

INVESTIMENTO EM INFRAESTRUTURA, CRESCIMENTO ECONÔMICO, EMISSÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO E CONSUMO ENERGÉTICO DO SETOR DE TRANSPORTES: UM MODELO CONCEITUAL PARA AVALIAÇÃO

Igor Tureta Zanchetta¹
Olívia Nascimento Boldrini¹
Gisele de Lorena Diniz Chaves¹

¹Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

RESUMO

O sistema de transporte é um sistema complexo com múltiplas variáveis que se influenciam de forma não linear. Ele é influenciado não somente pelo transporte como também por aspectos sociais, econômicos e fatores ambientais. Entretanto, incorporar todos os elementos de cada aspecto em um único modelo que represente adequadamente o sistema de transporte tem sido um desafio estudado ao longo dos anos. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo apresentar um modelo conceitual relacionando o transporte com os elementos: (1) investimento em infraestrutura; (2) crescimento econômico; (3) emissão de dióxido de carbono (CO₂) e (4) consumo energético. O modelo proposto, baseado no método de dinâmica de sistemas, apresenta a relação dinâmica entre esses elementos, evidenciando sua interação mútua. O modelo elaborado pode ser utilizado como ferramenta para auxiliar a tomada de decisão, em que dados reais podem ser inseridos para simular condições futuras.

ABSTRACT

The transportation system is a complex system with multiple variables that influence in a non linear way. It is influenced not only by transportation but also by social, economic and environmental factors. However, incorporating all the elements of each aspect into a single model that adequately represents the transport system has been a challenge studied over the years. In this sense, this work aims to present a conceptual model relating transport with the elements: (1) investment in infrastructure; (2) economic growth; (3) CO₂ emissions and (4) energy consumption. The proposed model, based on the system dynamics method, presents the dynamic relation between these elements, evidencing their mutual interaction. The elaborated model can be used as a tool to aid decision making, where real data can be inserted to simulate future conditions.

1. INTRODUÇÃO

O setor de transporte é um setor chave para o desenvolvimento de um país, uma vez que ele dá suporte para o desenvolvimento econômico e social de uma nação, possibilitando alocação eficiente de materiais e recursos. Adicionalmente, ele proporciona mobilidade para a população (Crescenzi; Pose, 2012). Saboori *et al* (2014) afirmam que o alto nível de crescimento econômico, a rápida urbanização, o aumento da renda disponível, a diversificação das atividades sociais e de lazer, o rápido crescimento do número de veículos particulares aumentam a demanda por transporte. Contudo, esse aumento da demanda traz consigo um desafio relacionado ao impacto ambiental decorrente das atividades de transportes. Este setor tem colaborado para o crescimento nos índices de emissão de gases do efeito estufa (GEE) e sua participação nas emissões de dióxido de carbono (CO₂) está aumentando gradualmente em todas as regiões do mundo (Chandran; Tang, 2013).

Em termos mundiais, acredita-se que as emissões de CO₂ do setor de transportes estão crescendo mais rapidamente que as emissões totais de CO₂. No período de 1990 a 2015 de acordo relatório publicado pela Agência Internacional de Energia (IEA, 2017), as emissões de CO₂ provenientes do setor de transporte tiveram um aumento de 68%. Em contrapartida, no mesmo período, as emissões totais de CO₂ tiveram um crescimento de 13%. No ano de 2015 o setor de transporte foi responsável por 24% das emissões de CO₂, sendo o modo rodoviário responsável por três quartos dessa emissão. Ribeiro *et al* (2007) projetam que o consumo

mundial de energia para o setor de transportes cresça 2% por ano, sendo observadas maiores taxas em países emergentes.

Em termos de emissão de CO₂, o setor de transportes no Brasil acompanha o cenário mundial. Em 2016, o setor foi responsável por 29% das emissões de CO₂ no Brasil. Desse percentual, 90% é relativo ao modo rodoviário (MMA, 2017), sendo considerado o setor que mais impacta na qualidade do ar no país. O consumo energético pelos transportes no Brasil perde somente para o setor industrial por um percentual muito pequeno, apenas 0,6% de diferença (EPE, 2017).

Os investimentos em transporte no Brasil apresentam níveis muito inferiores ao que se espera para economias de alto a moderado crescimento. Em 2016, o investimento em infraestrutura rodoviária foi de 0,13% do PIB. Este valor é muito inferior ao necessário para manter as obras fundamentais para os modos de transportes de acordo com Frischtak e Mourão (2017). Segundo estes autores, deveriam ser investidos no mínimo 5,3% do PIB naquele ano para realizar projetos essenciais propostos. O crescimento do PIB brasileiro abaixo da média mundial possui diversas explicações, mas é consenso que a influência da infraestrutura em quantidade insuficiente e qualidade inferior aos padrões internacionais corroboraram com essa desaceleração (Baltar, 2016).

No Brasil, o modo rodoviário responde por 60% do transporte de passageiros e cargas realizados no país, mas apenas 20% das rodovias brasileiras estavam pavimentadas em 2017. Por si só, este dado reflete baixa densidade de vias pavimentadas quando se considera a extensão territorial do país. Entretanto, 61,8% dessas rodovias encontram-se em estado regular, ruim ou péssimo, o que impacta nos custos do setor e em maiores índices de acidentes, tornando-o menos eficiente (CNT, 2017a).

Nesse contexto, alguns estudos buscaram identificar relações em longo e curto prazo entre infraestrutura, consumo de energia, e crescimento econômico no Brasil. Pao e Tsai (2010) utilizaram a metodologia de cointegração para avaliar a existência ou não de relações a longo e curto prazo das variáveis citadas dos países que compõem o BRIC. Em 2011 os mesmos autores utilizaram a técnica de análise de Multivariável de Granger para investigar relações causais entre emissão de CO₂, consumo de energia, investimento externo e PIB nos países participantes do BRIC. Hossain (2011) utilizou metodologia econométrica para elaborar um painel de estimativa para emissões de CO₂, consumo de energia, crescimento econômico, abertura comercial e urbanização de países recém-industrializados, entre eles o Brasil.

Todos os estudos citados trataram as variáveis envolvidas de forma global, não sendo abordado nenhum setor específico. Para o Brasil, não foi encontrado nenhum estudo que relacionasse as variáveis emissão de CO₂, consumo energético e crescimento econômico no contexto do setor de transporte, mais especificadamente para o modo rodoviário. A pesquisa foi feita nos Periódicos Capes em abril de 2018, utilizando as palavras-chave: emissão de CO₂, PIB, modo rodoviário, na língua portuguesa. As palavras chaves utilizadas pela busca nos periódicos em inglês foram *CO₂ emission, GDP, transport sector*.

Portanto, este artigo tem como objetivo desenvolver um modelo conceitual a partir do método de Dinâmica de Sistemas para evidenciar as relações entre investimento em infraestrutura rodoviária, emissões de CO₂, consumo energético e crescimento econômico dentro de uma abordagem de dinâmica de sistemas, bastante explorada atualmente. Existem discussões sobre

o uso do PIB, que nem sempre traz o desenvolvimento adequado (Robert *et al*, 2014). Contudo, espera-se que o investimento em infraestrutura de transporte gere desenvolvimento a partir de retornos fiscais e, com isso, impulsionar o processo de crescimento e desenvolvimento (Bertussi, Ellery, 2011).

A dinâmica de sistemas é um método que busca melhorar o aprendizado em sistemas complexos e está relacionada diretamente com o pensamento sistêmico (Sterman, 2000). Segundo Aslani *et al* (2013), a dinâmica de sistemas pode ser utilizada para desenvolver sistemas complexos, em que todos os estágios estão inter-relacionados e apresentam uma relação de causa e efeito (*feedback*) para o foco principal do sistema, que é representado pela compreensão do sistema. Para mais informações sobre o método de dinâmica de sistemas, verificar Morecroft (2015), Nabavi *et al* (2017) e Sterman (2000).

2. A INFLUÊNCIA DO TRANSPORTE NO CRESCIMENTO ECONÔMICO

O desenvolvimento em infraestrutura afeta o crescimento econômico de diversas maneiras. O aumento da infraestrutura de transporte em uma região provoca uma redução nos custos dos insumos industriais no processo de produção. Esta redução deve-se às melhorias no fluxo de transporte que, conseqüentemente, promove maior circulação de capital na região, inferindo em crescimento da economia local. Somado a isso, o investimento em infraestrutura apresenta impacto positivo na educação e na saúde da sociedade, o que em longo prazo acarreta em mão-de-obra mais qualificada e mais eficiente (Pradhan; Bagchi, 2013, Rolnik; Klink, 2011, Snieska; Simkunaite, 2009).

Desta forma, a infraestrutura de transporte é um fator chave para o crescimento econômico, pois, promove de maneira direta uma maior produtividade do trabalhador e de maneira indireta maior produtividade das indústrias (Achour; Belloumi, 2016). Achour e Belloumi (2016) desenvolveram um modelo econométrico relacionando causalmente o investimento em infraestrutura de transporte no crescimento econômico, emissões de CO₂ e utilização de energia para os modais rodoviário e ferroviário na Tunísia. Os autores verificaram e quantificaram a relação entre estes elementos no longo prazo.

O consumo de energia é influenciado pelo crescimento econômico, aumento populacional, industrialização, urbanização e principalmente pelo aumento da infraestrutura de transporte. O investimento em infraestrutura apresenta uma relação unidirecional com o consumo de energia, devido ao aumento de fluxo de veículos na região, o que promove um maior consumo de energia de combustível (Pradhan, 2010).

O consumo energético apresenta uma relação diretamente proporcional com a emissão de CO₂. Além disso, a emissão de CO₂ apresenta uma relação inversamente proporcional com o crescimento econômico, ou seja, quanto maior a emissão de CO₂, menor será o crescimento econômico, devido ao aumento da poluição e emissão de gases. Porém, quanto maior o crescimento econômico, maior será a emissão de CO₂, devido ao aumento em infraestrutura, o que reflete em uma relação diretamente proporcional (Chandran; Tang, 2013).

Azlina *et al* (2014) utilizaram a dinâmica de sistemas para criar um modelo que identifica a relação entre renda, consumo de energia e emissão de CO₂ na Malásia no período de 1975 a 2011. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que há uma relação causal em longo prazo entre as três variáveis abordadas. Os resultados foram comparados com alguns métodos

econométricos que avaliam as relações causais, como a curva de Kuznet, para validar o método de dinâmica de sistemas.

Diaz *et al* (2016) desenvolveram um modelo utilizando o método de dinâmica de sistemas, cujo objetivo era determinar o comportamento das relações cíclicas entre investimento em infraestrutura, crescimento econômico e congestionamento na região. Eles chegaram à conclusão que o aumento do investimento em infraestrutura acarreta em novas vagas de empregos ofertadas na região, elevando assim a renda per capita do local. Contudo, com o aumento da renda na região, a atratividade para migrações locais aumentam, o que eleva o nível de congestionamento. Com o aumento do congestionamento, a produtividade é reduzida, o que apresenta um impacto negativo no crescimento econômico. O modelo proposto foi aplicado na Virgínia (EUA) com o objetivo de auxiliar na tomada de decisão para novos projetos de investimento em infraestrutura.

Com o propósito de elaborar um modelo conceitual que possa ser simulado para o caso brasileiro, a Seção 3 tem como objetivo demonstrar a estrutura do modelo proposto, assim como suas equações. O modelo proposto apresenta característica de um ambiente macroeconômico, sendo assim, para simulações que envolvem regiões estaduais e municipais, o modelo deve ser adaptado.

3. O MODELO CONCEITUAL PROPOSTO

Com o auxílio do método de dinâmica de sistemas, foi desenvolvido um modelo de simulação a partir das relações sobre investimento em infraestrutura, emissão de CO₂ e crescimento econômico (destacado na Seção 2). Para exemplificação do modelo, quatro submodelos (A, B, C e D) serão apresentados ao longo desta Seção.

O submodelo A refere-se às variáveis de cunho econômico. Nesse submodelo são calculados os estoques PIB, a contribuição do setor de transporte ao PIB e os investimentos destinados à infraestrutura do setor de transporte no Brasil. Os estoques Investimentos em Infraestrutura e Valor adicionado pelo Transporte, dependem do PIB para serem calculados, as demais variáveis podem ser visualizadas na Figura 1.

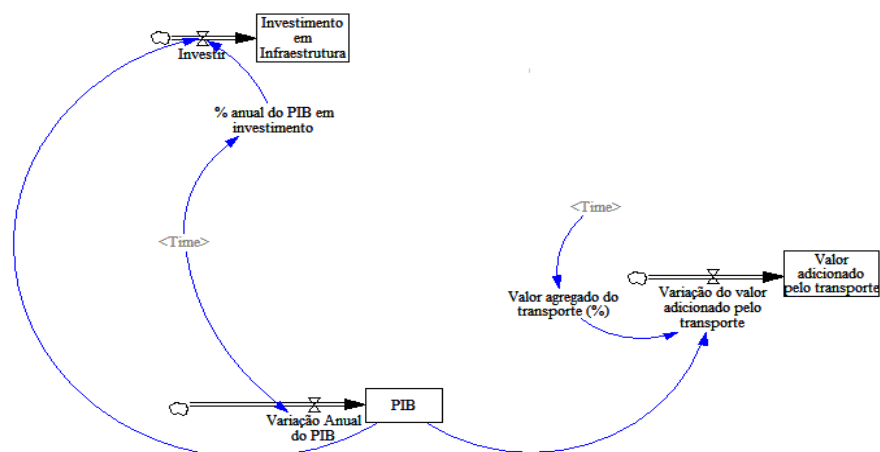


Figura 1: Diagrama de causa e efeito submodelo A

Fonte: Elaborado pelos autores.

No modelo desenvolvido, o PIB é representado como um estoque que acumula ao longo do período estudado sua variação monetária, somado o valor inicial do estoque no período (PIB_0), conforme demonstrado na Equação 1.

$$\int_{t_0}^t (PIB + \text{variação anual do PIB})dt + PIB_0 \quad (1)$$

O estoque valor adicionado pelo transporte (vat) refere-se à contribuição do setor de transporte ao PIB brasileiro. Ele acumula a variação do valor adicionado ao transporte ao longo do tempo por meio do fluxo de variação do valor adicionado pelo transporte ($vvat$) a partir do PIB de transporte atual (vat_0) (Equação 2).

$$vat = \int_{t_0}^t (vvat)dt + vat_0 \quad (2)$$

O fluxo variação do valor adicionado ao transporte é obtido pela multiplicação do PIB pela porcentagem anual de contribuição do setor de transporte ($\%VAT$), sendo o último inserido como dado no modelo (Equação 3).

$$vvat = PIB * VAT\% \quad (3)$$

Os investimentos em infraestrutura no Brasil são realizados com base no PIB. , Anualmente é despendida uma porcentagem do PIB para o setor de transporte (Frischtak, 2008). No modelo, o estoque Investimento em Infraestrutura ($INVINF$) representa os investimentos federais destinados ao setor de transporte no Brasil, em que estão inclusos os modais rodoviários, aquaviários, aéreos e ferroviários. O estoque é acumulado por meio do fluxo de investimentos anual ($investir$) a partir do montante de investimento inicial ($invinfo$) (Equação 4).

$$INVINF = \int_{t_0}^t (investir)dt + invinfo \quad (4)$$

O fluxo $investir$ é o produto entre a porcentagem do PIB ($\%PIBINV$) destinada a investimentos para o modo rodoviário, o qual é inserido como dado no modelo proposto e o PIB (Equação 5).

$$investir = \%PIBINV * PIB \quad (5)$$

Os investimentos empregados na infraestrutura servirão de base para o cálculo da infraestrutura rodoviária proposta pelo modelo, o qual será detalhado no submodelo B. O submodelo B faz referência à infraestrutura rodoviária. Nesse módulo, é feita uma estimativa de como os investimentos no setor de transporte no Brasil são convertidos em infraestrutura rodoviária, mais precisamente em rodovias pavimentadas. Para isso, utilizou-se o estoque Investimento em Infraestrutura para determinar a quantidade de rodovias pavimentadas anualmente.

Essas rodovias sofrem desgastes ao longo do tempo, o que impacta na extensão de quilômetros pavimentados total. Para simular um desgaste das rodovias federais brasileiras, utilizou-se a frota de veículos circulante no Brasil, em que foi estimado um fluxo médio anual e, a partir dele, pode-se calcular o desgaste. Vale ressaltar, que existem outros fatores que implicam em desgaste da rodovia, como o excesso de carga transportada, intemperismos e qualidade do pavimento (Fleury, 2011). Porém, por se tratar de um modelo genérico e pela dificuldade de simular os outros fatores em âmbito nacional, optou-se por estimar o desgaste apenas baseado na frota brasileira de veículos (caminhões médios e leves, motos, veículos articulados, ônibus e carros). A Figura 2 destaca o submodelo B, assim como suas respectivas relações entre as variáveis.

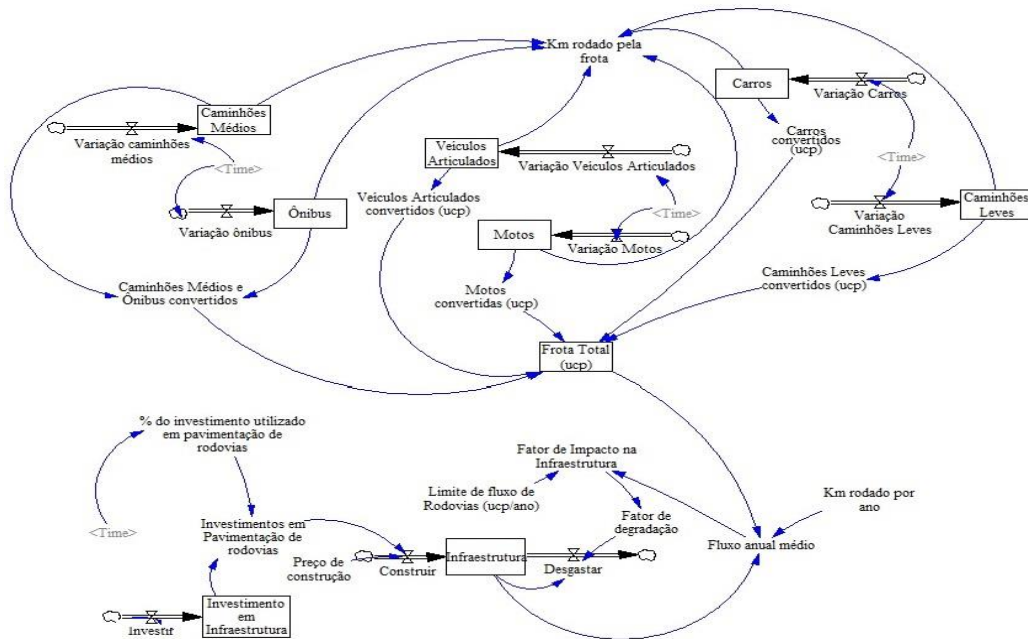


Figura 2: Diagrama de estoque e fluxo submodelo B
 Fonte: Elaborado pelos autores.

O estoque *infraestrutura* (*inf*) é dado em quilômetros e é calculado por meio da integração da diferença entre as taxas *construir* e *desgastar* para um dado período, a partir da infraestrutura atual (*inf*₀) conforme Equação 6.

$$inf = \int_{t_0}^t (construir - desgastar) dt + inf_0 \quad (6)$$

Os estoques Caminhões Médios, Ônibus, Motos, Carros, Veículos Articulados e Caminhões Leves representam a frota brasileira de veículos. Essa classificação da frota está em acordo com a classificação feita pelo Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN, 2016). A Equação 7 representa de forma genérica como esses estoques foram obtidos para cada tipo de veículo.

$$Tipo\ de\ veículo = \int (variação\ tipo\ de\ veículo) dt + quantidade\ inicial_0 \quad (7)$$

Para o cálculo do estoque frota total, é necessário transformar todos os tipos de veículos em uma unidade padrão, definida como unidade de carros de passeio (*ucp*). Essa conversão faz-se necessária, uma vez que para calcular o desgaste da rodovia é necessário haver um fluxo de veículos, em unidade dimensional compatível, para que seja possível comparar com o limite de fluxo suportado pelos pavimentos das rodovias nacionais (DNIT, 2006). Desta forma, todos os tipos de veículos foram convertidos em carros de passeio, obtidos pelo produto entre a quantidade e o fator de conversão para cada tipo de veículo especificado. Após essa conversão é possível obter a frota total em *ucp* de acordo com a integração da soma de todos os veículos somado a quantidade inicial (*FT*₀), conforme mostrado na Equação 8.

$$FT = \int (CMOc + Mc + Cc + VAc + CLc) dt + FT_0 \quad (8)$$

O desgaste depende diretamente do *fluxo anual médio* (*flxmed*) nas rodovias e do limite de fluxo suportado pelas rodovias (*LFROD*), o qual possui valor constante. O *flxmed* é calculado conforme Equação 9. A variável auxiliar quilômetro rodado pela frota (*kmrod*) foi definido com base na quantidade de quilômetros em média que um carro trafega em um ano no Brasil. Para determinação desse parâmetro, utilizou-se a idade média do veículo no Brasil como 9 anos

(Guimarães; Lee, 2010, Chesky, 2017). De acordo com o 1º Inventário de Emissões de Atmosféricas de Veículos Automotores Rodoviários realizado pelo Ministério de Meio Ambiente em 2011 (MMA, 2011), um veículo com essa idade percorre cerca de 14.000 quilômetros por ano. Com $flxmed$ e $LFROD$ conhecidos, pode-se obter o fator de impacto na infraestrutura ($FIINF$), conforme Equação 10.

$$flxmed = \left(\frac{kmrod * FT}{inf} \right) \quad (9)$$

$$FIINF = \frac{flxmed}{LFROD} \quad (10)$$

O fluxo *desgastar* é dado com auxílio da função *if then else*. A fim de conseguir um comportamento mais próximo do real, estabeleceu-se que só ocorreria desgaste na rodovia, a partir do momento que o $flxmed$ fosse maior que o $LFROD$, ou seja, quando o valor de $FIINF$ fosse maior que 1. Nesses casos, definiu-se um coeficiente constante para o desgaste equivalente a 3% da infraestrutura existente. O coeficiente de desgaste foi estimado de forma a aproximar os resultados obtidos do comportamento real. Desta forma, o coeficiente de desgaste de 3% tornou os resultados mais próximos dos dados reais. A Equação 11 ilustra o cálculo do fluxo. O atraso ou “*delay*” na Equação 11 representa o tempo médio para que o efeito do desgaste tenha impacto na via. Este valor de um ano foi determinado com base em dados históricos, conforme (CNT, 2017b).

$$desgastar = if\ then\ else\ (FIINF > 1, \quad Delay1(0.03 * Infraestrutura, 1), 0) \quad (11)$$

Para cálculo do fluxo construir, utilizou-se o estoque Investimento em Infraestrutura para calcular o percentual desse investimento que é destinado para pavimentação de rodovias. Esse percentual foi inserido como parâmetro no modelo, uma vez que ele varia no decorrer do período. Além desses parâmetros, foi necessário o parâmetro “preço de construção”, o qual faz referência ao custo para se pavimentar um quilômetro de rodovia no Brasil, ao qual podem ser auferidos pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT, 2006). Dessa forma, pode-se calcular o fluxo “construir”, de acordo com a Equação 12. Foi utilizado o atraso ou “*delay*” na equação como sendo 3 anos, em que 1 ano representa o tempo transcorrido para dar início ao projeto (tempo de debêntures), enquanto 2 anos representam o tempo efetivo para entregar o projeto finalizado (tempo de execução). Embora esses dados possam variar conforme o tipo de projeto, esse *delay* representa a média encontrada, conforme Wajnberg (2014).

$$construir = Delay1\left(\frac{INVINF}{PC}, 3\right) \quad (12)$$

Neste submodelo também é calculada a variável auxiliar quilômetro rodado pela frota ($kmrodf$), a qual servirá de parâmetro para o submodelo C, que se refere às emissões de CO₂ decorrente da utilização da frota brasileira. Essa variável é calculada por meio da Equação 13. As variáveis $MkmrodCL$, $MkmrodCM$, $MkmrodC$, $MkmrodM$, $MkmrodO$ e $MkmrodA$ representam a média de quilômetros rodados para cada veículo com base na média de 9 anos (processo semelhante ao cálculo do $kmrod$ mencionado anteriormente), esses dados são obtidos a partir do Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2011).

$$\begin{aligned} kmrodf = & Caminhões\ Leves * MkmrodCL + Caminhões\ Médios * MkmrodCM \\ & + Carros * MkmrodC + Motos * MkmrodM + Ônibus * MkmrodO \\ & + Veículos\ Articulados * MkmrodA \end{aligned} \quad (13)$$

O submodelo C compreende as variáveis e equações que determinam o valor total das emissões de CO₂ decorrentes das atividades do modo rodoviário no Brasil, conforme ilustrado da Figura 3.

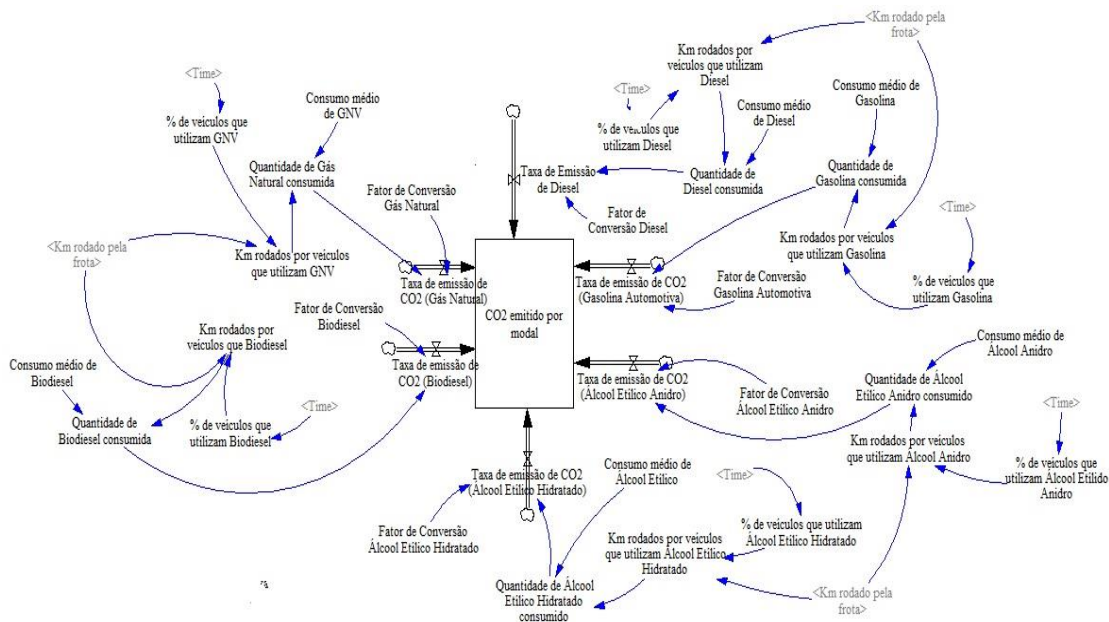


Figura 3: Diagrama de estoque e fluxo submodelo C
Fonte: Elaborado pelos autores.

O estoque *Emissão de CO₂ pelo modo de transporte (co2emitmod)* acumula as emissões oriundas da queima dos combustíveis dos veículos. É dado pela integração da soma das taxas de emissão de CO₂ dos combustíveis utilizados no modo rodoviário: taxa de emissão de CO₂ do álcool etílico anidro, taxa de emissão de CO₂ do álcool etílico hidratado, taxa de emissão de CO₂ do biodiesel, taxa de emissão de CO₂ da gasolina, taxa de emissão de CO₂ do gás natural e taxa de emissão de CO₂ do diesel; a partir da quantidade de CO₂ emitida inicial (*co2emitmod₀*) (Equação 14).

$$\int_{t_0}^t (Taxa\ de\ emiss\~ao\ de\ CO_2\ (\acute{a}lcool\ Etílico\ Anidro) + Taxa\ de\ emiss\~ao\ de\ CO_2\ (\acute{a}lcool\ Etílico\ Hidratado) + Taxa\ de\ emiss\~ao\ de\ CO_2\ (Biodiesel) + Taxa\ de\ emiss\~ao\ de\ CO_2\ (Gasolina\ Automotiva) + Taxa\ de\ emiss\~ao\ de\ CO_2\ (Gás\ Natural) + Taxa\ de\ Emiss\~ao\ de\ CO_2\ (Diesel))dt + co2emitmod_0 \quad (14)$$

As taxas de emissão de CO₂ dos diferentes combustíveis, consistem no produto do fator de conversão do combustível (*FCcombustíveln*) pela quantidade de combustível consumida pelos veículos (*QNTcombustíveln*), conforme Equação 15. O fator de conversão do combustível relaciona a quantidade de combustível consumida (L) em emissão de CO₂ (kgCO₂) e tem valor constante para cada tipo de combustível.

$$Taxa\ de\ emiss\~ao\ do\ combustiveln = FCcombustiveln * QNTcombustiveln \quad (15)$$

Para calcular a quantidade de combustível consumida, são necessários dois parâmetros: a quantidade de quilômetros percorrida por veículos que utilizam o combustível n (*KmRodcombustíveln*) e o consumo médio por veículo do combustível n (*Conscombustíveln*). Este parâmetro é constante para cada tipo de combustível. O *KmRodcombustíveln* é dado por meio do produto entre o *kmrodf* e a porcentagem dos veículos que utilizam o combustível n (*%combustíveln*). Esse percentual é inserido no modelo como dado, uma vez que variam anualmente. Eles foram obtidos por meio da proporção de uso de combustíveis pelo modo

rodoviário. Todos esses valores podem ser extraídos da série histórica disponível no Balanço Energético Nacional. Dessa forma, pode-se calcular a quilometragem percorrida pelos veículos e posteriormente a quantidade de combustível n utilizada, conforme Equações 16 e 17.

$$KmRodcombustíveln = \%combustíveln * kmrod f \quad (16)$$

$$QNTcombustíveln = KmRodcombustíveln * Conscombustíveln \quad (17)$$

A quantidade de combustível servirá também de parâmetro no Submodelo D, por meio dessa variável que será calculado o estoque de Energia Consumida pelo modo rodoviário. O Submodelo D calcula o consumo energético do modo rodoviário com base nos parâmetros determinado pelo Submodelo C. A Figura 4 apresenta as relações existentes nesse submodelo de forma detalhada.

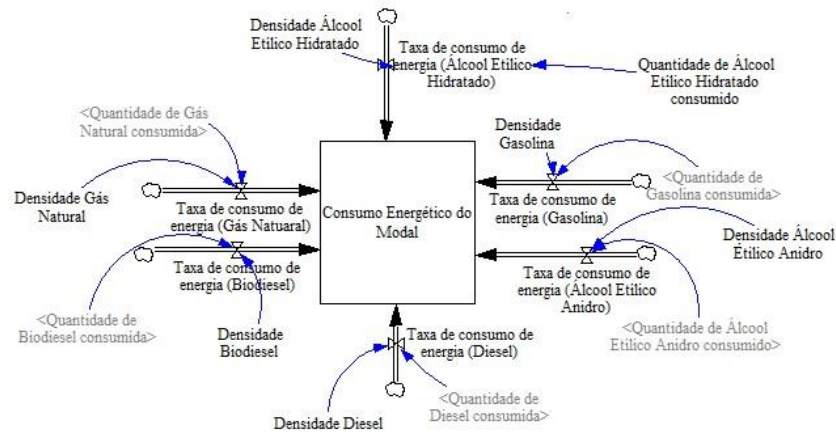


Figura 4: Diagrama de Estoque e Fluxo submodelo D
Fonte: Elaborado pelos autores.

O estoque Consumo Energético do modo de transporte acumula toda energia produzida anualmente pelo setor de transporte e é determinado pela integração das taxas de consumo de energia dos diferentes tipos de combustível a partir do consumo energético inicial ($consenerg_0$) conforme Equação 18.

$$\begin{aligned}
 consenerg = \int_{t_0}^t & (Taxa de consumo de energia (\text{Álcool Etílico Anidro}) \\
 & + Taxa de consumo de energia (\text{Álcool Etílico Hidratado}) \\
 & + Taxa de consumo de energia (\text{Biodiesel}) \\
 & + Taxa de consumo de energia (\text{Gasolina}) \\
 & + Taxa de consumo de energia (\text{Gás Natural}) \\
 & + Taxa de consumo de energia (\text{Diesel}))dt + consenerg_0 \quad (18)
 \end{aligned}$$

As taxas de consumo de energia pelo diferentes combustíveis, são obtidas por meio da multiplicação da $QNTcombustíveln$, da densidade de cada combustível ($Densidadecombustíveln$), o qual possui valor constante para cada tipo de combustível, e do valor constante 10^{-3} , que é fator de conversão de litros para metros cúbicos (Equação 19).

$$\begin{aligned}
 Taxa de consumo de energia combustíveln \\
 = QNTcombustíveln * (10^{-3}) * Densidadecombustíveln \quad (19)
 \end{aligned}$$

As variáveis Impacto do PIB nas emissões de CO₂, Intensidade Energética e Intensidade de emissão de CO₂ relacionarão os submodelos A, C e D e indiretamente o submodelo B, uma vez que ele deriva das equações do submodelo A, conforme a Figura 5.

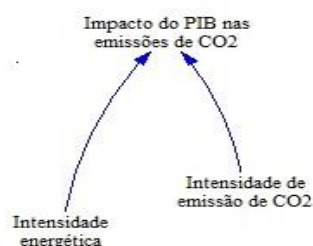


Figura 5: Relação submodelos A, C e D.

Fonte: Elaborado pelos autores.

A equação do Impacto do PIB nas emissões de CO₂ derivam da Identidade de Kaya. De acordo com a Identidade de Kaya, a variação na emissão de CO₂ é resultado da variação populacional, do produto interno per capita, da intensidade energética de atividades econômicas e da intensidade de dióxido de carbono proveniente da fonte de energia (Lima *et al*, 2016). No entanto, as emissões do CO₂ variam de acordo com a fonte de energia utilizada (EIA, 2006). Esta metodologia é considerada pelo *International Panel on Climate Change*, para estimar cenários de emissões. A vantagem desta metodologia refere-se à decomposição das emissões em quatro forças, o que simplifica a comparação e a análise de diversos cenários de emissões (IPCC, 1992).

4. CONCLUSÃO

O investimento em infraestrutura é classificado como um fator chave para o crescimento econômico de um país. Porém, ao aumentar o investimento em infraestrutura, a quantidade de fluxo de automóveis também aumenta e conseqüentemente a emissão de CO₂ também é aumentada, gerando assim um impacto negativo ao meio ambiente. Com isso, um dos desafios encontrados pelos gestores atualmente é de investir em infraestrutura para elevar o crescimento econômico do país sem que haja grandes impactos ambientais. Para isso, modelos de simulação e análise de séries históricas, assim como outros métodos são utilizados para identificar a melhor prática a ser adotada pelos gestores.

A Dinâmica de Sistemas é um método que auxilia a elaboração e simulação de modelos computacionais. A partir deste artigo, o método se provou bastante útil, pela elaboração e sintetização das relações entre as variáveis de um ambiente complexo. O foco do modelo proposto foi de apresentar as relações entre as variáveis investimento em infraestrutura, crescimento econômico, emissão de CO₂ e consumo energético. Contudo, as relações entre essas variáveis não são influenciadas de maneira direta, sendo necessário incorporar variáveis secundárias ao modelo para a construção de um sistema completo. Além disso, é possível aumentar a complexidade do modelo a partir da inserção de novas variáveis ao modelo, tais como variáveis que representam o modo ferroviário e assim realizar comparativos com o modo rodoviário.

O objetivo deste artigo foi propor um modelo conceitual que pode servir de base para aprimoramento, visando uma adequada representação da realidade. A partir daí, poderão ser

simuladas alterações para verificar propostas que minimizem o impacto dos transportes na emissão de gases de efeito estufa e no consumo energético. Estes modelos têm sido utilizados para avaliação em alguns países. Considerando que não foram encontrados modelos de dinâmica de sistemas aplicados à realidade brasileira, sugere-se a simulação do modelo a partir de dados reais para fins de validação do modelo e também para análise de cenários futuros.

REFERÊNCIAS

- Achour, H., & Belloumi, M. (2016). Investigating the causal relationship between transport infrastructure, transport energy consumption and economic growth in Tunisia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 56, p.988-998.
- Aslani, A., Helo, P., & Naaranoja, M. (2014). Role of renewable energy policies in energy dependency in Finland: System dynamics approach. *Applied Energy*, v. 113, p.758-765.
- Azlina, A. A., Law, S. H., & Mustapha, N. H. N. (2014). Dynamic linkages among transport energy consumption, income and CO2 emission in Malaysia. *Energy Policy*, v.73, p.598-606.
- Baltar, P. (2015). *Crescimento da economia e mercado de trabalho no Brasil* (No. 2036). Texto para Discussão, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA).
- Brasil, CNT (2017a). Confederação Nacional Do Transporte: Centro De Estudos Em Logística (CEL). *Pesquisa Nacional de Rodovias*. Rio de Janeiro.
- Brasil, CNT (2017b). *Transporte Rodoviário: Por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?* Confederação Nacional de Transporte (CNT), p.162.
- Brasil, DENATRAN (2016). *Frota de veículos*. Departamento Nacional De Trânsito.
- Brasil, DNIT (2006) – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Manual de estudos de tráfego*. - Rio de Janeiro, 384 p. (IPR. Publ., 723)
- Brasil, MMA (2011). *1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por veículos automotores rodoviários*. Ministério Do Meio Ambiente. Diretoria De Mudanças Climáticas, Secretaria De Mudanças Climáticas de Qualidade Ambiental.
- Brasil, MMA (2017). *Ministério do Meio Ambiente*. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/informma/item/6191-setor-de-transporte-e-o-que-causa-mais-impactos-na-qualidade-do-ar>, acessado em: 01 de junho de 2018.
- Bertussi, G. L., Ellery, R. J. (2011). *Gastos públicos com infraestrutura de transporte e crescimento econômico: uma análise para os estados brasileiros*. Ipea, boletim regional, urbano e ambiental. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/5654/1/BRU_n5_gastos.pdf, acessado em: 28 de agosto de 2018.
- 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.
- Chesky, L. (2017). Análise sobre o levantamento da frota circulante. Sindipeças – Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores; Abipeças – Associação Brasileira da Indústria de Autopeças, São Paulo. Disponível em: https://www.sindipecas.org.br/sindinews/2017/2017_Junho_AnaliseLevantamentoFrota.pdf, acessado em: 26 de junho de 2018.
- 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.
- DOE, U. S. EIA (2006). *Manufacturing Energy Consumption Survey (MECS)-2006 Data*, EIA, Washington, DC.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. (2017) *Balanço Energético Nacional 2017: Ano base 2016*. Rio de Janeiro: EPE, 2017.
- Fleury, P. F. (2011). *Infraestrutura—sonhos e realidade*. 8º Fórum de economia da Fundação Getúlio Vargas, São Paulo.
- Frischtak, C. R. (2008). O investimento em infra-estrutura no Brasil: histórico recente e perspectivas. *Pesquisa e Planejamento Econômico (PPE)*: v. 38, n. 2, p.307-348.
- Frischtak, C. R., & Mourão, J. (2017). UMA ESTIMATIVA DO ESTOQUE DE CAPITAL DE INFRAESTRUTURA NO BRASIL1. *DESAFIOS DA NAÇÃO*, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), v.1, p.710. Disponível em: http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/livros/livros/180327_desafios_da_nacao_apoio_voll.pdf, Acessado em: 28 de junho de 2018.

- Guimarães, L. E., & Lee, F. (2010). Levantamento do perfil e avaliação da frota de veículos de passeio brasileira visando racionalizar as emissões de dióxido de carbono. *Sociedade & Natureza*, v. 22, n.3, p.577-591.
- Hossain, M. S. (2011). Panel estimation for CO2 emissions, energy consumption, economic growth, trade openness and urbanization of newly industrialized countries. *Energy Policy*, v.39, n.11, p.6991-6999.
- IEA (2017). *CO2 Emissions from Fuel Combustion: IEA Statistics*. Paris, France: International Energy Agency.
- IPCC (1992). Intergovernmental Panel On Climate Change. Ephraums, J. J.; Jenkins, G. J. J. *Climate change 1992*. Cambridge University Press.
- Jifeng, W., 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.
- Lima, Y. R. D. S., Machado, T. S., & Rangel, J. J. D. A. (2016). Desacoplamento entre as Emissões de CO2 e o PIB. *Revista Produção e Desenvolvimento*, v. 2, n.3, p.37-53.
- Morecroft, J. D. (2015) *Strategic modelling and business dynamics: a feedback systems approach*. John Wiley & Sons.
- Nabavi, E.; K. A. Daniell e H. Najafi (2017). Boundary matters: the potential of system dynamics to support sustainability?. *Journal of Cleaner Production*, v. 140, n. 1, p. 312–323.
- Pao, H. T., & Tsai, C. M. (2010). CO2 emissions, energy consumption and economic growth in BRIC countries. *Energy Policy*, v.38, n.12, p.7850-7860.
- Pradhan, R. P. (2010). Transport infrastructure, energy consumption and economic growth triangle in India: cointegration and causality analysis. *Journal of Sustainable Development*, v.3, n.2, p.167.
- Pradhan, R. P., & Bagchi, T. P. (2013). Effect of transportation infrastructure on economic growth in India: the VECM approach. *Research in Transportation Economics*, v. 38, n.1, p.139-148.
- Ribeiro, S. K., Kobayashi, S., Beuthe, M., Gasca, J., Greene, D., Lee, D. S., Wit, R. (2007). *Transportation and its infrastructure*. In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Robert, C., Kubiszewski, I., Giovannini, E., Lovins, H., McGlade, J., Pickett, K. E., Wilkinson, R. (2014). Time to leave GDP behind. *Nature*, v. 505, n.7483.
- Rolnik, R., & Klink, J. (2011). Crescimento Econômico e desenvolvimento urbano: por que nossas cidades continuam tão precárias? *Novos estudos-CEBRAP*, (89), 89-109.
- Saboori, B., Sapri, M., & Baba, M. B. (2014). Economic growth, energy consumption and CO2 emissions in OECD (Organization for Economic Co-operation and Development)'s transport sector: A fully modified bi-directional relationship approach. *Energy*, v. 66, p.150-161, mar. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.12.048>.
- Snieska, V., & Simkunaite, I. (2009). Socio-economic impact of infrastructure investments. *Engineering Economics*, v.63, n.4, p.16-25.
- Sterman, J.D (2000). *Business Dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. Boston: Editora McGraw Hill.
- Wajnberg, D. (2014). Debêntures de infraestrutura: emissões realizadas e perspectivas. *Revista do BNDES*, v.41, p.331-378.

Igor Tureta Zanchetta (igortureta@gmail.com)

Olívia Nascimento Boldrini (olivianboldrini@gmail.com)

Gisele de Lorena Diniz Chaves (gisele.chaves@ufes.br)

Departamento de Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Rodovia BR 101 Norte, Km 60, São Mateus – ES, Brasil, CEP: 29.932-540