

Equipamento para medição de NOx específico (g/kW.h) em veículo para diagnóstico do sistema de controle de emissões

André Martelli¹, Celso de Souza Corsino²

1- CAAR Pesquisa e Engenharia, 2- Hybrid e-Controls

RESUMO

Entrou em vigor em 2012 no Brasil o PROCONVE fase P7. Os limites então estabelecidos para emissão de óxidos de nitrogênio (NOx) obrigou, na prática, muitas montadoras a adotarem sistemas controle de emissões para adequarem seus motores à combustão interna que equipam veículos pesados. Estes sistemas, novos aos consumidores e reparadores, demandam cuidados e reparos especiais para seu correto funcionamento e consequente efetividade no abatimento requerido na legislação. É consenso no setor automotivo que os brandos requerimentos de diagnóstico de bordo (OBD) da fase P-7 abriram espaço a diversos tipos de fraude que acabam por reduzir os benefícios ambientais almejados. A proposta deste trabalho é apresentar um equipamento já bastante usado nos processos de reparação nas oficinas mecânicas, com uma nova funcionalidade: leitura da emissão de NOx em base g/kW.h a partir de sensor NOx aferido. Permite-se assim uma comparação menos abstrata ao nível de eficiência do sistema de pós tratamento, uma vez que a leitura é comparável ao valor regulado. Vislumbra-se ainda – para situações específicas de carga do motor – uma verificação passa / não passa para os limites previstos em legislação. Foram avaliados 9 veículos, sendo que 4 deles não atenderam os limites de emissões da fase P-7. Dos veículos reprovados, apenas um apresentava indicação de falha e sinais evidentes de adulteração de reagente, o que reforça a necessidade de um equipamento capaz de identificar transgressões e materializá-las em campo pela quantificação das emissões.

Aplicabilidade

O equipamento é passível de ser utilizado na avaliação do funcionamento de sistemas de controle de poluição em veículos que devem atender ao PROCONVE P-7, seja os dotados de sistemas baseados em agente redutor (ARLA32) ou sistemas com recirculação dos gases de Escape (EGR). Máquinas agrícolas e veículos rodoviários regidos pelo PROCONVE MAR -1 e que possuem sistema de gerenciamento eletrônico do motor são também potenciais aplicações.

Objetivo

Descrever o funcionamento do equipamento e mostrar casos de uso no diagnóstico e correção de problemas de sistemas de controle de poluição em veículos pesados.

1. Introdução

O controle dos gases lançados na atmosfera através da queima de combustível fóssil demanda um grande esforço coordenado por parte dos governos, fabricantes de sensores, sistematistas e montadoras. Atender ao PROCONVE P-7 requereu intenso trabalho de preparação, investimentos em equipamentos para desenvolvimento e homologação, longas campanhas de validação e, por fim, treinamento da rede de concessionárias e reparadores independentes.

Todo este esforço acaba se perdendo à medida que – por má fé, falta de conhecimento dos reparadores ou por falta de peças de reposição – o usuário do veículo opta por adulterar o funcionamento do sistema de controle de emissões. São diversas os artifícios utilizados, desde a mais comum por alteração do reagente ARLA32 (diluição com água, ureia não certificada etc.) até emuladores que inibem funcionamento do sistema de dosagem. Ainda que passíveis de detecção em campo, as taxas de destes tipo de fraude (~12% em 146 veículos, como apontado em [1]) e seus efeitos em termos de emissões são extremamente preocupantes: o uso prolongado de ARLA adulterada pode danificar o catalisador e componentes de injeção e o uso de emuladores eleva a emissão a níveis cerca de 4,7 vezes maiores que com o sistema em funcionamento, conforme verificado na referência [2].

Mesmo sem uma base de dados consolidada, os autores confirmam - pela iteração com as oficinas – relatos de problemas recorrentes de catalisadores e sistemas de injeção contaminados.

Há ainda relatos de alterações promovidos por terceiros na central de controle do motor, visando inibir as funções de controle de poluição (válvulas EGR, detecção de falha em DPF, dosagem de ARLA, etc.) por meio de modificações em mapas de funcionamento das estratégias de controle. Estes ajustes se assemelham à conhecida prática de “chipar o motor” que antes visava, sobretudo, aumentar a potência para além da original de fábrica. Esta modalidade é de difícil detecção no âmbito de controle da poluição, uma vez que acabam por inibir o funcionamento dos monitores OBD mesmo sem a presença de um emulador físico na rede CAN (o qual materializa o crime).

Desde 2012 até fevereiro de 2020, cerca de 900.000 caminhões e ônibus foram licenciados no Brasil [3]. Até a entrada em vigor da fase P-8 do PROCONVE em 2022/23, mais de um milhão de veículos P-7 poderão estar em circulação. Considerando as curvas de utilização e sucateamento (idade média de 15 a 20 anos), levantadas pelo inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários [4], estes veículos serão responsáveis por parte considerável das emissões veiculares da próxima década.

A medida que a implementação do PROCONVE fase P-8 corrige falhas regulatórias no diagnóstico a bordo (OBD) [5] - abertas por lacunas de regulação, conforme descreve [6] - não se pode deixar de lado os milhares de veículos já nas ruas com sistemas inoperantes ou falhos, pondo em xeque os benefícios ambientais almejados.

A proposta deste trabalho, é apresentar um equipamento que se destina a aprimorar o diagnóstico das oficinas, possibilitando o uso dos dados da rede para a leitura do NOx em g/kWh e que se fazem significativas em condições de carga não atingidas com

o veículo estático. Como diferencial do produto, tem-se a utilização de um sensor NOx automotivo aferido adicionado ao sistema, de modo a dissociar possíveis falhas de leitura do sensor do veículo e permitir a quantificação em veículos que não possuem esse sensor.

Desta forma, tem-se uma modalidade de PEMS (do inglês, *Portable Emission Measurement System*) de custo acessível, capaz de ser empregado na detecção de falhas iminentes de componentes (marginal à detecção via OBD) e na materialização de fraudes por inibição do sistema de controle da poluição, caracterizadas por alta emissão em condições normais de uso.

2. Metodologia

Diferentemente da fase P-8 do PROCONVE, que estipula comprovação de atendimento dos limites de emissão em serviço (ISC, do inglês *In-Service Conformity*), não há provisão para testes em veículos na fase P-7. Desta forma, metodologias desenvolvidas para ISC como MWA (janela de média móvel) quando aplicadas diretamente a veículos não desenvolvidos para atendimento destes requisitos podem levar a níveis de emissão em condições reais muito superiores aos limites de homologação, como mostrado em [7].

Os requisitos da P-7 se resumem ao atendimento dos limites impostos (2,0 g/kW.h para NOx) em ciclos padrão estacionário e transiente (ESC / ETC). O ciclo ESC (*European Stationary Cycle*) constitui-se de 13 pontos de operação, dos quais 1 corresponde a marcha lenta e 12 divididos em 3 grupos de velocidade angular para 4 patamares de carga (25, 50, 75 e 100%). As velocidades são calculadas com base na curva de plena carga do motor, tomando as velocidades de referência acima e abaixo da velocidade de potência nominal, para ocorrência de 70 e 50% da potência respectivamente. O NOx tester determina estas velocidades a partir da curva de torque de referência lida da central de controle motor e as indica para condução do teste naquele veículo.

Busca-se então manter uma das velocidades indicadas para o motor e a carga acima de 25%, por alguns minutos (1 a 3 minutos) de modo a identificar períodos de operação similares ao ESC durante o tráfego em veículo. Assim, é possível comparar a performance de emissão aos limites de detecção OBD de 3,5 e 7,0 g/kW.h de NOx.

Este procedimento foi aplicado a 10 veículos, sendo que 5 puderam ser avaliados em dinamômetro de rolo, enquanto 5 foram apenas avaliados em vias públicas. A seguir são apresentadas as equações utilizadas para o cálculo em g/kW.h.

2.1. Princípio de funcionamento e equacionamento

O NOx Tester se baseia na leitura dos parâmetros de funcionamento do motor via conector OBDII (rpm, carga, vazão de combustível, etc.) e na utilização de um sensor automotivo de NOx, não sendo necessário a desmontagem de nenhuma parte do veículo em análise. A Figura 1 mostra um dos adaptadores disponíveis para montagem do sensor na ponteira do veículo.

O sensor é aferido com gás padrão de concentração conhecida para garantir que sua leitura atente aos limites declarados pelo fabricante de $\pm 10\text{ppm}$ a $\leq 100\text{ ppm}$ de NO_x e $\pm 10\%$ até 1500 ppm . O sensor reporta ainda percentual de oxigênio (O_2) na exaustão, que é utilizado para determinação do fator lambda. A Figura 2 mostra as variáveis típicas medidas.



Figura 1 – Adaptador do sensor de NO_x para ser inserido na ponteira do escapamento do veículo avaliado.

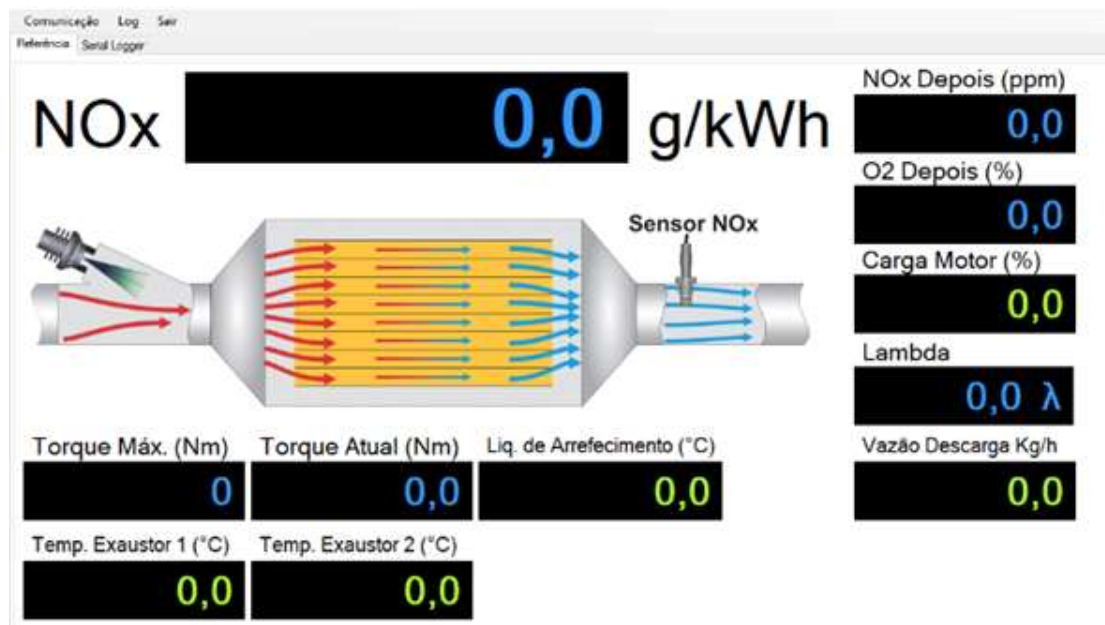


Figura 2 - Tela de interface do equipamento de medição Nox Tester.

Analisadores de gases ou sondas, baseiam-se no princípio da identificação da fração molar (equivalente a percentual ou partes por milhão - ppm) do gás analisado em uma mistura. Para a conversão da concentração dos gases para emissões específicas (E_{esp}), a Diretiva 1999/96 do Parlamento Europeu adota a formulação descrita pela seguinte equação (simplificada para um ponto de operação):

$$E_{esp} = \frac{m_{esc} \cdot c_{gas} \cdot u_{gas} \cdot K_{HD}}{P} \quad (1)$$

Onde m_{esc} representa a vazão mássica dos gases de escape (kg/h), P a potência líquida (kW) desenvolvida pelo motor, c_{gas} a concentração do gás (p.p.m), K_{HD} o fator de correção para umidade do ar ambiente e u_{gas} sua densidade relativa aos gases de escape, dada pela *Tabela 1*:

Tabela 1- valores de u_{gas} para amostragem não diluídas, combustível diesel:

NOx	CO	THC/NMHC
0,001587	0,000966	0,000479

- Valores u baseados nas propriedades ideais do gás e combustível a $\lambda = 2$, ar seco, 273 K, 101,3 kPa;

Esta simplificação considera que a umidade do gás de exaustão é retirada, o que corresponde a prática padrão em analisadores de NOx baseados no princípio da quimioluminescência (CLD). No caso do sensor automotivo, os autores não encontraram afirmações assertivas quanto a base de medição, porém publicações do fabricante do elemento sensor [7 e 8] apresentam diagramas e comparações com analisadores CLD que sugerem que a célula de zircônia onde o NOx é quantificado não é permeada por água, levando a conclusão de que esta reporta ppm em base seca.

Existe ainda uma provisão para correção de NOx considerando o efeito da umidade do ar (K_{HD}), porém nem todos os veículos possuem este sensor. Optou-se então por desconsiderar essa parcela neste trabalho uma vez que o efeito de K_{HD} no resultado das emissões específicas é da ordem de ~2%, sendo relevante sobretudo em processos de homologação de motores.

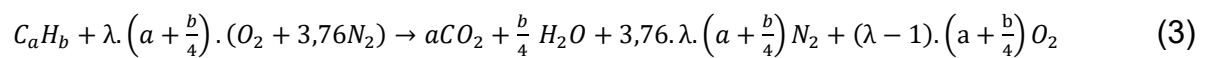
Outro ponto a ser considerado é a simplificação na diretiva de que todo NO é agregado como NO₂ (massa molecular $MMNO_x = 46$ g/mol), para fins de cálculo de massa emitida. Isto, na verdade, não afeta o cálculo a partir dos dados da sonda, uma vez que não há diferenciação entre as frações de NO ou NO₂, sendo reportado simplesmente ppm de NOx.

Ainda, é conhecida pelos autores a sensibilidade cruzada do sensor a presença de amônia (NH₃), que será reportada como NOx pela oxidação do NH₃ nas células eletroquímicas do sensor na proporção de 1 para 1. Contudo, uma quantidade significativa de NH₃ (>25 ppm) e lida como NOx nada mais do que reforça as suspeitas de problemas no sistema SCR, que intrinsecamente são desenhados para uma baixa perda de amônia.

Tendo em vista estas observações, temos que a massa de NOx emitida por hora pode ser estimada por:

$$NO_x = \frac{mesc \left[\frac{kg}{h} \right] \cdot 10^3 \cdot NO_x [p.p.m.] \cdot 10^{-6} \cdot MMNO_x \left[\frac{g}{mol} \right]}{MMesc \left[\frac{g}{mol} \right]} \quad [g/h] \quad (2)$$

Para definir-se a massa molecular média no escapamento, analisamos uma reação entre um combustível e um oxidante e avaliamos seus produtos. Tem-se a reação estequiométrica quando os produtos da combustão são apenas nitrogênio molecular (N₂), dióxido de carbono (CO₂) e água (H₂O), sendo desconsiderados, para fins de definição, os efeitos de dissociação. Desta forma, a equação de balanceamento para um hidrocarboneto genérico (C_aH_b) em combustão com o ar atmosférico é dada por:



O fator lambda de excesso de ar (λ) corresponde à fração dos quocientes entre as massas de ar e combustível admitidas (A/C_{real}) em relação à razão teórica (A/C_{esteq}) para combustão completa dos reagentes. Para $\lambda < 1$, existe combustível em excesso e para $\lambda > 1$, ar em excesso.

$$\lambda = \frac{A/C_{real}}{A/C_{esteq}} \quad (4)$$

O valor da razão entre as massas de ar e combustível estequiométrica (A/C_{esteq}) teórica é calculado apenas em função dos coeficientes a e b de um hidrocarboneto genérico (C_aH_b), ou ainda pela razão entre o número de átomos de hidrogênio e carbono ($y = a/b$). Fazendo-se a=1:

$$A/C_{esteq} = \frac{\left(1 + \frac{y}{4} \right) \cdot (32 + 3,76 \cdot 28)}{12 + y} \quad (5)$$

Para o diesel, uma molécula típica de hidrocarboneto é dada por C_{13,2}H_{24,4} (y=1,848) [10], sendo $\approx 14,57$ a razão A/C_{est} .

Nota-se, portanto, que a composição e a massa molar dos gases de escape são função da razão Hidrogênio/Carbono do combustível e o fator de excesso de ar. Para o diesel típico (y=1,848), calculou-se MMesc a partir do percentual de O₂% no escapamento como sendo (Figura 3):

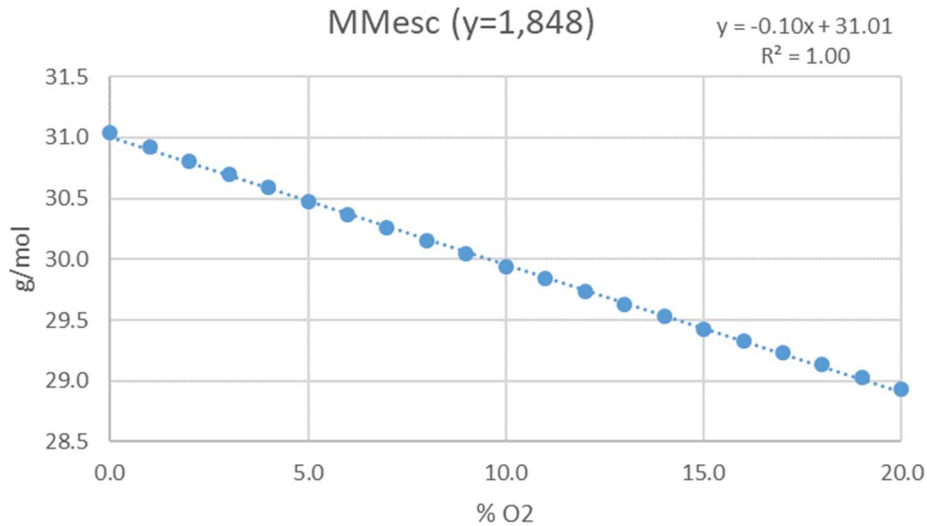


Figura 3 – massa molar da exaustão em função da fração de O₂.

Reescrevendo a eq. (2):

$$NO_x = \frac{m_{esc} \left[\frac{kg}{h} \right] \cdot NO_x \cdot [ppm] \cdot 46 \left[\frac{g}{mol} \right]}{(31 - O_2[\%]/10) \cdot 10^3} \quad [g/h] \quad (6)$$

Deste modo, tem-se que a vazão mássica de NO_x depende apenas das concentrações de O₂ e NO_x medidas pela sonda e da vazão mássica de escape.

2.1.1. Estimativa da vazão de escape

Sistemas PEMS requerem dispositivos de medição dessa vazão (tubos de Pitot, medidores ultra-sônicos, etc.) o que requer instalações complexas com adição de trechos retos de tubulação, além de encarecer o sistema. Optou-se por estimar esta vazão a partir dos dados disponíveis no barramento CAN do conector OBDII utilizando-se dos mesmos artifícios das estratégias de controle motor. Alguns sistemas reportam até mesmo esta vazão de escape, contudo quando não disponíveis as seguintes alternativas foram utilizadas:

a) Através da vazão de admissão e de combustível

A alternativa mais conveniente é somar a vazão de ar m_{ar} [kg/h] a de combustível q_{comb} [l/h] convertida em massa pela densidade típica do diesel (0,815 a 0,850 kg/l para diesel S10, segundo resolução ANP Resolução ANP N° 50/201)

$$\dot{m}_{esc} = \dot{m}_{ar} \left[\frac{kg}{h} \right] + \dot{q}_{comb} \left[\frac{l}{h} \right] \cdot \rho_{comb} \left[\frac{kg}{l} \right] \quad \left[\frac{kg}{h} \right] \quad (7)$$

A densidade utilizada do diesel é $\rho_{comb} = 0,833 \text{ kg/l}$ (conforme figura na resolução Conama n° 403, de 11 de novembro de 2008).

b) estimativa direta pelo fator lambda e vazão de combustível

Uma vez que a sonda de NOx transmite ainda o percentual de O₂ no escapamento, é possível estimar a vazão de escape através da relação:

$$\dot{m}_{esc} = \left(1 + \frac{A}{F_{est}} \right) \cdot \lambda \cdot \dot{q}_{comb} \left[\frac{l}{h} \right] \cdot \rho_{comb} \left[\frac{kg}{l} \right] \quad \left[\frac{kg}{h} \right] \quad (8)$$

O fator lambda no escape medido a partir da concentração de O₂ (%) e y é dado por:

$$\lambda = \frac{1 + \frac{O_2}{100} \cdot \left[\left(\frac{4+2y}{4+y} \right) - 1 \right]}{\left[1 - \frac{4,76 \cdot O_2}{100} \right]} \quad (9)$$

Substituindo y pelo valor típico para diesel (y=1,848), tem-se a forma simplificada:

$$\lambda = \frac{1 + \frac{0,3161 \cdot O_2}{100}}{\left[1 - \frac{4,76 \cdot O_2}{100} \right]} \quad (10)$$

Sendo %O₂ disponível na mensagem do sensor de NOx.

Convém observar que o fator lambda cresce acentuadamente para O₂ >17%, situação típica de corte de injeção ou baixa carga. Isto pode gerar valores de vazão de ar calculadas errôneas. Nestes casos, utiliza-se o menor valor de vazão de ar entre a equação 8 (com $\eta_v \sim 0,85$) e a equação 10.

c) pela eficiência volumétrica

A partir do volume de ar deslocado pelo motor (Vd), é possível estimar a vazão de ar considerando a densidade do ar no pórtico de admissão:

$$\dot{m}_{ar} = \frac{\eta_v \cdot Vd \cdot rpm \cdot 60}{2} \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{ar} \quad [kg/h] \quad (11)$$

onde o volume deslocado corresponde ao volume dos cilindros somados (ex. 13 L) e η_v a eficiência volumétrica do processo (tipicamente $\sim 0,85$, mas dependente da geometria do motor e rpm). A densidade do ar é dada por:

$$\rho_{ar} = \frac{p \cdot 10^3}{R \cdot (T + 273)} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (12)$$

Sendo do $R = 287,058 \text{ (J)/(Kg.K)}$, p a pressão absoluta no coletor de admissão [kPa] e T [°C] a temperatura no coletor de admissão.

2.1.2. Estimativa da potência

A potência é calculada a partir do torque atual T [N.m] e velocidade do motor:

$$P = \frac{2 \cdot \pi \cdot N \text{ [rpm]} \cdot T \text{ [N.m]}}{60 \cdot 1000} \quad [\text{kW}] \quad (13)$$

O torque atual líquido é calculado a partir de uma fração do torque de referência (T_{ref}) do motor, descontado do torque de fricção:

$$T = (T\% - Tf\%) * T_{ref} \quad [\text{N.m}] \quad (14)$$

2.2. Dinamômetro de rolo inercial e veículos utilizados

Utilizou-se dois dinamômetros de rolo SERVITEC modelo 2035, em duas oficinas diferentes. O dinamômetro é apenas responsável pela aplicação da carga para teste em velocidade constante, sendo que os dados de potência dissipada e velocidade do rolo não são consideradas nas análises.

Dois veículos sem indicação de falha no pós-tratamento foram avaliados em Pirassununga-SP. Ambos de mesma potência nominal 440 hp (324 kW), mas de fabricantes diferentes (A e B). A Figura 4 mostra um dos veículos ancorado e sendo instrumentado para os testes.



Figura 4 – Veículo 440hp, marca A ancorado para avaliação em dinamômetro de rolo em Pirassununga-SP.

Já um veículo de um fabricante C foi à oficina em Limeira-SP com falhas de eficiência de conversão catalítica e limitação de torque ativos (códigos 2272 e 2273), indicando que os limites de 3,5 e 7,0 g/kWh estavam sendo excedidos. Foi possível avaliar o desempenho antes e depois do reparo, que consistiu na troca do catalisador e substituição do ARLA32. Este último foi reprovado no teste colorimétrico utilizando o reagente denominado Negro de Eriocromo T.

Também em Limeira, foram testados dois veículos de um fabricante D sem indicação de falha. Estes se diferenciam dos demais pela tecnologia de controle de emissões por EGR, inerente aos motores que o equipam. Mesmo por isso, não se incluí nos resultados a temperatura de exaustão- crítica em sistemas SCR – sendo incluído em seu lugar o percentual de oxigênio medido pelo sensor NOx.

2.3 Testes em vias públicas e veículos utilizados

Para esta avaliação, um caminhão, também do fabricante C (com pós-tratamento SCR) e 2 veículos de um fabricante D (com tecnologia de emissões EGR) trafegaram na rodovia Presidente Dutra (BR-116) entre Guaratinguetá – SP e Queluz – SP. Em todos, não havia indicação de falhas nos sistemas de controle de emissões.

3. Resultados

Todos os resultados apresentados foram gravados após um período de aquecimento dos motores, com temperatura do líquido de arrefecimento estável e superior a 80°C. A aquisição de dados se deu a taxas variáveis, a uma frequência de 1 a 20Hz, a depender da atualização das mensagens CAN.

3.1 Dinamômetro de rolo inercial

Nos testes em dinamômetro, não se dispunha de refrigeração forçada, o que limitou as máximas potenciais desenvolvidas em aproximadamente metade da nominal dos veículos. Ainda assim, foi possível avaliar as características dos sistemas SCR testados.

3.1.1. Veículo 440 hp, marca A

O veículo 440 hp da marca A foi testado exaustivamente dentro dos limites de segurança do local de instalação do dinamômetro. O controle de carga permitiu a manutenção da velocidade do motor dentro de uma faixa de ± 50 RPM e com uma variação da temperatura de exaustão $< \pm 10$ °C na janela de medição de um minuto. A tabela resume os resultados que excursionam nos pontos intermediários do ciclo ESC (RPM de referência para este motor entre 1300 e 1800 r/min). Em termos de potência do motor, o máximo patamar indicado pela unidade de controle foi de 147 kW, metade do nominal. O cálculo da vazão de escape se baseou na vazão de combustível estimada pela central de controle motor e o fator lambda medido.

Tabela 2- Resultados do veículo 440 hp da marca A

RPM r/min	Carga %	T. Exaustão °C	NOx g/kW.h	σ NOx* g/kW.h
1300	27	242	5,3	0,4
1300	48	265	5,1	0,3
1300	51	270	2,1	0,6
1400	57	319	1,4	0,1
1400	59	327	1,8	0,2
1600	53	208	9,5	0,1
1600	55	259	3,9	0,3
1800	48	282	4,8	0,6
1800	48	312	2,7	0,2

*desvio padrão em 1 minuto de medição

É possível identificar que não há injeção de ARLA para o ponto 1600 RPM e 53% de carga, portanto estratégia de injeção de ARLA32 é habilitada para níveis de temperatura de exaustão superiores a ~ 240 °C. As melhores eficiência de conversão observadas para temperaturas superiores a 300°C. Possivelmente os pontos de mais alta carga no ESC compensarão as deficiências de conversão das baixas carga, uma vez que se limita a injeção de ARLA32 em baixas temperaturas de catalisador. Desta forma conclui-se que sendo atingidos níveis de emissões inferiores a 2 g/kW.h

consistentemente em alguns pontos, o sistema está operante e sem contaminação crítica.

Deve-se enfatizar que, apesar de a média destas medições ficarem acima do patamar de 3,5 g/kW.h, os requisitos brandos de OBD da fase P-7 não exigem que seja apontada uma falha dentro desta avaliação subjetiva e com maior propensão a pontos de média e baixa carga, de modo que estratégias dos fabricantes no sentido de conservar a integridade do sistema nestas situações são aceitáveis.

3.1.2. Veículo 440 hp, marca B

O veículo 440 hp da marca B foi testado apenas no patamar de 1100 RPM, devido a limitada disponibilidade deste. Diferentemente do primeiro veículo, o patamar de carga atingido nessa velocidade foi maior (até 88%), com uma máxima potência indicada de 157 kW. A velocidade do motor se manteve na faixa de ± 30 RPM e a temperatura de exaustão numa faixa mais esteira de ± 7 °C, o que reduziu a dispersão dos resultados de NOx.

Tabela 3- Resultados do veículo 440 hp da marca B

RPM	Carga	T. Exaustão	NOx	σ NOx*
r/min	%	°C	g/kW.h	g/kW.h
1100	18	161	10,1	0,1
1100	34	194	9,4	0,1
1100	54	252	9,2	0,1
1100	71	312	1,7	0,1
1100	88	336	0,8	0,1

*desvio padrão em 1 minuto de medição

Outro ponto que contribuiu para a menor dispersão nos resultados de NOx foi o cálculo da vazão de escape, que - pela ausência da vazão de combustível na rede CAN - foi estimada pelo método da eficiência volumétrica. Este método, porém, está sujeito incerteza inerente ao coeficiente de eficiência volumétrica escolhido.

Dos dados da Tabela 3, observa-se que a injeção de ARLA32 ocorre apenas para temperatura de exaustão superiores a ~ 260 °C e novamente as melhores eficiência de conversão foram observadas para temperaturas superiores a 300°C. Conclui-se que o sistema de controle de emissões se encontra operante e com performance satisfatória. Foi possível observar excelentes eficiências de conversão em alguns pontos, atestando a integridade do sistema de pós-tratamento.

3.1.3. Veículo 190 hp, marca C

O veículo 190 hp (marca C) apresentava indicação de falha no sistema SCR, com limitação de potência ativa. Antes e após o reparo, foi possível avaliar um ponto de operação de 90% de carga a 1800 RPM, sendo atingidas temperaturas de exaustão próximas a 350°C.

Tabela 4- Resultados do veículo 190 hp (marca C) a 1800 RPM e 90% de carga:

Condição	T. Exaustão °C	NOx g/kW.h	σ g/kW.h
Com avaria	355	9,2	0,2
Após reparo	349	1,4	0,3

Devido a condição de contaminação e adulteração de ARLA32, não é possível diferenciar o resultado de NO_x entre emissões de NO_x ou NH₃. Após a substituição do catalisador por um novo e da troca do agente redutor, foi possível verificar que os valores lidos pelo equipamento estavam dentro dos limites da fase P-7.

3.1.4. Veículo 230 hp, marca D

O veículo 230 hp (marca D) teve suas emissões próximas aos limites P7, sendo visível a correlação entre o percentual de oxigênio e emissões de NO_x, uma vez que os menores níveis de emissão ocorrem para O₂ < 8%, indicando a o efeito da recirculação dos gases de escape.

Tabela 5- Resumo dos resultados em dinamômetro de rolo do veículo 230 hp (marca D) e correspondente desvio padrão para o período de medição.

RPM r/min	Carga %	σ %	O ₂ %	σ %	NOx g/kW.h	σ g/kW.h
1442	66	3	7,5	0,5	1,4	0,2
1615	80	4	6,0	1,0	1,6	0,3
1772	62	5	8,5	1,7	1,8	0,2
2010	85	7	6,0	2,0	1,8	0,4
2220	53	3	10,2	1,3	4,5	0,3

3.1.5. Veículo 190 hp, marca D

O veículo 190 hp (marca D) não apresentava avaria. Contudo, como indica a tabela 6, suas emissões se mostraram muito superiores aos limites P7. O elevado teor de oxigênio (> 9%) sugere que o sistema EGR se encontra inoperante. Como os serviços a serem efetuados no caminhão não contemplavam o sistema de controle de emissões, não foram efetuadas averiguações ou reparos neste.

Tabela 6- Resumo dos resultados em dinamômetro de rolo do veículo 190 hp (marca D) e correspondente desvio padrão para o período de medição.

RPM	Carga	σ	O ₂	σ	NOx	σ
r/min	%	%	%	%	g/kW.h	g/kW.h
1550	41	1	13,0	0,5	10,6	0,2
1550	57	2	9,0	1,0	10,5	0,2
1808	38	1	14,0	1,0	9,3	0,4
2295	73	13	9,6	1,3	13,3	2,4
2496	81	18	10,4	3,2	12,5	3,0

3.2 Testes em vias públicas

3.2.1. Veículo 290 hp, marca C

O veículo 290 hp (marca C) possui com pós-tratamento do tipo SCR. Está equipado com implemento tipo “Baú”, porém vazio. Mesmo sem carga útil, foi possível atingir níveis de carregamento do motor bastante razoáveis, graças à topografia da via Dutra no trecho percorrido.

Apesar da grande dispersão dos resultados de NOx - cujo desvio padrão é da mesma ordem da grandeza medida - o veículo apresentou consistentemente níveis de emissão abaixo do requerido para detecção OBD (3,5 g/kW.h), constatando-se a eficácia do sistema em condições normais de uso.

Tabela 7- Resumo dos testes em vias públicas do veículo 290 hp (marca C) e correspondente desvio padrão para o período de medição.

RPM	σ	Carga	σ	T. Exaustão	σ	NOx	σ
r/min	r/min	%	%	°C	°C	g/kW.h	g/kW.h
1375	28	65	16	298	12	1,2	0,4
1372	20	66	15	292	6	1,5	2,3
1382	14	43	11	255	9	1,1	0,3
1372	31	47	20	261	14	2,8	1,6
1662	95	65	21	302	47	1,6	1,3
1601	31	21	21	218	13	3,3	1,4
1796	41	51	26	330	16	1,5	1,1

3.2.2. Veículo 190 hp, marca D

Um ônibus escolar com motorização 190 hp e sistema EGR foi testado apenas com o peso do encarroçamento e teve suas emissões superiores aos limites de detecção OBD, sem, contudo, apresentar falhas no painel ou scanner.

Tabela 8- Resumo dos testes em vias públicas ônibus escolar 190 hp (marca D) e correspondente desvio padrão para o período de medição.

RPM	σ	Carga	σ	O ₂	σ	NOx	σ
r/min	r/min	%	%	%	%	g/kW.h	g/kW.h
1493	29	79	11	6,8	1,7	8,5	1,7
1773	40	73	14	6,9	2,2	7,8	2,1
2295	27	73	13	9,6	1,3	13,3	2,4
2438	26	81	18	10,4	3,2	12,5	2,9

Nota-se uma grande dispersão dos resultados de NOx, que pode ser em parte atribuída à operação do sistema EGR em condições de carga variável.

3.2.2. Veículo 280 hp, marca D

O implemento de coleta de lixo urbano conferiu a este caminhão uma carga de aproximadamente 6 toneladas. Novamente os níveis de NOx foram superiores aos regulamentados.

Tabela 9- Resumo dos testes em vias públicas do veículo 280 hp (marca D) e correspondente desvio padrão para o período de medição.

RPM	σ	Carga	σ	O ₂	σ	NOx	σ
r/min	r/min	%	%	%	%	g/kW.h	g/kW.h
1350	30	64	3	8,2	0,9	7,0	1,4
1380	90	57	5	9,3	2,1	8,0	4,8
1435	144	62	3	8,8	1,9	6,5	1,5
1550	48	71	16	6,4	2,3	4,1	2,2
1635	33	65	5	7,4	1,3	4,5	1,3
1829	43	43	30	11,4	3,2	6,8	3,0
1791	55	55	11	6,1	2,9	3,9	2,5

Na investigação de possíveis causas para este resultado, a avaliação mecânica e elétrica dos componentes do EGR não revelou nenhuma anomalia. Já a hipótese de alterações no programa de controle da ECU não está descartada, mas há indícios de que um controle parcial das emissões de NOx é realizado, uma vez que seus menores níveis coincidem com um baixo percentual de O₂ na exaustão (atuação do EGR).

Ainda mais preocupante é o fato de que em nenhum dos pontos avaliados o nível de emissões ficou abaixo do limite de detecção OBD de 3,5 g/kW.h, não havendo, contudo, a indicação de falha. Ou seja, apesar de haver a emissão significativa de NOx, a fiscalização deste veículo com os artifícios atuais não constataria infração, pois não há indicação de falha ativa no painel.

Conclusão

O equipamento mostrou-se apropriado para de verificação do nível de emissões do gás NOx em g/kW.h nos motores diesel avaliados. Para verificação da eficácia dos sistemas de controle de poluição, observou-se a necessidade de aplicação de uma carga relevante ao motor (por exemplo >40%), e que a avaliação considere as particularidades operacionais de cada sistema. Em especial, as temperaturas de exaustão devem ser tais que possibilitem a injeção de ARLA32, sendo um valor típico

o nível de 280°C. Nos veículos com sistema EGR, além da indicação de NOx, tem se no percentual de oxigênio uma relevante variável para análise do sistema.

O equipamento demonstrou ainda a habilidade de identificar transgressões materializadas em campo pela quantificação das emissões, reduzindo a dependência dos agentes de fiscalização na operabilidade de funções de diagnóstico embarcado.

Agradecimentos

Agradecemos à Mercuri Diesel (Limeira -SP) e à Dieselp Diesel Center (Pirassununga – SP) por gentilmente ceder os dinamômetros, suas instalações e o auxílio de seu corpo técnico para o desenvolvimento deste trabalho. Da mesma forma, nosso muito obrigado aos técnicos da Oficina Formigoni Diesel (Lins – SP) e a Tecnotruck (Guaratinguetá – SP) pelo auxílio na instrumentação e por nos acompanhar nos testes.

Referências

- [1] COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. “Relatório da operação de fiscalização de ARLA 32”. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2013/12/Relat%C3%B3rio-da-Opera%C3%A7%C3%A3o-de-Fiscaliza%C3%A7%C3%A3o-de-ARLA-32-.pdf> Acesso em: 02/04/2020
- [2] MELO, Tadeu C. C. *et al.* “Efeito da qualidade da solução de ARLA 32 na eficiência do SCR, nas emissões de nox e no sistema de injeção de ARLA”. Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva (2015).
- [3] ANFAVEA, “Séries mensais, a partir de janeiro/1957, de autoveículos por segmento (automóveis, comerciais leves, caminhões, ônibus, total) de produção; licenciamento de nacionais, importados e total; exportações em unidades”. Disponível em: <http://www.anfavea.com.br/estatisticas>. Acesso em: 02/04/2020
- [4] MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE “Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013: Ano-base 2012”. Disponível em: http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/inventario_de_emissoes_por_veiculos_rodoviaros_2013.pdf Acesso em: 02/04/2020
- [5] POSADA, Francisco; MILLER, Josh. “Norma PROCONVE P-8 de emissões no Brasil”. Disponível em: https://theicct.org/sites/default/files/publications/P8_emission_Brazil_policyupdate_20190227.pdf Acesso em: 02/04/2020
- [6] FAÇANHA, Cristiano; GOULD, Ben; POSADA, Francisco. “Deficiências no programa PROCONVE P-7 brasileiro e o caso para normas P-8”. Disponível em:

https://theicct.org/sites/default/files/Brazil%20P-7%20Briefing%20Paper_PG_vFinal.pdf Acesso em: 02/04/2020

[7] KO, Sangchul et al. "NOx Emissions from Euro 5 and Euro 6 Heavy-Duty Diesel Vehicles under Real Driving Conditions" *Energies* 2020, 13(1), 218; doi:10.3390/en13010218

[8] NGK Insulators, Ltd., "Bringing the world's first high-precision NOx sensor to market", e Disponível em: https://www.ngk-insulators.com/en/news/20080611_9229.html Acesso em: 02/04/2020

[9] KATO, Nobuhide; NAKAGAKI, Kunihiro; INA, Noriyuki. "*Thick Film ZrO₂ NOx Sensor*". *SAE Technical Paper Series*. doi:10.4271/960334

[10] CHALLEN, Bernard.; BARANUESCU, Rodica. "Diesel engine reference book". 2 ed. Oxford: Butterworth-Heinemann. 1999. 714p.