



MODELAGEM COMPUTACIONAL PARA AVALIAR O IMPACTO AMBIENTAL DOS CINCO VEÍCULOS MAIS COMERCIALIZADOS, EM 2017, NO BRASIL

Glauco Oliveira Rodrigues

Universidade Federal de Santa Maria

Eugênio de Oliveira Simonetto

Universidade Federal de Santa Maria

Carine Dalla Valle

Universidade Federal de Santa Maria

Steffani Dapper

Universidade Federal de Santa Maria

Paulo Roberto Silveira Machado

Universidade Federal de Santa Maria

RESUMO

A poluição do ar é um dos maiores problemas ambientais no mundo, sendo considerado um fator preocupante, tanto para a atualidade, como para as próximas gerações. Neste contexto, o objetivo do presente estudo consistiu em elaborar um modelo para verificar, dentre os cinco veículos mais vendidos no Brasil, no ano de 2017, qual o veículo responsável pelo maior índice de poluição gerado. Para a realização do estudo, foi utilizada a metodologia de dinâmica de sistemas, exemplificada por Law (2015), a qual é composta por 4 etapas a serem seguidas para a execução da modelagem computacional. Foi utilizado um conjunto de variáveis para estimar esses impactos ao longo do tempo, as quais consistem em: variação do quilômetro rodado, distância estrada e distância cidade, rendimento estrada e rendimento cidade, consumo estrada e consumo cidade, consumo total, NMHC, CO, NO_x e CO₂ gerados, por veículo. O modelo desenvolvido foi composto por oito variáveis auxiliares, quatro variáveis de estoque, além de uma variável *shadow* denominada *time*. Foram gerados cinco cenários, sendo que o horizonte de tempo simulado foi de dez anos. Com os resultados, foi possível verificar que o veículo com maior emissão de gramas de NHMC e de CO foi o Onix. No que se refere ao poluente NO_x, o veículo gol apresentou o pior índice ambiental. Por fim, analisou-se a quantidade de CO₂ emitida por veículo, e todos os veículos apresentaram altos

*Autor para correspondência / Author for correspondence / Autor para la correspondencia:

Glauco Oliveira Rodrigues- glaucop10@redes.ufsm.br

Data do recebimento do artigo (received): 07/11/2018.

Data do aceite de publicação (accepted): 03/06/2021.

Desk Review

Double BlindReview

índices de emissão, sendo que a diferença entre eles foi pequena, trazendo o cenário que representa o veículo HB20, como o maior emissor deste poluente.

Palavras-chave: Modelagem. Veículos. Impacto ambiental.

ABSTRACT

Air pollution is one of the biggest environmental problems in the world and is considered a worrying factor, both for the present and for the next generations. In this context, the objective of this study was to elaborate a model to verify, among the five vehicles most sold in Brazil, in 2017, which is the vehicle responsible for the highest pollution index generated. In order to perform the study, the system dynamics methodology was used, as exemplified by Law (2015), which is composed of 4 steps to be followed for the execution of the computational modeling. We used a set of variables to estimate these impacts over time, which consist of: kilometer variation, road distance and city distance, road and city income, road consumption and city consumption, total consumption, NMHC, CO, NO_x and CO₂ generated per vehicle. The model was composed of eight auxiliary variables, four inventory variables, and a shadow variable called time. Five scenarios were generated, and the simulated time horizon was ten years. With the results, it was possible to verify that the vehicle with the highest emissions of NHMC and CO grams was the Onix. With respect to the pollutant NO_x, the vehicle gol had the worst environmental index. Finally, the amount of CO₂ emitted per vehicle was analyzed, and all the vehicles presented high emission indices, and the difference between them was small, bringing the scenario that represents the vehicle HB20, as the largest emitter of this pollutant.

Keywords: Modeling. Vehicles. Environmental impact.

1. INTRODUÇÃO

O contínuo desenvolvimento das grandes cidades vem proporcionando interações mais intensas entre as sociedades, fazendo com que essas novas relações resultem em problemas relacionados à mobilidade urbana. O espaço urbano pode ser entendido como um fenômeno de agrupamento social, no qual as pessoas se encontram distantes das ofertas de alimentos, matéria-prima, trabalho e lazer, o que resulta na necessidade do tráfego de pessoas e cargas (Brasil, 2006).

Conforme salienta Macário (2001), o espaço urbano é um recurso limitado e quanto maior o número de carros circulando dentro das cidades, pior será o índice de mobilidade para toda a população. Pode-se afirmar, conforme Sanches Júnior (2008), que os problemas da mobilidade nos grandes centros urbanos estão relacionados ao incentivo do uso de automóveis como a principal forma de transporte de pessoas, associado à ineficiência do transporte público coletivo, a falta de planejamento urbano e ao aumento de fluxo de cargas nas áreas centrais.

A maior parte do deslocamento de cargas e pessoas, no Brasil, é realizada por meio do uso de veículos automotores, os quais necessitam de energia e infraestrutura para o seu funcionamento. O transporte rodoviário passou a ser dominante no Brasil desde a metade do século XX, apresentando números elevados em relação a outros países (Moro, 2013).

No Brasil, o uso do transporte coletivo urbano, de maneira racional, não está próximo de se tornar realidade, pois poucas capitais oferecem este serviço de maneira eficiente. Neste sentido, a mobilidade urbana passa ser refém da utilização de recursos leves, de maneira individual pelos consumidores de combustíveis provenientes do petróleo, contribuindo assim, para o aumento da poluição do ar e da poluição sonora, fatores prejudiciais à saúde das pessoas (Moro, 2013).

Freitas et al. (2004) destacam que a poluição do ar vem ocorrendo há, aproximadamente, 500 anos. Esta é gerada a partir do lançamento de partículas e gases que são prejudiciais à composição da qualidade do ar. Os efeitos da poluição podem refletir nos vegetais, na deposição do solo, nos materiais, entre outros, causando danos à saúde da população, redução da produção agrícola, degradação das construções, danos às florestas e causando desequilíbrio nos ecossistemas (Queiroz, Jacomino, & Menezes, 2007).

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS) (2018), no mundo, nove em cada dez pessoas respiram o ar contaminado e poluído. Anualmente, sete milhões de pessoas morrem devido a causas relacionadas à poluição atmosférica e os níveis tendem a se manterem elevados no mundo todo. Destaca-se as minúsculas partículas que entram nos pulmões e no sistema cardiovascular, causando diversos problemas à saúde. Países localizados na Ásia, África e Oriente Médio apresentam o

maior número de mortes devido à poluição, com níveis cinco vezes maiores aos estabelecidos pela OMS. A OMS destaca, ainda, que a poluição atmosférica é um fator de risco para doenças não transmissíveis, causando cerca de 24% de mortes por doenças cardiovasculares, 25% por acidente vascular cerebral, 43% por doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC) e 29% associadas ao cancro do pulmão.

Neste contexto, o objetivo do presente estudo consistiu em elaborar um modelo para verificar, dentre os cinco veículos mais vendidos no Brasil, no ano de 2017, qual o veículo responsável pelo maior índice de poluição gerado.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Poluição veicular e emissão de poluentes

A poluição do ar é um dos maiores problemas ambientais no mundo, sendo considerado um fator preocupante, tanto para a atualidade, como para as próximas gerações. No ano de 2030, a estimativa é que o número de mortes de crianças por causas populares, como a ingestão de água insalubre, a falta de saneamento e a malária, seja menor que o número de mortes por inalação de material particulado (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico, 2012).

Russo (2010) destaca que a temática poluição do ar está relacionada com o estudo da interação do homem com o meio ambiente, a partir do uso de transportes automotivos, crescimento industrial, entre outros fatores. Os veículos, em geral, são fontes emissoras de substâncias tóxicas na atmosfera. A quantidade de poluentes emitidos está atrelada a fatores como, por exemplo, o tipo de motor, a regulagem do veículo, a manutenção realizada e, até mesmo, o modo como o motorista conduz o veículo (Teixeira, Feltes, & Santana, 2008).

Na Figura 1 pode-se observar os setores responsáveis pelo maior consumo de energia no Brasil. O setor industrial consome 33% da energia gerada no país, seguido pelo setor de transportes, representando 32,4%.

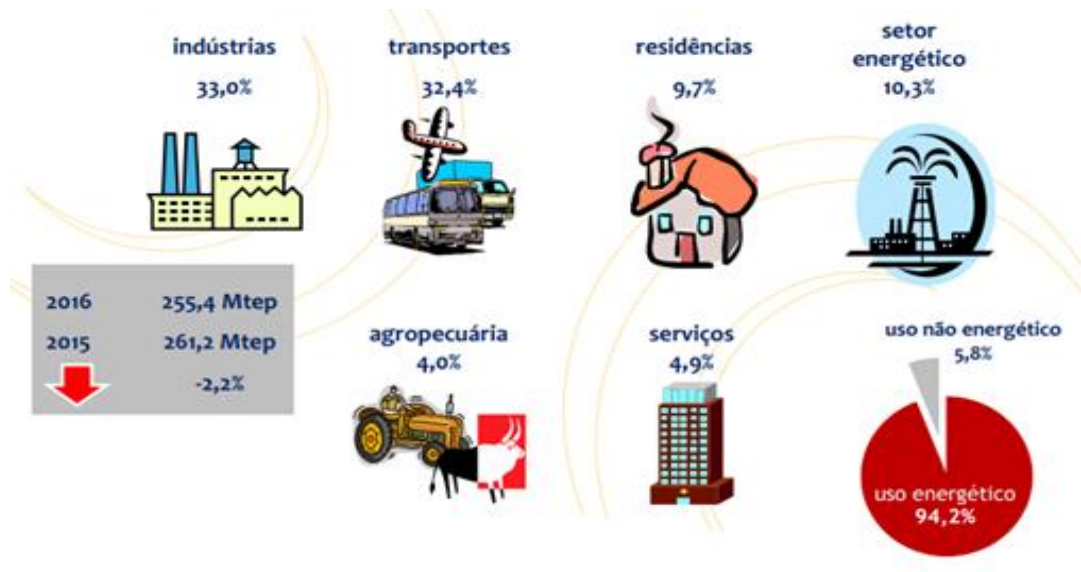


Figura 1. Quem consome energia no Brasil.
Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2017).

Teixeira, Feltes e Santana (2008) destacam que, mesmo quando o motor do veículo está desligado, este pode poluir o ar devido à evaporação de combustível pelo suspiro do tanque, bem como no sistema de carburação do motor. Veículos como os ônibus e os caminhões, que são caracterizados como veículos pesados, são os responsáveis pela maior parte das emissões de óxidos de nitrogênio e enxofre. No que se refere aos veículos leves, movidos à gasolina e a álcool, estes produzem, principalmente, monóxido de carbono e hidrocarbonetos.

A partir do Balanço Energético Nacional, realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2017), pode-se observar, na Figura 2, a matriz do consumo de energia do setor de transportes, elaborada com base no ano de 2016. O óleo diesel foi o principal combustível utilizado no setor de transportes, representando 43,9% do total de energia consumida. Teixeira, Feltes e Santana (2009) destacam que o diesel é o combustível capaz de provocar níveis de poluição mais elevados, caracterizando-se como danoso ao meio ambiente. O setor de transporte foi responsável por 82,1% do consumo de todo o óleo diesel no Brasil, no ano de 2016.

A gasolina e o etanol representam, respectivamente, 29,3% e 16,8% do combustível utilizado. Pode-se destacar o fato de que o diesel apresentou uma queda de -0,7% em relação ao ano de 2015 e a gasolina um aumento de 3,9% em relação ao mesmo ano. De acordo com a EPE (2017), a redução do consumo de diesel

se deve à queda da atividade econômica brasileira e o aumento do consumo da gasolina se justificou por preços mais competitivos deste combustível em relação ao etanol hidratado.

Quanto à composição da matriz energética do setor de transportes, pode-se verificar uma queda no número de fontes renováveis, pois em 2015 este percentual representava 22% e, no ano de 2016, passou a representar 20%.

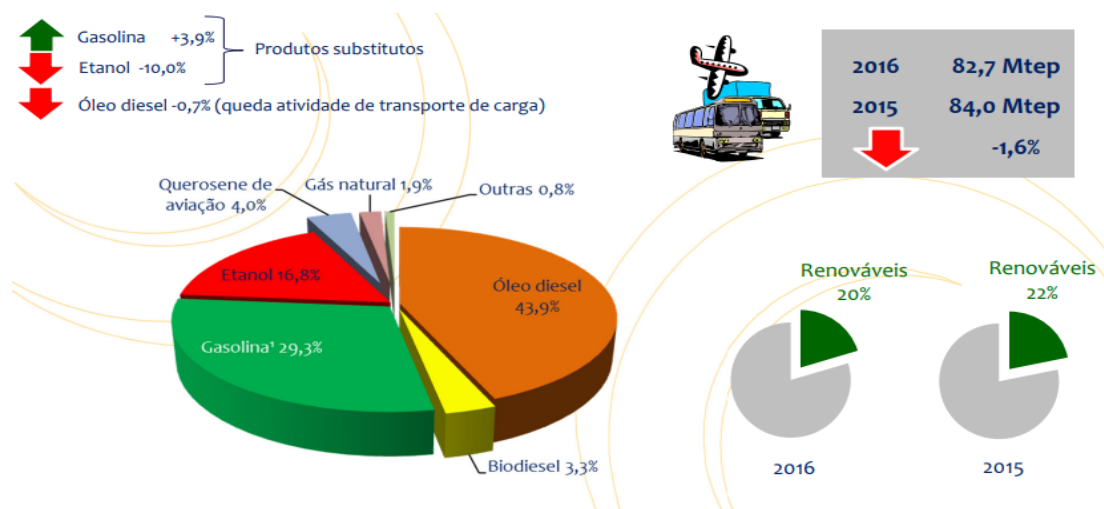


Figura 2. Matriz do consumo de energia do setor de transportes, no ano de 2016.

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2017).

¹ Inclui 49 mil tep de gasolina de aviação

Fontes de poluição como a decomposição da matéria orgânica, queimadas, erupções vulcânicas, já faziam parte da poluição atmosférica desde a antiguidade. Atualmente, a poluição advinda de fontes móveis é um dos problemas mais relevantes dos países desenvolvidos e em desenvolvimento (Moro, 2013).

O CONAMA, a partir da resolução nº 03, define como poluentes atmosféricos, qualquer forma de matéria ou energia que possua quantidade, concentração, tempo ou característica que está em desacordo com os níveis permitidos e que são capazes de tornar o ar impróprio, prejudicando a saúde, o bem-estar público, a fauna, a flora e a segurança.

De acordo com Lisboa (2007), os poluentes podem ser classificados em primários e secundários, sendo que os primários são emitidos diretamente das fontes e emissão, ou seja, são emitidos como resultado de algum processo como, por exemplo, o monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx), o dióxido de

enxofre (SO₂) e os compostos orgânicos voláteis (COV) onde se incluem os hidrocarbonetos (HC), os aldeídos, as cetonas, etc. Já os poluentes secundários, consistem naqueles formados na atmosfera e resultam como produtos de alguma reação como, por exemplo, o ozônio (O₃), Óxido Sulfúrico (SO₃), etc.

Material particulado (MP)	Pequenas partículas sólidas ou líquidas compostas pelos mais variados componentes químicos podendo ser inaláveis (quando seu diâmetro é menor que 2,5 µg) ou não inaláveis.
Dióxido de carbono (CO ₂)	Resultante da combustão completa do carbono presente no combustível; importante atualmente devido a sua expressiva contribuição ao efeito estufa.
Monóxido de carbono (CO)	Resultante da combustão incompleta do carbono contido no combustível; gás extremamente tóxico.
Metano (CH ₄)	Mais simples dos hidrocarbonetos, resultante da combustão; expressivo gás de efeito estufa.
Hidrocarbonetos (NMHC)	Não-metano: proveniente da combustão incompleta do combustível no motor; compreende todas as substâncias orgânicas geradas no processo de combustão exceto o metano; é precursor na formação do ozônio troposférico (O ₃), altamente prejudicial à saúde nesse nível da atmosfera.
Aldeídos (RCHO)	Os mais comuns são o acetaldeído e o formaldeído; um dos precursores do ozônio troposférico.
Óxidos de nitrogênio (NO _x)	Formado pela reação de oxigênio e nitrogênio presentes na atmosfera sob condições de alta temperatura e elevada pressão; assim como os NMHC e os RCHO, são precursores do ozônio troposférico.

Quadro 1. Poluentes atmosféricos

Fonte: INEA (2012).

O Instituto Estadual do Ambiente (INEA, 2012), listou os poluentes utilizados para a realização do cálculo de emissões para a frota de veículos brasileira, os quais podem ser observados no Quadro 1.

Gonçavel et al., (2010) destacam que os poluentes atmosféricos podem ser encontrados nos três estados da matéria, ou seja, estado líquido, gasoso e sólido. Os autores afirmam que os poluentes possuem ciclo complexo e podem interagir com o meio ambiente de diversas maneiras, pois estes estão constantemente interagindo com processos meteorológicos. Na Tabela 1 podem ser observados os poluentes emitidos por cada tipo de veículo e combustível.

Poluente/Classe de veículo	CO	NO _x	MP	RCHO	NMHC	CH ₄	CO ₂
Automóveis e comerciais leves Gasolina	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Automóveis e comerciais leves Etanol	✓	✓		✓	✓	✓	✓
Motocicletas Gasolina	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Motocicletas Etanol	✓	✓			✓	✓	✓
Veículos Diesel	✓	✓	✓		✓		✓
Veículos a GNV	✓	✓		✓	✓	✓	✓

Tabela 1. Poluentes emitidos por categoria ou classe de veículo e combustível
Fonte: INEA (2012).

2.2 Monóxido de Carbono (CO) e Dióxido de Carbono (CO₂)

O monóxido de carbono consiste em um gás inodoro e incolor e é emitido a partir do processo de combustão, o qual ocorre em condições não ideais (Ministério do Meio Ambiente, 2018). Nos grandes centros urbanos ocorre uma grande concentração de monóxido de carbono (CO), pois este provém, principalmente, do trânsito. Nestes grandes centros, a concentração de automóveis é maior, o que contribui para que o nível deste poluente seja mais elevado (Cançado et al., 2006).

De acordo com a EPE (2017), no ano de 2016, o total de emissões antrópicas, ou seja, aquelas realizadas por meio da atuação humana, associadas à matriz energética brasileira, atingiu 428,95 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (MtCO₂-eq), sendo que a maior parte (194,3 Mt CO₂- eq) foi gerada no

setor de transportes. Quando comparado com outros países, o Brasil apresenta menor intensidade no que se refere à emissão de CO₂. Cada brasileiro emite, em média, 7 vezes menos CO₂ do que um americano e 3 vezes menos do que um europeu ou um chinês. Quanto à elaboração de um produto, o Brasil emite 11% menos carbono que a economia europeia, 50% menos que a economia americana e 70% menos que a economia chinesa. Para produzir 1 MWh, o Brasil emite 2,3 vezes menos que a Europa, 3 vezes menos do que os Estados Unidos e 4,8 vezes menos do que a China.

Na Figura 3 é possível observar que o setor de transportes foi o maior responsável pela emissão de CO₂ no Brasil, em 2016, representando 45,3% do total de emissões.

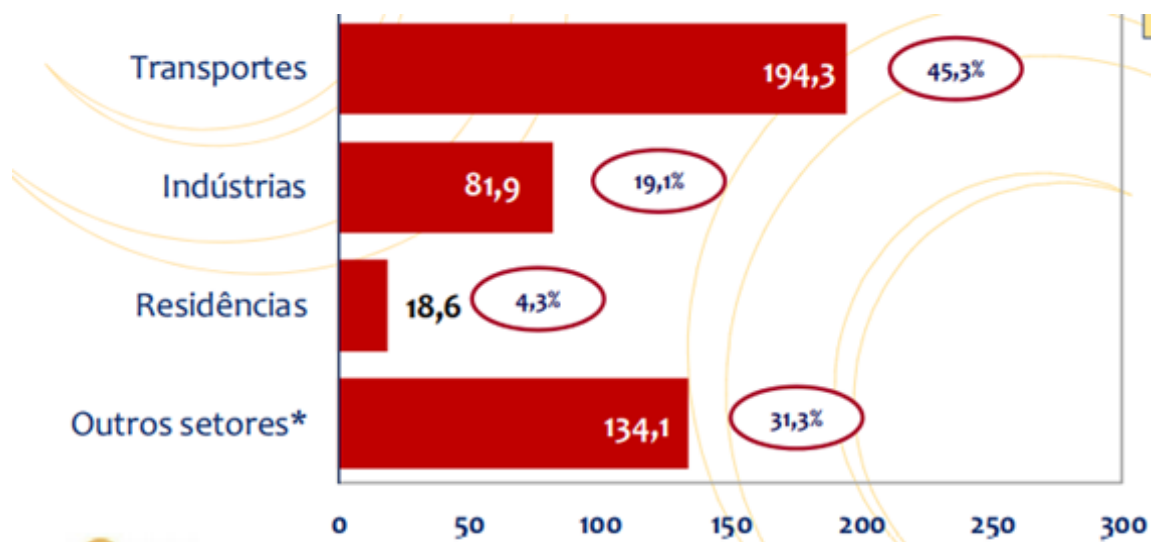


Figura 3. Emissão totais (2016), em Mt (CO₂)
Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2017).

Na Figura 4 é possível observar a evolução das emissões totais antrópicas associadas à matriz energética brasileira, em MtCO₂-eq. Pode-se verificar que a projeção para o ano de 2020 é um aumento na emissão de CO₂, podendo-se considerar como um fator preocupante, visto que o excesso deste poluente na atmosfera pode causar diversos problemas à saúde da população, afetando assim, a qualidade de vida dos brasileiros.

O CO possui afinidade com a hemoglobina, podendo substituir o oxigênio e reduzir a oxigenação do cérebro, coração e o resto do corpo, durante o processo de respiração. Quando inalado em baixa concentração, pode causar fadiga e dor no peito. Já em altas concentrações, pode causar asfixia e morte (Ministério do Meio Ambiente, 2018).

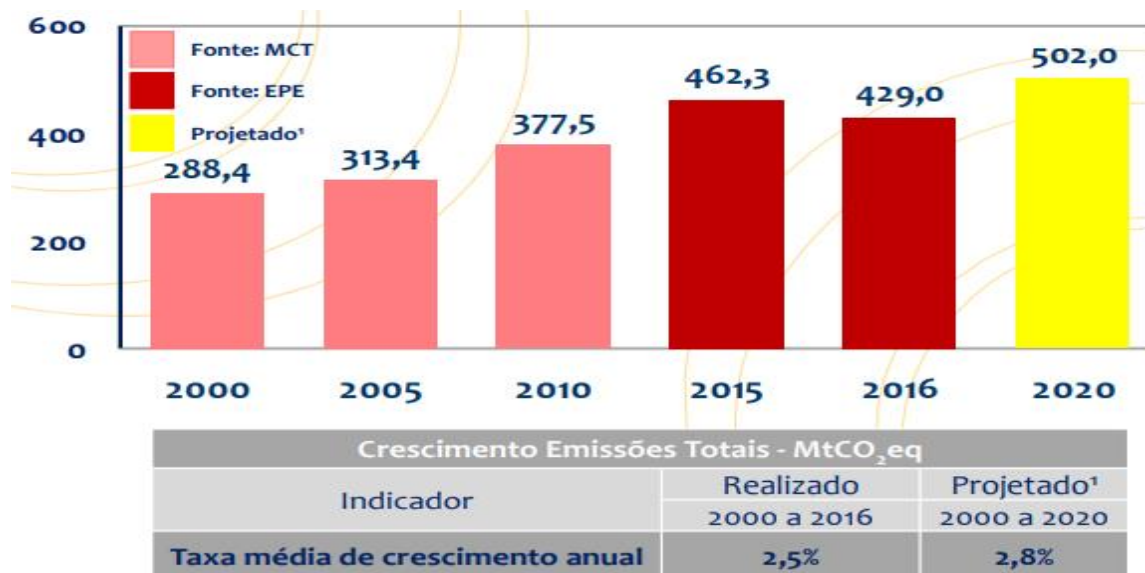


Figura 4. Evolução das emissões totais antrópicas associadas à matriz energética brasileira, em MtCO₂-eq

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2017).

2.3 Óxidos de Nitrogênio (NO_x)

Braga et al., (2001) afirmam que os automóveis são as fontes principais da emissão de óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂). Este é formado no processo de combustão em que o oxigênio reage com o nitrogênio, formando o óxido nítrico (NO), o dióxido de nitrogênio, entre outros óxidos de nitrogênio (NO_x). Este componente é reativo e, ao entrarem em contato com o oxigênio, com o ozônio e hidrocarbonetos o NO se transforma em NO₂. O NO₂ enfrenta a presença da luz solar e acaba reagindo com os hidrocarbonetos e o oxigênio, formando assim, o ozônio, um dos poluentes atmosféricos mais danosos à saúde da população.

2.4 Hidrocarbonetos Não Metano (NMHC)

Os NMHC compreendem os HC totais (THC) menos a parcela de metano (CH₄). As principais fontes deste poluente atmosférico são os veículos automotores e os processos industriais e naturais. Os NMHC são precursores da formação do ozônio troposférico, o qual é um potencial causador do efeito estufa (Ministério do Meio Ambiente, 2018).

3. DINÂMICA DE SISTEMAS

Muitas vezes não conseguimos achar boas soluções apenas com experimentos ou ensaios, ainda mais quando se está em um ambiente de negócios mutável e variável, de forma que a modelagem é uma das maneiras para se idealizar problemas complexos que aparecem em ambientes reais (BORSHCHEV, 2013). A partir do modelo, ou mesmo construindo o modelo, podemos explorá-lo para entender sua estrutura e comportamento, testá-lo mediante várias condições para comparar diferentes cenários. Nesse sentido, a dinâmica de sistemas é uma técnica apropriada para modelar e simular processos, pois ela permite levar em consideração as variações dinâmicas envolvidas nos processos modelados.

Assim, a metodologia *system dynamics* (SD) permite o estudo do comportamento dos sistemas ao longo do tempo, de maneira a permitir a avaliação das consequências de nossas decisões (DAELLENBACH; MCNICKLE, 2005). Tomada de decisão e conhecimento em um mundo que traz crescente complexidade dinâmica, requer que as pessoas se tornem pensadores sistêmicos.

De acordo com Bueno (2013), a dinâmica de sistemas é uma metodologia desenvolvida para analisar as relações de causa e efeito que determinadas variáveis possuem num sistema, seja ele organizacional ou social. A metodologia de Dinâmica de Sistemas (*System Dynamics*), desenvolvida por Jay Forrester, na década de 1950, possibilita estudar o comportamento dos sistemas com relação ao passar do tempo, assim sendo, é uma metodologia que, ao ser utilizada, permite aos seus usuários

avaliarem as consequências de suas decisões em um horizonte temporal futuro (Daellenbach, & McNickle, 2005).

As características da dinâmica são definidas por diagramas de retroalimentações causais, uma descrição lógica, não uma descrição de equação diferencial (Osipenko, & Farr, 2004). O problema, é desenvolvida a hipótese dinâmica como causa raiz; pela simulação computacional pode-se verificar se este sistema reproduz efeitos semelhantes daqueles que ocorrem no mundo real.

Finalmente a solução seja testada e, se possível, implementada (Morecroft, 2007). Portanto, se faz necessário estudar a poluição veicular em um horizonte temporal futuro decidiu-se utilizá-la na modelagem e simulação computacional. Portanto, o objetivo da Dinâmica de Sistemas é saber se o sistema em geral é estável ou instável, se ele tende a oscilar, a crescer, a declinar, ou se tende ao equilíbrio. Além disso, é possível obter um modelo que consiga simular o comportamento do sistema real endogenamente, isto é, a Dinâmica de Sistemas considera que as fontes dos problemas em um sistema fazem parte do sistema (Neto, 2003).

É importante ressaltar que, a oferta de transporte é um serviço e não um bem, por conta disso, não é possível armazená-lo, como em situações de maior procura (Ortúzar, & Willumsen, 2011). Segundo Senge (1990), para que haja uma melhor compreensão de um problema, é preciso que, ao realizarmos uma análise, consideremos todas as variáveis presentes no sistema.

Nesse sentido, a aplicabilidade dinâmica de sistemas se torna imprescindível quando nos deparamos com grandes problemas, principalmente quando estes prejudicam a saúde da população e o meio ambiente. Assim, por intermédio da simulação, propõe a compreensão de como o sistema em foco evolui no tempo e como mudanças em suas partes afetam todo o seu comportamento (Andrade, 1997).

Nesse sentido, percebe-se grande preocupação com o aumento da poluição do ar prejudica excessivamente a população bem como o meio ambiente. Por isso, vários autores utilizam-se desta metodologia para a análise de questões relacionadas ao meio ambiente e a sustentabilidade, dentre as quais, podem-se citar

os estudos de Sufian e Bala (2007); Abeliotis et al. (2009); Dyson e Chang (2005); Kum et al. (2005) e Simonetto (2014).

Portanto, em decorrência do grande aumento da frota circulante nos centros urbanos, as emissões veiculares tornaram-se uma grande preocupação na questão de poluição e conseqüentemente para o meio ambiente. Assim, o presente estudo busca analisar a situação atual dos principais veículos mais poluentes do Brasil, e possíveis cenários futuros através da dinâmica de sistemas, ou seja, o sistema computacional.

3.1 Desenvolvimento Do Modelo Computacional

Para verificar os impactos ambientais com relação à emissão de gases com potencial poluidor, construiu-se um modelo computacional. Por ser uma representação simplificada da realidade, foi definido um conjunto de variáveis para estimar esses impactos ao longo do tempo, explicadas a seguir.

- **Varição Km Rodado:** Esta variável é responsável por armazenar a média de quilômetros rodados pelos brasileiros.
- **Distância Estrada e Distância Cidade:** indicam a quantidade de quilômetros percorrida anualmente, em ciclo urbano - cidade, e rodoviário - estradas, respectivamente. As quilometragens foram separadas em urbano e rodoviário devido à diferença de consumo nos dois ciclos.
- **Rendimento Estrada e Rendimento Cidade:** quantidade de quilômetros que o veículo trafega com 1 litro de combustível em ciclo urbano e rodoviário, respectivamente.
- **Consumo Estrada e Consumo Cidade:** quantidade de combustível consumido pelo veículo na distância determinada pelo experimento computacional.
- **Consumo Total:** Quantidade total consumida pela rodagem na estrada e na cidade.
- **NMHC Gerado, CO Gerado, NOx Gerado, CO₂ Gerado:** quantidades geradas dos gases NMHC, CO, NOx e CO₂, em gramas, para cada km percorrido pelo veículo.

Após sua definição, o modelo foi implementado utilizando o *software* Vensim-
PLE (Ventana Systems, 2016). A Figura 5, traz a ilustração do modelo construído no
simulador.

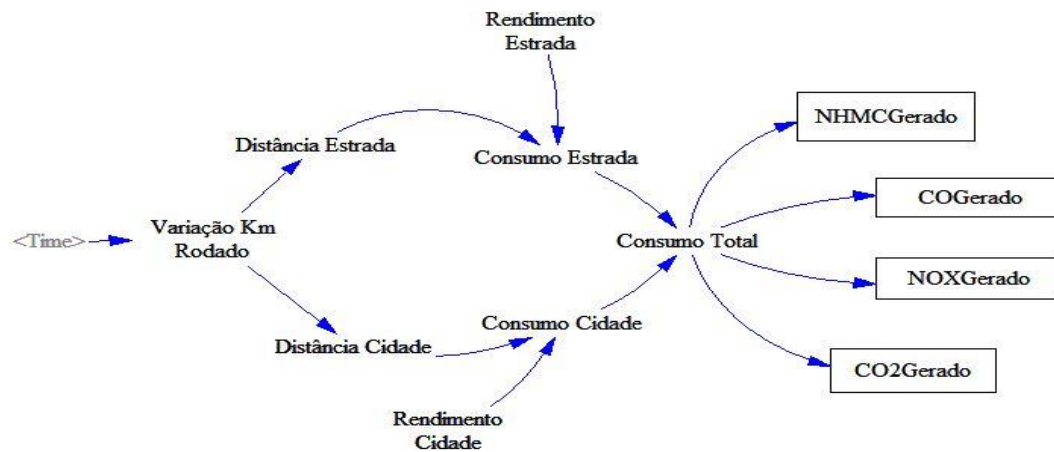


Figura 5. Modelo de simulação proposto

Fonte: Autores (2018) - construído pelo software Vensim-PLE

O modelo desenvolvido é composto por oito variáveis auxiliares, quatro variáveis de estoque, além de uma variável *shadow* chamada time, a mesma possibilitará a projeção de dez anos na simulação. As equações geradas para configurar a lógica do modelo estão apresentadas no Quadro 3.

- (1) $\text{Distância Estrada} = 3750 \cdot \text{Variação Km Rodado}$
- (2) $\text{Distância Cidade} = 11250 \cdot \text{Variação Km Rodado}$
- (3) $\text{Consumo Estrada} = \text{Rendimento Estrada} \cdot \text{Distância Estrada}$
- (4) $\text{Consumo Cidade} = \text{Rendimento Cidade} \cdot \text{Distância Cidade}$
- (5) $\text{Consumo Total} = \text{Consumo Cidade} + \text{Consumo Estrada}$
- (6) $\text{NHMCGerado} = \text{Consumo Total} \cdot \text{taxa de geração de NHMC do veículo}$
- (7) $\text{CO gerado} = \text{Consumo Total} \cdot \text{taxa de geração de CO do veículo}$
- (8) $\text{NO}_x \text{ gerado} = \text{Consumo Total} \cdot \text{taxa de geração de NOX do veículo}$
- (9) $\text{CO}_2 \text{ gerado} = \text{Consumo Total} \cdot \text{taxa de geração de CO2 do veículo}$

Quadro 3. Modelo de Equações

Fonte: Autores (2018).

Após definidas as equações e a lógica do modelo foram gerados cinco cenários, um cenário para cada veículo, possibilitando os pesquisadores analisarem separadamente a quantidade de emissão de cada veículo, podendo classificar os mais poluentes por gás. Os dados utilizados para os veículos estão descritos no Quadro 4.

Quadro 4. Dados Utilizados na Modelagem

	NHMC (g/Km)	CO (g/Km)	NO _x (g/Km)	CO ₂ (g/Km)	Km/l Cidade	Km/l Rodovia
Onix	0,031	0,482	0,008	95	12,9	15,3
HB20	0,014	0,309	0,011	101	12,5	14,1
Ford Ka	0,023	0,443	0,016	93	13,2	15,3
Gol	0,022	0,289	0,026	95	13,1	14,9
Prisma	0,027/	0,048	0,009	93	13,1	15,9

Fonte: INMETRO (2017).

A seguir será apresentado o experimento do estudo.

4. EXPERIMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após a criação do modelo, foram executadas as simulações no Software Vensim PLE, em um computador pessoal com as seguintes configurações: processador Intel Pentium Core i5; e 8 Gb de RAM. O tempo de execução da simulação fora da ordem de milionésimos de segundos. O horizonte de tempo simulado fora de dez anos.

Segundo dados da CETESB (2014), os automóveis "flex" da cidade de São Paulo percorrem, em média, cerca de 15 mil quilômetros por ano. Estas informações, são extremamente relevantes para o cálculo de inventários de emissões veiculares ou outras análises que utilizem a rodagem dos veículos. Foram utilizados os cinco veículos mais vendidos no Brasil no ano de 2017. Segundo a ANFAVEA (2017) os

veículos mais vendidos em ordem são: Onix, HB20, Ford Ka, Gol e Prisma. Os veículos foram divulgados também pela revista quatro rodas, infomoney e clicrbs.

O experimento se baseou no consumo de apenas um veículo e quanto cada veículo gerará por ano. Inicialmente, foi analisado a quantidade de gases gerado de NHMC. O carro com maior emissão de gramas de NHMC é o onix, chegando a emitir 1.946,03 gramas em dez anos de análise. O carro com menor emissão deste gás é o HB20, emitindo aproximadamente 1.000 gramas quando comparado ao veículo com maior índice de emissão de NHMC. A Figura 6 apresenta os cinco cenários simulados com as suas diferenças.

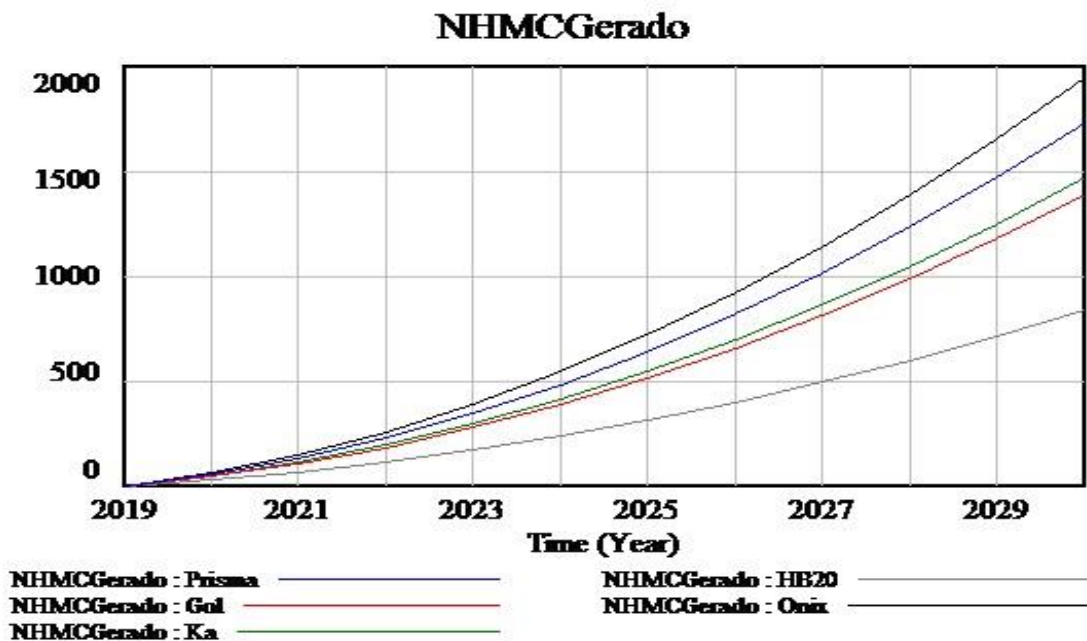


Figura 6. Emissão de NHMC

Fonte: Autores (2018) - Gráfico gerado pelo software Vensim-PLE

No quesito emissão de CO, o veículo onix apresentou novamente o cenário com maior índice de emissão, totalizando 30.257,5 gramas em 2030. O cenário com menor emissão de CO é o que representa o veículo Prisma, emitindo cerca de 300g ao ano, totalizando uma diferença de aproximadamente 30.000 gramas em 2030 quando comparado ao veículo onix. A análise está descrita na Figura 7.

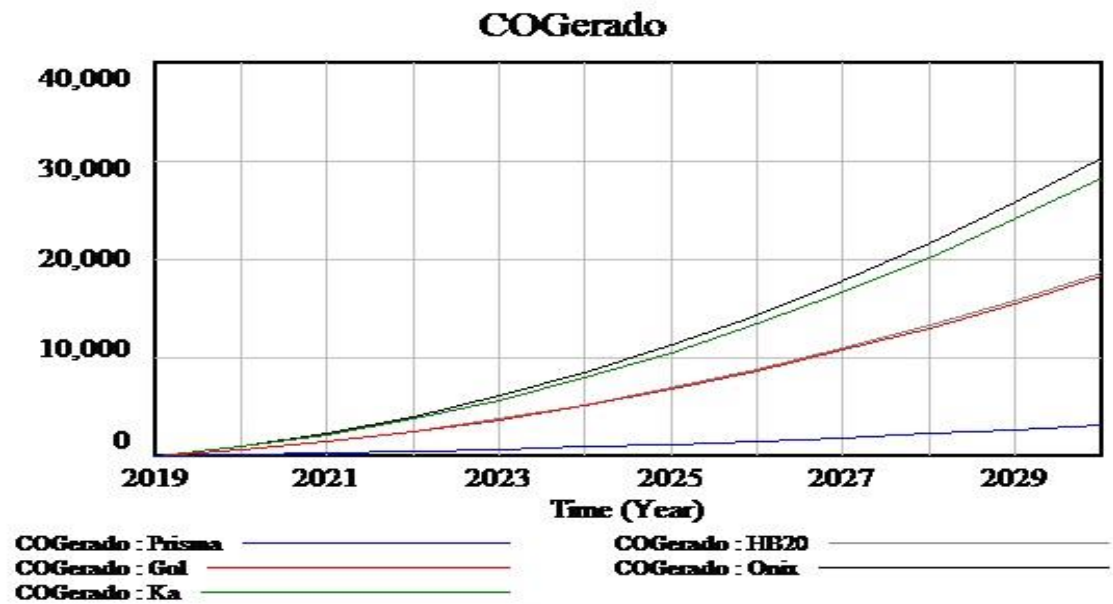


Figura 7. Emissão de CO

Fonte: Autores (2018) - Gráfico gerado pelo software Vensim-PLE

A terceira análise do modelo se refere à geração de NO_x , nesta perspectiva o cenário que representa o veículo Gol apresentou o pior índice ambiental, emitindo em média 163,8 g ao ano, totalizando 1.638,4 gramas em 2030. Por outro lado, o cenário positivo ao meio ambiente é o que comporta o veículo onix, o qual emite apenas 50 gramas ao ano. A Figura 8 apresenta as diferenças de emissões por veículo.

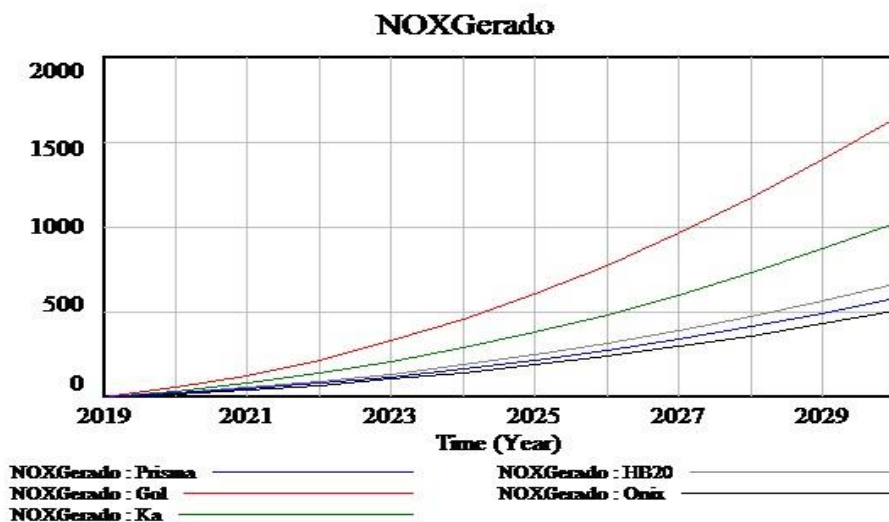


Figura 8. Emissão de NO_x

Fonte: Autores (2018) - Gráfico gerado pelo software Vensim-PLE

Por fim, analisou-se a quantidade de CO₂ emitida por veículo, e todos os veículos apresentaram altos índices de emissão. A diferença é pequena, trazendo o cenário que representa o veículo HB20 como o maior emissor, totalizando 6.058.490 g em 2030, a diferença média entre os veículos é na média de 100 gramas, portanto, tornando todos os cenários com índices altos de emissão de CO₂. A Figura 9 apresenta a pequena diferença entre os veículos.

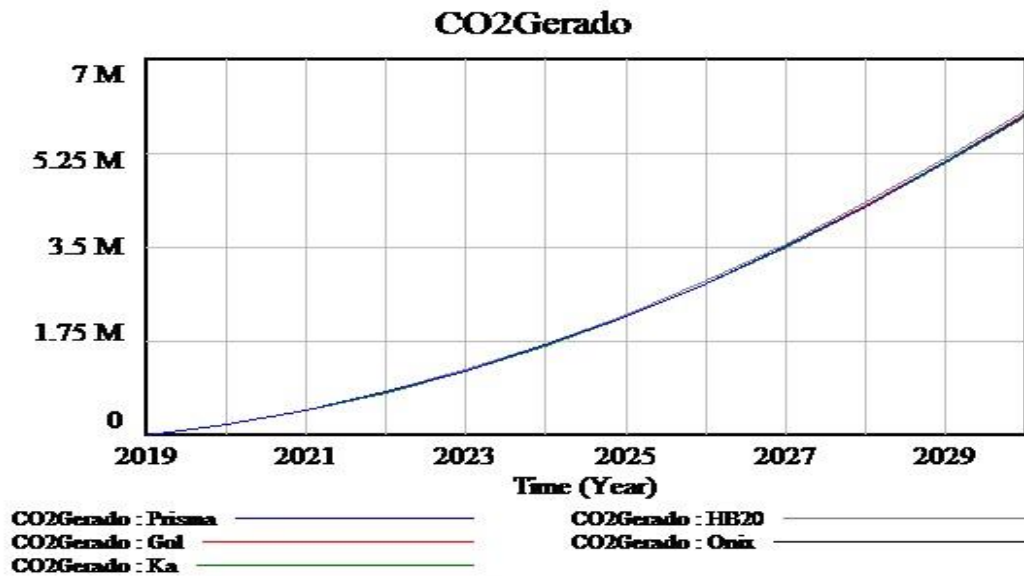


Figura 9. Emissão de CO₂

Fonte: Autores (2018) - Gráfico gerado pelo software Vensim-PLE

O modelo desenvolvido foi criado para ser utilizado com qualquer veículo, possibilitando outras simulações com o mesmo modelo, cabendo ao pesquisador apresentar o seu objetivo e problema de pesquisa a ser simulado. O modelo desenvolvido foi criado para ser utilizado com qualquer veículo, possibilitando outras simulações com o mesmo modelo, cabendo ao pesquisador apresentar o seu objetivo e problema de pesquisa a ser simulado.

5. CONCLUSÃO

A poluição do ar vem se tornando um dos principais problemas em todo o mundo. Além de prejudicar a fauna e à flora, esta pode causar diversos danos à saúde. Neste sentido, o presente estudo analisou, dentre os cinco veículos mais

vendido no Brasil, no ano de 2017, o nível de poluição atmosférica emitido pelos automóveis.

A partir da análise dos resultados, pode-se verificar que, em relação ao poluente NHMC, o veículo que apresentou o maior nível de emissão, em gramas, foi o onix, da marca Chevrolet, a qual, atualmente, lidera o número de vendas no Brasil. Quanto ao veículo que apresentou o menor nível de emissão deste poluente, destaca-se o HB20, da marca Hyundai.

Pereira (2014) destaca que o NHMC apresenta diferentes tempos de residência na atmosfera do planeta e pode causar efeitos nocivos à saúde, dependendo dos compostos que são emitidos, bem como das concentrações como, por exemplo, do benzeno, o qual pode ser cancerígeno em altos níveis.

No que tange ao poluente CO, o veículo Onix também apresentou o cenário com o maior nível de emissão deste poluente. Já o cenário com menor nível de poluição foi para o veículo Prisma, também da marca Chevrolet. Destaca-se o fato de que o veículo Prisma é o modelo sedan do veículo Onix e que, mesmo sendo um veículo com maior estrutura, este emite uma quantidade menor de CO.

Quanto ao poluente CO₂, foi possível verificar que todos os cinco veículos analisados apresentaram altos índices de emissão deste poluente, sendo que veículo HB20 apresentou o maior nível de poluição. Este fato pode ser considerado preocupante, visto que o dióxido de carbono é um poluente que contribui para o efeito estufa (Environmental Protection Agency, 2010), assim, em relação ao poluente NO_x, o veículo Gol apresentou o maior nível de poluição, enquanto o veículo Onix apresentou o menor nível de emissão de NO_x.

Por fim, o objetivo geral da presente pesquisa foi atingido, a partir da análise do nível de emissão de poluentes pelos veículos mais vendidos do Brasil. Pode-se perceber, a partir da realização deste estudo, uma tendência crescente no nível de emissão de todos os poluentes analisados, o que pode ser considerado um fator preocupante, visto que a poluição do ar pode contribuir para o surgimento de doenças.

A partir de uma revisão sistemática realizada por Dapper, Spohr e Ruviaro (2015), quanto à temática poluição do ar, pode-se constatar que dentre os estudos analisados na pesquisa, todos sugeriram que existe uma associação da poluição atmosférica com problemas na saúde das populações estudadas. Os autores destacam que, apesar de existirem avanços tecnológicos, capazes de proporcionarem um ar mais limpo, os níveis atuais de poluição atmosférica continuam a ser danosos para a saúde.

Fatores como o monitoramento da qualidade do ar e um efetivo controle das emissões antrópicas de poluentes na atmosfera, podem ser considerados como importantes para a prevenção de problemas decorrentes da poluição do ar.

REFERÊNCIAS

Abeliotis, K. et al. (2009). *Decision support systems in solid waste management: a case study at the national and local level in Greece*. Global NEST Journal, v. 11, n. 2, p. 117-126.

Andrade, A. L. (1997). *Pensamento sistêmico: um roteiro básico para perceber as estruturas da realidade organizacional*. REAd-Revista Eletrônica de Administração, v. 3, n. 1, p. 1-30.

Borshchev, A. (2013). *The big book of simulation modeling: multimethod modeling with AnyLogic 6*. Chicago: AnyLogic North America.

Braga, A. et al. (2001). *Poluição atmosférica e saúde humana*. Revista USP, n. 51, p. 58-71.

Brasil. Ministério das Cidades. (2006). *Caderno de Referência para Elaboração de Plano de Mobilidade Urbana*. Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br>>. Acesso em: 07 de julho de 2018.

Bueno, N. P. (2015). *Identificando mudanças de regimes sistêmicos em processos econômicos: um procedimento baseado na abordagem de dinâmica de sistemas*. Economia e Sociedade, v. 22, n. 1, p. 77-106.

Cançado, J. E. D. et al. *Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica*. J bras pneumol, v. 32, n. Supl 1, p. S5-S11, 2006.

Conama. Resolução 003/1990. Disponível em:
<<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res90/res0390.html>>. Acesso em: 10 ag.
2016.

Daellenbach, H.G., & McNickle, D.C. (2005). *Decision making through systems thinking*. Palgrave Macmillan.

Dapper, S. N.; Spohr, C.; & Zanini, R. R. (2016). *Poluição do ar como fator de risco para a saúde: uma revisão sistemática no estado de São Paulo*. Estudos Avançados, v. 30, n. 86, p. 83-97.

Dyson, B.; & Chang, N.B. (2005). *Forecasting municipal solid waste generation in a fast-growing urban region with system dynamics modeling*. Waste management, v. 25, n. 7, p. 669-679.

Empresa de Pesquisa Energética. *Relatório energético, ano base 2016*. Disponível em:<http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-46/topico-81/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2017_Web.pdf>. Acesso em: 20/10/2017.

EPA – U.S. (2010). Environmental Protection Agency. AP-42: *Compilation of Air Pollutant Emission Factors*. Volume I. Fifth Edition. Chapter 1. Section 1.3: Fuel Oil Combustion. Maio. Acesso em: 20/10/2014.

Freitas, C. et al. (2004). *Internações e óbitos e sua relação com a poluição atmosférica em São Paulo, 1993 a 1997*. Revista de Saúde Pública, v. 38, p. 751-757.

Geum, Y.; Lee, S.; & Park, Y. (2014). *Combining technology roadmap and system dynamics simulation to support scenario-planning: A case of car-sharing service*. Computers & Industrial Engineering, v. 71, p. 37-49.

Gonçalves, F. L. T. et al. (2010). *Modelagem dos processos de remoção sulfato e dióxido de enxofre presente no particulado em diferentes localidades da região metropolitana de São Paulo*. Revista brasileira de Geofísica, v. 28, n. 1, p. 109-119.

Huss, W. R.; & Honton, E. J. (1987). *Scenario planning—what style should you use?*. Long range planning, v. 20, n. 4, p. 21-29.

Instituto Estadual do Ambiente. (2018). *Cálculo de emissões para a frota de veículos brasileira*. Disponível

em: <http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80060/GT%20Inventarios/Breve%20-%20Calculo%20de%20Emissoes%20para%20a%20Frota%20de%20Veiculos%20Brasileira%20-Lemma_UFPR.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2018.

Lisboa, H. M. (2007). *Controle da poluição atmosférica*. 2007. Apostila. Montreal, Canadá- UFSC.

Kum, V.; Sharp, A.; & Harnpornchai, N. (2005). *A system dynamics study of solid waste recovery policies in Phnom Penh City*. In: Proceedings of The 23rd International Conference of the System Dynamics Society. 2005.

DE DIOS ORTUZAR, J.; & WILLUMSEN, L. G. (2011). *Modelling transport*. John Wiley & Sons.

OSIPENKO, L.; & FARR, J. (2004). *System dynamics and dynamic systems integration in regulatory environments*. In: Proceedings of the 22th System Dynamics Society Conference, England, No page numbers.

MACARIO, R. (2001). *Upgrading quality in urban mobility systems*. Managing Service Quality: An International Journal, v. 11, n. 2, p. 93-99.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. (2018). Poluentes atmosféricos. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/poluentes-atmosf%C3%A9ricos#Monoxido_de_carbono>. Acesso em: 14 jul. 2018.

MORECROFT J. (2007). *Strategic Modelling and Business Dynamics: a feedback systems approach*. Chichester, England. John Wiley & Sons Ltd.

MORO, N. (2013). *Inspecção veicular: Análise de Emissão de Gases e Poluentes em Veículos Leves Movidos a Gás Natural na Grande Florianópolis*. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/122718>> Acesso em: mai de 2018.

Neto, T.C. (2003). *Introdução à Dinâmica de Sistemas*. Disponível em <www.corbett.pro.br/introds.pdf>. Acesso em 05 de julho de 2018.

Organização Mundial da Saúde. (2018). *Poluição atmosférica*. Disponível em: <<https://www.sns.gov.pt/noticias/2018/05/02/oms-poluicao-atmosferica>>. 2018. Acesso em: 15 jul. 2018.

Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico. *Poluição do ar*. Disponível em: <<http://www.oecd.org/brazil/>>. Acesso em: 15 jul. 2018.

Queiroz, P. G. M.; Jacomino, V. M. F.; & Menezes, M. A. B. C. (2007). *Composição elementar do material particulado presente no aerossol atmosférico do município de Sete Lagoas*, Minas Gerais. *Química Nova*, v. 30, n. 5, p. 1233.

Sanches Junior, P. F. (2008). *Logística de carga urbana: uma análise da realidade brasileira*. Tese Doutorado. UNICAMP.

Senge, P. M. (1990). *A quinta disciplina: arte, teoria e prática da organização de aprendizagem*. Best Seller.

Simonetto, E. de O. (2014). *Simulation computer to evaluate scenarios of solid waste—an approach using systems dynamics*. *International Journal of Environment and Sustainable Development* 8, v. 13, n. 4, p. 339-353.

Sufian, M. A.; & Bala, B. K. (2007). *Modeling of urban solid waste management system: The case of Dhaka city*. *Waste Management*, v. 27, n. 7, p. 858-868.

Teixeira, E. C; Feltes, S.; Santana, E. R. R. de. (2008). *Estudo das emissões de fontes móveis na região metropolitana de Porto Alegre*, Rio Grande do Sul. *Química Nova*, v. 31, n. 2, p. 244-248.