

# A influência do sistema de frenagem a vácuo na eficiência energética veicular

Bruno Romão  
Bruno Fischer  
Emerson Batagini  
Thiago Mecatti  
Robert Bosch Ltda.

E-mails: Bruno.Romao@br.bosch.com, external.Bruno.Fischer2@br.bosch.com, Emerson.Batagini@br.bosch.com, Thiago.Mecatti@br.bosch.com

## ABSTRACT

Rota 2030 is a federal government program that also includes automotive policy to improve the energy efficiency of vehicles in the national fleet, regulating the emission of pollutants and fuel consumption. Moreover, the program consists of supporting the development of technologies whose benefits may not be measurable exclusively in laboratory cycles. As example, the implementation of the electromechanical brake booster, a vacuum-free technology, eliminating the need of vacuum in the brake system and related components. This paper presents a comparative study in real-world off-cycle, analyzing the energy efficiency between a vehicle with and without a conventional vacuum braking system and its components. The urban route contains different altitudes and traffic conditions, with numerous traffic lights. During the tests, vehicle dynamics signals were collected from the vehicle's Controller Area Network (CAN), in addition measurement of mass fuel flow. The results demonstrate that the implementation of vacuum-free system decreases fuel consumption.

## INTRODUÇÃO

Em razão a diversas regulamentações de controle de emissões, como as encontradas no Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) [1], existe um grande esforço das montadoras a partir de programas de investimentos em novas tecnologias para se enquadrarem nas legislações dos países de comercialização.

Para atendimento dos limites de emissões estabelecidos pelo PROCONVE pode-se citar a substituição do carburador pela injeção eletrônica, a qual proporcionou mais precisão no volume de combustível disponibilizado na câmara de combustão do motor e em conjunto com a ignição eletrônica possibilitou um maior controle da queima da mistura ar-combustível e reduziu significativamente as emissões veiculares.

O programa Inovar-Auto trouxe também incentivo às montadoras estabelecendo metas de eficiência energética. Atualmente os regramentos de mercado para eficiência energética e requisitos obrigatórios para comercialização de veículos são ditados pelo regime automotivo sucessor, o Rota 2030, além de trazer uma tributação especial para importação de peças sem produção nacional equivalente. Complementarmente, o programa traz políticas de estímulo à pesquisa e desenvolvimento que visam dotar as empresas de instrumentos para que as metas sejam atendidas, como tecnologias embarcadas que aumentam a eficiência energética veicular [2].

A medição de desempenho energético de diversas tecnologias veiculares é feita a partir de ciclos pré-determinados, os quais simulam condições urbanas e rodoviárias de forma a representar uma amostra representativa das emissões reais do veículo [3]. No entanto, os ciclos padronizados podem limitar as quantificações de ganhos de algumas tecnologias, cujos benefícios não são plenamente medidos nos resultados de ciclo de emissões. Estas tecnologias são reconhecidas pelo Rota 2030 como tecnologias inovadoras e, por meio delas, créditos são concedidos de forma a reduzir o consumo energético final de um veículo a ser considerado no programa. Tais créditos favorecem no atingimento de critérios específicos de eficiência energética que podem inclusive proporcionar uma redução na alíquota do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) [4].

Este trabalho visa comprovar com testes urbanos realizados na cidade de Campinas que a remoção do vácuo do sistema de frenagem e componentes agregados reduzem o consumo energético de veículos de baixa cilindrada. Os testes foram realizados com o veículo com o sistema de freio na condição original e comparando-o com os resultados de consumo de combustível na condição sem assistência de vácuo. Os resultados demonstraram menor consumo energético na situação sem vácuo, o que mostra o potencial do sistema de frenagem eletromecânico, independente de vácuo, como tecnologia inovadora.

## PROGRAMA ROTA 2030

O programa Rota 2030 – Mobilidade e Logística, é sucessor do programa Inovar-Auto, o qual teve encerramento em 31 de dezembro de 2017. O Rota 2030 foi desenvolvido como parte da estratégia do Governo Federal em evoluir o setor automotivo brasileiro em um contexto em que este indica grandes transformações, seja no modo de usar os veículos ou na forma de produzi-los [2].

O objetivo principal do programa é expandir a inserção global da indústria automotiva brasileira a partir da exportação de veículos e autopeças. O plano é que a inserção global seja progressiva e ao fim do programa o Brasil esteja em estado da arte em relação a produção global de veículos automotores [2].

A estratégia do Rota 2030 é baseada na estipulação de metas obrigatórias para as empresas automotivas, assim como na promoção de benefícios e incentivos fiscais. Dentre os benefícios, pode-se citar que empresas habilitadas ao programa que realizarem investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) de 0,25% a 1,20% da receita bruta do total da venda de bens e serviços relacionados ao ramo automotivo, excluindo-se impostos e contribuições incidentes da venda, poderão ter dedução do IRPJ (Imposto sobre a Renda das Pessoas Jurídicas) e CSLL (Contribuição Social sobre o Lucro Líquido), proporcional ao que foi investido em P&D no país. O retorno pode variar entre 10,2% e 12,5% do valor investido. Além disso, o programa isenta o imposto de importação de autopeças que não possuem produção nacional equivalente, tendo como obrigatoriedade a aplicação dos importadores de 2,0% do valor aduaneiro em projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação e em programas que apoiam de forma prioritária o desenvolvimento industrial e tecnológico para o setor automotivo e sua cadeia [2].

Adicionalmente o Rota 2030 traz requisitos obrigatórios para comercialização de veículos novos em relação a eficiência energética e desempenho estrutural. Assim como eletrodomésticos, 100% dos veículos comercializados no país são etiquetados, no quesito eficiência energética a partir do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBEV). Os veículos recebem classificação de mais eficiente (A) à menos eficiente (G), onde se há o entendimento de que os mais eficientes utilizam menos energia e, portanto, possuem menor impacto ambiental [5]. Metas também foram definidas como a redução do consumo de combustível médio dos veículos novos em pelo menos 11% na primeira fase em 2022 e antecipação da disponibilização de itens de segurança veicular [2].

A comercialização ou importação de veículos sem os registros de eficiência energética e segurança veicular impostos pelo programa levam a multa compensatória de até 20,0% sobre o valor da receita decorrente da venda dos

veículos. Além disso, o descumprimento das metas de eficiência energética, de rotulagem veicular ou de desempenho estrutural podem acarretar multas de R\$50 a R\$360 por veículo licenciado [6].

Em compensação, as montadoras que atenderem as metas estabelecidas podem receber redução de IPI por versão de veículo. A Figura 1 apresenta as possibilidades de redução de IPI por tipo de veículo: motor de combustão interna (MCI), elétrico ou híbrido. Obrigatoriamente, o primeiro ponto percentual (p.p.) se dá pelo atendimento da versão do veículo à eficiência energética e o segundo p.p. pode ser atingido ou por eficiência ou por atendimento de itens de segurança veicular. Em veículos híbridos há ainda a possibilidade de 3 p.p. adicionais, se a motorização for flex [6].

Tipo do Veículo	1º p.p. 1º p.p. Eficiência Energética	2º p.p. +1º p.p. Eficiência Energética OU +1º p.p. Segurança Veicular	Adicional +3 p.p. Se motor Flex	Max. Redução IPI (%)
 MCI	✓	✓ OU ✓		2%
 Elétrico	✓	✓ OU ✓		2%
 Híbrido	✓	✓ OU ✓	✓	5%

Figura 1. Possibilidades de redução de IPI a partir do Rota 2030. Fonte: [6]

Para reduzir o consumo energético por versão de veículo também podem ser concedidos créditos devido a inserção de novas tecnologias, cujos benefícios de redução de consumo de combustível podem não ser passíveis de serem medidos em ciclos de ensaios de emissões executados em dinamômetro. De acordo a Portaria Nº 2.202, de 28 de dezembro de 2018, são consideradas pré-elegíveis as tecnologias e respectivos créditos em MJ/km encontrados na Tabela 1 [4].

Tabela 1. Lista de Tecnologias Inovadoras – Rota 2030. Fonte: [4].

Lista de Tecnologias Inovadoras	Redução (MJ/km)
Start-Stop	0,0227
Sistema de Controle da Grade Frontal	0,0049
Indicador de Troca da Marcha (GSI)	0,0134
Sistema de Monitoramento da Pressão nos Pneus (TPMS – Tire Pressure Monitoring System)	0,0134
Iluminação de LED	0,0032 – 0,0079
Ar Condicionado com Compressor Variável	0,04
% Redução Arrasto Aerodinâmico	0,0017 – 0,0159
Tecnologias Gerenciamento Térmico	0,0033 – 0,0363

Novas tecnologias que não estão na Tabela 1 podem ser consideradas e novos créditos concedidos, desde que os

valores solicitados sejam comprovados por entidade independente a partir de relatório circunstanciado. Para serem consideradas pré-elegíveis como tecnologias inovadoras os seguintes requisitos devem ser atendidos: os efeitos da tecnologia de eficiência energética devem persistir ao longo da vida do veículo, o seu funcionamento deve estar habilitado na configuração padrão do veículo, a tecnologia não é requerida por alguma outra regulamentação e deve ser declarada no processo de obtenção da Licença para Uso da Configuração de Veículos ou Motor [4].

A expectativa para a segunda fase do programa, prevista para 2027, é de tornar ainda mais estritos os limites de eficiência energética. Espera-se que sejam impostas melhorias de 8% a 12% no consumo de combustível e emissões de poluentes dos veículos comercializados pelas montadoras. Além de haver uma sinalização de que neste segundo ciclo ocorrerá uma mudança de consideração do consumo de combustível e emissões de CO<sub>2</sub> passando a mensurar as emissões do poço à roda [7].

## CICLO URBANO

O ciclo utilizado para o estudo foi desenvolvido por colaboradores da Robert Bosch Ltda, de forma a comtemplar condições reais de trânsito na cidade de Campinas/SP. O trajeto inclui semáforos, condições de trânsito elevado e ruas de alta e baixa velocidade. Além disso, possui diversos trechos com aclives e declives com uma diferença de altitude de até 90 metros. As diferentes altitudes nos trechos podem ser vistas na Figura 2.

Foram considerados dois motoristas de forma a obedecer ao mesmo trajeto realizando 10 repetições, 5 na condição original e 5 na condição sem assistência de vácuo. A distância percorrida durante o ciclo é de 30,5 km, a velocidade média abaixo de 30 km/h e a velocidade máxima próxima de 70 km/h, obedecendo em ambas as condições padrões similares de dirigibilidade e velocidade. Na Figura 3, se encontra o ciclo desenvolvido e executado durante os ensaios.

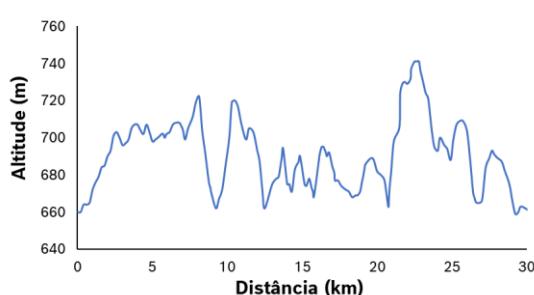


Figura 2. Altitude por distância no ciclo urbano. Fonte: [8]

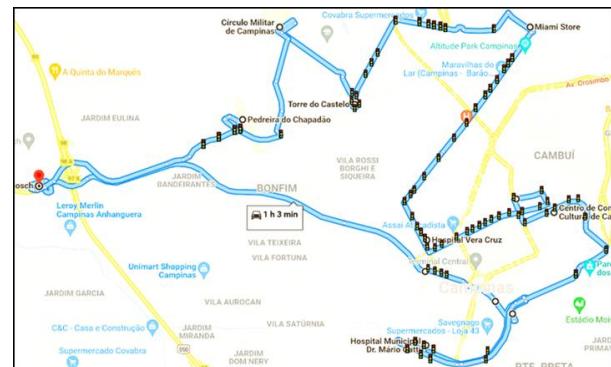


Figura 3. Ciclo urbano em Campinas/SP. Fonte: [9]

ENSAIO URBANO

Para comprovação dos benefícios a partir do uso de tecnologias inovadoras é necessária a execução de ensaios que quantifiquem os ganhos de eficiência energética. Para isso são executados ensaios que podem ser realizados em trajeto urbano e são coletadas variáveis que permitem a análise da dinâmica veicular assim como o consumo energético.

O estudo foi realizado com um veículo de baixa cilindrada dotado originalmente de um sistema de frenagem assistido à vácuo, provido de uma bomba auxiliar. Os ensaios foram realizados na condição original (AFV) e na condição sem assistência de vácuo e da bomba auxiliar (AFE). Nas próximas seções são apresentadas as ferramentas utilizadas para a preparação e análise dos dados, a instrumentação veicular e as considerações para encontrar os ganhos de eficiência energética.

PREPARAÇÃO DOS DADOS – durante os testes realizados a vazão mássica de combustível ( $q_m$ ) foi medida de forma instantânea, na unidade de quilogramas por hora. A partir da divisão de  $q_m$  pela densidade do combustível ( $\rho_r$ ), em quilograma por litros, é possível encontrar a vazão volumétrica ( $q_v$ ), em litros por hora, de acordo com a Equação 1.

$$q_v = \frac{q_m}{\rho_r} \quad (1)$$

Executando-se a integração da vazão volumétrica entre um intervalo de tempo final (tf) e tempo inicial (ti) encontra-se o volume em litros de combustível (V), de acordo com a Equação 2. Considerou-se o volume de combustível para cada teste, comparando-se a condição do veículo. A integração da vazão volumétrica foi realizada com recursos adicionais do *software* de medição.

$$V = \int_{t_i}^{t_f} q_v * dt \quad (2)$$

As medições foram rotuladas por número da repetição e motorista, agrupando-as por condição do sistema de frenagem do veículo. O processamento dos dados foi a partir do *Microsoft Power BI*, inserindo todas as medições realizadas na ferramenta e criando-se curvas médias das variáveis analisadas.

**INSTRUMENTAÇÃO VEICULAR** – os sinais de dinâmica veicular foram coletados a partir da rede CAN do veículo. Um cabo Lemo foi conectado a CAN do ESC (*Electronic Stability Control*) e a coleta de dados foi a partir de um *software* de medição e calibração de sistemas de controle de chassis, o MM6x. A partir de *hardwares* compatíveis, com este *software* é possível realizar a medição de sinais de fontes como: CAN, *FlexRay* e sinais em canais A/D (Analógico-Digital) em alta resolução.

O hardware utilizado para leitura de dados CAN (*Controller Area Network*) foi a VX1135 da Vector, uma solução desenvolvida para tarefas de medição e calibração que pode ser usada tanto em veículo quanto em laboratório. Possui interfaces para conexão com unidades de controle eletrônicas e medições no formato CAN [10].

Para medição de consumo de combustível utilizou-se um medidor de vazão do tipo *Coriolis*, da marca Micro Motion. A leitura é realizada na unidade de vazão mássica (kg/h) e os valores coletados são proporcionais a uma determinada tensão, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2. Valores para leitura dos dados do medidor Coriolis. Fonte: Elaboração Própria.

[kg/h]	[V]
0	2,008
100	10,004

A partir da leitura dos valores analógicos foi possível transformá-los em dados de vazão. A ACW-Lite box (ACW), da Gi-Electronic GmbH, possui a função de coletar dados no formato analógico e convertê-los para o formato CAN [11]. Ela foi usada durante as medições de dados de vazão.

A alimentação elétrica dos equipamentos foi realizada com a bateria do veículo. Dois cabos foram conectados em paralelo a bateria e ligados a uma caixa de tensão com bornes fêmea, utilizando-se um fusível de 10 A para proteção. Então, os bornes machos do *Coriolis*, da VX1135 e da ACW foram ligados a caixa de tensão. O esquemático contendo as ligações com os equipamentos utilizados durante os ensaios se encontra na Figura 4.

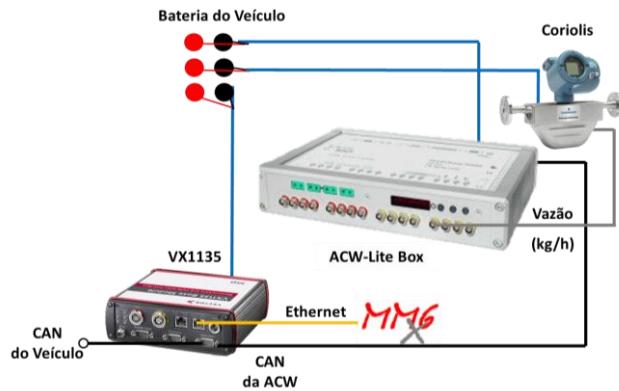


Figura 4. Esquemático de ligação dos equipamentos. Fonte: Elaboração Própria.

**ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS** – O percurso total foi dividido em 12 trechos, caracterizados por diferentes distâncias e número de semáforos, de acordo com a Tabela 3. Na Tabela 3 se encontram a identificação numérica, o local de início e fim do trecho, a distância percorrida e a quantidade de semáforos, respectivamente.

Tabela 3. Trechos do circuito urbano. Fonte: Elaboração Própria.

Identificação	Trecho	Distância do trecho (km)	Quantidade Semáforos
1	Bosch - Ferroviária	5,5	1
2	Ferroviária - Retorno Viaduto	1,8	3
3	Retorno Viaduto - Chico Xavier	2,1	4
4	Chico Xavier - Catedral do Chopp	3,3	6
5	Catedral do Chopp - General Osório	1,4	6
6	General Osório - Anchieta	1,2	6
7	Anchieta - Andrade Neves	1,2	11
8	Andrade Neves - Miami Store	3,3	19
9	Miami Store - Torre do Castelo	3,4	14
10	Torre Castelo - Círculo Militar	1,6	1
11	Círculo Militar - Semáforo Marechal Rondon	1,5	1
12	Semáforo Marechal Rondon - Bosch	4,2	4
Total		30,5	76

Visando-se normalizar o tempo gasto em cada trecho, bem como quilometragem e número de semáforos, considerou-se a comparação dos sistemas a partir do consumo volumétrico de combustível por unidade de tempo (vazão média de combustível – em litros por minuto). Os valores apresentados na Figura 5 representam a média da vazão de combustível dos cinco ensaios realizados para cada sistema. Nota-se que em todos os trechos do circuito ocorre redução de consumo de combustível quando o veículo utiliza o sistema sem assistência de vácuo (AFE) em relação ao sistema de frenagem original (AFV).

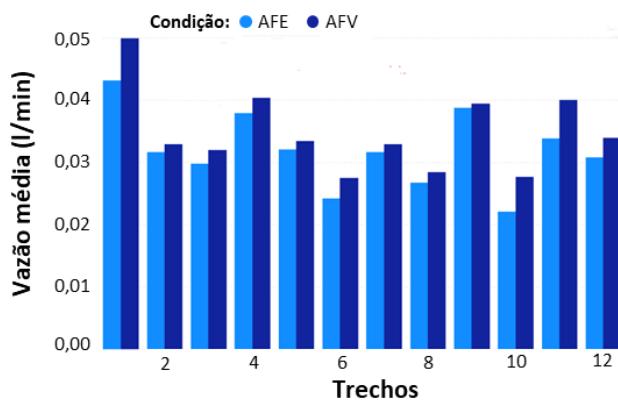


Figura 5. Vazão média de combustível por trecho. Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 6 descreve a redução em porcentagem da vazão média de combustível com o sistema AFE por número de semáforos por quilômetro. Analisando-se a relação entre a redução de consumo de combustível e o número de semáforos por quilômetro observa-se que as maiores reduções estão em trechos com baixo número de semáforos por quilômetro.

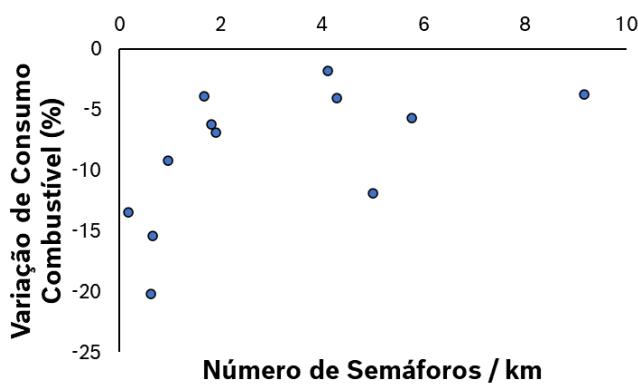


Figura 6. Variação de consumo em porcentagem por número de semáforos por quilômetro. Fonte: Elaboração Própria.

A redução de consumo de combustível pode ser explicada por menor atrito interno no motor devido a não utilização de componentes no sistema AFE. Estes componentes também podem ser denominados como “componentes parasitas”, os quais aumentam o atrito interno no motor e reduzem a sua potência. Na Figura 7, se encontram os dados coletados do atrito interno médio do motor em relação ao seu torque, comparando-se os dois sistemas. Verifica-se que para todas as faixas de torque do motor o sistema AFE apresenta menor atrito interno, comprovando-se o aumento de atrito interno pelo componente parasita do sistema AFV.

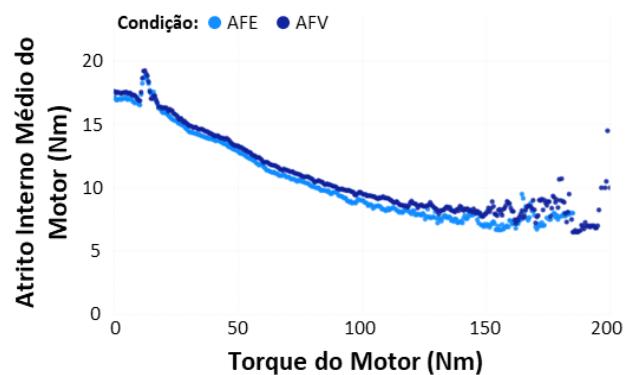


Figura 7. Atrito interno médio do motor pelo torque. Fonte: Elaboração Própria.

## AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DO ENSAIO URBANO

A vazão média de combustível considerando os cinco ensaios para os dois sistemas e todos os trechos se encontra na Figura 8. De acordo com os resultados encontrados, nota-se redução em consumo de combustível na condição sem auxílio de vácuo e bomba auxiliar (AFE) em relação a condição original (AFV).

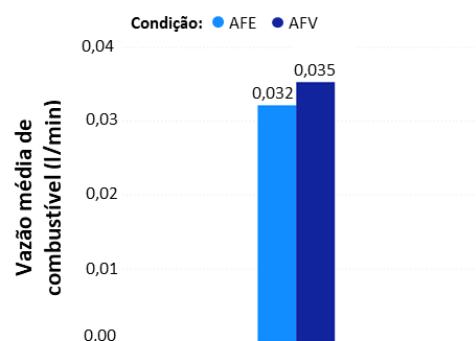


Figura 8. Vazão média de combustível para o circuito urbano comparando-se os dois sistemas. Fonte: Elaboração Própria.

Para analisar de forma estatística os resultados encontrados avaliou-se o valor das médias ( $M$ ) somadas e subtraídas ao desvio padrão ( $\sigma$ ) para cada sistema. O desvio padrão foi calculado a partir dos dados dos cinco ensaios para cada condição de teste. Na Figura 9, se encontram os resultados desta análise, em que o valor superior se refere a  $M + \sigma$ , o valor central igual a  $M$  e o valor inferior igual a  $M - \sigma$ .

A partir da análise da amostragem realizada com variação de distância, número de semáforos, assim como condições de trânsito, verifica-se que a redução de consumo de combustível é oriunda da mudança do sistema de frenagem do veículo e não uma coincidência estatística,

pois mesmo considerando os desvios é possível identificar a redução no consumo de combustível.

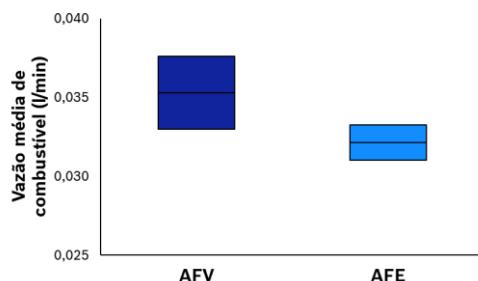


Figura 9. Análise estatística da vazão de combustível dos sistemas. Fonte: Elaboração Própria.

## CONCLUSÃO

Focado no desenvolvimento do setor automotivo nacional o Rota 2030 trouxe metas de eficiência energética e segurança veicular, além de benefícios fiscais para importação de autoparças e incentivos a P&D.

Para atingimento das metas de eficiência energética e redução de IPI de até 2 p.p. o programa trouxe para as montadoras a oportunidade de uso de tecnologias inovadoras nos seus veículos, as quais podem não possuir a redução de consumo energético mensurada em ciclos de emissões, mas sim a partir de créditos concedidos com sua instalação.

Tendo-se isso em vista, neste trabalho executaram-se ensaios de eficiência energética, em ciclo urbano na cidade de Campinas/SP, em um veículo de baixa cilindrada comparando-se o sistema de frenagem à vácuo com bomba auxiliar e o sistema de frenagem sem assistência de vácuo. Os resultados demonstram que na condição sem assistência de vácuo há redução de consumo de combustível quando comparado ao sistema de vácuo e a bomba auxiliar.

Com isso, identifica-se como oportunidade a inserção do amplificador de força de frenagem eletromecânico, independente de vácuo, como uma tecnologia inovadora nos veículos do mercado nacional, contribuindo assim para uma redução no consumo de combustível veicular e auxiliando as montadoras a atingirem as metas de eficiência energética impostas pelo Rota 2030.

## REFERÊNCIAS

- [1] CETESB. “Emissão Veicular – Proconve”. [Online]. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/veicular/proconve/>>. [Acesso em 17 de maio 2023].

[2] BRASIL. Ministério da Economia. “Rota 2030 - Mobilidade e Logística”. [Online]. Disponível em: <<https://www.gov.br/produtividade-e-comercio-exterior/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/setor-automotivo/rota-2030-mobilidade-e-logistica/>>. [Acesso em 17 de maio 2023].

[3] MENDES, M. 2018. “Valoração de tecnologias fora de ciclo quanto ao consumo de combustível”, Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

[4] BRASIL. Ministério da Economia. “Portaria nº 2.202-SEI, de 28 de dezembro de 2018” [Online]. Disponível em: <[https://www.in.gov.br/materia/-/asset\\_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/57492854/](https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/57492854/)>. [Acesso em 17 de maio 2023].

[5] Brasil. Ministério da Economia. “Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE”. [Online]. Disponível em <<https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/conheca-o-programa/>>. [Acesso em 17 de maio 2023].

[6] BRASIL. Ministério da Economia. “Decreto nº 9.557, de 8 de novembro de 2018” [Online]. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2018/decreto/D9557.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/decreto/D9557.htm)>. [Acesso em 17 de maio 2023].

[7] Riato, G., 2023. “Rota 2030: nova fase vai impor melhoria de até 12% na eficiência energética”, Automotive Business. [Online]. Disponível em: <<https://automotivebusiness.com.br/pt/posts/setor-automotivo/rota-2030-eficiencia-energetica-fase-2-carros/>>. [Acesso em 17 de maio 2023].

[8] GOOGLE EARTH. [Online]. Disponível em <<http://earth.google.com>>. [Acesso em 17 de maio 2023].

[9] GOOGLE MAPS. [Online]. Disponível em <<https://www.google.com.br/maps>>. [Acesso em 17 de maio 2023]

[10] Vector. “VX1000 – Product Information”. [Online]. Disponível em: <[https://cdn.vector.com/cms/content/products/vx1000/Docs/VX1000\\_ProductInformation\\_EN.pdf](https://cdn.vector.com/cms/content/products/vx1000/Docs/VX1000_ProductInformation_EN.pdf)>. [Acesso em 23 de maio 2023].

[11] Gi-Electronic GmbH. 2012. “ACW-Lite Box Ref. 4.1x (Lite 3)”.