

# ENGENHARIA MECÂNICA AUTOMOBILÍSTICA

**Alunos:** Bruno José Abad Miranda Silva, Bruno Liotti Vollet, Daniel Rampazzo Bragança Ferreira, Gustavo Okada, Heitor Cavalhieri Zanetti, Pedro de Souza Ciampone, Pedro Massad, Vitor Assarito Gatt e Ygor Dalmaz Navarro

**Orientador:** André de Souza Mendes (asmendes@fei.edu.br)

Fábio Delatore (fdelatore@fei.edu.br)



## Smart Driving: Influência do modo de condução no consumo de combustível em ônibus urbanos com motor a Diesel

### RESUMO

Quando se pensa em utilização dos recursos naturais, certamente uma das primeiras coisas que vem a mente é a utilização de combustíveis fósseis, visto que os combustíveis são a maior fonte de energia para o transporte de pessoas. Em território brasileiro, por ano é feito um total de 16,1 bilhões de viagens, sendo o transporte coletivo mais utilizado no país, tendo uma frota nacional de 117 mil consumindo uma média mensal de 4000 litros por veículo, isso resulta em um gasto mensal de 2 bilhões de reais. Tendo isso em vista, uma pequena economia de combustível poderia resultar em um grande impacto econômico e ambiental. Segundo Melman et al. (2021), 74,9% da variação do consumo de combustível é definido por três variáveis, perfil da pista, modelo do veículo e modo de condução. Sendo o perfil da pista e o modelo do veículo variáveis não possíveis de manipular, foi escolhido como objeto de estudo o modo de condução, que corresponde a 21,8% da composição do consumo e pode ser definido por parâmetros como rotação do motor, posição do pedal do acelerador, velocidade e aceleração. Pensando na variabilidade e na má condução dos motoristas de ônibus, foi criado o projeto Smart Driving, visando reduzir o impacto do condutor no consumo de combustível através da manipulação do sinal do pedal. Com isso, foi desenvolvido um sistema que pode ser implementado em diferentes ônibus por ser compacto e de fácil instalação. Para o sistema em questão, foi feita simulação integrada pelo Simulink com TruckSim, que considerando a dinâmica do veículo e determinadas condições, pode ser avaliada a influência que o sistema teria no consumo de combustível, mostrando que pode chegar a uma redução de 15% pelos parâmetros do teste. Além disso, ainda é apresentado um projeto corretivo para a embreagem utilizada, visto que o sistema pode impactar na sua vida útil. Esse redimensionamento foi realizado buscando o mínimo de alteração no powertrain do ônibus para que assim possa ser facilmente inserido em diferentes modelos.

### INTRODUÇÃO

Segundo estudo da ONU de 2020, 56,2% da população do planeta é urbana e a projeção até 2050 é de que a zona urbana continue crescendo enquanto a rural diminui. Atualmente, os dados do Brasil é que a população urbana representa 87%, uma vasta predominância em relação a rural.

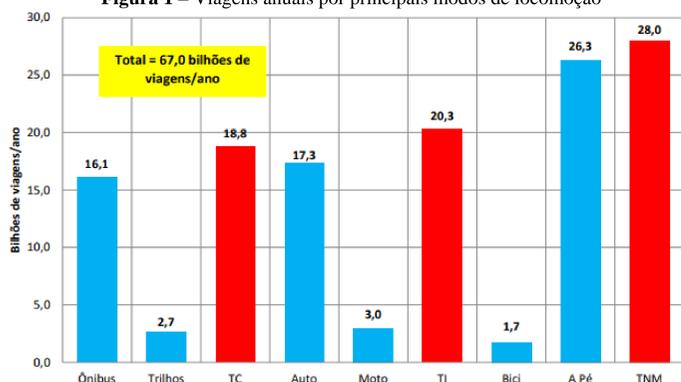
Nas regiões urbanas, o trânsito tem a função social de atender às demandas da população de acessibilidade, mobilidade e qualidade de vida. Nisto, a mobilidade abrange facilitar deslocamentos de pessoas e bens nas cidades (MING, 2017). Com isso, municípios urbanos contam com diversos modelos de transportes públicos sendo os mais usuais os ônibus, metrô e trens

No ano de 2015, em 39 países, tiveram 243 bilhões de viagens em transporte público, sendo um aumento de 18% em relação ao ano de 2000 (INTERNATIONAL ASSOCIATION OF PUBLIC TRANSPORT, 2017). Neste cenário, o Brasil é o terceiro país com mais viagens no mundo, chegando ao valor de 19,7 bilhões, atrás apenas da China e Japão.

Com isso, muitos estudos atualmente estão voltados para minimizar a emissão de poluentes, o que traz diversas possíveis soluções, desde alterações de projeto até adoção de veículos elétricos. Pela frota do país contar com ônibus a combustão, ainda há espaço para buscar reduzir o uso de combustível e ter um menor impacto tanto na economia como no meio ambiente.

No Brasil, o total de viagens por ano por ônibus chega ao valor de 16,1 bilhões, sendo o transporte coletivo mais utilizado no país por uma considerável margem (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS, 2020), como ilustra a Figura 1. A frota de ônibus nacional é de aproximadamente 117 mil, em que o consumo médio mensal é cerca de 4000 litros por veículo. Assim, pode-se estimar um gasto mensal em torno de 2 bilhões de reais com combustível para locomoção por meio de ônibus no país.

Figura 1 – Viagens anuais por principais modos de locomoção



Fonte: ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS, 2020

Em relação ao impacto ao meio ambiente, a emissão de poluentes por meio de ônibus, no ano de 2018, foi de aproximadamente 0,05 milhões de toneladas por ano, o que representa 46% da emissão total de poluentes por veículos no Brasil (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS, 2020), como mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Emissão anual de poluentes por modo de transporte em 2018

Modo	Locais (milhões de t/ano)	Participação (%)	Efeito estufa (milhões de t/ano)	Participação (%)
Transporte coletivo	Ônibus (municipal + metropolitano)	0,05	46	9,33
	Subtotal	0,05	46	9,33
Transporte individual	Auto	0,04	38	20,17
	Moto	0,02	16	1,50
	Subtotal	0,06	54	21,68
Total	0,11	100	31,01	100

Fonte: ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS, 2020

Como pode-se ver, o ônibus é um dos principais meios para emissão de poluentes e também para consumo de combustível no país, o que requer um maior aprofundamento no tema e avaliar como reduzir esses valores.

### PROBLEMA E PROPÓSITO

**Problema:** Influência do modo de condução no consumo de combustível em ônibus urbanos com motor a Diesel.

**Propósito:** Como reduzir a influência do modo de condução no consumo de combustível em ônibus urbanos com motor a Diesel.

### BENCHMARKING

#### Controle de Cruzeiro com Previsão Topológica Ativa

Vantagens:

- Reduz até 2% do consumo
- Adaptação dinâmica às condições reais da estrada e do trânsito por meio da identificação da topografia

Desvantagens:

- Dificuldade de implementação em frotas antigas
- Custo elevado

Atuação: Reduz a influência do condutor em rodovias



#### Controle de ECU's de Motor e Transmissão

Vantagens:

- Modelo já firmado na indústria em carros de passeio;
- Limitação de aceleração atuando na antecipação trocas de marcha e mudança no mapa do pedal.

Desvantagens:

- Fácil de ser desativado pelo motorista;
- Pode se tornar inefetivo à longo prazo.
- Resposta do pedal diferente da esperada pelo motorista.

Atuação: Mudança na resposta do pedal do acelerador, caixa de câmbio e motor a depender da fabricante do veículo



#### Controle genérico no sinal de pedal de acelerador

Vantagens:

- Modo ECO reduzindo acelerações agressivas
- Fácil instalação

Desvantagens:

- Fácil de ser burlado pelo motorista
- Padrão da curva de abertura de borboleta igual para todos os veículos, não sendo personalizada para a curva de torque de cada motor
- Resposta do pedal diferente da esperada pelo motorista.

Atuação: Mudança no mapa do pedal de acelerador



# ENGENHARIA MECÂNICA AUTOMOBILÍSTICA

**Alunos:** Bruno José Abad Miranda Silva, Bruno Liotti Vollet, Daniel Rampazzo Bragança Ferreira, Gustavo Okada, Heitor Cavalhieri Zanetti, Pedro de Souza Ciampone, Pedro Massad, Vitor Assarito Gatt e Ygor Dalmazo Navarro

**Orientador:** André de Souza Mendes (asmendes@fei.edu.br)

Fábio Delatore (fdelatore@fei.edu.br)



## Sugestão de Troca de Marcha

Vantagens:

- Modelo já firmado na indústria;
- Economia de combustível;

Desvantagens:

- Fácil de ser burlado pelo motorista;
- Sistema passivo;



https://autopapo.uol.com.br/blog-do-boris/seta-para-trocar-a-marcha-ja-ouviu-falar/

Atuação: Indicação para melhor faixa de troca de marcha ao condutor

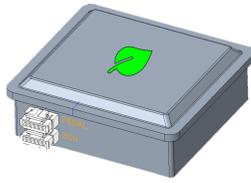
## Intervenção controlada no sinal de pedal de acelerador baseada em condições do veículo em tempo real

Vantagens:

- Sistema de atuação ativo;
- Economia de combustível;

Desvantagens:

- Custo;
- Resposta do pedal diferente da esperada pelo motorista.



Fonte: Próprios Autores

## MATRIZ DE DECISÃO

Para a realização da matriz de decisão, primeiro foram listadas as possíveis opções identificadas durante o nosso benchmarking para solucionar o nosso problema em questão, a influência no modo de condução no consumo de combustível em ônibus urbanos.

Uma vez identificadas as possíveis opções disponíveis para a solução do problema, identificamos os critérios que são importantes para a nossa tomada de decisão. Sendo eles a controlabilidade da rotação do motor, capacidade de economia de combustível, influência na aceleração longitudinal, segurança na utilização do produto, possibilidade de anular a atuação do produto e o seu custo de implementação.

Para que as soluções citadas pudessem ser avaliadas de acordo com os critérios listados, utilizamos o ônibus convencional como referência para atribuir notas às outras soluções baseadas em cada critério, sendo a escala utilizada "--" "-" "0" "+" "++", respectivamente, da pior para a melhor nota.

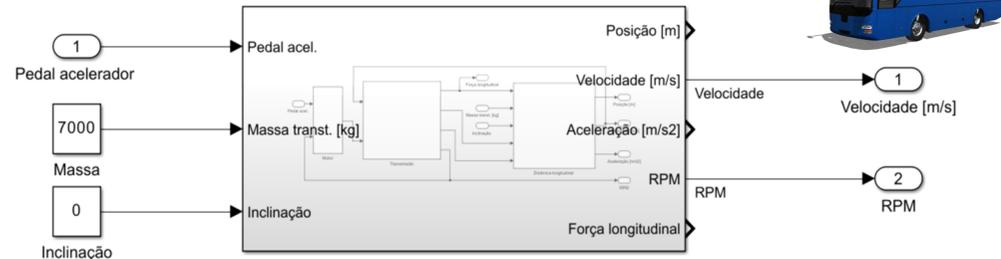
Critério	Referência: Solução 0	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4	Solução 5
	Ônibus convencional	Controle de cruzeiro + previsão topográfica	Controle de ECU's de Motor e Transmissão	Controle genérico no sinal de pedal de acelerador	Sugestão de troca de marcha	Intervenção controlada no sinal de pedal de acelerador baseada em condições do veículo em tempo real
Redução de consumo de combustível em frota já existente	0	0	+	0	+	++
Atua no controle de rotação do motor	0	0	+	0	+	++
Capacidade de economia de combustível	0	+	+	+	+	+
Influência na aceleração longitudinal	0	+	+	+	-	++
Segurança	0	0	0	-	0	-
Possibilidade de anular	0	-	0	++	--	+
Custo de implementação	0	--	-	-	-	--
Resultado	0	-	++	++	--	++

Legenda	
++	Muito melhor
+	Melhor
0	Igual
-	Pior
--	Muito pior

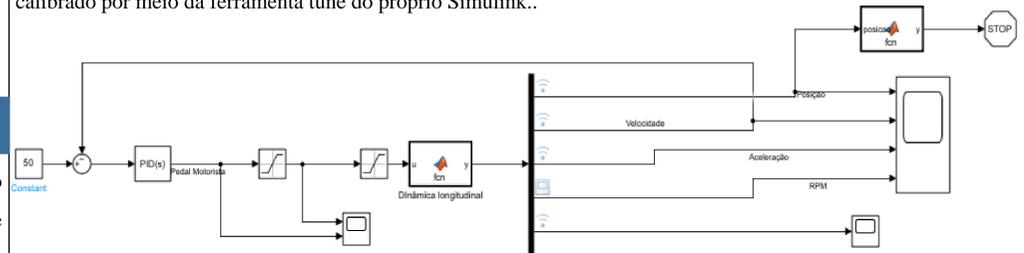
Após a atribuição de notas para cada um dos sistemas em cada um dos parâmetros, tendo como referência o ônibus convencional sem nenhum sistema de influência no modo de condução do veículo, tem-se como melhor solução a intervenção controlada no sinal de pedal de acelerador baseada em condições do veículo em tempo real, uma vez que essa obteve a melhor pontuação geral.

## RESULTADOS DA MELHORIA

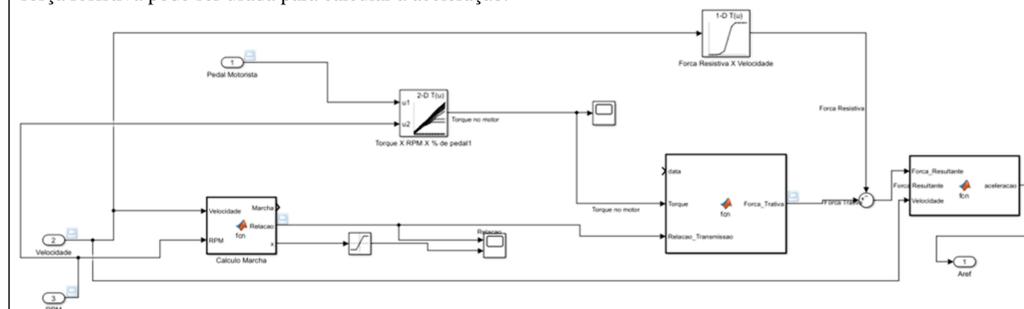
O primeiro passo foi criar um modelo de dinâmica longitudinal simplificado de um ônibus com potência do motor de 150 kW e um peso bruto total de 17.000 kg. A transmissão é de 6 marchas, com as seguintes relações: 1ª marcha: 6,7:1, 2ª marcha: 3,81:1, 3ª marcha: 2,29:1, 4ª marcha: 1,48:1, 5ª marcha: 1:1, 6ª marcha: 0,73:1. Além disso, a relação do diferencial é de 5,875:1.



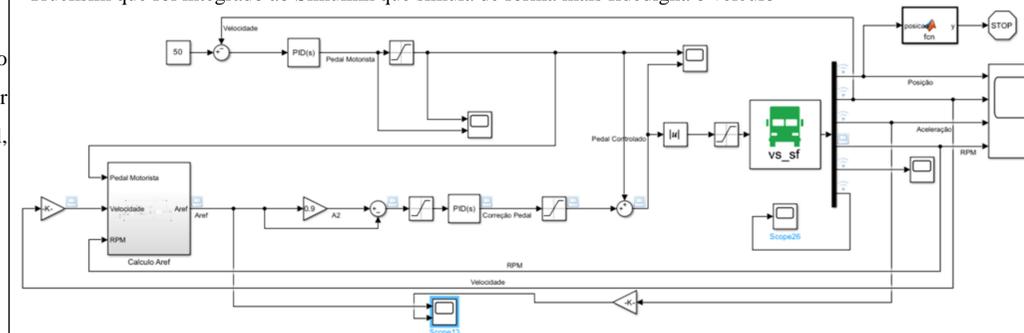
Utilizando o modelo de dinâmica longitudinal foi possível desenvolver um controlador do tipo proporcional integral derivativo (PID) que visa simular o comportamento do motorista durante uma aceleração. O controlador foi calibrado por meio da ferramenta tune do próprio Simulink..



No modelo o controlador recebe um erro gerado pela velocidade medida na planta, que é o modelo de dinâmica longitudinal, subtraído de uma velocidade desejada e entrega porcentagem de pedal a planta. O próximo passo foi desenvolver um modelo capaz de prever a aceleração no instante a frente recebendo em tempo real as informações de porcentagem de pedal, velocidade e RPM do motor o sistema calcula a relação de transmissão naquele instante, descobrindo a marcha. Calcula o torque gerado pelo motor e consequentemente a força trativa, que subtraída da força resistiva pode ser usada para calcular a aceleração.



Ao utilizar o modelo de dinâmica novamente como planta e alimentando o modelo de previsão de aceleração com as informações necessárias foi possível implementar um controlador do tipo proporcional integral derivativo que visa diminuir a aceleração no instante a frente que atua gerando um sinal negativo de pedal, que somado ao sinal gerado pelo motorista ao pisar no pedal do acelerador resulta no sinal que entrará na planta. Com os controladores calibrados foi possível substituir o modelo simplificado de dinâmica longitudinal pelo software Trucksim que foi integrado ao Simulink que simula de forma mais fidedigna o veículo



# ENGENHARIA MECÂNICA AUTOMOBILÍSTICA

**Alunos:** Bruno José Abad Miranda Silva, Bruno Liotti Vollet, Daniel Rampazzo Bragança Ferreira, Gustavo Okada, Heitor Cavalhieri Zanetti, Pedro de Souza Ciampone, Pedro Massad, Vitor Assarito Gatt e Ygor Dalmazo Navarro

**Orientador:** André de Souza Mendes (asmendes@fei.edu.br)

Fábio Delatore (fdelatore@fei.edu.br)



O teste foi realizado com o veículo partindo do repouso e o motorista buscando atingir a velocidade limite da via de 50km/h e é finalizado ao atingir 50m, considerando uma inclinação de 0%. A desaceleração não é levada em conta pois não há consumo de combustível nessa fase.

Consumo de combustível com e sem o Smart Driving



Velocidade e tempo do veículo com e sem o Smart Driving



Possuíamos como target 3% de economia de combustível e obtivemos nesse teste uma redução de cerca de 15,7% e um aumento de tempo de 4,45%, que atende o target e o requisito. É importante levar em consideração dois aspectos:

- Essa redução ocorre durante uma aceleração, onde o Smart Driving tem maior atuação, e não significa dizer que o ônibus terá uma redução de consumo de combustível de 15% no geral.
- Existem algumas simplificações nesse modelo de teste que podem afetar o resultado, mas é possível ter uma boa base de comparação de como a solução vai se comportar em um cenário real.

Essa porcentagem será refletida no trabalho de atrito específico se o revestimento se manter o mesmo, visto que a equação se dá pelo trabalho de atrito dividido pela área de contato total do revestimento com o volante do motor e com o a placa de pressão. Esse aumento da energia de atrito específica impacta diretamente no incremento de temperatura da embreagem a cada acoplamento e modulação. Pensando na aplicação do produto ser ônibus urbanos, onde ocorrem múltiplas partidas seguidas decorrente dos pontos de parada e do trânsito do trajeto, um cenário de elevado estresse é comum, podendo levar precocemente ao fenômeno de “fading”, que ocorre após múltiplas partidas e modulação intensa, elevando a temperatura do revestimento a um patamar onde o material de atrito perde suas propriedades de atrito, diminuindo drasticamente o coeficiente de atrito levando a uma falha onde ocorre a interrupção de transmissão de torque, função principal da embreagem. Se o nível de estresse se mantém, pode levar a falhas como aumento do desgaste e em casos extremos a destruição térmica, incapacitando a embreagem de continuar sendo usada.

Com o intuito de condicionar a embreagem a trabalhar nos parâmetros em que foi projetada, as dimensões do revestimento serão redimensionadas visando manter o trabalho de atrito específico nas mesmas condições do veículo original. Dessa forma, foi calculado o trabalho de atrito específico (a) para a condição do veículo original com a embreagem original, sendo a embreagem original uma MF395 com revestimento de 395mm de diâmetro externo e 240mm de diâmetro interno, resultando no valor de 6,6 kgfm/cm<sup>2</sup>. Junto aos valores de trabalho de atrito específico calculados previamente é possível descobrir a área mínima que o revestimento precisa ter para atender a energia específica de 6,6 kgfm/cm<sup>2</sup> como mostra a Figura 5.

Figura 5 – Área mínima calculada

$T_{atr} =$	11271,99 kgfm
$a =$	6,6 Kgfm/cm <sup>2</sup>
$A_{min.} =$	1702,84 cm <sup>2</sup>

Fonte: Autores

Como pretende-se manter o diâmetro externo para manter o modelo da embreagem e facilitar a implementação, foi calculado através da área o novo diâmetro interno, resultando no valor de 218,22mm, o qual foi normalizado para 220mm para facilitar a obtenção do mesmo no mercado. Na figura 6 é mostrado um comparativo dos trabalhos de atrito específico.

Figura 6 – Comparativo redimensionamento

Veículo original	Veículo com SD e embreagem original	Veículo com SD e embreagem modificada
$T_{atr} =$ 10234,18 kgfm	$T_{atr} =$ 11271,99 kgfm	$T_{atr} =$ 11271,99 kgfm
$A_{rev(395x240)} =$ 1546,06 cm <sup>2</sup>	$A_{rev(395x240)} =$ 1546,06 cm <sup>2</sup>	$A_{rev(395x220)} =$ 1690,57 cm <sup>2</sup>
$a =$ 6,6 Kgfm/cm <sup>2</sup>	$a =$ 7,3 Kgfm/cm <sup>2</sup>	$a =$ 6,7 Kgfm/cm <sup>2</sup>

Fonte: Autores

## EMBREAGEM

Visto a possível redução de torque no período de acoplamento, é necessário reavaliar o projeto de embreagem dado o aumento do trabalho de atrito causado pelo menor torque em seu momento de geração de maior energia térmica e desgaste. Dito isso, esse trabalho de atrito foi calculado conforme a equação 1, como o estudo será feito analisando o impacto do produto Smart Drive, variáveis como o peso bruto (G), fator característico de redução (S), rotação de arrancada ( $n_a$ ), coeficiente de atrito de rodagem (F) e ângulo de inclinação de rampa ( $\theta$ ) serão os mesmos para ambas os cálculos, sendo o torque máximo ( $T_{max}$ ) o único parâmetro alterado.

Equação 1 – Cálculo trabalho de atrito

$$T_{atr} = \frac{5,6 \cdot \left(\frac{n_a}{100}\right)^2}{S \cdot \left[\frac{0,95 \cdot S}{G} - \frac{(F + \text{TAN } \theta)}{T_{max}}\right]}$$

Foi escolhido para o estudo o ônibus Mercedes-Benz OF-1721, por sua grande parcela de mercado. Os resultados podem ser observados nas Figuras 3 e 4. Para um redução de 10% de torque, há um aumento de 9,2% no torque de atrito.

Figura 3 – Cálculo  $T_{atr}$  veículo original

$T_{max} =$	780 Nm	$S =$	82,51394
$n_{max} =$	2600 rpm	$\text{tg } (\theta) =$	0,151
Inclinação =	15 %	$G =$	17000 Kgf
$m_{total} =$	17000 Kg	$n_p =$	1950 rpm
$F =$	0,015		
$I =$	39,35915		
$R =$	0,477 m		
$T_{atr} =$	10234,18 kgfm		

Fonte: Autores

Figura 4 - Cálculo  $T_{atr}$  veículo com Smart Drive

$T_{max} =$	702 Nm	$S =$	82,51394
$n_{max} =$	2600 rpm	$\text{tg } (\theta) =$	0,151
Inclinação =	15 %	$G =$	17000 Kgf
$m_{total} =$	17000	$n_p =$	1950 rpm
$F =$	0,015		
$I =$	39,35915		
$R =$	0,477 m		
$T_{atr} =$	11271,99 kgfm		

Fonte: Autores

## Conclusão

Com base nos dados apresentados, pode-se concluir que o modo de condução é um fator crucial no consumo de combustível em ônibus urbanos com motor a Diesel e que é uma questão que ainda tem muito mais a ser estudada e com grandes oportunidades de novos projetos para evolução. O projeto Smart Driving apresentou valores satisfatórios com base nas simulações efetuadas nas condições estipuladas, chegando a um consumo de combustível de 15%, o que é superior ao Target anteriormente estipulado de 5%, apresentando uma margem larga de sucesso. Ainda assim, durante o projeto foi possível notar possíveis problemas que fossem aparecer no ônibus, como o caso da embreagem. Com isso, agregado ao sistema Smart Driving, foi proposta uma solução para este caso, mudando o diâmetro interno da embreagem em busca de manter os parâmetros de projeto anteriores dela, evitando possíveis falhas *fading* e demais outras formas. Como resultado, buscou-se manter a energia de atrito específico do material para evitar o superaquecimento, podendo gerar *fading*, resultado esse alcançado pela mudança no diâmetro interno.

## REFERÊNCIAS

- [1] MELMAN, Timo et al. Multivariate and location-specific correlates of fuel consumption: A test track study. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 92, p. 102627, 2021.
- [2] MING, Mônica Guo. **A Importância do Desenvolvimento do Transporte Público na Evolução da Mobilidade Urbana**. 2017. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Econômicas, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.
- [3] INTERNATIONAL ASSOCIATION OF PUBLIC TRANSPORT (org.). **Urban Public Transport in the 21st Century**. Bélgica, 2017.
- [4] ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS (org.). **Relatório geral 2018**. Sistema de Informação da Mobilidade Urbana, 2020.
- [5] MELMAN, Timo; BECKERS, Niek; MOUTON, Xavier; ABBINK, David. A Proactive Method to Assist Eco-Driving. **SSRN Electronic Journal**, Delft.
- [6] BEUSEN, Bart et al. Using on-board logging devices to study the longer-term impact of an eco-driving course. **Transportation research part D: transport and environment**, v. 14, n. 7, p. 514-520, 2009.
- [7] Scania. Updated CCAP from Scania can save up to 2% fuel. Scania Group, <https://www.scania.com/group/en/home/newsroom/press-releases/press-release-detail-page.html/4538481-updated-ccap-from-scania-can-save-up-to-2--fuel>. Publicado em 11 de outubro de 2023.
- [8] Chiptuning. PedalBox. Disponível em: <https://www.chiptuning.com/en/pedalbox.html>. Acesso em: 11 de outubro de 2023.
- [9] RaceChip. PedalBox XLR. Disponível em: [https://www.racechip.com/pedal-box/xlr.html?gad=1&gclid=CjwKCAjwg4SpBhAKEiwAdyLwvB0Uykz86SuXL2lbr73kBLy9J9U\\_\\_NLgxTrT6X-ffBrltGDawrRQxoCy5EQAvD\\_BwE](https://www.racechip.com/pedal-box/xlr.html?gad=1&gclid=CjwKCAjwg4SpBhAKEiwAdyLwvB0Uykz86SuXL2lbr73kBLy9J9U__NLgxTrT6X-ffBrltGDawrRQxoCy5EQAvD_BwE). Acesso em: 11 de outubro de 2023.