

A INFLUÊNCIA DA COBRANÇA DE PEDÁGIOS EM CENTROS URBANOS: UM MODELO CAUSAL UTILIZANDO DINÂMICA DE SISTEMAS

Igor Tureta Zanchetta
Glaydston Ribeiro Mattos
Licio da Silva Portugal

Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO

A mobilidade urbana sustentável desempenha um papel importante no desenvolvimento econômico, na redução de poluentes e no bem-estar da população. Entretanto, o excesso de automóveis em circulação nos centros urbanos gera congestionamentos desnecessários que, por sua vez, não contribuem para o desenvolvimento sustentável da mobilidade urbana. Sendo assim, cidades como Londres e Estocolmo adotaram a política de pedágio urbano (*congestion charge*) no centro da cidade a fim de reduzir o fluxo de automóveis, além de arrecadar capital para investimento no setor de transporte. Portanto, este artigo tem como principal objetivo identificar as principais variáveis que são influenciadas pela política de pedágio urbano, assim como suas inter-relações. Para isso, foi desenvolvido um Diagrama de Causa e Efeito a partir da Dinâmica de Sistemas para analisar o comportamento qualitativo das variáveis. Observou-se que a política de pedágio urbano apresentou grande potencial para o desenvolvimento da mobilidade urbana sustentável nos casos analisados.

ABSTRACT

Sustainable urban mobility plays a key role in economic development, pollutant reduction and population well-being. However, the excessive number of cars in circulation in urban centers leads to unnecessary congestion, which does not contribute to the sustainable development of urban mobility. Thus, cities such as London and Stockholm have adopted the urban congestion charge policy in order to reduce the flow of cars and raise capital for investment in the transport sector. Therefore, this paper aims to identify the main variables that are influenced by the urban toll policy, as well as their interrelationships. For this, a Cause and Effect Diagram was developed from the Systems Dynamics approach to analyze the qualitative behavior of the variables. It was observed that the urban toll policy presented good potential for the development of sustainable urban mobility in all cases considered.

1. INTRODUÇÃO

O setor de transporte tem um papel fundamental para o desenvolvimento de uma determinada região, uma vez que ele dá suporte ao desenvolvimento econômico e social da população, possibilitando a alocação eficiente de materiais e recursos e proporcionando mobilidade urbana de qualidade (Crescenzi e Pose, 2012).

A partir do crescimento econômico, percebe-se uma alteração no padrão de comportamento das pessoas em relação ao transporte, em que pessoas com maior renda tendem a se deslocar por meio do transporte privado, enquanto indivíduos com baixa renda tendem a utilizar o transporte público. Esta alteração no padrão de viagem impacta de maneira significativa a mobilidade sustentável, quando há uma predominância pela escolha do transporte privado devido ao desenvolvimento econômico da região (Ribeiro *et al.*, 2014).

Além disso, com o advento da urbanização, os centros urbanos se tornaram mais atrativos para a população devido à qualidade de vida, trabalho e lazer. Porém, o elevado crescimento populacional nos centros urbanos implicou em maior complexidade no gerenciamento e planejamento do sistema de transporte urbano, em particular devido ao nível de congestionamento das vias (Spickermann *et al.*, 2013). O congestionamento na hora de pico representa o maior gargalo da mobilidade urbana, sendo responsável principalmente pela quantidade de automóveis em circulação. Logo, políticas de estímulo ao uso de transportes de alta capacidade devem ser prioridades quando se trata de mobilidade sustentável (Wang *et al.*,

2008).

Segundo Diaz *et al.* (2016), o congestionamento proporciona impactos negativos no desenvolvimento econômico devido à queda da produtividade proporcionada pelo aumento do tempo de viagem e pelo estresse. Além disso, há uma relação diretamente proporcional entre os custos logísticos e o nível de congestionamento da região, ou seja, quanto maior o nível de congestionamento, maior serão os custos logísticos associados, elevando por consequência o preço de bens e serviços. O aumento do nível de congestionamento nos centros urbanos também eleva a emissão de dióxido de carbono (CO₂), resultando assim em impactos negativos ao meio ambiente que, por sua vez, implica em uma relação inversamente proporcional ao desenvolvimento econômico, ou seja, quanto maior a emissão de CO₂, menor será o desenvolvimento econômico (Chandran e Tang, 2013).

Para solucionar o congestionamento em centros urbanos, políticas de restrição do uso do veículo particular por meio de tarifas de congestionamento (Pedágio Urbano) foram utilizadas em cidades como Londres, Estocolmo e Cingapura, a fim de reduzir o tráfego de automóveis nos horários de pico e incentivar o uso do transporte público. Em 2003, foi implementada a política de Pedágio Urbano em Londres, que inicialmente era visto como uma política “radical”, posteriormente demonstrou ser uma política benéfica para a região. Com isso, ocorreu uma redução de 15% na quantidade de veículos por quilômetro no centro de Londres, assim como um aumento de 17% na velocidade dos veículos (Prud'homme e Bocarejo, 2005).

Nesse contexto, este artigo tem como objetivo identificar as principais variáveis que são influenciadas pela política de Pedágio Urbano, assim como suas inter-relações, ou seja, como as variáveis deste sistema complexo interagem entre si. Para isso, foi utilizado o método de Dinâmica de Sistemas (DS) a fim de propor um mapa sistêmico ou Diagrama de Causa e Efeito (DCE). A partir do DCE foi possível identificar os ciclos positivos e negativos do sistema, bem como analisar as relações entre as variáveis do modelo, contribuindo desta maneira, como uma ferramenta para a tomada de decisão na gestão de transporte com foco na mobilidade urbana.

A seguir quatro seções serão ainda abordadas. A metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho está apresentada na Seção 2. Ao longo da Seção 3, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre o método de DS assim como suas aplicações no âmbito da mobilidade urbana. A Seção 4 consiste em apresentar o modelo proposto, suas principais características e analisar as inter-relações entre os componentes do sistema que compreendem o DCE. Por fim, a Seção 5 retrata as considerações finais e propostas para trabalhos futuros.

2. METODOLOGIA

A metodologia para o desenvolvimento deste trabalho foi dividida em quatro etapas, sendo elas: Etapa 1: Delimitação do Ambiente de Estudo; Etapa 2: Revisão Bibliográfica; Etapa 3: Elaboração do Diagrama de Causa e Efeito (DCE); e Etapa 4: Análise das Inter-relações do Sistema Proposto. A Figura 1 apresenta o relacionamento entre todas estas etapas.

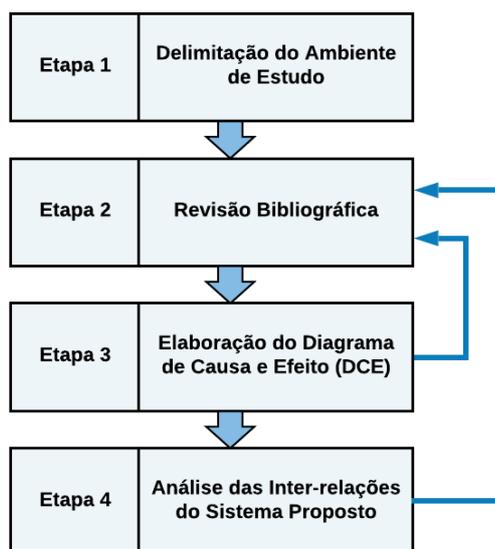


Figura 1: Procedimentos da metodologia do estudo
Fonte: Elaborado pelo autor

A delimitação do ambiente de estudo concebida na Etapa 1 serviu de guia para, na Etapa 2, se selecionar e revisar estudos sobre congestionamento em centros urbanos, preço de congestionamento, impacto da implementação do sistema de cobrança do uso de veículos individuais em centros urbanos e aplicações da DS à mobilidade urbana. Após o levantamento bibliográfico a cerca das variáveis que são influenciadas pelo sistema de transporte em centros urbanos, a DS foi utilizada para a elaboração do modelo proposto.

Para a elaboração do DCE, Etapa 3, foi utilizado como base o trabalho de Wang *et al.* (2008) que leva em consideração as principais variáveis do sistema de transporte no âmbito da mobilidade urbana. Segundo os autores, o sistema de mobilidade urbana é constituído por sete submodelos, sendo eles: (1) população, (2) número de veículos, (3) meio ambiente, (4) economia, (5) demanda de viagem, (6) congestionamento e (7) infraestrutura. Esse modelo foi então aprimorado com a inclusão de novas variáveis que são influenciadas direta ou indiretamente pela política de Pedágio Urbano. Ao longo da Etapa 3, foi necessário retornar a Etapa 2, a fim de verificar corretamente os conceitos adotados na elaboração do diagrama, conforme a Figura 1.

O DCE foi elaborado com o auxílio do *software* Vensim PLE[®] e é apresentado com detalhes na Seção 4. A partir da análise do DCE, realizou-se a Etapa 4 onde foi possível identificar as inter-relações entre as variáveis do sistema, assim como os principais ciclos positivos e negativos, auxiliando desta maneira a tomada de decisão do planejamento da mobilidade urbana. Além disso, foi levado em consideração a influencia da política de Pedágio Urbano no sistema de transporte, bem como os impactos negativos e positivos. Ao longo da Etapa 4, semelhante à etapa anterior, foi necessário retornar a Etapa 2 para validar a interpretação dos ciclos do sistema proposto, conforme a Figura 1.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Dinâmica de Sistemas (DS) foi desenvolvida no âmbito do *Massachusetts Institute of*

Technology (MIT) por Jay Wright Forrester como um conjunto de ferramentas e uma abordagem para dar suporte ao controle e à tomada de decisão em indústrias. Ela foi consolidada na obra “*Industrial Dynamics*”, publicada em 1961 (Wang *et al.*, 2008, Hsieh e Chou, 2018). Originalmente, a DS era usada no ambiente industrial, mas aplicações posteriores foram identificadas em outras áreas do conhecimento, como física, biologia, ciências sociais e ecologia (Forrester, 1997). Além disso, a DS é utilizada em diversas áreas de pesquisa, mas principalmente por empresas para auxiliar na tomada de decisão (Morecroft, 2015).

A DS é um método que procura melhorar o aprendizado em sistemas complexos e está diretamente relacionado ao pensamento sistêmico. Ela analisa o comportamento de sistemas complexos, incluindo todas as relações relevantes de causa e efeito, atrasos e ciclos de *feedback* (Sterman, 2000). No pensamento sistêmico, os ciclos de *feedback* permitem a adaptação de sistemas ao ambiente por meio da autocorreção a partir da aprendizagem (Seddon e Caulkin, 2008).

Em DS existem duas maneiras de modelagem para caracterizar o sistema: a abordagem *soft* (qualitativa) e a *hard* (quantitativa). A modelagem *soft* possibilita uma melhor visualização do sistema através das inter-relações das variáveis presentes no modelo, já a modelagem *hard* consiste no desenvolvimento de um modelo passível de simulação computacional utilizando as características difundidas na abordagem *soft* (Fernandes, 2003, Ghisolfi *et al.*, 2019).

A partir da abordagem *soft*, que em DS é denominada de Diagrama de Causa e Efeito (DCE), é possível elaborar um mapa sistêmico das variáveis do modelo. O mapa sistêmico auxilia o detalhamento do modelo, em que é possível determinar os ciclos causais entre as variáveis. Existem dois tipos de ciclo, sendo eles: (1) ciclos de retroalimentação e (2) ciclos de balanceamento. Os ciclos de retroalimentação são denominados de ciclos positivos, cuja característica é de reforçar ou amplificar os eventos do sistema. Já os ciclos de balanceamentos são denominados de ciclos negativos, cujo comportamento é de balancear o sistema a partir de mudanças que se opõem ao evento do sistema, ou seja, ao longo do tempo o comportamento das variáveis tende a se estabilizar (Sterman, 2000).

O DCE possui certas limitações como ferramenta para visualizar os laços de realimentação, uma vez que as variáveis de causa e efeito podem conduzir a deduções erradas sobre o comportamento do sistema e tal ferramenta não permite a distinção entre fluxo e estoques, nem a simulação (Hassmiller Lich *et al.*, 2017). Sendo assim, o Diagrama de Estoque e Fluxo (DEF), que representa a abordagem *hard* em DS, é utilizado como uma ferramenta de simulação computacional a fim de verificar o comportamento das variáveis ao longo do tempo (Sterman, 2000). Ambas as abordagens são realizadas em conjunto para a construção de um modelo que permite aproximar dos sistemas complexos reais (Hassmiller Lich *et al.*, 2017). Porém, para este trabalho, abordou somente o DCE, cujo objetivo é identificar as principais variáveis do sistema proposto e apresentar as relações qualitativas do modelo.

No âmbito da engenharia de transportes, diversos estudos foram conduzidos a partir da DS devido à alta complexidade entre os fatores que interferem nos sistemas de transportes. Sendo assim, Shepherd (2014) realizou uma pesquisa bibliográfica sobre os modelos de DS aplicado ao transporte. O levantamento bibliográfico abrangeu 54 estudos, que foram classificados em seis categorias, sendo elas: (1) combustíveis alternativos, (2) logística do transporte na cadeia

de suprimentos, (3) infraestrutura, (4) estratégias políticas no âmbito urbano, regional e nacional, (5) linhas aéreas e aeroportos e (6) áreas emergentes. Dentre essas categorias mencionadas, os estudos sobre estratégias políticas no âmbito urbano, regional e nacional se destacaram com maior relevância, correspondendo a 13 dos 54 trabalhos estudados.

A fim de apontar trabalhos sobre modelos de DS aplicados ao sistema de transporte, destacam-se os trabalhos realizados por Wang *et al.* (2008), Armah *et al.* (2010), Pfaffenbichler *et al.* (2010), Liu *et al.* (2015), Bajracharya (2016), Thaller *et al.* (2017), Wang *et al.* (2018), e Fontoura *et al.* (2019).

Wang *et al.* (2008) utilizaram a DS para desenvolver um sistema de transporte com o foco na mobilidade urbana. A partir de simulações realizadas com dados da cidade de Dalian (China), verificou-se que a restrição da quantidade de veículos privados na cidade corroboraria para o desenvolvimento sustentável do sistema de transporte. Neste mesmo sentido, Fontoura *et al.* (2019) utilizaram a DS para desenvolver um modelo de mobilidade urbana para o caso da região metropolitana de São Paulo (Brasil). Com isso, os autores buscaram analisar a influência da política de mobilidade urbana da região metropolitana de São Paulo com base no impacto ambiental e econômico. Os autores concluíram que as políticas adotadas não são suficientes para atingir as metas estabelecidas, é necessário a implementação de políticas mais eficientes para controlar a emissão de poluentes, assim como políticas de incentivo ao uso de modalidades não motorizadas para auxiliar a redução do congestionamento da cidade.

De outro modo, Thaller *et al.* (2017) também utilizaram a DS para explicar o comportamento do transporte urbano, porém, o modelo desenvolvido pelos autores teve como foco o transporte de mercadorias. Autores como Armah *et al.* (2010) utilizaram a DS para descrever de maneira qualitativa as relações entre as variáveis do sistema de transporte. Os autores abordaram os principais problemas e desafios do sistema de transportes da cidade de Acra (capital de Gana) levando em consideração as externalidades negativas, como o congestionamento do tráfego, poluição do ar e o impacto na saúde, segurança do trânsito e no planejamento do uso do solo. Sobre impactos ambientais, Liu *et al.* (2015) realizaram um estudo de caso na cidade de Pequim (China) sobre o consumo de energia em transporte urbano de passageiros e a emissão de CO₂. Os autores utilizaram a DS para simular a melhor política de gerenciamento do sistema de transporte a fim de minimizar os impactos negativos ocasionados pelo crescimento urbano acelerado da cidade.

Outro aspecto bastante discutido na literatura é a escolha do modo de transporte. Sendo assim, Bajracharya (2016) utilizou a DS para analisar o comportamento da escolha do modo de transporte da população. O autor primeiramente elaborou o DCE, em que foram identificadas as principais relações, e em seguida desenvolveu o DEF para simular o caso de Dubai (Emirados Árabes). Em outro trabalho, Wang *et al.* (2018) desenvolveram um modelo a partir da DS para o gerenciamento de táxi em cidades metropolitanas. Após a validação desse modelo, os autores utilizaram os dados de Pequim (China) como entrada para simular o mercado de táxi. Por fim, os resultados foram fornecidos ao governo para auxiliar na tomada de decisão das políticas de gestão de táxi urbano.

Além disso, Pfaffenbichler *et al.* (2010) utilizaram a DS para elaborar um modelo complexo de sistema de transporte, levando em consideração a integração do planejamento do uso correto do solo com o planejamento do transporte urbano. Segundo os autores, este modelo é

denominado MARS (*Metropolitan Activity Relocation Simulator*), cujo objetivo é simular cenários com dados reais e auxiliar a tomada de decisão, assim como otimizar a política de gestão do transporte urbano. Esse modelo foi construído a partir do *software* Vensim PLE[®], contudo, é necessária a versão completa do *software* para avaliar tudo que foi desenvolvido.

Assim, além de apresentar um modelo de DS sobre mobilidade urbana sustentável, este artigo busca preencher o *gap* sobre políticas de pedágio urbano, já que, poucos estudos são encontrados na literatura, principalmente quando se trata de aplicações de políticas de pedágio urbano com base no método de DS.

4. DIAGRAMA DE CAUSA E EFEITO (DCE)

A partir da revisão da literatura, buscou-se então elaborar o DCE, Etapa 3 do procedimento metodológico, para avaliar o impacto da política de Pedágio Urbano. Sendo assim, não foi levado em consideração o detalhamento de todas as variáveis do modelo, como por exemplo, a população que é influenciada pela taxa de mortalidade, taxa de natalidade e migração. Portanto, buscou-se abordar as principais variáveis que constituem o sistema de mobilidade urbana, assim como as variáveis vinculadas à política de pedágio urbano.

Com isso, a Figura 2 apresenta o DCE proposto que considera 14 variáveis, seis relações inversamente proporcionais (seta vermelha) e 17 relações diretamente proporcionais (seta azul). A partir das inter-relações entre as variáveis do sistema, foram identificados 12 ciclos fechados, sendo quatro de retroalimentação (ciclos positivos) e oito de balanceamento (ciclos negativos).

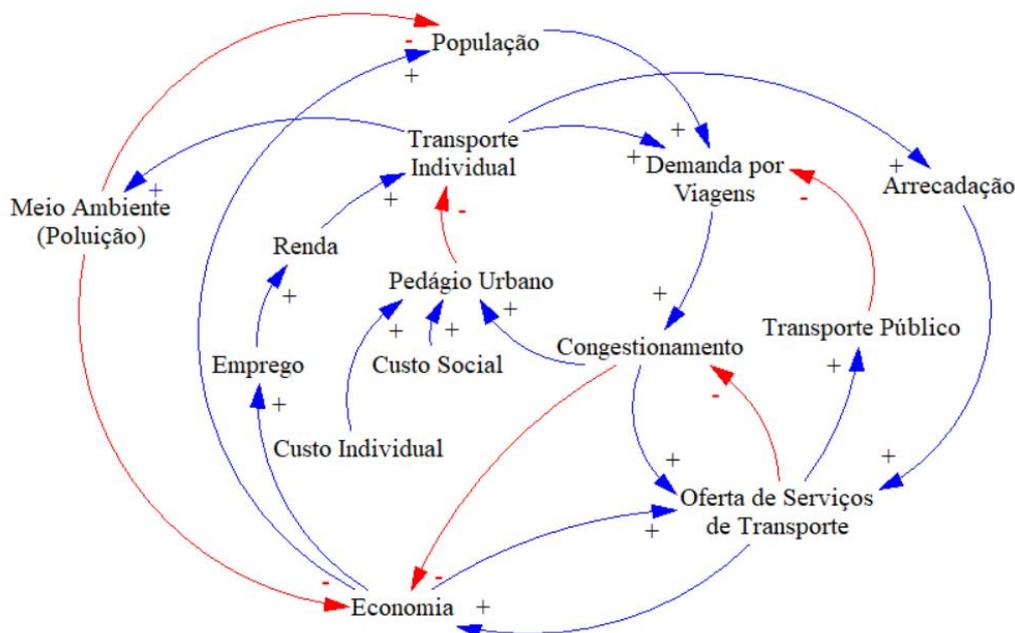


Figura 2: Diagrama de Causa e Efeito (DCE)

Fonte: Elaborado pelo autor

Vale ressaltar que a interpretação dos ciclos fechados do sistema não consiste em estabelecer que os ciclos positivos sejam bons enquanto os ciclos negativos sejam ruins, e sim, que ciclos positivos apresentam comportamento de amplificação (positivas ou negativas) das relações

entre as variáveis, enquanto os ciclos negativos tendem a balancear (estabilizar) as relações das variáveis (Sterman, 2000). Logo, o comportamento entre as variáveis de cada ciclo fechado é explicado a seguir.

Ciclo (i):

Transporte Individual \rightarrow^+ *Demanda por Viagens* \rightarrow^+ *Congestionamento* \rightarrow^+
Pedágio Urbano \rightarrow^- *Transporte Individual*

O ciclo negativo (i) representa a base da implementação da política de Pedágio Urbano, cujo objetivo é reduzir a quantidade de automóveis em circulação nos grandes centros urbanos. Neste caso, o transporte individual apresenta uma relação diretamente proporcional com a demanda por viagens, ou seja, o aumento do fluxo de automóveis nas vias provoca um aumento na demanda por viagens (quantidade de viagens para uma determinada região específica), conseqüentemente há um aumento no congestionamento da via. Além disso, o congestionamento apresenta uma relação diretamente proporcional ao Pedágio Urbano (Hamilton e Eliasson, 2013). Porém, o nível de congestionamento não é suficiente para determinar o valor do Pedágio Urbano, isto é, deve-se levar em consideração a relação de outras variáveis do sistema, tais como o custo individual e o custo social.

O custo individual representa o custo por indivíduo de percorrer um determinado trecho de via, ou seja, quanto maior a quantidade de veículos particulares em uma determinada região, maior o tempo em trânsito, conseqüentemente, o custo individual aumenta. O custo social é determinado pela soma do custo individual com o custo de adicionar um novo veículo no trânsito, ou seja, a introdução de um novo veículo no trânsito impacta no tempo total do transporte coletivo. Esse tempo adicional somado com o custo individual representa o custo social (Prud'homme e Bocarejo, 2005).

Dessa forma, o Pedágio Urbano é calculado a partir da diferença entre o custo social e o custo individual no ponto ótimo, sendo que, o ponto ótimo representa a quantidade ideal de veículos em circulação. A quantidade ideal de veículos é determinada com base na relação entre demanda e oferta por transporte, levando em consideração o tráfego veicular e a capacidade viária. (Prud'homme e Bocarejo, 2005). Em resumo, o pedágio representa o valor que determinada pessoa está disposta a pagar para que outro indivíduo deixe de utilizar o transporte individual. Portanto, o Pedágio Urbano apresenta uma relação inversamente proporcional ao transporte individual, ou seja, ao aumentar o Pedágio Urbano, a quantidade de automóveis tende a diminuir.

Ciclo (ii):

Congestionamento \rightarrow^+ *Oferta de Serviços de Transporte* \rightarrow^- *Congestionamento*

A partir do ciclo negativo (ii), observa-se que o congestionamento apresenta uma relação bidirecional em relação à oferta de serviços de transporte. Ou seja, quanto maior o nível de congestionamento da via, maior será a necessidade de aumentar a oferta de serviços de transporte, no entanto, ao aumentar a oferta de transporte, menor será o nível de congestionamento da região (Wang *et al.* 2008, Fontoura *et al.* 2019). O congestionamento só será menor se a oferta de transporte se referir às modalidades sustentáveis (transporte público e não motorizado).

Ciclo (iii):

Oferta de Serviços de Transporte →⁺ *Transporte Público* →⁻

Demanda por Viagens →⁺ *Congestionamento* →⁺ *Oferta de Serviços de Transporte*

Em relação ao ciclo negativo (iii), verifica-se que a oferta de serviços de transporte mostra uma relação diretamente proporcional ao transporte público. Esta relação ocorre devido às melhorias na confiabilidade do sistema, frequência de serviço, conforto e segurança, o que implica em maior utilização do transporte público pela população. Ao aumentar o uso do transporte público, há uma redução na demanda por viagens devido à alta capacidade do transporte público quando comparado ao transporte individual (Moradi e Vagnoni, 2018). Para mostrar esta relação, suponha que 100 automóveis se deslocam até um determinado destino, sendo que, cada automóvel contém um único indivíduo, logo, 100 viagens são realizadas. Contudo, ao utilizar o ônibus como meio alternativo, sendo que a capacidade do ônibus é de 50 pessoas, apenas 2 viagens seriam necessárias, reduzido assim o número de veículos nas vias.

Ao analisar a influência do meio ambiente no sistema, observam-se três ciclos negativos, descritos a seguir.

Ciclo (iv):

Meio Ambiente (Poluição) →⁻ *População* →⁺ *Demanda por Viagens* →⁺

Congestionamento →⁺ *Pedágio Urbano* →⁻ *Transporte Individual* →⁺

Meio Ambiente (Poluição)

Ciclo (v):

Meio Ambiente (Poluição) →⁻ *Economia* →⁺ *Oferta de Serviços de Transporte*

→⁺ *Transporte Público* →⁻ *Demanda por Viagens* →⁺ *Congestionamento* →⁺

Pedágio Urbano →⁻ *Transporte Individual* →⁺ *Meio Ambiente (Poluição)*

Ciclo (vi):

Meio Ambiente (Poluição) →⁻ *Economia* →⁺ *Oferta de Serviços de Transporte*

→⁻ *Congestionamento* →⁺ *Pedágio Urbano* →⁻ *Transporte Individual* →⁺

Meio Ambiente (Poluição)

A poluição do meio ambiente está relacionada com a população no que tange a atratividade da região, sendo que, quanto maior a poluição da região, menor será a atratividade da região. A demanda por viagens é influenciada diretamente pela quantidade de pessoas, logo, se a população apresenta um crescimento, a demanda por viagens aumenta também. Além disso, ao aumentar a demanda por viagens, o nível de congestionamento também aumenta e por consequência, o Pedágio Urbano também aumenta (Wang *et al.* 2008). O Pedágio Urbano apresenta uma relação inversamente proporcional ao transporte individual, sendo que, ao aumentar o pedágio urbano, a quantidade de automóveis em trânsito tende a diminuir (conforme já explicado anteriormente). Para concluir o ciclo, por motivos triviais, a quantidade do fluxo de transporte individual apresenta uma relação diretamente proporcional à poluição do meio ambiente. Além disso, o meio ambiente (poluição) apresenta uma relação inversamente proporcional com a economia (Diaz e Behr, 2016). Em outras palavras, a poluição provoca um custo indireto à região por meio dos impactos ambientais e também impactos à saúde pública.

Os ciclos negativos (vii) e (viii) apresentados a seguir têm como objetivo analisar as relações das variáveis com base na economia.

Ciclo (vii):

*Economia \rightarrow^+ População \rightarrow^+ Demanda por Viagens \rightarrow^+
Congestionamento \rightarrow^- Economia*

Ciclo (viii):

*Economia \rightarrow^+ Emprego \rightarrow^+ Renda \rightarrow^+ Transporte Individual \rightarrow^+
Demanda por Viagens \rightarrow^+ Congestionamento \rightarrow^- Economia*

A economia apresenta uma relação diretamente proporcional com a população da região, ou seja, o crescimento econômico implica em maior atratividade da população, de outro modo, quando há um declínio na economia, a quantidade de emigração aumenta (Rolnik e Klink, 2011). Além disso, a economia apresenta impacto direto na quantidade de empregos gerado em uma determinada região, assim como o aumento da renda. A renda do indivíduo apresenta uma relação diretamente proporcional com o transporte individual, sendo que, ao aumentar a renda, o cidadão tende a migrar do transporte público para o transporte individual (Ribeiro *et al.*, 2014).

Em relação aos quatro ciclos positivos, constata-se que a economia é um fator relevante para o comportamento de retroalimentação do sistema, já que se destaca em todos os ciclos positivos do sistema proposto.

Ciclo (ix):

Economia \rightarrow^+ Oferta de Serviços de Transporte \rightarrow^+ Economia

Ciclo (x):

*Economia \rightarrow^+ Poluição \rightarrow^+ Demanda por Viagens \rightarrow^+ Congestionamento \rightarrow^+
Oferta de Serviços de Transporte \rightarrow^+ Economia*

Ciclo (xi):

*Economia \rightarrow^+ Emprego \rightarrow^+ Renda \rightarrow^+ Transporte Individual \rightarrow^+
Demanda por Viagens \rightarrow^+ Congestionamento \rightarrow^+
Oferta de Serviços de Transporte \rightarrow^+ Economia*

Ciclo (xii):

*Economia \rightarrow^+ Emprego \rightarrow^+ Renda \rightarrow^+ Transporte Individual \rightarrow^+
Arrecadação \rightarrow^+ Oferta de Serviços de Transporte \rightarrow^+ Economia*

De acordo com o ciclo positivo (ix), a economia apresenta uma relação bidirecional positiva com a oferta de serviços de transporte, ou seja, ao aumentar ou diminuir a economia, a oferta de serviços de transporte também aumenta ou diminui, sendo que, a recíproca também é verdadeira (Zanchetta *et al.*, 2018). Os ciclos positivos (x) e (xi) do sistema representam o processo pelo qual, diante do crescimento econômico, o problema da mobilidade urbana não é resolvido. Verifica-se que ao aumentar a economia, a população também aumenta, provocando assim aumento na demanda por viagens, que por consequência implica em maior

congestionamento, que por sua vez, exige maior oferta de serviços de transporte. Ainda que este ciclo fomente a economia, o congestionamento, que é visto como o problema para a mobilidade urbana, não é resolvido.

O ciclo positivo (xii) está vinculado ao crescimento econômico a partir das arrecadações do pedágio urbano. Ao aumentar a economia, a quantidade de emprego e renda também aumenta, implicando em maior uso do transporte individual. O transporte individual apresenta uma relação diretamente proporcional à arrecadação do pedágio urbano, que por sua vez, implica em maior oferta de serviços de transporte devido aos investimentos no setor de transporte, que por consequência provoca maior crescimento econômico (Quddus *et al.*, 2007). Sendo assim, este ciclo positivo mostra que a implementação da política de Pedágio Urbano pode estimular o desenvolvimento econômico da região. Contudo, deve-se analisar o comportamento do sistema como um todo, tendo em vista que há ciclos que impactam tanto positivamente quanto negativamente à mobilidade urbana. Para analisar se a implementação de tal política é viável ou não, deve-se utilizar o DEF a fim de simular cenários específicos, já que o DCE apresentado neste artigo leva em consideração somente a análise qualitativa das variáveis do sistema. Portanto, verifica-se que o DCE proposto neste artigo pode ser útil aos tomadores de decisão no momento de avaliar políticas de Pedágio Urbano.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A mobilidade urbana sustentável desempenha um papel fundamental na qualidade dos serviços, eficiência do transporte, redução de custo, desenvolvimento econômico, redução de poluentes e bem-estar da população, porém, o elevado nível de congestionamento nas vias provoca impactos negativos ao desenvolvimento sustentável da mobilidade urbana. Sendo assim, cidades como Londres e Estocolmo adotaram a política de Pedágio Urbano a partir de dois aspectos, sendo eles: (1) promover a mobilidade urbana sustentável e (2) arrecadar verba para investimentos em infraestrutura de transporte.

Ainda que a política de Pedágio Urbano seja concebida como uma política radical, devem-se avaliar seus impactos positivos e negativos. Neste sentido, o modelo proposto apresentou as principais relações entre variáveis que constituem o sistema de transporte de mobilidade urbana. Além disso, o tema de Pedágio Urbano é pouco discutido no âmbito da Dinâmica de Sistemas, sendo assim, este artigo contribuiu para apresentar os principais ciclos que contribuem para a mobilidade urbana sustentável.

Dentre as relações apresentadas neste trabalho, verificou-se que podem ocorrer ciclos positivos do sistema que não contribuem para o desenvolvimento da mobilidade sustentável, embora mostrem impactos positivos ao desenvolvimento econômico. Ainda neste sentido, constatou-se maior predominância de ciclos negativos quando comparado com a quantidade de ciclos positivos. Dentre os ciclos negativos abordados neste modelo, os ciclos (i), (ii), (iii) garantem a estabilidade das variáveis “Transporte Individual”, “Congestionamento” e “Demanda por Viagens” ao longo do tempo, corroborando assim para uma mobilidade urbana mais sustentável. Os ciclos negativos (iv) e (v) não apresentam impactos positivos para a mobilidade urbana, já que a relação negativa está vinculada à economia, ou seja, ambos os ciclos indicam que ao aumentar a economia de uma determinada região, há fatores que indiretamente provocam a diminuição do mesmo.

Além disso, os ciclos negativos (vi), (vii) e (viii) apresentam influência no desenvolvimento

da mobilidade urbana sustentável. Porém, ao excluir a variável Pedágio Urbano do sistema, verifica-se que o ciclo (vi) deixa de solucionar os problemas de mobilidade urbana, enquanto os ciclos (vii) e (viii) ainda contribuem para a mobilidade sustentável, já que, há uma relação inversamente proporcional ao congestionamento. Portanto, a política de Pedágio Urbano para automóveis em centros urbanos salientou categoricamente o apoio para o desenvolvimento da mobilidade urbana sustentável. Vale ressaltar que o preço do Pedágio Urbano é um critério muito delicado de analisar, pois pode provocar aversão da população caso o valor seja muito elevado, provocando assim mais desvantagem do que vantagens para a mobilidade urbana.

O Diagrama de Causa e Efeito (DCE) apresentado neste artigo possui limitações quanto à análise do sistema de transporte. Dentre as limitações do sistema proposto, destacam-se principalmente o fator temporal e o impacto quantitativo das variáveis. O fator temporal está diretamente relacionado à velocidade das ações, ou seja, o impacto econômico de uma determinada região mediante os investimentos de infraestrutura é lento quando comparado à implementação do Pedágio Urbano. Em outras palavras, o impacto na região é imediato quando implementado o Pedágio Urbano (redução de automóveis em circulação), enquanto o crescimento econômico duraria meses ou anos. Além disso, o DCE não permite analisar a viabilidade da implementação da política de pedágio urbano.

Portanto, como proposta para trabalhos futuros, sugere-se a elaboração do Diagrama de Estoque e Fluxo (DEF) para realizar simulações computacionais com dados reais, assim como analisar o comportamento das variáveis ao longo do tempo com base em cenários de implementação da política de Pedágio Urbano em grandes centros urbanos, tal como o centro do Rio de Janeiro. Com isso, será possível analisar o melhor preço para o Pedágio Urbano a fim de evitar demasiados problemas, auxiliando assim os tomadores de decisão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Armah, F.; Yawson, D.; Pappoe, A. A. (2010). A systems dynamics approach to explore traffic congestion and air pollution link in the city of Accra, Ghana. *Sustainability*, v. 2, n. 1, p. 252-265.
- Bajracharya, A. (2016). Public Transportation and Private Car: A System Dynamics Approach in Understanding the Mode Choice. *International Journal of System Dynamics Applications*, v. 5, n. 2, p. 1-18.
- Chandran, V. G. R.; Tang, C. F. (2013). The impacts of transport energy consumption, foreign direct investment and income on CO 2 emissions in ASEAN-5 economies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 24, p.445-453.
- Crescenzi, R.; Pose, A.R. (2012). Infrastructure and regional growth in the European Union. *Papers In Regional Science*, v. 91, n.3, p.487-513.
- Diaz, R.; Behr, J. G.; Ng, M. (2016). Quantifying the economic and demographic impact of transportation infrastructure investments: A simulation study. *Simulation*, v.92, n.4, p.377-393.
- Fernandes, A. C. (2003). *Scorecard Dinâmico: em Direção à Integração da Dinâmica de Sistemas com o Balanced Scorecard*. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Fontoura, W. B.; Chaves, G. L. D.; Ribeiro, G. M. (2019). The Brazilian urban mobility policy: The impact in São Paulo transport system using system dynamics. *Transport Policy*, v. 73, p. 51-61.
- Forrester, J. W. (1997). Industrial Dynamics. *Journal of the Operational Research Society*, v. 48, n. 10, p. 1037-1041.
- Ghisolfi, V.; Ribeiro, G. M.; Chaves, G. D. L. D.; Orrico Filho, R. D.; Hoffmann, I. C. S.; Perim, L. R. (2019). Evaluating Impacts of Overweight in Road Freight Transportation: A Case Study in Brazil with System Dynamics. *Sustainability*, v.11, n.11, p. 3128.
- Hamilton, C. J.; Eliasson, J. (2013). Costs and benefits of the European directive on road tolling interoperability. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 30, p. 221-238.
- Hassmiller Lich, K.; Urban, J. B.; Frerichs, L.; Dave, G. (2017). Extending systems thinking in planning and evaluation using Group Concept Mapping and System Dynamics to tackle complex problems. *Evaluation*

- and Program Planning*, v. 60, p. 254-264.
- Hsieh, Y. H.; Chou, Y. H. (2018). Modeling the impact of service innovation for small and medium enterprises: A system dynamics approach. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 82, p. 84-102.
- Liu, X.; Ma, S.; Tian, J.; Jia, N.; Li, G. (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, p. 253-270.
- Moradi, A.; Vagnoni, E. (2018). A multi-level perspective analysis of urban mobility system dynamics: What are the future transition pathways?. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 126, p. 231-243.
- Morecroft, J. D. (2015). *Strategic modelling and business dynamics: a feedback systems approach*. John Wiley & Sons.
- Pfaffenbichler, P.; Emberger, G.; Shepherd, S. (2010). A system dynamics approach to land use transport interaction modelling: the strategic model MARS and its application. *System Dynamics Review*, v. 26, n. 3, p. 262-282.
- Prud'homme, R.; Bocarejo, J. P. (2005). The London congestion charge: a tentative economic appraisal. *Transport Policy*, v. 12, n. 3, p. 279-287.
- Quddus, M. A.; Bell, M. G.; Schmöcker, J. D.; Fonzone, A. (2007). The impact of the congestion charge on the retail business in London: An econometric analysis. *Transport Policy*, v. 14, n. 5, p. 433-444.
- Ribeiro, G. R.; Magrinya, F.; Orrico Filho, D. R. (2014). Study of the changes in urban mobility of the Brazilian middle class, brought about by the population's increased income, and the ensuing impact on urban mass transit. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, v. 160, p. 294-303.
- Rolnik, R.; Klink, J. (2011). Crescimento Econômico e desenvolvimento urbano: por que nossas cidades continuam tão precárias?. *Novos estudos CEBRAP*, v. 89, p. 89-109.
- Seddon J.; Caulkin S. (2008). Systems thinkings, lean production and action learning. *Action Learning: Research and Practice*, v. 4, n. 1, p. 9-24.
- Shepherd, S. P. (2014). A review of system dynamics models applied in transportation. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, v. 2, n. 2, p. 83-105.
- Spickermann, A.; Grienitz, V.; Heiko, A. (2014). Heading towards a multimodal city of the future?: Multi-stakeholder scenarios for urban mobility. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 89, p. 201-221.
- Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. McGraw-Hill, Nova York.
- Thaller, C.; Niemann, F.; Dahmenc, B.; Clausend, U.; Leerkamp, B. (2017). Describing and explaining urban freight transport by System Dynamics. *Transportation research procedia*, v. 25, p. 1075-1094.
- Wang, H.; Zhang, K.; Chen, J.; Wang, Z.; Li, G.; Yang, Y. (2018). System dynamics model of taxi management in metropolises: Economic and environmental implications for Beijing. *Journal of environmental management*, v. 213, p. 555-565.
- Wang, J.; Huapu, L.; Hu, P. (2008). System dynamics model of urban transportation system and its application. *Journal of Transportation Systems engineering and information technology*, v. 8, n. 3, p. 83-89.
- Zanchetta, I. T.; Boldrini, O. N.; Chaves, G. L. D. (2018). Investimento em infraestrutura, crescimento econômico, emissão de dióxido de carbono e consumo energético do setor de transportes: um modelo conceitual para avaliação. *Anais: 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, Gramado -RS , 4 a 7 de Novembro de 2018*.

Igor Tureta Zanchetta (igor.zanchetta@pet.coppe.ufrj.br)

Glaydston Ribeiro Mattos (glaydston@pet.coppe.ufrj.br)

Licínio da Silva Portugal (licinio@pet.coppe.ufrj.br)

Centro de Tecnologia - Rua Horácio Macedo, Bloco H, 2030 - 101 - Cidade Universitária, Rio de Janeiro - RJ, 21941-450