

## Relatório Técnico

Estudo da variação das emissões atmosféricas decorrentes da adição de biodiesel em misturas com diesel mineral S10: Avaliação de motores de combustão interna em ciclo de condução

UnB Campus Gama – FGA  
Engenharia Automotiva  
Laboratório de Medição de Desempenho Automotivo – LMDA  
Brasília, 9 de novembro de 2023



## **Estudo da variação das emissões atmosféricas oriundas da adição de biodiesel em misturas com diesel mineral S10: Avaliação de motores de combustão interna em ciclo de condução**

### Autores:

Fábio Cordeiro de Lisboa  
João Carlos Wohlgemuth  
Nicolas Lima de Oliveira

### Resumo:

Este relatório técnico apresenta os resultados obtidos nos ensaios em ciclo de condução de dois caminhões que representam diferentes tecnologias presentes na frota de veículos pesados do Brasil. O primeiro, representando 43,9% da frota de pesados, é avaliado pela fase P7 do Proconve, que segue a resolução CONAMA 403/2008, e é representado pelo caminhão MB Accelo 815. O segundo, que representa 31,2% da frota, é avaliado pela fase P5 do Proconve, que segue a resolução CONAMA 315/2002, e é representado pelo Ford Cargo 815. Os veículos foram ensaiados em dinamômetro de chassi seguindo a metodologia prevista na ABNT NBR 15634, e os resultados compilados na forma de tabelas e gráficos comparativos. O veículo mais atual (MB Accelo) sofreu menos alterações nas emissões específicas de NO<sub>x</sub> com a variação dos combustíveis, variando apenas 1% nos ensaios com B7 e B20, contra 12% de variação de emissões específicas de NO<sub>x</sub> no Ford Cargo. Somente traços de hidrocarbonetos foram identificados nos gases de escapamento para ambos os veículos. O Ford Cargo apresentou um aumento de 15% no consumo específico de combustível com a variação de B7 para B20, contra 9,5% para o MB Accelo. Apesar das variações verificadas, nenhum dos veículos ensaiados teve indicadores de emissão atmosférica maiores do que os limites apresentados para as fases do Proconve que representam. No entanto, dado o tamanho da frota em operação, o aumento de 12% nas emissões de NO<sub>x</sub> em veículos mais antigos acende um sinal de alerta quanto ao aumento do percentual de biodiesel no diesel comercial sem que haja tempo de renovação da frota com dispositivos de pós tratamento mais eficientes.

## Símbolos e acrônimos

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFR	Razão ar/combustível ( <i>Air-Fuel Ratio</i> )
Arla 32	Agente Redutor Líquido Automotivo a 32,5% <sub>v</sub> de ureia
B0	Diesel puro
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DPF	filtro de particulado dos gases de escape de motor diesel
EGR	EGR (Recirculação de Gases de Exaustão) trata os gases durante o processo de combustão
ESC	Ciclo de Regime Constante
ETC	Ciclo de Regime Transiente
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
NBR	Norma Brasileira
NMHC	Hidrocarbonetos não metano
OBD	Dispositivos ou sistemas para auto diagnose
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
SCR	Redução Catalítica Seletiva – realiza o tratamento dos gases depois da combustão
THC	Medições de total de hidrocarbonetos
S10	Diesel contendo 10 partes por milhão de enxofre
% <i>n</i>	Rotação normalizada
<i>n</i>	Rotação do motor
<i>m<sub>b</sub></i>	Massa de biodiesel
<i>m<sub>d</sub></i>	Massa de diesel
% <i>b</i>	Percentual de biodiesel

## 1. Introdução

A adição de biodiesel no diesel comercial é um assunto polêmico e que constantemente está em discussão, seja pelas empresas produtoras de combustível, seja pelos fabricantes de veículos ou pelos consumidores, imprensa especializada e oficinas mecânicas. O consumo de combustível e as emissões, bem como o impacto na manutenção e na durabilidade dos motores sempre é pauta de debates entre todos os agentes.

Este estudo visa conduzir uma análise comparativa das emissões de poluentes atmosféricos resultantes da queima de misturas de diesel com biodiesel em diferentes proporções, com o intuito de verificar a influência das variações de adição de biodiesel nas emissões. Para compor os ensaios como equipamento de testes, foram utilizados dois veículos com diferentes avaliações quanto as emissões: um moderno Mercedes Accelo, veículo produzido em 2022, em conformidade com a fase P7 (similar à Euro 5, atualmente em vigor) do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE que é uma divisão do IBAMA que disciplina as emissões veiculares no Brasil. Um segundo de modelo mais antigo, o Ford Cargo, fabricado em 2010, em conformidade com a fase P5 do Proconve, similar à Euro 3. O comparativo visa cobrir representativamente a frota brasileira onde caminhões com avaliação P5 representam 31,2%, enquanto 43,9% são avaliados pela fase P7. Em todos os testes as concentrações de monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e hidrocarbonetos totais foram meticulosamente monitoradas através de um sistema de coleta e análise de gases, empregando o método de infravermelho não dispersivo.

Para a análise das variações nas emissões, foram produzidas combinações de diesel puro S10 com proporções de 7%, 15% e 20% de biodiesel. Todas essas misturas foram produzidas retirando o diesel puro S10 e o biodiesel de vasilhames únicos, ou seja, havia apenas uma única fonte de diesel e outra única fonte de biodiesel para a preparação de todas as misturas de combustível, garantindo que houve apenas a variação da concentração dos dois componentes nas misturas e não sua a variação da natureza ou composição química.

Dada a necessidade de instrumentação especializada para a realização desses testes, as avaliações foram conduzidas em modo estacionário, com os veículos fixados em um dinamômetro, permitindo a simulação de diversas situações de condução com o veículo ligado aos instrumentos de medição. Este estudo oferece uma visão abrangente da influência da adição de biodiesel nas emissões de veículos, fornecendo dados valiosos para avaliar o impacto ambiental de cada proporção desse combustível, inclusive comparando entre veículos de tecnologia atual e de produzidos há uma década.

Cada conjunto de testes de uma mesma modalidade foi realizada em um único dia e no menor espaço de tempo, a fim de manter as condições de temperatura e pressão atmosférica o mais estável o possível. Até os condutores foram mantidos únicos para cada modelo de teste, nos dois caminhões, visando suprimir as variações impostas por modos de condução.

## 2. Materiais e Métodos

Para o levantamento dos dados e sua respectiva análise, foram empregados os equipamentos e métodos descritos a seguir:

### 2.1 Instrumentos de Medição

**Balança** - O consumo de óleo diesel do veículo foi medido por diferença gravimétrica com o uso de uma balança eletrônica Toledo modelo 9094C/5, com resolução classe III do Inmetro ( $\pm 2g$ ). Esse dado será usado para calcular o consumo específico em cada ensaio. Um computador conectado à balança, rodando o software DRCOM232, registra a variação de massa ocorrida durante os ensaios, o protocolo de comunicação usado é o Prt1- Este protocolo de comunicação utiliza: 1 Bit de parada; 8 Bits de dados; sem paridade. O envio dos dados é iniciado, quando a balança recebe o comando de solicitação "ENQ". ENQ = Caractere ASCII (05H) enviado pelo dispositivo externo. A partir deste comando e na condição de peso estável, a balança enviará ao dispositivo externo, o seguinte pacote de dados: [STX][PPPPP][ETX] onde: STX = Caractere ASCII (02 H) – Início da transmissão. PPPPP = 5 caracteres ASCII relativos ao peso sem ponto decimal. O ponto deve ser tratado via software. ETX = Caractere ASCII (03 H) – Término da transmissão.

**Dinamômetro de Chassi** - Foi utilizado um dinamômetro de chassi Dynamite de 12 polegadas, com freio de corrente parasita, capaz de medir até 700 hp de potência. O sistema está equipado com um dispositivo de coleta de dados (DAQ) que inclui sensores para registrar os parâmetros do motor do veículo, além de uma estação meteorológica que ajusta os dados de acordo com as condições locais de umidade, temperatura e pressão. Também conta com um sensor de rotação e uma célula de carga para medir o torque. A resolução do sistema é de 5%, e suas velocidades máximas atingem 200 km/h. Este dispositivo permite a avaliação do desempenho dos caminhões em condições simuladas que se aproximam das situações reais de uso, medindo a potência, o torque, a velocidade e a aceleração dos veículos. Para a coleta e tratamento dos dados foi utilizado o *software* DYNO-MAX Pro 2010 versão 10.23 SP#1.

**Analisador de Gases e Condicionador de gases** - O equipamento utilizado foi NAPRO PC-Multigas (Figura 1), que emprega o método de infravermelho não dispersivo para medir CO, CO<sub>2</sub> e HC, e o método de células eletroquímicas para medir O<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, conforme as normas NBR, OIML R99 CLASS1, ISO3930 e ASM/BAR 97. Ele também pode avaliar a rotação do motor por um sensor indutivo tipo *clamp* e a temperatura por um sensor termopar tipo "J", que não serão usados para este estudo. O condicionador de gases tem a função de reduzir a umidade da amostra de gás, e é controlado pelo analisador. Para a análise dos dados das emissões gasosas do escapamento, foi utilizado o *software* MODAL 2010 versão 1.13/20G, fornecido pela NAPRO.

Figura 1 Analisador e Condicionador de gases de combustão automotivo PC Multigás



Fonte: Os autores

O analisador também mede o valor de Lambda e a relação ar – combustível designado por AFR (*Air-Fuel Ratio*), que mostram a qualidade da queima, baseando-se nos gases analisados e em constantes próprias para cada tipo de combustível, seguindo a fórmula de Brettschneider para o equilíbrio das reações químicas. Dados técnicos do analisador de gases pode ser consultado na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1 Especificações do analisador de gases de combustão

Alimentação	12VDC ou 110/220VAC (60 hz)
CO	0 a 15%
CO <sub>2</sub>	0 a 20%
HC	0 a 20.000 ppm (ref. Hexano)
O <sub>2</sub>	0 a 25%
NO <sub>x</sub>	0 a 5.000 ppm (Ref. NO)
Lambda	0 a 9,99 (-)
AFR	0 a 99,99 (-)

Fonte: Manual do PC-Multigás Napro

## 2.2 Veículos ensaiados

Os testes foram realizados com dois caminhões de diferentes idades e tecnologias de pós-tratamento de gases de escapamento. Para fins comparativos, foram testados um Mercedes-Benz Accelo 815 de 2022, que atende à fase P7 do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) e utiliza o sistema de pós-tratamento Redução Catalítica Seletiva (SCR) com agente redutor líquido a 32,5%<sub>w</sub> de ureia (Arla-32), e um Ford Cargo 815 de 2010, que atende à fase P5 do PROCONVE e não possui pós-tratamento SCR, mas está equipado com injeção eletrônica de combustível e Recirculação de Gases de Exaustão (EGR). As características técnicas dos veículos estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 Especificações dos veículos ensaiados

Dados técnicos	MB Accelo 815 2022	Ford Cargo 815 2010
Motor	MB OM 924 LA BlueTec5	Cummins ISBe4
(D x C) cilindrada	(106mm x 136mm) 4,8L	(102mm x 120mm) 3,9L
Potência máxima	156 cv @ 2200 rpm	150 cv @ 2500 rpm
Torque máximo	59 kgfm @ 1600 rpm	56 kgfm @ 1500 rpm
Taxa de compressão	17,5:1	17,3:1
Pós tratamento escape	EGR, DPF e SCR	EGR e DPF

Fonte: Manuais do MB Accelo 815 e do Ford Cargo 815

Os veículos foram posicionados cuidadosamente sobre o dinamômetro de chassis, com as rodas do eixo traseiro encaixadas e firmemente posicionadas entre os rolos de teste. O caminhão foi fixado ao solo e ao dispositivo de teste com amarração cruzada, para prevenir movimentações indevidas. Para isso, foram empregadas cintas de amarração que suportam até 3 toneladas cada, de forma a receber as cargas impostas durante os testes.

Foi utilizado um sistema adicional de arrefecimento, através de um ventilador de grande porte disposto em frente à grade frontal dos veículos, para evitar temperaturas elevadas no motor. Além disso, foi utilizado um sistema de exaustão de gases do laboratório, para impedir a concentração de gases nocivos no ambiente de testes. A Figura 2 a seguir mostra o posicionamento do caminhão na bancada de testes.

Figura 2 Posicionamento do caminhão no dinamômetro de Chassi, sistema auxiliar de arrefecimento e o sistema de medição de fluxo de combustível



Fonte: os autores

## 2.3 Parametrização do ciclo de condução

O ciclo de condução foi definido e parametrizado de acordo com a norma ABNT NBR 15634. Essa norma define uma sequência de modos (ou pontos) de ensaio, cada um com rotação e carga definidas, que deve ser desenvolvida pelo motor em condições de funcionamento em regime constante (ciclo ESC) ou transiente (ciclos ETC e ELR).

O ciclo de condução ETC (ciclo europeu em regime transiente) tem duração total de 1800 segundos, divididos em 900 segundos para cada fase: baixa e alta velocidade. A

velocidade média do ciclo é de 46,5 km/h e a distância total é de 23,3 km. O ciclo ESC (ciclo europeu em regime constante) destina-se a medir a emissão de gases poluentes e de material particulado, consistindo em uma sequência de 13 modos em regime constante.

Para a construção da tabela de velocidades para o ciclo ETC e seus regimes de carga, são aplicados os procedimentos descritos no capítulo 8 da ABNT NBR 15634. Após definido, o ciclo foi repetido para ambos os caminhões, sendo utilizado o mesmo condutor para ambos os veículos. A rotação real (Equação 1) e o torque real (Equação 2) são calculados utilizando a tabela 11 do item 8.12 da referida norma.

$$n_{real} = \frac{\%n(n_{ref} - n_0)}{100} + n_0 \quad (1)$$

$$Torque_{real} = \frac{\%Torque \times Torque_{max}}{100} \quad (2)$$

Onde:

$\%n$  é a rotação normalizada do motor obtida a partir da tabela 11 do item 8.12 da norma, expressa em porcentagem (%);

$n_{ref}$  é a rotação de referência. calculada utilizando a equação 3 a seguir:

$$n_{real} = 95\% \times (n_{hi} - n_{lo}) + n_{lo} \quad (3)$$

Onde  $n_{hi}$  e  $n_{lo}$  são as rotações máximas e mínimas determinadas conforme procedimento da seção 6.1 da NBR 15634.

O percentual de torque tabelado é representado por  $\%Torque$  e o torque máximo por  $Torque_{max}$ . Com isso foi possível configurar o controlador do dinamômetro e criar a tabela 3 em função da velocidade e marcha utilizada para cada instante do ensaio.

*Tabela 3 Ciclo de condução criado para o ensaio*

<b>Tempo (s)</b>	<b>Marcha</b>	<b>Velocidade média alvo (km/h)</b>
0 a 60	2	20
60 a 150	3	40
150 a 180	Neutro	0
180 a 210	2	20
210 a 240	Neutro	0
240 a 600	3	40
600 a 720	Neutro	0
720 a 900	3	40
900 a 1200	4	60
1200 a 1320	Neutro	0
1320 a 1800	5	80

*Fonte: os autores*

## 2.4 Preparação das Concentrações de Diesel S10 + Biodiesel

Para a realização do estudo, foi necessário realizar o preparo das concentrações com 7%<sub>mm</sub>, 15%<sub>mm</sub> e 20%<sub>mm</sub> de biodiesel no diesel (%*b* = 0,07, 0,15 e 0,20) respectivamente. O rigor no preparo das concentrações dos combustíveis foi mantido buscando o máximo de exatidão nas proporções, utilizando balança com exatidão Inmetro Classe 3. Para o cálculo das concentrações utilizou-se a adição de biodiesel (*m<sub>b</sub>*) Equação 4, a uma certa massa de diesel (*m<sub>d</sub>*) fixa e igual a 3 kg.

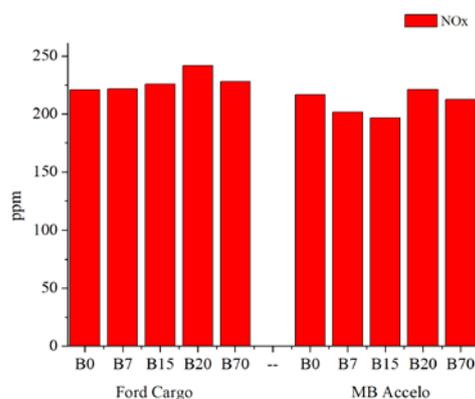
$$m_b = \frac{\%b \times m_d}{(1 - \%b)} \quad (4)$$

Adicionalmente, foram utilizados combustíveis contendo diesel puro (B0) e com concentração de 70% (B70) para algumas comparações. O objetivo era verificar se o aumento da concentração de biodiesel poderia resultar em algum resultado significativo nos ensaios. As características do diesel S10 puro (B0) e do biodiesel puro (B100) são garantidas e monitoradas pela distribuidora VIBRA. Isso está atestado no documento de doação. Essas características seguem as descritas no anexo II da resolução CONAMA nº 403, de 11 de novembro de 2008.

### 3. Resultados

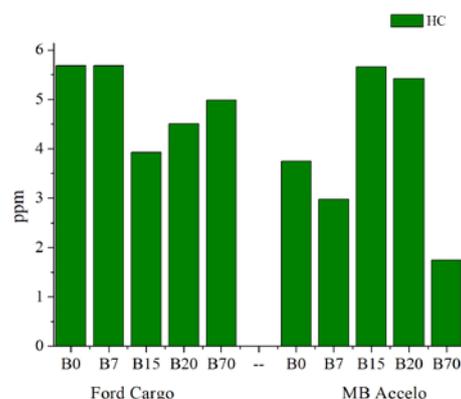
De acordo com os procedimentos da norma ABNT NBR15634, descritos na seção anterior, foram feitos ensaios nos ciclos de condução ETC e ESC, de forma comparativa para dois caminhões com tecnologias diferentes e mesma classe de motores. De forma geral, o comportamento das emissões, considerando somente as emissões médias dos resultados extraídos diretamente das tabelas do analisador de gases, obtivemos para o NO<sub>x</sub> (ppm<sub>w</sub>) e para o HC (ppm<sub>w</sub>) o comportamento mostrado pelas Figuras 3 e 4.

Figura 3 Emissões médias de NO<sub>x</sub> (ppm<sub>w</sub>)



Fonte: Os autores

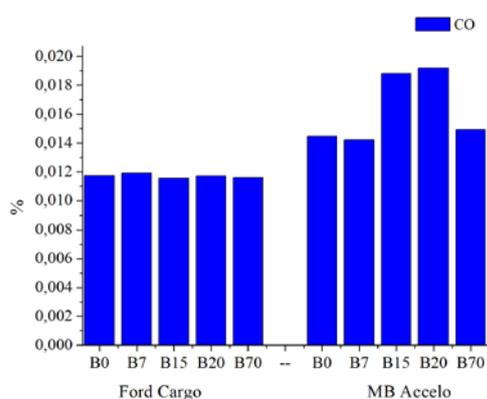
Figura 4 Emissões médias de HC (ppm<sub>w</sub>)



Fonte: Os autores

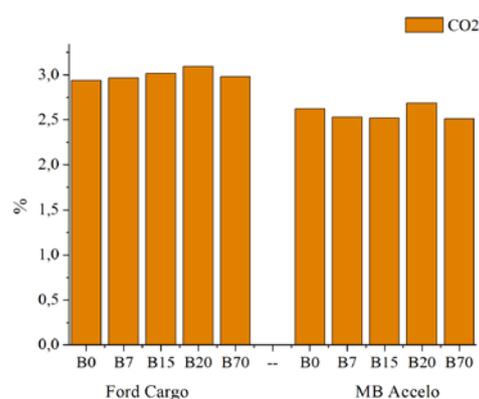
Note que os valores observados nas figuras 3 e 4 não levam em conta o desempenho de cada caminhão, estes dados serão apresentados nas seções seguintes. Mas é possível ver um comportamento diferente entre ambos os caminhões estudados, que se deve ao fato de o caminhão de tecnologia mais atual (MB Accelo) possuir equipamentos de pós tratamento mais eficiente, com injeção de Arla 32 para a redução do NO<sub>x</sub>. Apesar de visível no gráfico da Figura 5, as emissões de CO para ambos os caminhões são apenas traços (emissões muito baixas) e as variações estão dentro da faixa de incerteza de medição do equipamento.

Figura 5 Emissões médias de CO (%<sub>w</sub>)



Fonte: Os autores

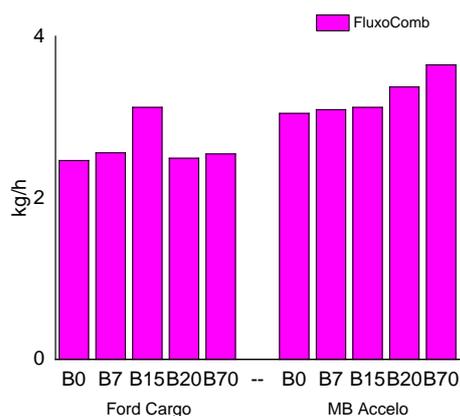
Figura 6 Emissões médias de CO<sub>2</sub> (%<sub>w</sub>)



Fonte: Os autores

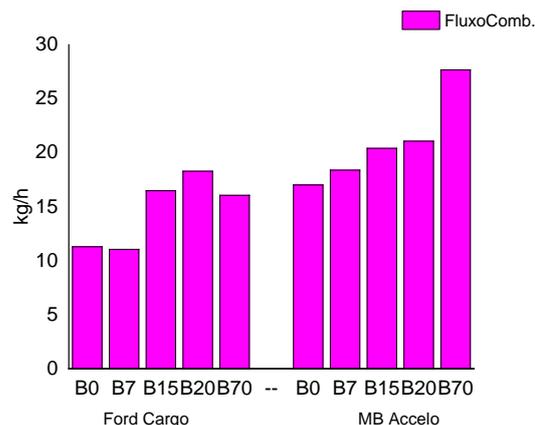
O comportamento decrescente das emissões médias de HC é mostrado na figura 4 enquanto a análise da quantidade de carbono deve ser analisada observando os gráficos das figuras 4, 5 e 6 em conjunto. Com relação ao fluxo de combustível é possível notar o maior consumo do MB Accelo devido ao maior volume deslocado pelo motor (Figuras 7 e 8).

Figura 7 Fluxo de combustível em cargas parciais



Fonte: Os autores

Figura 8 Fluxo de combustível em carga plena

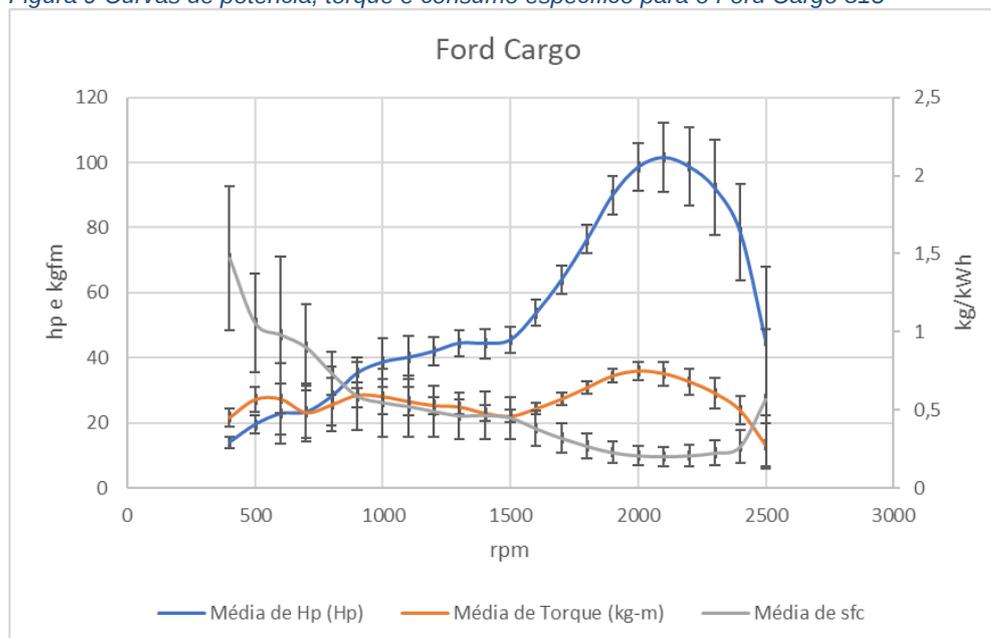


Fonte: Os autores

Quando observado estes valores, não é possível inferir sobre o quanto se consome ou se emite de poluentes em função da quantidade de energia gerada pelo motor. Para solucionar esta questão as métricas estabelecidas pelas resoluções CONAMA nº 305 de 2002 para caminhões fase P5 do PRONCOVE e a resolução CONAMA nº 403 de 2008, cujos valores limites estão listados nas próximas seções.

Para o levantamento do desempenho e consequente entrega de potência, torque e consumo específico de diesel de cada caminhão, foram levantadas suas curvas de desempenho (Figuras 9 e 10). Por elas é possível verificar que o caminhão da Ford é mais sensível à variação de combustível, com a potência máxima de  $101,6 \pm 10,5$  hp, enquanto o caminhão da Mercedes entregou  $123,7 \pm 6,4$  hp. O menor desvio de medição sinaliza um ajuste melhor nos mapas de injeção do Accelo 815.

Figura 9 Curvas de potência, torque e consumo específico para o Ford Cargo 815

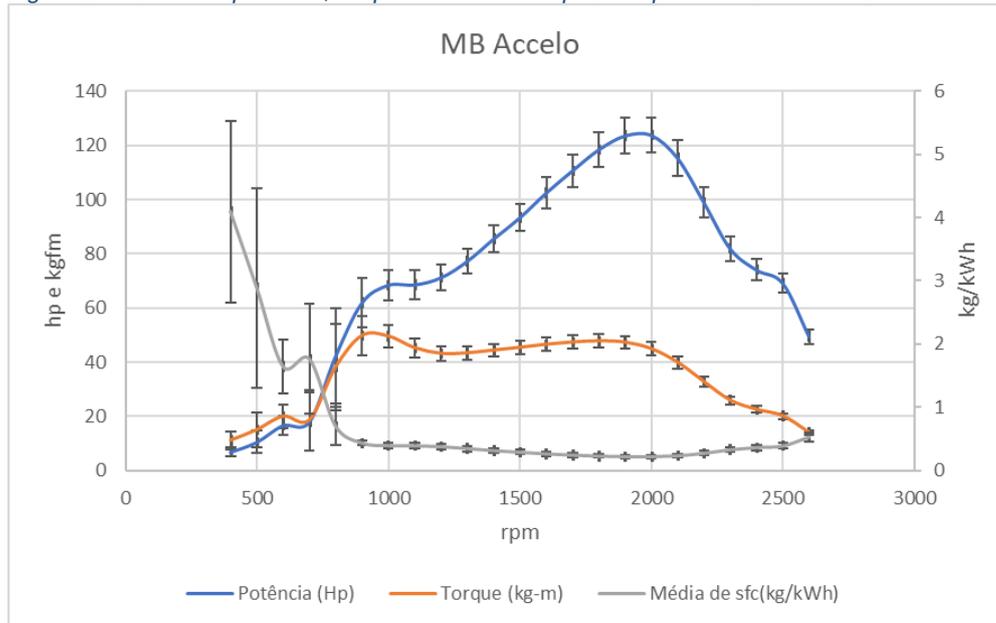


Fonte: Os autores

O desempenho medido para Ford Cargo apresenta potência máxima de 100,5 hp a 2100 rpm quando alimentado com B7, contra 96,8 hp a 2100 rpm quando alimentado com

B20. O torque máximo foi de 35,9 kgfm a 1900 rpm usando B7, contra 35 kgfm a 1900 rpm com B20. O menor consumo específico foi medido na região de torque máximo.

Figura 10 Curvas de potência, torque e consumo específico para o MB Accelo 815



Fonte: Os autores

O desempenho medido para MB Accelo apresenta potência máxima de 124 hp a 1900 rpm quando alimentado com B7, contra 123,8 hp a 1900 rpm quando alimentado com B20. O torque máximo foi de 47,9 kgfm a 1800 rpm usando B7, contra 47,6 kgfm a 1800 rpm com B20. O menor consumo específico foi medido na região de torque máximo.

Os valores de referência para rotação e torque usados para a parametrização do ciclo de condução descrito em 2.3, segundo a NBR 15634 item 6.1, são retirados das curvas das Figuras 9 e 10. A padronização de condução apresentada na tabela 3 foi calculada a partir destes dados de referência. A partir destes dados são compilados os resultados dos ciclos mostrados nas seções 3.1 e 3.2. Segundo as resoluções do CONAMA que disciplinam a questão de emissão de poluentes por veículos automotores, os fabricantes e importadores de motores do ciclo Diesel ou de veículos a Diesel destinados ao mercado nacional devem apresentar ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis-IBAMA, relatório de valores típicos das emissões de dióxido de carbono e de aldeídos totais, bem como do consumo específico de combustível, medidos nos ensaios de Ciclo de Regime Transiente (ETC) e Ciclo de Regime Constante (ESC) e expressos por emissões específicas ( $GAS_x$ ) em g/kWh, conforme a equação 5 a seguir.

$$GAS_x = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} m_{GASi} \times W_{Fi}}{\sum_{i=1}^{i=n} P(n)_i \times W_{Fi}} \quad (5)$$

Onde;

$m_{GAS}$  é a massa de cada um dos gases, expressa em quilogramas (kg);

$P(n)_i$  é a potência útil determinada conforme a Tabela 5 da NBR 15634 e

$W_{Fi}$  é o fator de ponderação

### 3.1 Ciclo em Regime Transiente - ETC

Os resultados obtidos são o compilado em 1800 ciclos de 1s em regime transiente para cada caminhão estudado. Como limites são estabelecidos pela resolução CONAMA nº 315, de 29 de outubro de 2002, para a fase P5 (Ford Cargo) e pela resolução CONAMA nº 403, de 11 de novembro de 2008, para a fase P7 (MB Accelo). A tabela 4 a seguir resume os limites estabelecidos por estas duas resoluções para as medições feitas no presente estudo.

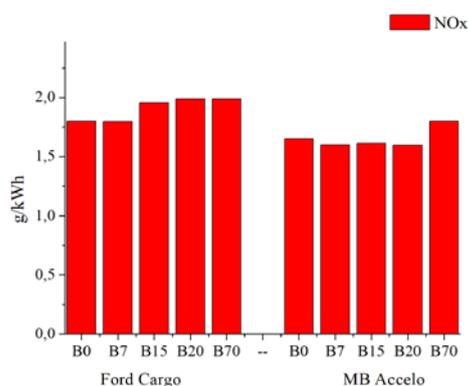
Tabela 4 Valores limites - ensaios ETC

Fase Proconve	Monóxido de Carbono CO (g/kWh)	Hidrocarbonetos Totais THC (g/kWh)	Óxidos de Nitrogênio NO <sub>x</sub> (g/kWh)
P5 (Ford Cargo)	4,0	0,55	3,5
P7 (MB Accelo)	4	NA	2

Fonte: CONAMA nº 315/2002 e CONAMA nº 403/2008

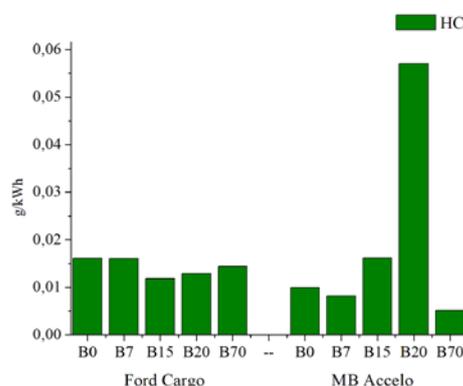
Para a análise em ciclo transiente para as emissões de NO<sub>x</sub> onde os resultados são mostrados pelo gráfico da Figura 11, enquanto as emissões de hidrocarbonetos totais (HC) são apresentadas pelo gráfico da Figura 12.

Figura 11 Emissão de NO<sub>x</sub> em ciclo ETC



Fonte: Os autores

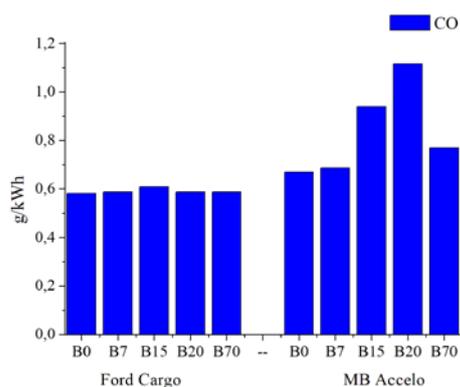
Figura 12 Emissão de HC em ciclo ETC



Fonte: Os autores

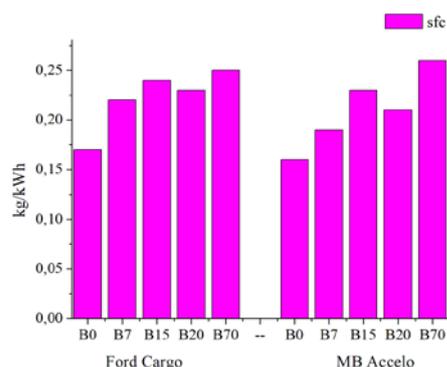
Observa-se que ambos os veículos apresentam conformidade com relação à emissão de NO<sub>x</sub> e HC segundo às avaliações das fases PROCONVE P7 e P5, para o caminhão Mercedes e Ford respectivamente. Para o veículo mais antigo, observou-se uma tendência discreta de elevação, inferior a 10% de B7 para B20, das emissões de NO<sub>x</sub>, em reposta ao aumento da quantidade de biodiesel na mistura. O caminhão Mercedes, equipado com SCR, apresenta valores estáveis na emissão de NO<sub>x</sub>. Para os hidrocarbonetos percebe-se valores baixos, interpretados como traços de HC no fluxo de gases de escapamento.

Figura 13 Emissão de CO em ciclo ETC



Fonte: Os autores

Figura 14 Consumo específico de combustível em ciclo ETC



Fonte: Os autores

Com valores bem abaixo dos limites, ambos os caminhões estão em conformidade com relação às emissões de CO, a variação observada na Figura 13, não representa uma tendência de elevação dos índices com o aumento da proporção de biodiesel. O gráfico da Figura 14, apresenta os resultados obtidos com relação ao consumo específico de combustível traduz o quão eficiente é o motor na conversão de energia. Pelo resultado mostrado (Figura 14), observa-se um aumento do consumo específico pela adição de biodiesel na mistura em ambos os modelos ensaiados com uma variação de 4% para o Ford e de 9% para o Accelo.

## 3.2 Ciclo em Regime Constante - ESC

O ciclo ESC consiste de um ciclo de ensaio com 13 modos de operação em regime constante, os valores obtidos representam valores obtidos do veículo em regimes de carga superiores aos testados no ciclo anterior. Como limites são estabelecidos pela resolução CONAMA nº 315, de 29 de outubro de 2002, para a fase P5 (Ford Cargo) e pela resolução CONAMA nº 403, de 11 de novembro de 2008, para a fase P7 (MB Accelo). A tabela 5 a seguir resume os limites estabelecidos por estas duas resoluções para as medições feitas no presente estudo.

Tabela 5 Valores limites - ensaios ESC

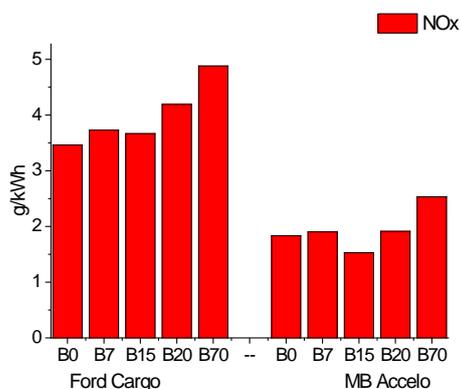
Fase Proconve	Monóxido de Carbono CO (g/kWh)	Hidrocarbonetos Totais THC (g/kWh)	Óxidos de Nitrogênio NO <sub>x</sub> (g/kWh)
P5 (Ford Cargo)	2,1	0,66	5,0
P7 (MB Accelo)	1,5	0,46	2,0

Fonte: CONAMA nº 315/2002 e CONAMA nº 403/2008

No ciclo de condução ESC uma carga maior é imposta ao motor do veículo, sendo possível verificar com clareza a resposta do motor, em emissões atmosféricas, dada a variação do combustível de B7 para B20. No gráfico da Figura 15 observamos a tendência de aumento das emissões específicas de NO<sub>x</sub> na ordem de 12% no Ford Cargo e de 1% no MB Accelo. Esta diferença pode ser atribuída a presença do SCR no veículo avaliado na fase P7. Assim como no ciclo anterior as emissões específicas de HC apresentam apenas traços e as variações observadas no gráfico da Figura 16 não representam variações significativas nos resultados do ensaio.

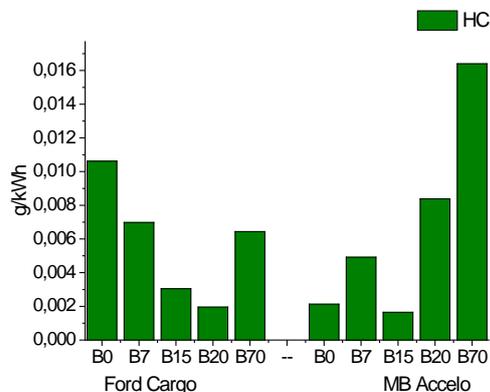
Ambos os veículos estão com emissões abaixo do estabelecido pelo PRONCOVE para as fases aos quais eles pertencem. Observa-se também a eficiência do sistema de pós tratamento pela injeção de solução de ureia a 32,5%<sub>w</sub> nos gases de escapamento do veículo da Mercedes (P7), uma vez que a variação entre os combustíveis de referência B0 e B20 ficou na ordem de 4%. Para valores de mistura acima de 20%<sub>mm</sub> de biodiesel, o manual de operações do veículo traz restrições ao uso, sugerindo procedimentos de manutenção diferenciados, essa preocupação se reflete também nas emissões específicas de NO<sub>x</sub>, com aumento de 38% quando variado de B0 para B70.

Figura 15 Emissão de NO<sub>x</sub> em ciclo ESC



Fonte: Os autores

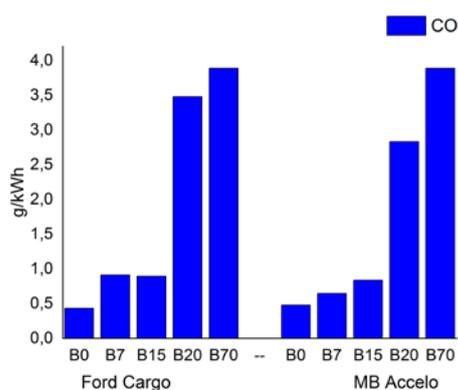
Figura 16 Emissão de HC em ciclo ESC



Fonte: Os autores

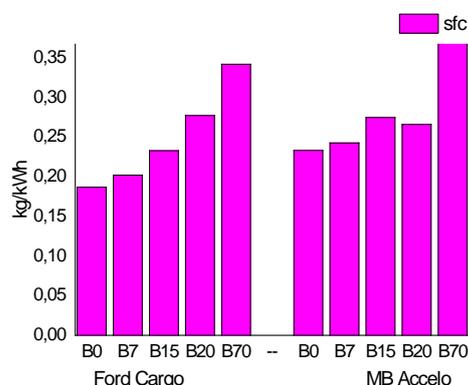
Para as emissões específicas de CO mostradas na Figura 17, observou-se valores acima dos limites estabelecidos pelo PROCONVE para ambos os veículos abastecidos com combustível com taxas maiores que 20%<sub>mm</sub> de biodiesel, esse comportamento precisa ser melhor estudados e verificado se não houve alguma causa especial associada, uma vez que o veículo ficou abaixo dos valores de referência no ciclo ETC.

Figura 17 Emissão de CO em ciclo ESC



Fonte: Os autores

Figura 18 Consumo específico de combustível no ciclo ESC



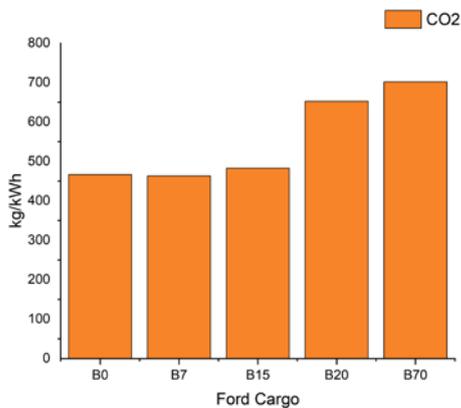
Fonte: Os autores

O Consumo específico de combustível mostrado pelo gráfico da Figura 18, apresenta um aumento de 9,5% no MB Accelo (de B7 para B20) contra um aumento de 15% (de B7 para B20) no veículo da Ford, sugerindo que a evolução tecnológica presente nas estratégias de controle do motor do veículo da Mercedes (P7) é capaz de absorver com mais eficiência a variação do combustível.

### 3.3 Emissões específicas de CO<sub>2</sub>

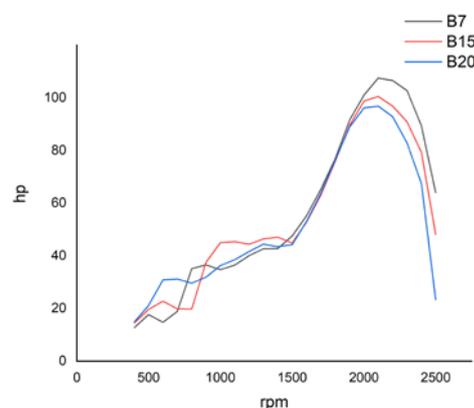
Complementando a análise anterior (Figura 6), que apresenta o teor médio de CO<sub>2</sub> nos gases de escapamento, observa-se que para misturas com maior quantidade de biodiesel, as emissões específicas aumentam. O gráfico da Figura 19, mostra esta tendência ao apresentar os dados conjuntamente com a curva de potência (Figura 20), que apresenta o motivo do aumento das emissões específicas de CO<sub>2</sub> associado à diminuição da potência efetiva de 107,5cv@2100rpm com B7 para 96,8cv@2100rpm com B20 (Figura 20).

Figura 19 Emissões específicas de CO<sub>2</sub> (Cargo)



Fonte: Os autores

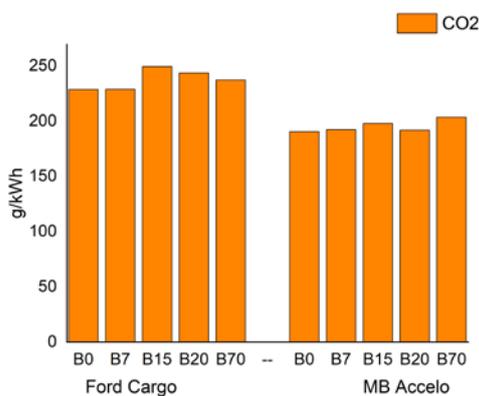
Figura 20 Potência em carga plena (Cargo 815)



Fonte: Os autores

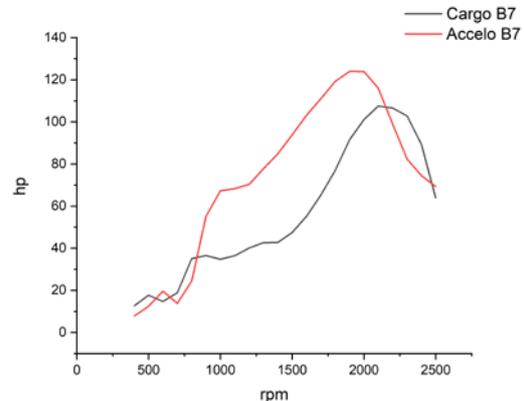
A emissão específica de CO<sub>2</sub> em ciclo de condução ETC (Figura 21), reflete a estabilidade de valores, uma vez que neste ciclo são avaliados 1800 pontos, abrangendo regimes de baixa carga e funcionamento do veículo sem movimento (marcha lenta).

Figura 21 Emissões específicas de CO<sub>2</sub> em ciclo ETC



Fonte: Os autores

Figura 22 Curva de potência comparada para B7



Fonte: Os autores

Observa-se uma discreta variação na emissão específica de CO<sub>2</sub> nos gases de escape entre os veículos, devido a maior potência entregue pelo Accelo (Figuras 9 e 10).

## 4. Conclusão

Foram testados dois veículos com idades, tecnologias e sistemas de pós-tratamento de gases de escapamento diferentes. Cada um dos veículos atende a limites de emissões previstos em fases diferentes do PROCONVE, segundo as resoluções CONAMA nº 315/2002 e CONAMA nº 403/2008. Os métodos estabelecidos (ABNT NBR 15634) foram replicados para ambos os caminhões de forma criteriosa, a fim de reduzir interferências nos sistemas de medição e na forma de conduzir os veículos durante os experimentos.

O veículo MB Accelo (P7) sofreu menos alterações nas emissões específicas de NO<sub>x</sub> com a variação das misturas de combustíveis, variando apenas 1% com a mudança de mistura de B7 para B20. Esse fato pode ser atribuído ao aprimoramento dos softwares de controle do motor no decorrer da década passada e à evolução nos sistemas de pós-tratamento dos gases de escapamento. O outro veículo, Ford Cargo 815, avaliado pela fase P5 do PROCONVE, apresentou variações mais importantes na ordem de 12% entre B7 e B20, sem ultrapassar os limites estabelecidos para emissões de NO<sub>x</sub> para caminhões da sua categoria. **No entanto, considerando o tamanho da frota de veículos mais antigos ainda em operação, o aumento de 12% nas emissões específicas de NO<sub>x</sub>, quando a quantidade de biodiesel aumenta de 7% para 20%, sugere um ponto de atenção para impactos ambientais na mudança do padrão de mistura regulamentar.**

A variação do fluxo de combustível em (kg/h), quando em ciclo transiente (Figura 7), com o aumento da mistura de B7 para B20, percebe-se o aumento do consumo em 3,3% no caminhão da Ford (P5) e em 9% no caminhão da Mercedes (P7). Já o consumo específico de combustível (kg/kWh), com os caminhões em carga plena, foi maior no Ford Cargo (P5), aumentando em 15% de B7 para B20. Enquanto o caminhão avaliado com P7 aumentou 9,5% para a mesma variação de mistura.

As emissões específicas de hidrocarbonetos se apresentaram como traços (valores muito baixos) e as variações observadas se devem à escala utilizada e às incertezas dos sistemas de medição. Já as emissões específicas de CO<sub>2</sub> apresentam valores mais estáveis no veículo mais novo MB Accelo (P7), devido a menores variações na potência efetiva com o aumento do percentual de biodiesel na mistura.

Como sugestão de trabalhos futuros, indica-se a investigação da contaminação de filtros e lubrificantes pelo aumento de biodiesel na mistura, bem como uma avaliação dos custos de manutenção e operação associados a esta modificação no combustível.

Os resultados indicam que os caminhões testados atenderiam aos limites de emissões estabelecidos pelo PROCONVE para todos os combustíveis testados, incluindo a mistura com 70% de biodiesel (B70). No entanto, o aumento de 12% nas emissões específicas de NO<sub>x</sub>, quando a quantidade de biodiesel aumenta de 7% para 20%, sugere um ponto de atenção para impactos ambientais na mudança do padrão de mistura regulamentar.