

## DINAMICA DE SISTEMAS PARA AVALIAR O IMPACTO AMBIENTAL DOS QUATRO VEÍCULOS MAIS COMERCIALIZADOS, EM 2018, NO BRASIL

Glauco Oliveira Rodrigues<sup>1</sup>, Paulo Roberto Langwinski<sup>2</sup>, Gustavo Chiapinotto Da Silva<sup>3</sup>, Daniele Medianeira Rizzetti<sup>4</sup>, Cristiane Moreira<sup>5</sup>

<sup>1</sup>glaucop10@redes.ufsm.br, <sup>2</sup>glaucorodriguesp10@gmail.com, <sup>3</sup>glaucorodriguesp10@gmail.com, <sup>4</sup>glaucorodriguesp10@gmail.com, <sup>5</sup>glaucorodriguesp10@gmail.com

### Resumo

Vivemos numa sociedade que tem sua base de funcionamento e sobrevivência na mobilidade, na possibilidade de movimentação, no direito de ir e vir, de enviar e receber. Sendo assim, o objetivo deste artigo é analisar os impactos ambientais dos quatro veículos mais vendidos em 2018. Para isso, utilizou-se a metodologia de dinâmica de sistemas através da aplicação de modelagem e simulação computacional. A partir da elaboração de um modelo, construíram-se cenários de cada veículo que foram avaliados em um horizonte de dez anos, verificando, em cada situação, os impactos ambientais.

**Palavras-chave:** Dinâmica de Sistemas. Poluição. Veículos mais vendidos.

## *DYNAMICS OF SYSTEMS TO ASSESS THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF THE FOUR MOST COMMERCIALIZED VEHICLES IN 2018 IN BRAZIL*

### *Abstract*

*We live in a society that has its basis of functioning and survival in mobility, the possibility of movement, the right to come and go, to send and receive. Therefore, the purpose of this article is to analyze the environmental impacts of the four best selling vehicles in 2018. For this, we used the system dynamics methodology through the application of modeling and computer simulation. From the elaboration of a model, scenarios of each vehicle were constructed that were evaluated in a horizon of ten years, verifying, in each situation, the environmental impacts.*

**Keywords:** System Dynamics. Pollution. Top selling vehicles.

### 1 Introdução

O aumento das alterações climáticas no planeta nos últimos anos, ligadas à emissões de gases por veículos, vem ganhando grande atenção de estudiosos do mundo inteiro como, Lee (2010), Lam (2010), Masjuki (2011). Vivemos numa sociedade que tem sua base de funcionamento e sobrevivência na mobilidade, na possibilidade de movimentação, no direito de ir e vir, de enviar e receber. Quanto mais eficiente o deslocamento, melhor. Para isto necessitamos de um sistema de transporte. Por razões econômicas, a nossa estrutura de transporte está praticamente toda baseada no uso intensivo de veículos motorizados.

Apesar da evolução tecnológica, motores a combustão dos carros ainda são grandes responsáveis pela poluição nas cidades. Os primeiros motores surgiram no século XVIII. Eles eram

movidos a combustão externa, com a utilização de lenha - as famosas máquinas a vapor. No século XIX, apareceram os primeiros motores a combustão interna, nos quais o combustível é queimado dentro do próprio motor. Os motores de combustão interna apresentam vantagem sobre as máquinas a vapor pela sua versatilidade, eficiência e possibilidade de adaptação a diversos tipos de máquinas. Ainda assim, eles são os grandes responsáveis pela produção da poluição dos carros.

Os gases que formam a poluição dos carros, gerados nos motores a combustão interna, podem causar diversos problemas à saúde humana e ao meio ambiente. Os óxidos SO<sub>2</sub> e o NO<sub>x</sub> afetam o sistema respiratório e causam a chuva ácida, o CO reduz a capacidade de transporte de oxigênio no sangue e os materiais particulados causam alergias respiratórias e são vetores (carregam) de outros poluentes (metais pesados, compostos orgânicos cancerígenos).

Quando há grande emissão de poluição nas cidades ainda existem fenômenos naturais, como a inversão térmica, que piora o cenário da poluição, pois dificulta a dispersão desses gases e mantém a população exposta a eles por um período mais prolongado.

Neste contexto, o objetivo do presente estudo consistiu em elaborar um modelo para verificar, dentre os quatro veículos mais vendidos no Brasil, no ano de 2018, 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).

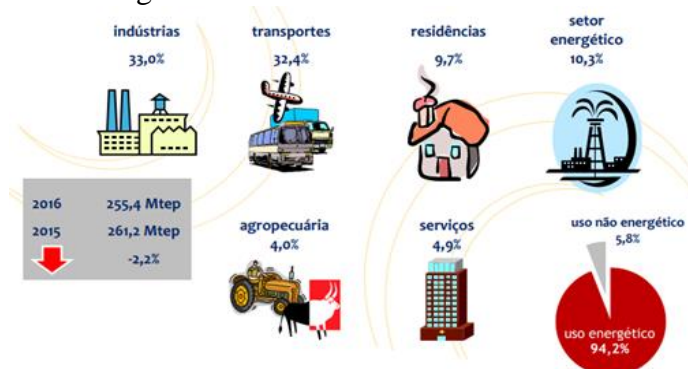
Russo (2010) destaca que a temática poluição do ar está relacionada com o estudo da interação do homem com o meio ambiente, a partir do uso de transportes automotivos, crescimento industrial, entre outros fatores.

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%.

# REAVI

Figura 1 - Quem consome energia no Brasil.



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

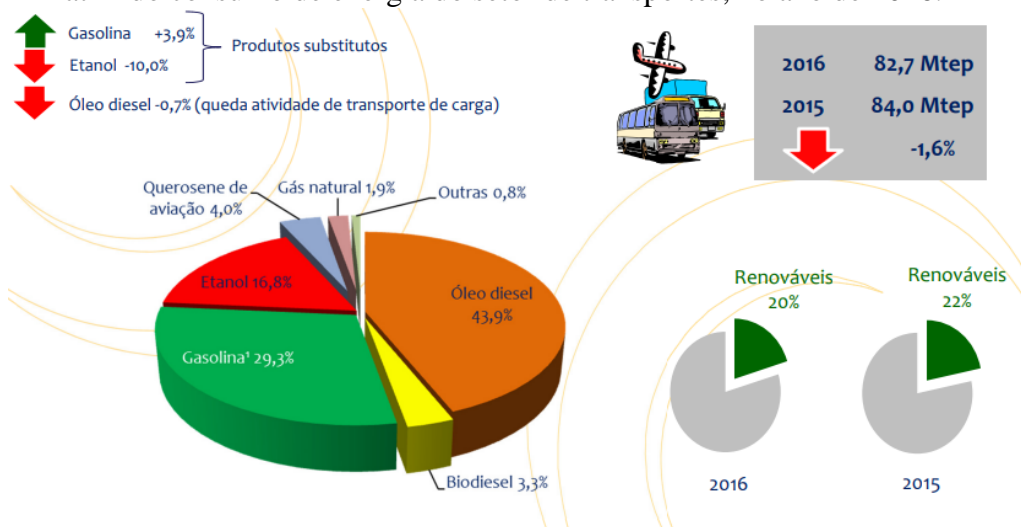
Teixeira, Feltes e Santana (2008) destacam que, mesmo quando o motor do veículo está desligado, este pode poluir o ar devido à evaporação de combustível pelo suspiro do tanque, bem como no sistema de carburação do motor. Veículos como os ônibus e os caminhões, que são caracterizados como veículos pesados, 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).

<sup>1</sup> 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 (NO<sub>x</sub>), o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) 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 (O<sub>3</sub>), Óxido Sulfúrico (SO<sub>3</sub>), etc.

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.

**Quadro 1 - Poluentes atmosféricos**

|   |  |
|---|--|
| 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 <sub>2</sub> )   | 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 <sub>4</sub> )               | 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 <sub>3</sub> ), 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 <sub>x</sub> ) | 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.   |

Fonte: INEA (2012).

### 3 Método de pesquisa

Neste trabalho a metodologia de pesquisa adotada para o desenvolvimento do modelo computacional foi baseada na metodologia de dinâmica de sistemas proposta por Law (2015) e, consistiu das seguintes etapas: (1) estudos exploratórios em artigos científicos, manuais de referência, na qual o problema foi caracterizado e estruturado (2) desenvolvimento da solução, pela construção de modelos formais capazes de representar o problema; (3) implementação computacional da solução, utilizando-se o simulador Vensim (VENSIM, 2019) da área de dinâmica de sistemas; (4) avaliação da solução, através de testes em laboratório e em campo, para verificar se os resultados obtidos estão de acordo com a realidade observada, bem como através da simulação de um experimento utilizando três cenários para tal

Para realizar a análise dos resultados da simulação computacional, será utilizado o *software* Vensim. O Vensim possui as características de melhorar os sistemas reais, sendo muito utilizado para desenvolver e analisar modelos de dinâmica de sistemas.

Através das ferramentas e suas extensões, apresenta para o usuário uma análise de alta qualidade, com dimensões que absorvem e checam a realidade. Podem-se interligar diferentes variáveis, atribuindo diferentes pesos além de fornecer ao usuário um ambiente para criação de

modelos flexíveis. Outro benefício do software é o mesmo ser gratuito, podendo ser utilizado em salas de aula ou em outros ambientes educacionais.

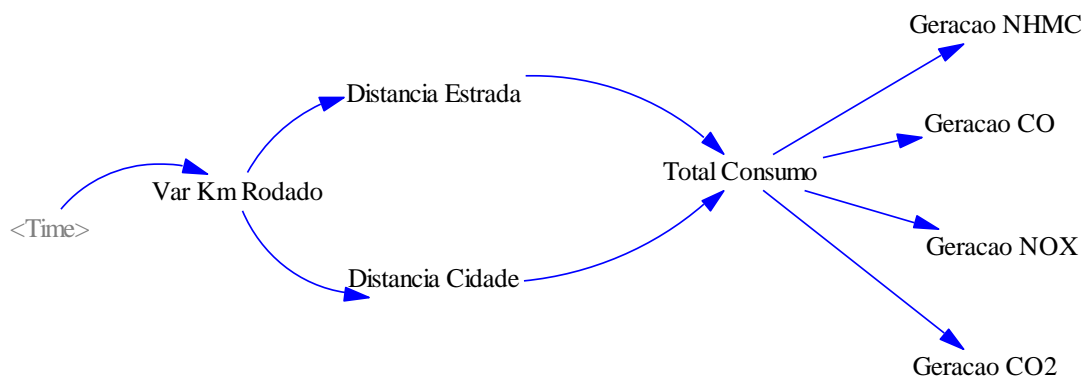
## 4 Desenvolvimento do modelo de dinâmica de sistemas

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.

- **Var 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.
- **Total Consumo:** Quantidade total de km rodados na estrada e na cidade.
- **Geração NMHC, Geração CO, Geração NOx, Geração CO<sub>2</sub>:** quantidades geradas dos gases NMHC, CO, NOx e CO<sub>2</sub>, em gramas, para cada km percorrido pelo veículo;

Após sua definição, o modelo foi implementado utilizando o *software* Vensim-PLE (VENTANA SYSTEMS, 2019). A Figura 4, traz a ilustração do modelo construído no simulador.

**Figura 4** - Modelo de simulação proposto



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

O modelo desenvolvido é composto por oito variáveis auxiliares, além de uma variável *shadow* chamada *time*, a mesma possibilitará a projeção do futuro. Para esta simulação será executado o tempo de 19 meses, que é o tempo médio que um brasileiro fica com um mesmo veículo. As equações geradas para configurar a lógica do modelo estão apresentadas no Quadro 2.

## Quadro 2 - Modelo de Equações.

|     |  |
|-----|--|
| (1) | $\text{Distância Estrada} = 3750 * \text{Variação Km Rodado}$                                    |
| (2) | $\text{Distância Cidade} = 11250 * \text{Variação Km Rodado}$                                    |
| (3) | $\text{Geracao NHMC} = \text{Total Consumo} * \text{taxa de geração de NHMC do veículo}$         |
| (4) | $\text{Geracao CO} = \text{Total Consumo} * \text{taxa de geração de CO do veículo}$             |
| (5) | $\text{Geracao NO}_x = \text{Total Consumo} * \text{taxa de geração de NOX do veículo}$          |
| (6) | $\text{Geracao CO}_2 = \text{Total Consumo} * \text{taxa de geração de CO}_2 \text{ do veículo}$ |

Fonte: Autores (2018).

A seguir será apresentado o experimento do estudo.

## 5 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 quatro veículos mais vendidos no Brasil no ano de 2018. Os dados utilizados para os descrever os veículos estão descritos no Quadro 3.

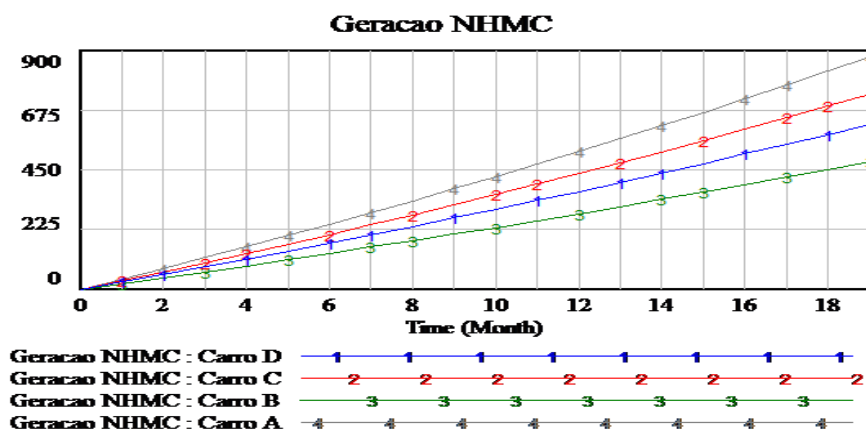
## Quadro 3 - Características dos Veículos.

|           | Características                       |
|-----------|---------------------------------------|
| Veiculo A | Veículo mais vendido em 2018          |
| Veiculo B | Segundo veículo mais vendido em 2018  |
| Veiculo C | Terceiro veículo mais vendido em 2018 |
| Veiculo D | Quarto veículo mais vendido em 2018   |
| Veiculo E | Quinto veículo mais vendido em 2018   |

Fonte: Revista AutoEsporte (2018), Leal (2018) e Revista Quatrorodas (2018).

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 veículo A, chegando a emitir 875,5 gramas em dezenove meses de análise. O carro com menor emissão deste gás é o veículo B, emitindo aproximadamente 480 gramas quando comparado ao veículo com maior índice de emissão de NHMC. A Figura 5 apresenta os cinco cenários simulados com as suas diferenças.

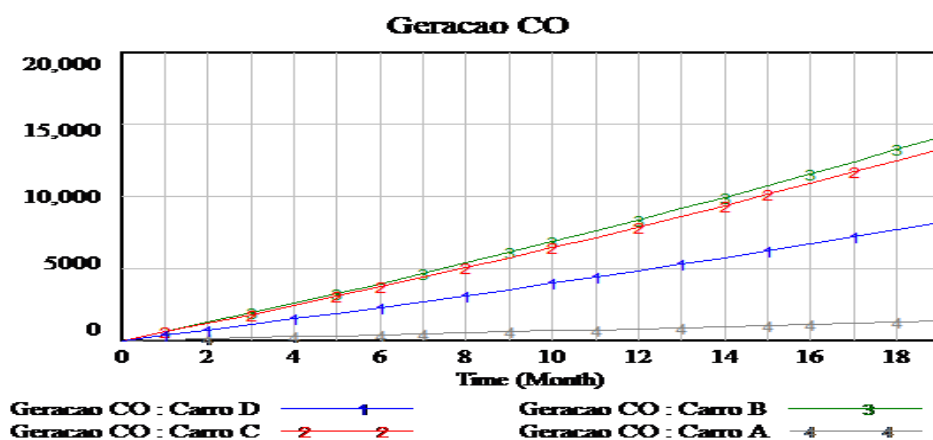
**Figura 5 - Emissão de NHMC.**



Fonte: Autores (2019) - Gráfico gerado pelo software Vensim-PLE

No quesito emissão de CO, o veículo B apresentou o cenário com maior índice de emissão, totalizando 14215 gramas no final da simulação. O cenário com menor emissão de CO é o que representa o veículo D, emitindo cerca de 429 g ao mês, totalizando uma diferença de aproximadamente 5961 gramas em 19 meses quando comparado ao veículo B. A análise está descrita na Figura 6.

**Figura 6 - Emissão de CO.**

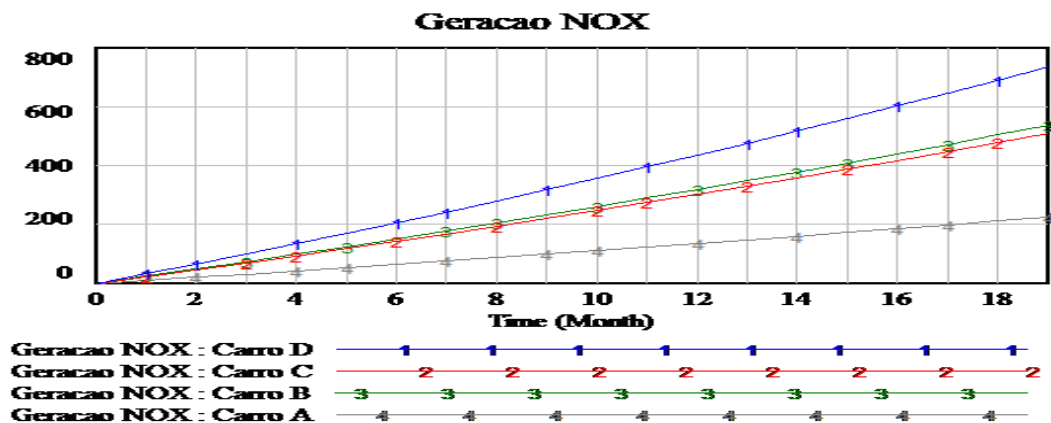


Fonte: Autores (2019) - Gráfico gerado pelo software Vensim-PLE

A terceira análise do modelo se refere à geração de NO<sub>x</sub>, nesta perspectiva o cenário que representa o veículo D apresentou o pior índice ambiental, emitindo em média 38 g ao mês, totalizando 734,5 gramas no mês 19 da simulação. Por outro lado, o cenário positivo ao meio ambiente é o que comporta o veículo A, o qual emite apenas 11 gramas ao ano. A Figura 7 apresenta as diferenças de emissões por veículo.



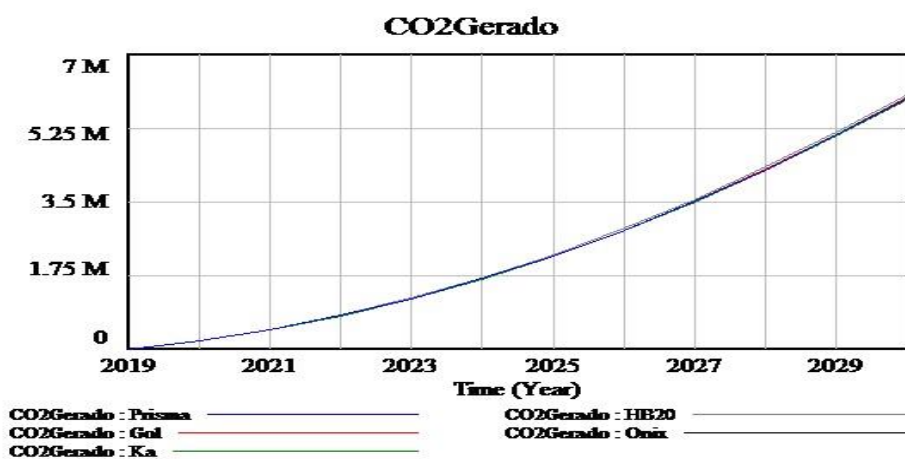
Figura 7- Emissão de NO<sub>x</sub>



Fonte: Autores (2019) - Gráfico gerado pelo software Vensim-PLE

Por fim, analisou-se a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida por veículo, e todos os veículos apresentaram altos índices de emissão. A diferença é pequena, trazendo o cenário que representa o veículo B como o maior emissor, totalizando 302.750 g em 19 MESES, a diferença média entre os veículos é na média de 100 gramas, portanto, tornando todos os cenários com índices altos de emissão de CO<sub>2</sub>. A Figura 8 apresenta a pequena diferença entre os veículos.

Figura 8 - Emissão de CO<sub>2</sub>



Fonte: Autores (2019) - 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.

## 6 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 4 veículos mais vendidos no Brasil, no ano de 2018, o nível de poluição atmosférica emitido pelos automóveis.

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 proporcionar 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. 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, 2009.

DYSON, Brian; CHANG, Ni-Bin. Forecasting municipal solid waste generation in a fast-growing urban region with system dynamics modeling. **Waste management**, v. 25, n. 7, p. 669-679, 2005.

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

MORO, Norberto. **Inspeção 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, 2013.

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. **Poluição do ar**. Disponível em: <<http://www.oecd.org/brazil/>>. Acesso em: 15 jul. 2018.

SIMONETTO, Eugênio de Oliveira. 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, 2014.

# REAVI

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

TEIXEIRA, Elba Calesso; FELTES, Sabrina; SANTANA, Eduardo Rodrigo Ramos de. 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, 2008.

VENTANA SYSTEMS. **Vensim Simulation Software**. 2016. Disponível em: <<http://www.vensim.com>>. Acesso em: 28 jun. 2019.