

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA POLÍTICA NACIONAL DE MOBILIDADE URBANA POR MEIO DA DINÂMICA DE SISTEMAS: UM ESTUDO DE CASO NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO

Wlisses Bonelá Fontoura

Glaydston Mattos Ribeiro

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE)

Gisele de Lorena Diniz Chaves

Universidade Federal Espírito Santo

Departamento de Engenharias e Tecnologia

RESUMO

A mobilidade urbana é um dos principais desafios enfrentados pelas cidades atualmente e, conseqüentemente, é uma das prioridades na pauta do planejamento das cidades. Para apoiar esse planejamento, em 2012, a Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU) foi desenvolvida para integrar os diferentes modos de transporte e melhorar a acessibilidade e a mobilidade no espaço urbano. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar um modelo de apoio à decisão, utilizando a Dinâmica de Sistemas como ferramenta de modelagem e simulação, para avaliar os efeitos da implementação da PNMU, com foco nas variáveis ambientais, econômicas e de tráfego. Para verificar a aplicabilidade do modelo proposto, foi realizado um estudo de caso na cidade do Rio de Janeiro. Os resultados apontam a importância da implementação da PNMU para reduzir os efeitos negativos do transporte e, também, para aumentar a eficiência dos sistemas de transporte.

ABSTRACT

Urban mobility is one of the major challenges that the cities are currently facing and, consequently, it is one of the priorities of the city's planning agenda. To support this planning, in 2012 the Brazilian Urban Mobility Policy (BUMP) was developed to integrate the different modes of transportation and to improve accessibility and mobility in urban space. Thus, this study presents a decision support model, using System Dynamics as a modeling and simulation tool, to evaluate the impacts of BUMP implementation, focusing on environmental, economic and traffic variables. In order to verify the applicability of the proposed model, a case study was carried out in the city of Rio de Janeiro. The results highlight the importance of BUMP implementation to reduce the negative effects of transportation and also to improve the system efficiency.

1. INTRODUÇÃO

Além de atender a demanda considerando as dimensões do espaço urbano e a complexidade das atividades nele desenvolvidas, o planejamento de transportes deve ponderar as necessidades específicas da população. Portanto, para que se obtenha um sistema de transporte eficiente e justo, o deslocamento de pessoas e de cargas deve ser considerado no planejamento dos transportes urbanos, na configuração espacial das cidades e nas políticas urbanas (Santos; Aguiar, 2013).

Quanto às políticas públicas, as mesmas devem atender a população em seus direitos constitucionais e a institucionalização de tais políticas é fundamental para amparar o processo de planejamento de transportes (Brasil, 2018). No Brasil, foi criada em 2012 a Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU) que objetiva contribuir para o acesso universal à cidade e a melhoria da mobilidade urbana (Brasil, 2012).

Conforme destacam Rodrigues Júnior e Vieira (2017), além da formulação e implementação das políticas públicas, é necessário desenvolver procedimentos de análise e controle para que se obtenha uma constante melhoria dessas políticas. No entanto, o sistema de transporte urbano é um sistema complexo que envolve diversos fatores que estão inter-relacionados e interagem

continuamente ao longo do tempo. Portanto, não é apropriado que as características desse sistema sejam analisadas por meio de abordagens lineares (Wang *et al.*, 2008).

Nesse sentido, a Dinâmica de Sistema (DS) é apontada como uma alternativa para a análise dos sistemas de transporte, pois esta abordagem auxilia na compreensão de sistemas complexos (Sterman, 2001). Usado cada vez mais para projetar políticas em empresas e definir políticas públicas, a DS é um método eficiente para conseguir uma boa interpretação em situações de complexidade dinâmica e resistência política (Sterman, 2000).

Face às informações apresentadas, surge a seguinte problemática: a PNMU é capaz de garantir o deslocamento dos cidadãos e de bens no perímetro urbano, assegurando a acessibilidade de movimentação e a sustentabilidade ambiental? Diante de tal problema de pesquisa, o objetivo principal deste trabalho consiste em apresentar um modelo, utilizando a DS como ferramenta de modelagem e simulação, para verificar a eficácia da PNMU, com foco nas variáveis ambientais, econômicas e de tráfego. Além disso, para verificar a aplicabilidade do modelo proposto, pretende-se realizar um estudo de caso na cidade do Rio de Janeiro.

Este artigo está estruturado em seis seções, sendo esta primeira de caráter introdutório sobre o tema de pesquisa. A Seção 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre a aplicação da DS como ferramenta para a análise da mobilidade urbana. O modelo proposto é apresentado na Seção 3, enquanto que a Seção 4 apresenta o estudo de caso e obtenção dos parâmetros para a simulação. A Seção 5 consiste na apresentação e discussão dos resultados da simulação dinâmica. Por fim, as considerações finais e as sugestões para futuras pesquisas são apresentadas na Seção 6.

2. DINÂMICA DE SISTEMAS APLICADA A ANÁLISE DA MOBILIDADE URBANA

O desenvolvimento da sustentabilidade urbana exige um equilíbrio entre fatores econômicos, sociais e ambientais (Chen *et al.*, 2006). Portanto, realizar decisões para melhorar a mobilidade urbana gera escolha (*trade-offs*) entre esses fatores (Litman, 2014). Para auxiliar os gestores na resolução dos novos desafios nesse setor, métodos e ferramentas têm sido amplamente utilizados no processo de tomada de decisão e na comparação de abordagens de solução. Por ser útil na análise dos problemas do setor de transporte, a DS vem sendo aplicada em diversos estudos para analisar a mobilidade urbana (Shepherd, 2014; Batur e Koç, 2017), como é apresentado a seguir.

Por meio da DS e da econometria, Raux (2003) propôs uma estrutura de modelagem para simular os efeitos de médio e longo prazo das políticas de transporte urbano. Já Acharya (2005) utiliza a abordagem da DS para avaliar diferentes alternativas de políticas que buscam conciliar o transporte motorizado com a mobilidade urbana sustentável nos países em desenvolvimento.

Wang *et al.* (2008) desenvolveram um modelo por meio da DS para analisar os impactos da política de propriedade de veículos no desenvolvimento do transporte urbano sustentável na cidade de Dalian, China. De modo similar, Rassafi *et al.* (2014) e Haghshenas *et al.* (2015) examinaram os impactos ambientais, econômicos e sociais de diversas políticas de transporte em Mashhad e Isfahan, Irã, respectivamente.

Li *et al.* (2013) propuseram uma estrutura para avaliar os impactos das políticas de priorização do transporte público dentro de um sistema de transporte. Já Sayyadi e Awasthi (2017) utilizaram dados hipotéticos para avaliar o impacto de diversas políticas de planejamento de transporte sustentável.

Buscando uma maior mobilidade e acessibilidade, Wirjodirdjo *et al.* (2014) estudaram, por meio da DS, o planejamento da revitalização do trem destinado ao transporte de passageiros em Surabaya, Indonésia. De maneira análoga, Yang *et al.* (2014) analisaram, por meio da DS, os efeitos do transporte ferroviário urbano em Regiões Metropolitanas. Para isso, foi realizado um estudo de caso na cidade Cantão, China.

Para analisar o impacto do crescimento populacional na demanda de transportes, Yao e Chen (2015) desenvolveram um modelo de simulação que explora as relações entre população, economia, habitação, transporte e o desenvolvimento do espaço urbano. Quanto ao crescimento da frota de veículos, Song *et al.* (2013) utilizaram a DS para analisar os efeitos de diferentes políticas de transporte na propriedade de carros em Cantão, China.

Para verificar a influência da política de estacionamentos na mobilidade urbana, Bernardino e Hoofd (2013) desenvolveram um modelo de DS para analisar as mudanças geradas por essa política na divisão modal, na velocidade e no custo das viagens realizadas em Lisboa, Portugal. No contexto da gestão do congestionamento, destaca-se o trabalho de Jia *et al.* (2017) que apresentaram um modelo para verificar os efeitos da política de cobrança de congestionamento e a política de subsídios em Xangai, China. Já Liu *et al.* (2010) apresentaram uma estrutura conceitual para descrever o comportamento do congestionamento e avaliar os efeitos de curto e longo prazo da política de precificação de congestionamento em um sistema socioeconômico de transporte.

Com o intuito de reduzir o consumo de energia e as emissões de carbono do tráfego urbano, encontra-se na literatura diversos estudos que aplicam a abordagem da DS para analisar os efeitos de políticas de transportes na emissão de poluentes. Neste contexto, Chen *et al.* (2006), Armah *et al.* (2010), Azhaginiyal e Umadevi (2014), Liu *et al.* (2014), Vafa-Arani *et al.* (2014), Liu *et al.* (2015), Hosseinabad e Moraga (2017) e Wen e Bai (2017) realizaram estudos de caso para analisar a influência dessas políticas.

No Brasil, Menezes *et al.* (2017) avaliaram, por meio de um modelo de DS, os impactos da implementação de três políticas de mobilidade na cidade de São Paulo. Já Fontoura *et al.* (2019) apresentaram um modelo para analisar o impacto da PNMU no sistema de transporte urbano e, também, realizaram um estudo de caso na Região Metropolitana de São Paulo.

Após a análise dos modelos encontrados na literatura, verificou-se que a maioria dos estudos abordam apenas um modo de transporte público. Além disso, o transporte não motorizado não é considerado em grande parte dos modelos que analisam a mobilidade urbana por meio da DS. Os fatores sociais e o uso do solo, apontados nas políticas de mobilidade urbana, também são geralmente desconsiderados nos modelos. Deste modo, observa-se a necessidade de desenvolver um modelo mais complexo que envolva ao mesmo tempo diversos fatores relacionados a mobilidade urbana, permitindo assim uma análise mais realista dos sistemas de transportes. Assim, ressalta-se que é justamente nesse ponto que este artigo está inserido.

3. MODELO PROPOSTO

A DS é um método que emprega abordagens quantitativa e qualitativa. Para isso, a DS utiliza dois diagramas: o Diagrama de Causa e Efeito (DCE) e o Diagrama de Estoque e Fluxo (DEF). O DCE é um mapa do sistema com todos os seus componentes e suas interações. Já o DEF é uma forma de distinguir as variáveis do sistema pelas acumulações dos recursos e pelas taxas de mudanças desses recursos (Sterman, 2000).

Baseado na revisão dos modelos encontrados na literatura, estruturou-se um modelo de simulação em DS para analisar os impactos da PNMU em sistemas socioeconômicos de transportes. Entretanto, utilizou-se o modelo de Fontoura *et al.* (2019) como principal referência para a elaboração do modelo proposto. Para tornar o modelo mais próximo da realidade, algumas variáveis e relações foram adicionadas.

Conforme discutido na seção anterior, a maior parte dos modelos de DS aplicados na análise mobilidade urbana consideram apenas o ônibus como transporte público. No modelo proposto, o transporte público é representado por ônibus, trem, metrô e o veículo leve sobre trilhos (VLT). Além de inserir o submodelo do transporte público com diferentes modos de transporte, o modelo proposto apresenta o incentivo ao transporte não motorizado em detrimento do transporte motorizado.

Vale ressaltar que, devido à complexidade do sistema de transportes e, conseqüentemente, o elevado número de variáveis envolvidas, o DCE proposto é composto por submodelos nos quais essas variáveis estão agrupadas. Deste modo, o DCE, apresentado na Figura 1, é composto por nove submodelos (População, Economia, Meio Ambiente, Demanda de Transportes, Oferta de Transportes, Transporte Não Motorizado, Transporte Público, Transporte Individual e Congestionamento) e a PNMU.

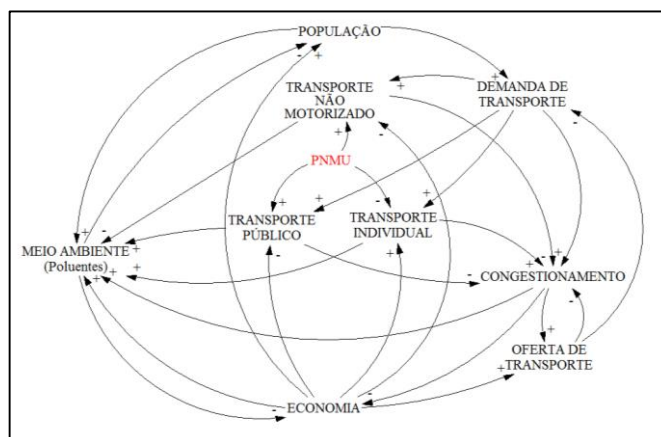


Figura 1: Diagrama de Causa e Efeito proposto.

O submodelo População retrata o estágio de desenvolvimento de uma determinada região. Para avaliar o impacto da economia nos sistemas de transportes, o PIB é a principal variável do submodelo Economia. Como o aumento ou decréscimo na economia impacta diretamente nos investimentos realizados no setor de transporte, este submodelo calcula o investimento em transporte que também é influenciado pelo congestionamento.

O submodelo Demanda de Transporte determina o total de viagens realizadas no sistema de transporte. A partir do número total de viagens é possível determinar a quantidade de viagens realizadas com modos motorizados e não motorizados. Para isso, utiliza-se a atratividade do modo não motorizado que é influenciada pelo nível de implementação da PNMU. Com a quantidade de viagens com o modo motorizado definida, é possível determinar a quantidade de viagens que são realizadas com o transporte público e com o transporte individual. Para isso, utiliza-se a atratividade do transporte público que, assim como a atratividade do transporte não motorizado, é influenciada pelo nível de implementação da PNMU.

O submodelo Oferta de Transporte possui o objetivo de calcular a extensão total de infraestrutura de transporte destinada a suprir a demanda de transporte. A partir da oferta de transporte são calculados dois indicadores de mobilidade urbana: o *Rapid Transit to Resident* (RTR) e a Área Coberta.

O submodelo Transporte Público consiste na divisão modal após a determinação do número de viagens realizadas por este tipo de transporte. Já o congestionamento é determinado a partir da capacidade das vias e da distância percorrida pelos veículos, conforme os modelos propostos por Wang *et al.* (2008) e Sayyadi e Awasthi (2017). Por fim, o submodelo Meio Ambiente calcula a quantidade de dióxido de carbono (CO₂) emitido pelo sistema de transporte.

Apesar de apresentar as relações entre os submodelos, o DCE não apresenta todas as variáveis do sistema de transporte. Sendo assim, para o desenvolvimento do DEF (Figura 2), todas as variáveis foram listadas e classificadas, permitindo, assim, o equacionamento do modelo proposto. Vale ressaltar que este equacionamento pode ser verificado com detalhes em Fontoura (2019).

4. ESTUDO DE CASO

A cidade do Rio de Janeiro é a capital do estado do Rio de Janeiro e está localizada na região sudeste do Brasil. Com uma área territorial de 1.200,177 km², o Rio de Janeiro está dividido em 33 regiões administrativas com 160 bairros (Prefeitura do Rio de Janeiro, 2018). Com uma população estimada em aproximadamente 6,5 milhões habitantes, este município é a segunda maior metrópole do Brasil e a quarta maior da América, resultando em uma densidade demográfica de 5.265,82 habitantes/km² (IBGE, 2018; CAU/BR, 2014; IBGE, 2010). Além disso, o Rio de Janeiro possui o segundo maior PIB nacional, obtendo um PIB *per capita* de R\$ 49.527,98 (IBGE, 2015).

Este município possui um dos maiores sistemas de transporte do Brasil. A sua rede de transportes é composta por 170 km de trilhos de trens, 125 km de linhas de ônibus em sistema de Transporte Rápido por Ônibus (BRT), 58 km de metrô, 12 km de VLT, 54 km de linhas de ônibus em sistema *Bus Rapid Service* (BRS), 420 km de ciclovias e 4 linhas de barcas sobre a Baía de Guanabara (SuperVia, 2016; BRTRIO, 2018; Invepar, 2018; VLT Carioca, 2018; Prefeitura do Rio de Janeiro, 2017).

A medição da mobilidade urbana, realizada a partir do Plano de Mobilidade Urbano Sustentável (PMUS), aponta que, do total de 12.595.855 deslocamentos diários, as viagens com transporte coletivo correspondem a 47,33%, equivalendo, aproximadamente, ao dobro das viagens com transporte individual (Prefeitura do Rio de Janeiro, 2017).

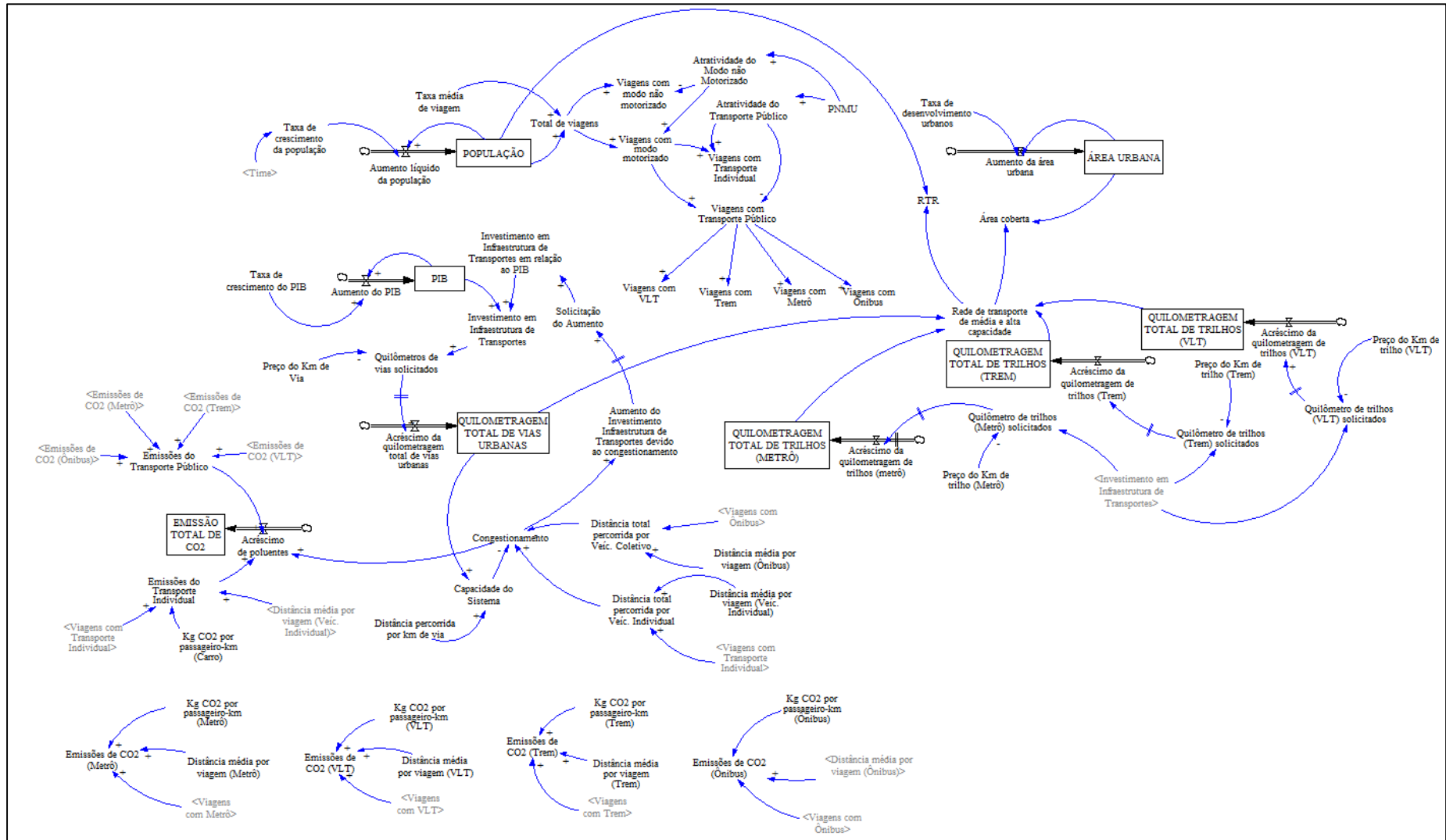


Figura 2: Diagrama de Estoque e Fluxo proposto

Para determinar a atratividade do modo não motorizado na cidade do Rio de Janeiro, estabeleceu-se uma relação entre a porcentagem de viagens com este modo e o nível de implementação da PNMU. De maneira análoga, utilizou-se a porcentagem de viagens com o transporte público (entre as viagens motorizadas) e a PNMU para determinar a atratividade do transporte público. Essas relações foram realizadas com base em cenários de implementação de políticas de mobilidade urbana, os quais foram adaptados para a realidade do Rio de Janeiro. Portanto, baseado nas projeções de Perkins+Will (2018) e de SuM4All™ (2017) a atratividade do transporte não motorizado e a atratividade do transporte público são determinadas conforme as funções da Figura 3(a) e 3(b), respectivamente. Mais detalhes sobre o processo de obtenção de parâmetros para o estudo de caso estão disponíveis em Fontoura (2019).

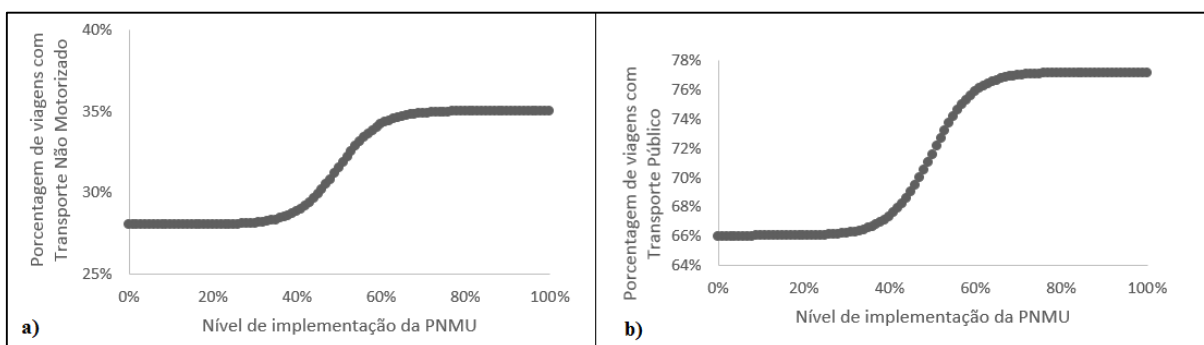


Figura 3: Atratividade do Transporte Não Motorizado (a) e do Transporte Público (b)

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A investigação dos efeitos da implementação da PNMU foi realizada a partir da análise de dois cenários. O primeiro é o cenário base que consiste na simulação do modelo proposto utilizando os parâmetros para a cidade do Rio de Janeiro. Para evidenciar o impacto da implementação da PNMU apresentado no cenário base, o segundo cenário apresenta os impactos da não implementação da PNMU. Deste modo, esse cenário simula o modelo atribuindo o valor zero ao nível de implementação da PNMU. Além disso, este cenário considera a taxa de crescimento do transporte motorizado e do transporte individual nos últimos anos.

Para a realização do estudo de caso, optou-se por um período de simulação de 32 anos, sendo 2018 o ano base (Ano = 0) e 2050 (Ano = 32) o último ano simulado. Vale ressaltar que, assim como a modelagem, a simulação computacional foi executada por meio do *software* Vensim®PLE (*Personal Learning Edition*). Para isso, utilizou-se uma versão gratuita deste aplicativo, fornecida pela Ventana Systems (2015), destinada ao uso pessoal e educacional.

5.1 Resultados do cenário com implementação da PNMU

Das 5,16 bilhões de viagens realizadas no ano 0, observa-se que apenas 28% são realizadas pelo modo não motorizado. Com um aumento de aproximadamente 5%, no ano 32, verifica-se que 5,43 bilhões de viagens são realizadas, das quais 35% ocorrem por modos não motorizados. Sendo assim, observa-se um aumento de 31% no número de viagens com o modo não motorizado, passando de 1,44 bilhões para 1,90 bilhões em 32 anos. Já o número de viagens com modo motorizado reduz de 3,71 bilhões no ano 0 para 3,53 bilhões no ano 32, ou seja, 5% de redução.

No ano 25 ocorre o maior número de viagens com transporte público, que é de 2,74 bilhões de viagens. Porém, este valor reduz para 2,72 bilhões no ano 32. Apesar do aumento no nível de implementação da PNMU, a redução do número de viagens com transporte público ocorre devido à redução do número de viagens realizadas com o modo motorizado. Entretanto, ao analisar a divisão modal, observa-se que o número de viagens com transporte público representa 77,08% e 77,17% das viagens com modos motorizados nos anos 25 e 32, respectivamente. Já o transporte individual, que representa 34% das viagens motorizadas no ano 0, passa a representar apenas 22,83% no ano 32, resultando em uma redução de 457 milhões de viagens por ano.

Quanto ao congestionamento, a Figura 3 mostra que no ano 0 o nível de congestionamento é de 1,438, ou seja, a distância total percorrida é 43,8% superior à capacidade do sistema, gerando o congestionamento. Esta variável apresenta um crescimento até o nono ano, atingindo um nível de 1,483. Após o ano 10 o nível de congestionamento começa a diminuir e, por isso, o mesmo é inferior a 1,00 a partir do ano 20. Portanto, observa-se que após 19 anos do início da implementação da PNMU o problema do congestionamento do município começa a ser solucionado. Vale ressaltar que no ano 20 o nível de implementação da PNMU é de 61,3%.

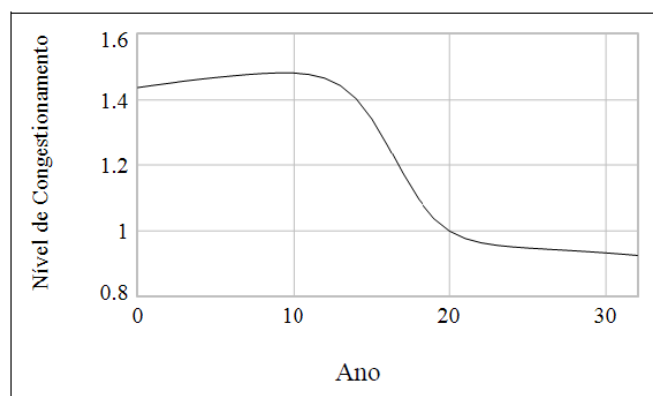


Figura 4: Nível de Congestionamento

Nota-se, também, que o nível de congestionamento atinge o valor de 0,92 no ano 32 após a implementação de 100% da PNMU. Portanto, observa-se que, apesar do sistema não apresentar mais congestionamento, a demanda por transporte está bem próxima da capacidade do sistema. Vale ressaltar que ao afirmar que o sistema não apresenta mais congestionamento, considera-se que a média anual do nível de congestionamento é abaixo de 1,00. Entretanto, ainda podem existir picos de demanda durante o dia ou em épocas específicas, tornando o sistema congestionado. Esses possíveis picos de demanda temporários são dissolvidos em função do horizonte temporal de um ano.

Quanto à emissão de CO₂, observa-se uma redução na emissão de poluentes ao longo dos anos. Como não há saída da variável de estoque “Emissão total de CO₂”, esta variável cresce ao longo dos anos, resultando em um acúmulo de 49,66 milhões de toneladas de CO₂ em 32 anos. Sendo assim, observa-se que mesmo o número total de viagens aumentando 5,24% em 32 anos, a emissão do ano 32 representa, aproximadamente, 60% das emissões do ano 0.

Por fim, verificou-se o impacto da implementação da PNMU nos indicadores “RTR” e “Área Coberta”. O RTR é de 63,29 Km de transporte de média de alta capacidade (TMAC) por milhão

de habitantes no ano 0 e reduz a uma taxa média de 0,24% por ano, atingindo o valor de 60,03 no ano 22. Essa queda no indicador se justifica pelo aumento da população somada a ausência de investimentos para a ampliação da infraestrutura do trem, metrô e VLT. Ocorre um crescimento deste indicador a partir do ano 23, o qual se justifica pela redução da taxa de crescimento na população a partir deste ano. Apesar da queda do indicador, a cidade do Rio de Janeiro apresenta valores superiores à média nacional. De acordo com Repogle e Fulton (2014), o RTR do Brasil é de 10,8 Km por milhão de habitantes e a projeção nacional para o ano de 2050 (ano 32) em um cenário de alta mudança é de 32,4 Km por milhão de habitantes. Quanto ao indicador “Área Coberta”, no ano 0 existem 0,3448 Km TMAC para cada Km² da cidade do Rio de Janeiro. De maneira análoga ao RTR, este indicador reduz ao longo dos anos devido à falta de investimentos em transportes de média e alta capacidade e, por isso, o mesmo chega ao valor de 0,3371 Km por Km² no ano 32.

Em suma, os resultados do cenário base evidenciam o impacto da implementação da PNMU nos sistemas de transporte. Entre os diversos benefícios, destacam-se a redução do nível de congestionamento e da emissão de poluentes. Além disso, os resultados deste cenário comprovam a importância do incentivo do transporte não motorizado e do transporte público em detrimento do transporte motorizado e do transporte individual, respectivamente.

5.2 Resultados do cenário sem implementação da PNMU

Para a simulação deste cenário, utilizou-se dados históricos das taxas de crescimento do transporte motorizado e do transporte individual. Portanto, as variáveis “PNMU”, “Atratividade do Transporte não Motorizado” e “Atratividade do Transporte Público” foram removidas do modelo. Essas variáveis foram substituídas pelas variáveis “% do Transporte Motorizado” e “% do Transporte Individual” de modo que a taxa de crescimento desses modos fosse considerada pelo modelo.

De acordo com o PDTU de 2015, entre os anos de 2003 e 2012 o percentual de viagens motorizadas cresceu a uma taxa de 0,90% por ano (Governo do Estado do Rio de Janeiro, 2015). Ainda de acordo com o PDTU de 2015, a participação das viagens com transporte individual cresceu neste mesmo período a uma taxa de 1,11% ao ano. Analisando a atual divisão modal da cidade do Rio de Janeiro, onde 72% das viagens são realizadas por modos motorizados e desse total 34% são realizadas por transporte individual, nota-se que essas taxas médias de crescimento permaneceram entre os anos de 2012 e 2018.

Ao simular este cenário por 32 anos, nota-se que o nível de congestionamento quase duplica, passando de 1,44 no ano 0 para 2,72 no ano 32. Deste modo, fica evidente que, sem a implementação da PNMU, o atual sistema de transporte do Rio de Janeiro não possui capacidade para atender a demanda futura. Portanto, torna-se necessário a implementação imediata de medidas para evitar o caos no transporte urbano da cidade.

Ao analisar o submodelo Meio Ambiente, nota-se o grande prejuízo ambiental causado pela não implementação da PNMU. Observa-se que a emissão de CO₂ aumenta a uma taxa média anual de 1,85%, resultando em 3,28 milhões de toneladas de CO₂ emitidos no ano 32. Ao final dos 32 anos, o estoque de CO₂ equivale a 79,98 milhões de toneladas. Este valor é 1,6 vezes maior do que o estoque acumulado durante o mesmo período no Cenário Base. Sendo assim, além de garantir um fluxo adequado de pessoas e cargas no espaço urbano, a PNMU é importante para a redução dos impactos do setor de transporte no meio ambiente.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio da discussão apresentada neste trabalho, verificou-se que existem vários modelos que utilizam a Dinâmica de Sistemas (DS) na análise da mobilidade urbana. Entretanto, nota-se que a maior parte desses modelos não consideram pontos fundamentais da PNMU como, por exemplo, os diferentes modos do transporte público. Assim, este trabalho buscou avaliar o impacto da PNMU em sistemas socioeconômicos de transporte. Para tanto, foi desenvolvido um modelo por meio da DS e, para verificar a aplicabilidade do modelo proposto, foi realizado um estudo de caso na cidade do Rio de Janeiro.

Os resultados da simulação do modelo proposto apontam a importância da implementação da PNMU para reduzir os efeitos negativos do transporte e, também, para aumentar a eficiência dos sistemas de transporte. No cenário base, observa-se que, apesar do crescimento populacional e do desenvolvimento econômico, o incentivo ao uso do transporte não motorizado e do transporte público reduz o nível de congestionamento e a emissão de poluentes.

No segundo cenário, buscou-se verificar o comportamento do sistema de transporte sem a implementação da PNMU. Considerando as taxas atuais de crescimento do transporte motorizado e do transporte individual, observa-se que em 32 anos o nível de congestionamento e as emissões de CO₂ dobrarão. Deste modo, fica evidente que a continuidade do atual padrão de viagens aumentará as externalidades negativas do transporte, agravando os problemas de trânsito e de mobilidade. Portanto, levando em consideração o Cenário Base, o segundo cenário analisado evidencia a importância da implementação da PNMU para que se obtenha um sistema de transporte que atenda a demanda de maneira sustentável.

Como sugestões para trabalhos futuros, acredita-se que o modelo de apoio a decisão proposto nesse estudo pode ser ampliado. Sugere-se que o modelo aborde pontos fundamentais da PNMU como, por exemplo, os fatores sociais e o uso do solo. Outra sugestão consiste em estudar políticas públicas que proporcionem uma maior taxa média de ocupação dos veículos privados (de preferência, superior a 2 pessoas por automóvel), de acordo com o nível de implantação da PNMU.

Na estrutura proposta, considerou-se como expansão da oferta de transporte a construção de infraestrutura. Entretanto, existem outras maneiras de aumentar a capacidade dos modos sobre trilhos (trem, metrô e VLT) sem a necessidade de expandir a infraestrutura. Portanto, sugere-se também que trabalhos futuros abordem outras formas de investimentos para expansão da capacidade do sistema. Por fim, sugere-se a inserção de veículos elétricos no modelo.

Assim, nota-se que o presente trabalho contribui para a literatura de modo a complementar os estudos existentes sobre a temática. Além disso, o modelo proposto pode ser aplicado em outros municípios, permitindo a análise do impacto de estratégias de mobilidade urbana em outros sistemas socioeconômicos de transporte. Portanto, este estudo colabora para o planejamento das cidades, permitindo, por meio de um modelo de apoio a decisão, analisar o impacto de diferentes medidas (isoladas ou em conjunto) nos sistemas de transporte urbano.

REFERÊNCIAS

- Acharya, S. R. (2005) Motorization and Urban Mobility in developing countries exploring policy options through dynamic simulation. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, v. 6, p. 4113-4128.
- Armah, F. A., D. O. Yawson e A. A. N. M. Pappoe (2010) A Systems Dynamics Approach to Explore Traffic Congestion and Air Pollution Link in the City of Accra, Ghana. *Sustainability*, v. 2, [s. n.], p. 252-265.

- Azhaginiyal, A. e G. Umadevi (2014) System Dynamics Simulation Modeling of Transport, Energy and Emissions Interactions. *Civil Engineering and Architecture*, v. 2, n. 4, p. 149-165.
- Batur, I. e M. Koç (2017) A review of system dynamics applications in sustainable urban transportation. In: *European Conference on Sustainability, Energy & the Environment*, p. 1-11, Brighthon, UK, ECSEE.
- Bernardino, J. P. R. e M. V. D. Hoofd (2013) Parking Policy and Urban Mobility Level of Service-System Dynamics as a Modelling Tool for Decision Making. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, v. 13, n. 3, p. 239-258.
- Brasil (2012) *Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012*. Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana. Brasília: Diário Oficial da União.
- Brasil (2018) *Avaliação das Políticas Públicas de Transportes: Segurança nas Rodovias Federais*. Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/component/content/article/113-politica-e-planejamento-de-transportes/7385-apt.html>>. Acesso em: 27 nov. 2018.
- BRTRIO (2018) *Conheça o BRT*. Disponível em: <<http://brtrio.com/>>. Acesso em: 4 jul. 2018.
- CAU/BR (2014) *As maiores cidades da América*. Conselho de Arquitetura e Urbanismo do Brasil. Disponível em: <<http://arquiteturaurbanismotodos.org.br/as-maiores-cidades-da-america-latina/>>. Acesso em: 6 ju. 2018.
- Chen, M., T. Ho, C. Jan (2006) A System Dynamics Model of Sustainable Urban Development: Assessing Air Purification Policies at Taipei City. *Asian Pacific Planning Review*, v. 4, n. 1, p. 29-52.
- Fontoura, W. B. (2019) *Uma estrutura para avaliar os impactos dinâmicos da Política Nacional de Mobilidade Urbana em sistemas socioeconômicos de transporte*. 122 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Fontoura, W. B., G. L. D. Chaves e G. M. Ribeiro (2019) The Brazilian Urban Mobility Policy: The Impact in São Paulo Transport System using System Dynamics. *Transport Policy*, v. 73, [s.n.], p. 51-61.
- Governo do Rio de Janeiro (2015) *Plano Diretor de Transporte Urbano - PDTU*. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.rj.gov.br/web/setrans/exibeconteudo?article-id=626280>>. Acesso em: 4 jul. 2018.
- Haghshenas, H., M. Vaziri e A. Gholamialam (2015) Evaluation of sustainable policy in urban transportation using system dynamics and world cities data: A case study in Isfahan. *Cities*, v. 45, [s. n.], p. 104-115.
- Hosseinabad, E. R. e R. J. Moraga (2017) A System Dynamics Approach in Air Pollution Mitigation of Metropolitan Areas with Sustainable Development Perspective: A Case Study of Mexico City", *Journal of Applied Environmental and Biological Science*, v. 7, n. 12, pp. 164-174.
- IBGE (2010) *Censo Demográfico 2010*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 8 jun. 2018.
- IBGE (2015) *Produto Interno Bruto dos Municípios*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/>>. Acesso em: 8 jun. 2018.
- IBGE (2018) *Projeção da População do Brasil e das Unidades de Federação*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao>>. Acesso em: 4 jul. 2018.
- INVEPAR (2018) *METRÓRIO*. Disponível em: <<http://www.invepar.com.br/>>. Acesso em: 4 jul. 2018.
- Jia, S., G. Yan, A. Shen e J. Zheng (2017) A System Dynamics Model for Determining the Traffic Congestion Charges and Subsidies. *Arabian Journal for Science and Engineering*, v. 42, n. 12, p. 5291-5304.
- Li, K., S. Zhou e X. Yang (2013) A System Dynamics Approach for Evaluating Policies on Prioritizing Public Transportation. *Applied Mechanics and Materials*, v. 391, [s.n.], p. 628-632.
- Litman T. (2014) The Mobility-Productivity Paradox: Exploring the negative relationships between mobility and economic productivity. *International Transportation Economic Development Conference*, Dallas, Texas, USA, p. 1-18.
- Liu, S., K. P. Triantis e S. Sarangi (2010) A framework for evaluating the dynamic impacts of a congestion pricing policy for a transportation socioeconomic system. *Transport Research Part A*, v. 44, n. 8, p. 596-608.
- Liu, S., S. Chen, X. Liang, B. Mao e S. Jia (2014) Analysis of Transport Policy Effect on CO₂ Emissions Based on System Dynamics. *Advances in Mechanical Engineering*, v. 7, n. 1, p. 1-8.
- Liu, X., M. Shoufeng, J. Tian, N. Jia e G. Li (2015) A system dynamics approach to scenario analysis for urban passenger transport energy consumption and CO₂ emissions: A case study of Beijing. *Energy Policy*, v. 85, n. 8, p. 253-270.
- Menezes, E., A. G. Maia e C. S. Carvalho (2017) Effectiveness of low-carbon development strategies: Evaluation of policy scenarios for the urban transport sector in a Brazilian megacity. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 114, [s. n.], p. 226-241.
- PERKINS+WILL (2018) *Designing for Future Mobility: Developing a Framework for the Livable Future City*. Disponível em: <https://ca.perkinswill.com/sites/default/files/Designing_for_Future_Mobility_Report.pdf>. Acesso em 10 out. 2018.

- Prefeitura do Rio de Janeiro (2017) *Rio Conecta*. Disponível em: <<http://www.rio.rj.gov.br/web/smu/exibeconteudo?id=7301546>>. Acesso em: 2 jul. 2018.
- Prefeitura do Rio de Janeiro (2018) *Regiões Administrativas*. Disponível em: <<http://www.rio.rj.gov.br/web/smu/exibeconteudo?id=7301546>>. Acesso em 28 jul. 2018.
- Rassafi, A. A., O. J. Mahdi e H. Javanshir (2014) An Appraisal of Sustainable Urban Transportation: Application of a System Dynamics Model. *International Journal of Transportation Engineering*, v. 2, n. 1, p. 47-66.
- Raux, C. (2003) A system dynamics model for the urban travel system. In: *European Transport Conference, ETC*, Estrasburgo, p. 1-21.
- Replogle, M. A. e L. M. Fulton (2014) *A Global High Shift Scenario: Impacts and Potential for more Public Transport Walking, and Cycling with Lower Car Use*. Instituto de Políticas de Transporte & Desenvolvimento – ITDP. Disponível em: <https://www.itdp.org/wp-content/uploads/2014/09/A-Global-High-Shift-Scenario_WEB.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2018.
- Rodrigues Júnior, J. C. M. e R. S. Vieira (2017) Políticas públicas de transporte coletivo de passageiros: Segregação das mulheres em vagão exclusivo do metrô. *Revista de Direito Sociais e Políticas Públicas*, v. 3, n. 2, p. 122-139.
- Santos, E. C. e E. Aguiar (2013) Transporte de Cargas em Áreas Urbanas. In: Caixeta Filho, J. V. e R. S. Martins (Coord). *Gestão Logística do Transporte de Cargas*, São Paulo: Atlas.
- Sayyadi, R. e A. Awasthi (2017) A system dynamics based simulation model to evaluate regulatory policies for sustainable transportation planning. *International Journal of Modelling and Simulation*, v. 37, n. 1, p. 25-35.
- Shepherd, S. P. (2014) A review of system dynamics models applied in transportation. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, v. 2, n. 2, p. 83-105.
- Song, J., J. Li e H. Xu (2013) System Dynamics Model of Urban Car Ownership: A case study of Guangzhou. In: *International Conference on Transportation Engineering, ICTE*, Chengdu, China, p. 3106-3111.
- Sterman, J. (2000) *Business Dynamics: System Thinking and Modelling for a Complex World*. New York: McGraw-Hill.
- Sterman, J. D. (2001) System Dynamics Modeling: Tools for Learning n a Complex World. *California Management Review*, v. 43, n. 4, p. 7-25.
- SUM4ALL™ (2017) *Global Mobility Report 2017: Tracking Sector Performance*. Sustainable Mobility for All. Disponível em: <<https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/28542/120500.pdf>>. Acesso em 10 out. 2018.
- SuperVia (2016) *Quem somos*. Disponível em: <<http://www.supervia.com.br/pt-br/quem-somos>>. Acesso em: 4 jul. 2018.
- Vafa-Arani, H., S. Jahani, H. Dashti, J. Heydari e S. Moazen (2014) A system dynamics modeling for urban air pollution: A case study of Tehran, Iran. *Transportation Research Part D*, v. 31, n. 2, p. 21-36.
- Ventana Systems, 2015, *Free Downloads*. Disponível em: <<http://vensim.com/>>. Acesso em: 17 jul. 2018.
- VLT Carioca (2018) *Sobre o VLT*. Disponível em: <<http://www.vltrio.com.br>>. Acesso em: 4 jul. 2018.
- Wang, J., H. Lu e H. Peng (2008) System Dynamics Model of Urban Transportation System and Its Application. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, v. 48, n. 3, p. 83-89.
- Wen, L. e L. Bai (2017) System Dynamics Modeling and Policy Simulation for Urban Traffic: a Case Study in Beijing. *Environmental Modeling & Assessment*, v. 22, n. 4, p. 363-378.
- Wirjodirdjo, B., P. Amelia e A. A. Fanani (2014) A system dynamic model of train revitalization toward sustainable urban transportation system in Surabaya-Indonesia. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 9, n. 11, p. 2068-2073.
- Yang, Y., P. Zhang e S. Ni (2014) Assessment of the Impacts of Urban Rail Transit on Metropolitan Regions Using System Dynamics Model. *Transportation Research Procedia*, v. 4, [s. n.], p. 521-534.
- Yao, H. e D. Chen (2015) A system dynamics model for urban sustainable transportation planning. In: *International Conference on Geoinformatics*, Geoinformatics, Wuhan, China, p. 1-5.

Wlisses Bonelá Fontoura (wlisses@pet.coppe.ufrj.br)
Glaydston Mattos Ribeiro (glaydston@pet.coppe.ufrj.br)
Programa de Engenharia de Transportes, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia, Bloco H, Sala 106, Cidade Universitária – Rio de Janeiro, RJ, Brasil
Gisele de Lorena Diniz Chaves (gisele.chaves@ufes.br)
Departamento de Engenharias e Tecnologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rodovia BR 101 Norte, KM 60, Bairro Litorâneo – São Mateus, ES, Brasil