, um conjunto de recursos disponíveis (ônibus e motoristas) e sua distribuição entre as garagens que fazem parte da rede de trânsito, a fase de planejamento operacional destina-se a construção de escala de horários para veículos e tripulação que minimizem os custos totais, respeitando todas as restrições legais e operacionais. Esta fase também inclui o planejamento da cessão de vagas de estacionamento para os veículos nas garagens, bem como estabelecer os horários de manutenção da frota.

A Programação de veículos (*Vehicle Scheduling*) desempenha um papel importante na gestão, uma vez que é o primeiro passo do planejamento, onde o foco principal é minimizar os custos nominais, de aquisição, operacionais e de veículos. Em geral, a definição dos horários se aplica para os dias da semana, enquanto um calendário diferente é definido para cada dia da semana. Estes calendários são geralmente válidos por um determinado período de tempo. Assim a programação de veículos, a um nível de planejamento, precisa ser realizada de acordo com cada temporada. Deve notar-se que, em grandes cidades as frotas de ônibus funcionam 24 horas por dia, o que torna mais difícil definir um problema diário. No entanto, dado o baixo volume de atividades durante a noite, um calendário de 24 horas é dividido em um calendário de turnos

O problema de programação de veículos enfrentados pelos responsáveis pelo transporte público corresponde ao problema de programação de um único depósito de veículo (*Single Depot Vehicle Scheduling Problem - SDVSP*) quando a operação dispõe de uma única garagem (depósito) para sua frota, e múltiplas garagens (*Multiple Depot Vehicle Scheduling Problem - MDVSP*) quando são utilizadas várias garagens para diversos veículos que estão disponíveis. Uma extensão importante para o MDVSP é a possibilidade de alteração dos horários de partida das viagens programadas dentro de determinados intervalos de tempo, adicionando as “janelas de tempo”. Tal flexibilidade nos horários de partida, que podem ser considerados quando a frequência em uma rota não é elevada, muitas vezes pode resultar em significantes economias, e tornar possível fornecer viagens adicionais. Para solução deste problema são utilizadas diversas técnicas de Pesquisa Operacional, tais como *Branch and Bound*, Relaxamento Lagrangeano e Heurísticas (DESALUNLIERS, LAVIGNE e SOUMIS, 1998; KLIOWER, BUNTE e SUHL, 2006; PRATA, 2009; VISENTINI *et al.*, 2013;)

A partir de um cronograma de atividades anônimo definido para um determinado horizonte de tempo (semana ou mês) é necessário definir os trabalhadores necessários para cumprir as funções de acordo com a disponibilidade dos mesmos. Esta tarefa, que pode ser chamada de escala de serviço (*Crew Rostering*), inclui respeitar as restrições legais que regem as atividades dos trabalhadores, como por exemplo: o condutor de veículos não pode trabalhar mais do que certa quantidade de horas ou dias consecutivos (DESAULNIERS e HICKMAN, 2007). Muitas vezes o processo de otimização é restrito pela legislação, no entanto em algumas situações o objetivo é distribuir a carga de trabalho uniformemente entre os trabalhadores, e isso resulta em interessantes problemas de otimização.

Na prática, a solução de problemas de escalas para serviços de trânsito consiste em resolver primeiramente uma sequência de problemas de atribuição para construir uma solução inicial e, em seguida, utilizando um procedimento de melhoria local para melhorar esta solução (DESAULNIERS e HICKMAN, 2007). De um ponto de vista de programação matemática, o problema de escalas de serviços pode ser formulado como um problema de conjunto particionado (*Set Partitioning Problem*) ou um problema de cobertura (*Covering Problem*).

No entanto, este modelo não é usual para problemas de escalas de trabalho de sistemas de transporte público. Uma diferença importante entre os problemas de escala de serviço abordando diferentes modos de transportes (rodoviário, aéreo e ferroviário) parece ser o tamanho das instâncias em problemas reais, que é maior para os problemas de trânsito.

Um problema de planejamento operacional que tem atraído pouca atenção na literatura é a gestão da área de estacionamento em depósitos (garagens) de veículos (*Parking and Dispatching*). Em cidades com engarrafamentos, os depósitos têm, muitas vezes, espaços limitados e completamente lotados durante todo dia. Estes estacionamentos devem considerar diferentes tipos de veículos que são necessários para operar as linhas de ônibus. Portanto, quando um veículo necessita deixar o depósito durante a manhã, diversos outros veículos podem necessitar de remoção para liberar o caminho até a saída, podendo resultar em atrasos. Duas alternativas podem ser consideradas para evitar atrasos. A primeira consiste em atribuir uma rota para o veículo que estiver mais acessível no horário de saída, neste caso pode ocorrer uma incompatibilidade. A segunda alternativa é reordenar os veículos durante a noite para que todos eles estejam corretamente posicionados para a saídas da manhã. Esta troca de lugares nas posições dentro das garagens é chamada de *Crossing* ou *Maneuver* (DESAULNIERS e HICKMAN, 2007). A partir de uma sequência de chegadas de ônibus durante a noite, uma tabela de horários de saídas na parte da manhã e o tipo de veículo necessário para cada rota, o problema de estacionamento de veículos para expedição consiste em estacionar os veículos na garagem de tal modo que minimize o número de manobras e incompatibilidades para realizar as saídas. Por razões de segurança, os veículos não estão autorizados a ir para trás na garagem. Portanto, assumindo que a garagem opera com filas, veículos entram nas vias em uma extremidade e saem em outra, respeitando a capacidade destas filas. Finalmente, dado o espaço limitado disponível para executar manobras, só são permitidas trocas entre veículos da mesma fila. O problema de estacionamento de veículos é um problema de planejamento operacional que normalmente necessita ser resolvido diariamente devido à alta variabilidade dos tipos de veículos disponíveis (DESAULNIERS e HICKMAN, 2007).

Outra área onde a Pesquisa Operacional pode ser útil dentro do planejamento de operações no trânsito público é a programação de manutenção de veículos (*Maintenance Scheduling*). Como os custos de manutenção têm relevante participação no total de gastos do sistema de transporte, alguns operadores estão investindo em sistemas de agendamento de manutenção para reduzir os custos de manutenção, mantendo o nível de segurança e atraente frente aos usuários. Infelizmente, os sistemas de manutenção não são aplicáveis em todos os lugares (DESAULNIERS e HICKMAN, 2007).

Quando o espaço nas garagens é limitado, a atribuição dos veículos às rotas é executada diariamente conforme dia e se torna impossível prever quantos quilômetros cada veículo vai viajar nos próximos dias. Neste caso, os veículos são simplesmente retirados da frota quando

necessitam de reparos ou manutenção. Estas retiradas de última hora podem, muitas vezes, reduzir a qualidade do serviço devido à falta de veículos disponíveis para atender as rotas. Por outro lado, para garagens com maiores espaços de estacionamento pode ser desejável atribuir motoristas específicos para os veículos por um longo período. A lógica por trás desta estratégia é que os motoristas, por estarem designados para o mesmo veículo todos os dias, estão mais sensíveis e responsáveis em apontar as necessidades mecânicas de seus veículos e relatar problemas menores antes que eles se tornem motivos de parada. Neste contexto, onde programações de veículos são fixadas para um longo período de tempo, um sistema de manutenção pode desenvolver um agendamento de manutenções quando os veículos não estão sendo utilizados, de forma a maximizar a utilização dos recursos (DESAULNIERS e HICKMAN, 2007).

4.4. Controle em Tempo Real

Em operações reais, uma grande variedade de fatores exógenos e endógenos pode afetar a prestação de serviços, como o clima, os incidentes, as variações nas condições de tráfego, avarias de veículos, etc. Neste sentido, tais fatores podem diminuir o nível de serviço disponibilizado aos usuários. Para esta discussão, nós diferenciamos as interrupções de serviço maiores e menores: pequenas interrupções são aquelas que criam pequenas perturbações na programação de horários (por exemplo, 5-10 minutos), e grandes interrupções causam longas paradas na programação. A distinção é feita, a fim de diferenciar as típicas respostas para estes problemas no serviço (DESAULNIERS e HICKMAN, 2007).

Para enfrentar estes desafios, o operador de trânsito pode empregar uma variedade de técnicas de controle de operações que dependem da magnitude da perturbação no serviço. Geralmente, apenas perturbações menores do cronograma e pequenas interrupções de serviço são as prioridades nas técnicas mais comuns aplicadas. Quando as principais interrupções de serviço ocorrem, medidas de controle mais complexas devem ser consideradas. Em todas as abordagens de modelagem, o objetivo é minimizar o atraso total para os passageiros (ou tempo de espera). Uma série de estratégias de controle de tráfego em tempo real utilizam técnicas de programação matemática a partir de modelos determinísticos aplicados às operações de trânsito.

Resumidamente, o problema global enfrentado pelos operadores de trânsito é oferecer à população um serviço de boa qualidade que permita aos usuários viajar facilmente a uma tarifa baixa. Adicionalmente, existe uma missão social, que visa reduzir a poluição e o tráfego congestionado, bem como o aumento da mobilidade da população. Todas estas iniciativas estão

sujeitas a restrições orçamentárias que os forçam a gerir os recursos de alto valor, tais como ônibus, motoristas, instalações de manutenção e garagens de ônibus da forma mais eficiente possível. Além disso, estes problemas são complexos porque envolvem passageiros, ônibus e motoristas que estão sujeitos a preferências individuais e restrições, e interagir uns com os outros de acordo com um conjunto de relacionamentos apresenta grandes desafios. Desta forma, para Desaulniers e Hickman (2007), a Pesquisa Operacional é considerada uma ferramenta essencial para auxiliar o planejamento e a execução das operações de trânsito de forma eficiente.

5. Considerações Finais e Oportunidades de Pesquisas

Realizada esta discussão teórica acerca dos trabalhos que envolvem a mobilidade urbana e transporte público sob diferentes perspectivas, pode-se perceber importantes questões que indicam oportunidades de desenvolvimento e aplicação de modelos e técnicas de solução a partir da Pesquisa Operacional. Diante das considerações apresentadas neste trabalho, relacionam-se importantes aspectos que podem servir de objeto para futuras pesquisas nos campos operacional, tático e estratégico.

O *desenvolvimento de sistemas de transporte públicos integrados* se mostra como potencial campo de exploração. Os trabalhos de Nia *et al.* (2011) e Pinjari *et al.* (2011) apresentam estudos para viabilizar a integração de diferentes modos de transporte público de acordo com a preferência pelo uso de determinados meios de transporte (bicicleta, automóvel, ônibus e carona). Além disto, estudos sobre a ocupação das áreas urbanas (residenciais e comerciais) também são contemplados e indicam que as políticas públicas são fatores determinantes para o desenvolvimento de sistemas de transporte eficientes. Neste sentido, ao se trabalhar com modelos integrados, tem-se a possibilidade de desenvolver inovadores modelos de otimização que atendam a crescente necessidade por mobilidade nos grandes centros urbanos.

Desta mesma forma, observou-se que pesquisas que abordam a *modelagem de congestionamentos de tráfego* ainda são bastante escassas no âmbito da mobilidade urbana, embora os congestionamentos sejam apontados como os principais responsáveis pelos problemas de trânsito (RAJPUT, AGARWAL e MAHAJAN, 2011). O desenvolvimento de trabalhos que considerem a gestão da operação de trânsito de forma a minimizar os engarrafamentos é um campo de estudo bastante frutífero e carente de soluções a partir da modelagem matemática.

A *mobilidade urbana sustentável* é um campo de pesquisa emergente conforme os trabalhos de Falvo *et al.* (2011) e Susniené (2012). Desenvolver sistemas de transporte público que promovam a mobilidade urbana através de uma abordagem sustentável tem sido uma necessidade social cada vez mais latente. Modelos inovadores e alternativos a partir de energia renovável (eletricidade) que integrem e incentivem o uso de diferentes tipos de transportes podem trazer importantes contribuições para mobilidade urbana sustentável.

No Brasil, as demandas por acesso a melhores condições de mobilidade são geradas pelo desenvolvimento social e econômico do país. Além disso, o país tem sido sede de eventos de grande magnitude que necessitam atender demandas localizadas e extremamente elevadas por mobilidade nos grandes centros urbanos. No Brasil, a Lei nº 12.587 de 3 de Janeiro de 2012 (BRASIL, 2012) que institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana é um incentivo para o desenvolvimento de modelos matemáticos eficientes que respeitem os limites orçamentários e contribuam em aplicações práticas para a sociedade. Neste sentido, a Pesquisa Operacional se apresenta como importante método de pesquisa para desenvolver soluções viáveis e aplicadas.

Estas oportunidades de pesquisa visam contribuir para o aprimoramento e desenvolvimento de modelos para a mobilidade urbana focada em transporte público. Tais considerações possibilitam evidenciar importantes aspectos que, mesmo já sendo abordados, têm relevância para nortear futuras pesquisas, visto a evidente necessidade de implementações desta temática a serviço da sociedade.

Referências

BRASIL (2012). Lei nº 12.587, de 03 de janeiro de 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br>. Acesso em 25 de jul. 2013.

Chin, R. (2010). Sustainable Urban Mobility in 2020. *The Futurist*. v.44. n.4. 29-33.

Cipriani, E., Gori, S., Petrelli, M. (2012). Transit network design: A procedure and an application to a large urban area. *Transportation Research Part C*. v.20, n.1, 3-14.

Costa, M.S. (2003). Mobilidade Urbana Sustentável: Um Estudo Comparativo e as Bases de um Sistema de Gestão para Brasil e Portugal. Dissertação de Mestrado. UFSCar. São Paulo.

Costa, M.S. (2008). Um índice de mobilidade urbana sustentável. Tese de Doutorado. USP. São Paulo.

Desaulniers, G, Lavigne, J., Soumis. (1998). Multi-depot vehicle scheduling problems with windows and waiting costs. *European Journal of Operational Research*. v.111, n.3. 479-494.

Desaulniers, G., Hickman, M.D. (2007). *Handbook in OR & MS*. v.14, cap.2, Elsevier.

- Fagin, H. (1963). Urban mobility and transportation technology: prospects for relief. *Transportation Journal*. v.3, n.1, 20-25.
- Falvo, M.C., Lamedica, R., Bartoni, R., Maranzano, G. (2011). Energy management in metro-transit systems: an innovative proposal toward an integrated and sustainable urban mobility system including plug-in electric vehicles. *Electric Power Systems Research*. v.81. n.12, 2127-2138.
- Liu, L., Yang, J., Mu H., Li, X., Wu, F. (2014). Exact algorithms for multi-criteria multi-modal shortest path with transfer delaying and arriving time-window in urban transit network. *Applied Mathematical Modelling*. v.38, n.9-10, 2613-2629.
- Kepaptsoglou, K., Meerschaert, V., Neergaard, K., Papadimitriou, S., Rye, T., Schremser, R., Vleugels, I. (2012). Quality management in mobility management: a scheme for supporting sustainable transportation cities. *International Journal of Sustainable Transportation*. v.6, n.1, 235-256.
- Kersys, A. (2011). Sustainable Urban Transport System Development Reducing Traffic Congestions Costs. *Engineering Economics*. v.22, n.1, 5-13.
- Kliwer, N., Bunt, S., Suhl, L. (2006). Time windows for scheduled trips in multiple depot vehicle scheduling. In: 11th Meeting of the Proceedings of the EURO Working Group on Transportation. Bari, Italy: Technical University of Bari, 340-346.
- Marín, A.G., Jaramillo, P. (2009). Urban rapid transit network design: accelerated Benders decomposition. *Annals of Operations Research*, v.169. n.1, 35-53.
- Nia, S.G., Sharif, B., Habibzadeh, N., Rezvani, M. (2011). Using the genetic algorithm for optimization of the integrated urban transportation systems. *Journal of Technology Management for Growing Economies*. v.2, n.1, 103-113.
- Parasuraman, A.; Zeithaml, V. A.; Berry, L. L. (1994). Reassessment of expectations as a comparison standard in measuring service quality: implications for further research. *Journal of Marketing* v.58, n.1, 111-124.
- Peng, Z., Zhu, Y., Song, S. (2008). Mobility of the Chinese urban poor: a case study of Hefei City. *The Chinese Economy*, v.41, n.1, 36-57.
- Pinjari, A.R., Pendyala, R.M., Bhat, C.R., Waddell, P.A. (2011). Modeling the choice continuum: an integrated model of residential location, auto ownership, bicycle ownership, and commute mode choice decisions. *Transportation*, v.38, n.6, 933-958.
- Prata, B.D.A. (2009). Programação integrada de veículos e motoristas: uma visão geral. *Sistemas & Gestão*. v. 4, n.3, Dezembro, 182-204.
- Rajput, B.L., Agarwal, A.L., Mahajan, D. (2011). A Study of Urban Transport Crisis of the Pune City. *The IUP Journal of Infrastructure*. v.9, n.1, 58-70.
- Salicrú, M., Fleurent, C., Armengol, J.M. (2011). Timetable-based operation in urban transport: Runtime optimization and improvements in the operating process. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. v.45, n.8, 721-740.
- Shafer, A. (1998). The global demand for motorized mobility. *Transportation Research Part A*. v. 32, n.6, 455-477.

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

- Shafer, A., Victor, D.G. (2000). The future mobility of the world population. *Transportation Research Part A*. v.34, n.3, 171-205.
- Souche, S. (2010). Measuring the structural determinants of urban travel demand. *Transport Policy*. v.17. n.3. 127-137.
- Srinivasan, S. (2005). Linking land use and transportation in a rapidly urbanizing context. A study in Delhi, India. *Transportation*, v.32, n.1, 87-104.
- Susniené, D. (2012). Quality approach to the sustainability of public transport. *Transport*. v. 27, n. 1, 102-110.
- Visentini, M. S., Borenstein, D., Araujo, O. C. B., Guedes, P. C. (2013). New solution approaches to integrate the vehicle-type scheduling and timetable generation. In: *International Conference on Operations Research, Rotterdam. OR 2013 Conference*.
- Wu, J.H., Florian, M., Marcotte, P. (1994). Transit equilibrium assignment: a model and solution algorithms. *Transportation Science*. v.28, n.3, August, 193-203.
- Zhang, C.M., Zhai, L.L. (2013). Research on Bus Dispatching Method Based on Goal Programming. *Applied Mechanics and Materials*. v. 409/410, 1269-1272.
- Zheng, N., Geroliminis, N. (2013). On the distribution of urban road space for multimodal congested networks. *Transportation Research Part B: Methodological*. v.57, n.11, November, 326-341.