

CORRELAÇÃO DE PARÂMETROS DE CONDUÇÃO NO DESEMPENHO E EMISSÕES VEICULARES

Lucas Daniel Silva Leal, leal.lucas@hotmail.com.br¹
Vinícius Rückert Roso, vinicius.roso@mecanica.ufsm.br¹
Carlos Eduardo Castilla Alvarez, ing.carlos.ufps@gmail.com¹
Fabrício José Pacheco Pujatti, pujatti@demec.ufmg.br¹
Ramon Molina Valle, ramon@demec.ufmg.br¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC), Av. Presidente Antônio Carlos 6627, Pampulha, Belo Horizonte - MG

Resumo: A expansão urbana, em especial nas grandes cidades, aliado à má qualidade do transporte urbano tem incentivado o aumento do número de veículos de passageiros nas ruas. Com isso, legislações cada vez mais restritas impõem limites de emissões de gases para as montadoras afim de manter a qualidade do ar atmosférico. Entretanto, os procedimentos de ensaios veiculares, que são variáveis em acordo com a legislação de cada país, abrangem diferentes condições de condução que, em muitas vezes, não representam o observado em condições reais. Estas estimativas também são utilizadas para a elaboração de inventários nacionais de emissões, que acabam por distorcer a real qualidade do ar atmosférico. Diante disto, o objetivo deste trabalho está em realizar comparações através de simulações computacionais entre os ciclos de condução utilizados na homologação de veículos de passeio leve em diferentes países, evidenciando as características de cada um dos ciclos e o impacto destes nas emissões dos principais gases de exaustão, como NO_x, HC e CO. As análises revelam significativas variações entre as frequências de aceleração, velocidades médias e energia dispensada no desenvolvimento dos ciclos padrão de condução, em função da divergência entre o adotado para homologação nos diversos países e o observado em condições reais de operação.

Palavras-chave: ciclos de condução, emissões veiculares, simulação computacional

1. INTRODUÇÃO

O número de veículos leves cresce a cada ano, fazendo com que o total de energia consumida pelo setor de transportes tenha sido dobrado nos últimos 30 anos (Dulac, 2012). O setor de transportes é um dos principais responsáveis pelo uso da energia total produzida no mundo. Grande parte dessa energia provém de fontes fósseis, sendo aproximadamente 95% da energia consumida mundialmente (Chow, 2003). O setor de transportes é um dos principais responsáveis pelas emissões de CO₂ proveniente da queima de combustíveis fósseis e, segundo Timilsina and Shrestha (Timilsina e Shrestha, 2009), houve um crescimento médio de 5,3% ao ano das emissões em massa de CO₂ na Ásia, considerando o período de 1980 a 2005.

Devido a isso, as legislações referentes às emissões de poluentes têm sido intensificadas, reduzindo os limites e criando programas que incentivam os fabricantes de veículos a reduzir não só as emissões como também o consumo de combustível. No Brasil, o PROCONVE – Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores – é o programa que determina os objetivos a serem atingidos pelas montadoras. Atualmente, o programa se encontra na fase L-6, que se iniciou em 2014. Nesta fase, os limites para automóveis são 1,3 g/km para o CO (Monóxido de Carbono); 0,30 g/km para HC (Hidrocarbonetos Totais); 0,05 g/km para NMHC (hidrocarbonetos não-metano); 0,08 g/km de NO_x (Óxidos de Nitrogênio) e 0,02 g/km de Aldeídos e Cetonas (Szwarcfiter *et al.*, 2005).

No Brasil, o procedimento de ensaio de emissões veiculares é regulamentado pela norma ABNT NBR 6601 (Abnt, 2012) que, juntamente com outras normas adicionais, regulamentam as condições necessárias para a execução do teste de forma válida. A realização do procedimento consiste na execução de um ciclo de condução veicular em uma célula contendo equipamentos que simulem as forças de resistência ao movimento (como um dinamômetro de chassi) e um sistema que realiza a captação dos gases provenientes da combustão do motor no escapamento do veículo. Para tanto, o veículo deve ser abastecido com combustível padronizado por norma, para então ser conduzido através do ciclo padrão (no caso o FTP-75) em dinamômetro de chassi. Durante o teste, os gases provenientes do escapamento devem ser coletados por um sistema de amostragem constante sendo enviados à sacos de amostragem. Posteriormente, o conteúdo armazenado é analisado e são calculadas as emissões e a autonomia do veículo em teste.

Os ciclos de condução utilizados para homologação apresentam condições de operação do veículo quando submetido à situações urbanas e de rodovia, e em geral baseiam-se no tipo de veículo (motocicleta, carro, ônibus, etc). O objetivo do uso de ciclos padrão é tornar possível a medição e controle das emissões veiculares através da realização de testes em laboratório, utilizando-os como mapa de velocidades a ser seguido pelo condutor na execução do teste. Foram avaliadas as influências (Joumard *et al.*, 2000) de ciclos de condução na quantificação das emissões por veículos de passageiros, tendo sido estudados 36 ciclos de condução reais e padronizados, apontando para desvios de até 50% nas emissões com o uso de ciclos inadequados.

As características das condições geográficas das cidades, bem como os diferentes padrões de mobilidade urbana em cada uma são fatores que levam a divergências entre os resultados encontrados em ciclos de homologação e os resultados obtidos em condições reais (André *et al.*, 2006). Com isso, a criação de ciclos de condução baseados em dados obtidos em vias reais se torna necessária para uma melhor adaptação desses parâmetros aos padrões de utilização dos veículos leves atuais. Vários autores têm se dedicado a criação destes ciclos de condução veicular específicos para diversas cidades e meios de transporte, como, por exemplo, Hong Kong (Hung *et al.*, 2005), Edinburgh (Esteves-Booth *et al.*, 2001), Chennai (Nesamani e Subramanian, 2011) e São Paulo (Maciel Filho, 2013).

A partir do estado da arte, em busca de maiores aproximações entre os ciclos padrões e os ciclos reais, este trabalho tem como objetivo comparar os ciclos padrões e os ciclos reais desenvolvidos em diferentes regiões do mundo. Estas comparações serão feitas através de simulações computacionais, utilizando os parâmetros dos ciclos padrões utilizados por diversos países e os ciclos reais desenvolvidos por estudos realizados em cada país, em diferentes condições de utilização dos veículos leves. A partir disto, torna-se possível a discussão sobre quais são as possíveis causas das diferenças entre os resultados de emissões e consumo de combustível obtidos em condições de homologação e em condições reais de utilização dos veículos leves de passageiros.

1.1. Ciclos padrões de condução

Criado nos Estados Unidos, o Federal Test Procedure - FTP-75, representa a condição de circulação em vias urbanas para testes de certificação de emissões de veículos leves. No Brasil, os ciclos de condução urbano e estrada são exatamente os ciclos utilizados nos Estados Unidos, sendo o ciclo urbano abordado na norma ABNT NBR-6601. O ciclo FTP-75 possui uma velocidade média de 34,2 km/h e duração de 1877 segundos.

Na Europa, o ciclo de ensaio *New European Driving Cycle* (NEDC) é utilizado na certificação de emissões em veículos leves, tendo sido atualizado em 1997. O gráfico de velocidades do NEDC, é utilizado também em outros países, como por exemplo na Índia, onde o ciclo padrão é o *Indian Drive Cycle* (IDC). Porém, em 2014, países europeus, asiáticos, africanos e oceânicos realizaram um acordo objetivando a implementação do procedimento de ensaios de emissões *World Harmonized Light Vehicles Test Procedure* (WLTP), visando uma maior padronização dos resultados. Dentro das modificações implicadas pela adoção do WLTP está a atualização do ciclo NEDC para WLTC, que possui velocidades mais elevadas e maior distância percorrida. Isso resulta em maiores temperaturas dos gases de exaustão e reduz o impacto das emissões geradas nas condições onde o motor está frio (Marotta *et al.*, 2015). O WLTC possui três classes, divididas de acordo com a relação entre a potência e a massa do veículo. O ciclo que corresponde à maioria dos carros leves europeus é o WLTC classe 3, com velocidade média de 46,5 km/h, duração de 1800 segundos e distância total de 23,27 km.

1.2. Ciclos reais de condução veicular

Devido à constante variação das condições de tráfego nas grandes cidades, a representatividade dos testes utilizando ciclos padrões têm se distanciado cada vez mais da realidade, sendo necessárias novas pesquisas para buscar uma adaptação destes para as necessidades atuais (André, 2004). Várias metodologias para a determinação de novos ciclos têm sido estudadas. Em geral, os estudos baseiam-se em metodologias para a construção de novos ciclos, envolvendo a seleção das áreas urbanas, o período do dia, as velocidades mais representativas, a coleta desses dados e a aplicação destes ciclos em dinamômetro de chassi para comparação com resultados obtidos de ciclos já existentes (Tsai *et al.*, 2005).

Em 2016, Roso e Martins (Roso e Martins 2016) desenvolveram um ciclo real de condução na cidade de Santa Maria-RS, localizada ao sul do Brasil. O trajeto escolhido para o desenvolvimento do ciclo foi da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) até o centro da cidade, com dados coletados em várias condições de trânsito. Essa rota foi escolhida por ser representativa aos trajetos realizados pelos ônibus urbanos da cidade. Dentre as abordagens, destacam-se coletas de dados realizadas em dias consecutivos com veículo leve de passeio, resultando na criação de um ciclo cumulativo e um ciclo médio. Também foram coletados dados para veículos coletivos, sendo estes utilizados para a criação de ciclos específicos para ônibus urbanos. Foram avaliadas todas as medições e, posteriormente, criados ciclos reais médios e cumulativos para os diferentes meios de transporte. O ciclo cumulativo, obtido através da coleta em três dias consecutivos para veículos leves. O ciclo cumulativo apresentou velocidade média de aproximadamente 21 km/h, enquanto que, para a mesma base de dados, o ciclo médio apresentou 31 km/h.

Através de um veículo instrumentado, Kent (Kent *et al.*, 1978) coletou dados de condução em Sidney durante o período da manhã. Os dados foram registrados e analisados, sendo considerados para a estimativa de emissões veiculares na cidade. A partir dos dados de condução, uma síntese resultou no ciclo *Sidney Driving Cycle* (SDC),

de forma a representar os parâmetros estatísticos coletados. Em seguida, foi feita a comparação com o então ciclo padrão, FTP-75, apontando para valores de aceleração e velocidade média maiores no ciclo SDC.

Em 2006, Tzirakis *et al.* utilizaram um ciclo real desenvolvido através análise estatística de dados de GPS e acelerômetros, obtidos em veículos conduzidos em vias urbanas de Atenas durante dois anos, para realizar comparações das emissões de gases e consumo de combustível com o ciclo padrão NEDC (Tzirakis *et al.*, 2006). O ciclo obtido, chamado de *Athens Driving Cycle* (ADC), apresenta duração de 1160 segundos e distância total de 6512 metros.

Em Dublin, pesquisadores criaram um ciclo baseado em dados de velocidade coletados via tomada *On-Board Diagnostic* (OBD), durante a circulação em vias urbanas da cidade (Achour *et al.*, 2011). Para os experimentos, o veículo também era equipado com um sistema de análise de gás portátil, para que fossem medidas as emissões em rua e, posteriormente, comparadas às emissões previstas por simulação para validações dos métodos e modelos utilizados. Os dados considerados para o desenvolvimento do ciclo, foram obtidos em três horários diferentes, sendo dois onde o tráfego de carros na cidade era mais intenso e um onde o trânsito era pouco movimentado. As rotas utilizadas possuem aproximadamente 4 km de extensão.

Em 2001, foi apresentado uma proposta de um ciclo real para a cidade de Edimburgo, capital da Escócia (Esteves-Booth *et al.*, 2001). O ciclo foi obtido através do tratamento de dados obtidos de coletas de velocidades em tráfego real, posteriormente calculados através do método Traffic Flow Index (TRAFIX). O ciclo obtido, chamado de *Edinburgh Driving Cycle* (EDC), foi comparado com o ciclo padrão da época, o *European Cycle* (ECE). Ambos os ciclos possuem mesma velocidade média, distância percorrida e tempo de duração, porém, possuem divergências significativas no número de acelerações e desacelerações.

Na Índia, onde também está sendo adotado o WLTP assim como na Europa, têm-se uma preocupação em se quantificar qual a diferença entre as emissões no ciclo padrão e em condições reais. Em 2009, pesquisadores fizeram uma comparação entre o ciclo padrão, na época o IDC, e um ciclo real desenvolvido na cidade de Pune (Kamble *et al.*, 2009). A metodologia de desenvolvimento do ciclo baseou-se na coleta de dados de veículos de passageiro em rua, em rotas curtas e com paradas consecutivas, em diferentes condições de tráfego e com distâncias aproximadamente iguais entre si. O ciclo real de Pune possui velocidade média de 19,55 km/h, sendo menor que a do ciclo padrão IDC, que possui velocidade média de 21 km/h. Em 2016, após a apresentação do WLTC, foi desenvolvido um estudo de comparação (Kumar Pathak *et al.*, 2016) dos parâmetros de um ciclo real em relação ao WLTC e ao MIDC (derivado do NEDC, porém com velocidades máximas menores), via simulações de veículos de passageiros leves operando com gasolina. Neste trabalho, as coletas de dados foram realizadas em rotas reais com condições urbanas variadas, através de dados adquiridos por GPS e sensores de velocidade. Ao final, obtiveram-se três ciclos, diferentes em função das condições de tráfego: livre, médio e congestionado.

A cidade de Hong Kong, por ser uma das principais cidades chinesas, apresentou grandes mudanças na quantidade de veículos urbanos devido ao crescimento econômico do país. Devido a essas mudanças, foi desenvolvido, em 1999, um ciclo real, baseado em dados coletados utilizando um veículo instrumentado, movido à diesel, circulando em áreas urbanas de distritos de Hong Kong (Tong *et al.*, 1999). O ciclo obtido foi comparado com outros ciclos padrões, constatando-se que nenhum deles representaria satisfatoriamente as reais condições de circulação em Hong Kong. O ciclo sintetizado possui uma duração total de 1471 segundos e velocidade média de 15,48 km/h.

Em 2004 foi apontada uma possível mudança de circulação nas cidades do Delta do Rio das Pérolas (PRD), causada pela proposta da construção de uma ponte que interligaria as principais cidades, entre elas, Hong Kong (Hung *et al.*, 2005). Para a avaliação das mudanças de condições de dirigibilidade, foram coletados dados de circulação para diferentes condições de tráfego, todos os dias da semana. Em Hong Kong, a rota escolhida possui 16 km de extensão, estando entre um centro comercial e um centro residencial.

Cingapura é uma das cidades que mais emite CO₂ através do setor de transportes, tendo uma frota de aproximadamente 1 milhão de veículos (Ho *et al.*, 2014). A partir disso, Ho *et al.* desenvolveram um ciclo para que fossem melhor aproximadas as condições de uso real do veículo em comparação ao que era observado através do ciclo de homologação utilizado no país, no caso, o NEDC. O ciclo Singapore Drive Cycle (SDC) tem duração de 2400 segundos e apresentou resultados de emissões que divergem em até 47% em relação ao padrão NEDC.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho foi baseada na comparação entre ciclos padronizados por norma e ciclos desenvolvidos em condições reais de condução veicular. Para isso foram definidos os ciclos padrão utilizados no mundo, nos quais destacam-se os ciclos europeus *New European Driving Cycle* (NEDC) e *Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle* (WLTC) e o ciclo americano *Federal Test Procedure* (FTP-75). A partir destes, a pesquisa baseou-se em estudos reais de condução desenvolvidos nos países nos quais os citados ciclos padrão se aplicam (Kumar Pathak *et al.*, 2016). Estes ciclos reais, já apresentados anteriormente, foram desenvolvidos sob diferentes metodologias a fim de contemplar a realidade do tráfego em cada uma das regiões de estudo. Com isso, a metodologia deste trabalho é dividida em dois subitens, onde, no primeiro é abordada a comparação de características para cada um dos ciclos avaliados, seja real ou padrão, e no segundo subitem é realizada uma avaliação através de simulação computacional afim de quantificar as variações de consumo de combustível e emissões de gases para as condições reais e padrão de condução.

2.1. Comparação dos parâmetros dos ciclos

A comparação foi feita entre os ciclos reais e os respectivos ciclos de condução utilizados para homologação. Para estas comparações, vários parâmetros podem ser utilizados, como por exemplo, a velocidade média, a energia cinética de aceleração (PKE), a raiz quadrada da aceleração média (RMS) e a aceleração positiva relativa (RPA). Estes parâmetros fazem parte dos principais utilizados para correlação e comparação entre ciclos de condução reais e ciclos de condução padronizados (Berry, 2010);(Van De Weijer, 1997);(Smit *et al.*, 2007). Devido a isto, neste trabalho, foram considerados como parâmetros a velocidade média, a PKE, a RMS e a RPA.

A PKE é uma medida do quanto de energia se gasta em aceleração em um ciclo de condução, isto é, indica o quanto de energia produzida pela fonte motora é necessária para que o motorista conduza o veículo nas velocidades do gráfico do ciclo (Kumar Pathak *et al.*, 2016). A PKE também pode ser utilizada para prever o quanto de emissões um motor irá emitir em determinado ciclo.

A aceleração RMS, aplicada como método de comparação em ciclos de condução, é um fator que mede a frequência de oscilações no ciclo, bem como a amplitude das variações. Um ciclo com maior RMS indica que irá exigir alterações de velocidade mais intensas, que pode resultar em maiores emissões (Kumar Pathak *et al.*, 2016).

A RPA representa o cálculo da potência positiva necessária para um determinado padrão de acelerações em relação à distância percorrida. O cálculo da RPA permite avaliar qual é a carga do ciclo de velocidades, sendo portanto importante fator para comparação de ciclos (Kumar Pathak *et al.*, 2016).

2.2. Comparação das emissões veiculares via simulação computacional

Para avaliar o consumo de combustível e as emissões de um veículo percorrendo os trajetos estabelecidos pelos ciclos padrão e reais considerados, um modelo computacional unidimensional foi desenvolvido utilizando o software GT-Suite da Gamma Technologies®. A Tabela 01 apresenta características referentes à um veículo comercial brasileiro, de pequeno porte, considerado para esta simulação computacional. As informações necessárias para compor os mapas de consumo de combustível e emissões de gases, utilizados como dados de entrada, foram extraídas da literatura (Schäfer e Van Basshuysen, 1995).

Tabela 01. Características do veículo simulado

Motor	
Volume deslocado cm ³)	1998
Número de cilindros	4
Aspiração	Naturalmente aspirado
Ciclo	Otto
Combustível	Gasolina
Torque	19,2 kgfm @ 4000rpm
Potência	100 kW @ 5400rpm
Veículo	
Massa do veículo (kg)	1275
Massa dos passageiros (kg)	80
Coeficiente aerodinâmico	0,29
Área frontal	1,95
Distância entre eixos (m)	2,614
Transmissão	Manual

Com este software, a avaliação de dinâmica veicular possibilita a configuração de modelos representativos de diferentes meios de transporte. Para isso, são consideradas as variáveis envolvidas no funcionamento do veículo real, como motor, transmissão, pneus, ambiente e características de condução. Assim, torna-se possível a introdução de um ciclo de condução que através do controle sobre posições de pedal de freio e de acelerador, faz com que o veículo acompanhe a velocidade indicada pelo ciclo de condução (GT-SUITE, 2015). São inseridas características construtivas e mecânicas, como de motor, caixa de câmbio, diferencial, freios, pneus, eixos, estrutura e parâmetros aerodinâmicos, além de características de condução do veículo, como posição dos pedais, velocidade a ser seguida e instantes para troca de marcha.

Relacionado aos mapas de desempenho, são inseridas informações de consumo de combustível, fluxo de ar e liberação de calor em função da rotação do motor e da carga admitida. Assim como o assumido para o consumo de combustível, os mapas considerados para emissões também devem ser inseridos em função do BMEP. Individualmente,

mapas de NO_x, CO, CO₂, HC e material particulado permitem o cálculo instantâneo da taxa de emissões durante a simulação.

Em análises dinâmicas no GT-Drive, as equações diferenciais de movimento do veículo e seus componentes são integradas no tempo, calculando transientes de velocidade e de torque no sistema. O torque do motor é dado em função das condições de operação e calculado através do mapa de BMEP previamente inserido. Também em função do BMEP, o modelo determina a posição constante ou transitória do acelerador. A resistência a rolagem é determinada através de coeficientes aerodinâmicos e da velocidade do veículo, sendo calculada linearmente em função da força que se opõe ao movimento.

3. RESULTADOS

Para avaliar as diferentes características e impactos de cada um dos ciclos padrão e dos ciclos reais analisados, os resultados são apresentados em duas subseções. A primeira subseção é dedicada a apresentar as características dos ciclos individuais conforme metodologia descrita no item 2. Para isso, apresentam-se velocidade máxima, velocidade média, distância, duração, PKE, RMS e RPA de cada um dos ciclos avaliados. A segunda subseção apresenta os resultados da simulação computacional representativa de um veículo de passeio leve, percorrendo os ciclos considerados, para efeitos de emissões e consumo de combustível.

3.1. Características dos ciclos

3.1.1. Comparação entre reais e padrões europeus

Neste item, foram avaliados os ciclos reais desenvolvidos em cidades onde o padrão é o ciclo europeu. Na Tabela 02 são apresentados os resultados encontrados para os parâmetros de comparação, citados anteriormente na metodologia deste trabalho. Estes parâmetros apontam para uma tendência onde os ciclos reais possuem menor velocidade média em relação aos ciclos padrão NEDC e WLTC. Esse fator é esperado, uma vez que devido ao aumento da quantidade de veículos nas cidades analisadas, o tempo em que o veículo fica parado é maior e, quando em movimento, possui acelerações mais brandas devido ao fluxo intenso de veículos.

Comparando-se os fatores PKE, RMS e RPA, pode-se dizer que a energia gasta para desenvolvimento dos ciclos reais é maior do que quando comparados aos padrões WLTC e NEDC. Isso pode ser atribuído a um regime de operação que desfavorece a eficiência energética do motor, tendo muitas variações de aceleração, conforme indicado diretamente pelo fator RMS, que chegou a praticamente dobrar em relação ao NEDC para alguns ciclos (Pune, Hong Kong e Edinburgh). Analisando-se isoladamente os resultados encontrados para o ciclo de Cingapura, pode-se dizer que houve uma grande divergência em relação aos demais. Os parâmetros aqui encontrados apontam para um gasto energético muito maior para o mesmo, quando comparado inclusive aos outros reais. Porém, por ter sido calculado unicamente por dados gráficos, o valor dos fatores aqui encontrados para este ciclo em especial, podem apresentar maiores erros.

Por ter sido desenvolvido com as bases estatísticas de circulação mais recentes, o WLTC se aproxima mais dos ciclos reais quando comparado ao padrão NEDC, porém, de acordo com os resultados, o WLTC ainda está aquém do que é observado na maioria das grandes cidades.

Tabela 02. Comparação entre ciclos reais e padrões europeus

Ciclo	Velocidade máxima (kph)	Velocidade Média (kph)	Distância (km)	Duração (s)	PKE (m/s ²)	RMS (m/s ²)	RPA (m/s ²)
WLTC	131,30	46,5	23,270	1800	0,309	0,532	0,160
NEDC	120,00	33,6	11,030	1180	0,222	0,439	0,105
Athens	70,86	20,21	6,512	1160	0,346	0,450	0,026
Edinburgh	48,28	20	4,200	830	0,429	0,780	0,107
Singapore	88,00	32,8	21,500	2344	2,102	8,667	1,376
Hong Kong (1999)	53,10	15,48	6,286	1462	0,413	0,455	0,329
Hong Kong (2004)	87,17	25,73	9,399	1315	0,450	0,830	0,153
Dublin	53,60	26,47	5,147	700	0,455	0,805	0,237
Pune	53,80	19,55	8,320	1533	0,307	0,514	0,245

3.1.2. Comparação entre ciclos reais e padrão americano

Neste item, foram avaliados ciclos reais de cidades onde o ciclo padrão corresponde ao ciclo FTP-75, assim como feito anteriormente para os ciclos das cidades europeias e asiáticas. Para esta comparação, os ciclos reais escolhidos pertencem a cidades de continentes completamente distintos, mas que adotam o mesmo ciclo para homologação.

Analisando-se a velocidade máxima e média dos ciclos, percebe-se que o ciclo desenvolvido na cidade de Sidney se aproxima mais ao padrão do que quando comparado ao ciclo de Santa Maria. Por ter sido desenvolvido em 1977, as condições de circulação urbana eram muito mais próximas do ciclo FTP-75 do que quando comparadas às bases estatísticas utilizadas para o ciclo de Santa Maria, que foi desenvolvido em 2016. Essa diferença de 39 anos entre a criação dos dois ciclos sobrepõe a diferença entre o padrão de circulação urbana que deve existir entre cidades de diferentes continentes.

Comparando-se os fatores PKE, RMS e RPA, pode-se concluir que o ciclo de Santa Maria é o que mais exige em termos de acelerações e desacelerações, uma vez que o fator RMS para o mesmo é muito maior que para o FTP-75 e para o de Sidney. Novamente, isso é justificável devido ao fato do ciclo ter sido desenvolvido recentemente, em uma cidade onde o fluxo de veículos exige um grande número de paradas e arrancadas no veículo. Porém, apesar do ciclo da cidade de Sidney ter sido desenvolvido há mais de 30 anos, já aponta valores de parâmetros RMS, PKE e RPA maiores que o do FTP-75, indicando que o ciclo padrão para a cidade de Sidney já não era perfeitamente representativo naquela época e hoje muito provavelmente estes fatores se distanciam ainda mais.

Tabela 03. Comparação entre ciclos reais e o padrão americano

Ciclo	Velocidade máxima (kph)	Velocidade Média (kph)	Distância (km)	Duração (s)	PKE (m/s²)	RMS (m/s²)	RPA (m/s²)
FTP-75	91,25	34,12	17,77	1877	0,347	0,631	0,195
Santa Maria	67,00	21,04	35,40	6013	0,410	2,493	0,218
Sidney	80,90	33,60	5,94	637	0,420	0,697	0,306

3.2. Emissões

Esta seção apresenta resultados para consumo de combustível e emissões de um veículo de passeio leve, motor ciclo Otto, operando com gasolina em condições de homologação e em condições reais de condução. Conforme mencionado no item 2, os resultados aqui expressos originam-se da interpolação de mapas de consumo e emissões obtidos na literatura em acordo com a condição de carga à qual o veículo é submetido no ciclo. Em função de os mapas utilizados não reportarem diretamente o veículo em questão, as comparações foram desenvolvidas através de percentuais de variação entre os ciclos simulados.

Assim, da Figura 1 à Figura 4 são apresentados dados referentes ao consumo de combustível e emissões de gases em 12 ciclos de condução distintos, sendo três deles de homologação e nove reais de operação. Para fins de comparação, agruparam-se ao FTP-75 e ao NEDC os ciclos reais desenvolvidos nos países aos quais são empregados. Assim, conforme já descrito, os ciclos desenvolvidos nas cidades de Sidney e Santa Maria são comparados ao de homologação em seus respectivos países (Austrália e Brasil), o FTP-75. Da mesma forma procede-se para os resultados dos ciclos reais desenvolvidos em países aos quais o ciclo NEDC se aplica a homologação. Ainda, na comparação ao NEDC inclui-se o ciclo WLTC. Como método de comparação, definiram-se os valores obtidos para os ciclos padrão como sendo 100%, sobre os quais as variações percentuais foram apresentadas. A Figura 1 apresenta o percentual de consumo de combustível para o veículo percorrendo os ciclos reais com relação aos ciclos padrão utilizados na homologação. O ciclo americano FTP-75 subestima as condições reais de condução avaliadas em cidades do Brasil (Santa Maria) e da Austrália (Sidney) em 40% e 13%, respectivamente. Com isso, valores de consumo de combustível divulgados pelas montadoras, tendem a ser expressivamente aquém do observado em conduções reais nestas cidades. Quanto ao NEDC, variações menores do que 3% são observadas para condições reais em Pune e em Dublin. A maior divergência do padrão europeu fora observada na cidade de Atenas, apresentando um consumo de combustível 17% superior. Ainda para o consumo de combustível, o ciclo WLTC apresenta maior afastamento das condições reais em todos os casos se comparado ao ciclo NEDC.

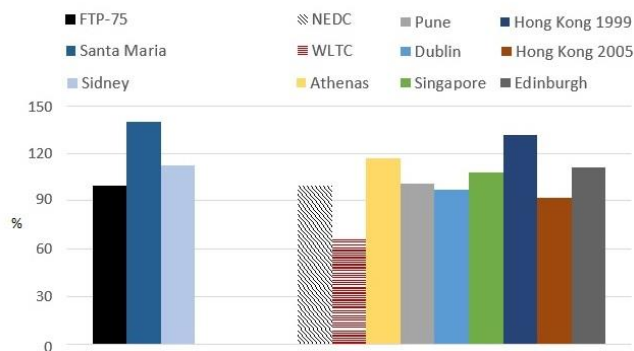


Figura 1. Percentual de consumo de combustível para os ciclos reais em relação aos padrões FTP-75 e NEDC

Como consideração geral a todos os resultados de emissões, observam-se valores de até 250% superiores ao ciclo padrão NEDC para o ciclo em Cingapura. Este fato pode estar relacionado com comportamentos agressivos de condução, como bruscas acelerações e desacelerações. Entretanto, conforme já citado, os dados utilizados para formulação dos ciclos reais são provenientes dos gráficos publicados na literatura, podendo ser prejudicados pela escala e resolução utilizadas nos trabalhos. Especificamente para o caso de Cingapura, Ho et al (2014) expressam o ciclo em relação aos minutos de duração. Com isso, as variações referentes a poucos segundos restam prejudicadas.

As emissões de NO_x , apresentadas na Figura 2 também apresentam valores superiores para os ciclos reais comparados ao padrão FTP-75. Tal variação chega a 29% para o ciclo de Santa Maria e 24% para o de Sidney. Entre os padrões europeus, as emissões observadas para o WLTC e para o NEDC apresentam divergências inferiores à 1%, o que também se estendeu para o ciclo real de Pune. Além do ciclo de Cingapura, os maiores afastamentos em relação ao padrão foram observados para o de Hong Kong desenvolvido em 1999, para o de Dublin e para o de Atenas.

Na Figura 3, as emissões de HC apresentam valores 53% e 32% superiores ao observado nas condições padrão do ciclo FTP-75 para os ciclos de Santa Maria e de Sidney, respectivamente. Para os comparativos ao ciclo NEDC, as divergências observadas são menores, chegando a 40% no ciclo de Dublin. As emissões de HC no ciclo real de Pune e no elaborado em Hong Kong em 2005 apresentam valores com maior proximidade ao padrão NEDC, divergindo em 3% e 5%, respectivamente.

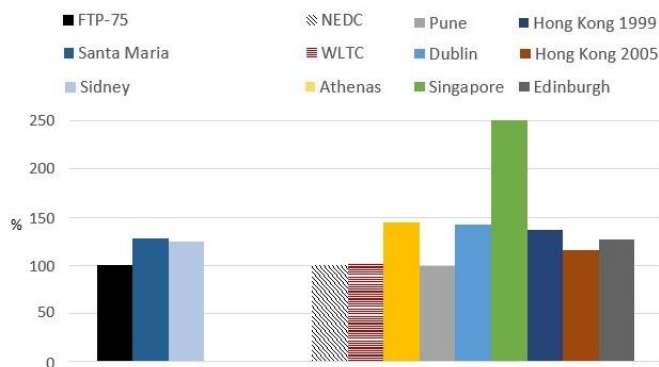


Figura 2. Percentual de emissões de NO_x para os ciclos reais em relação aos padrões FTP-75 e NEDC

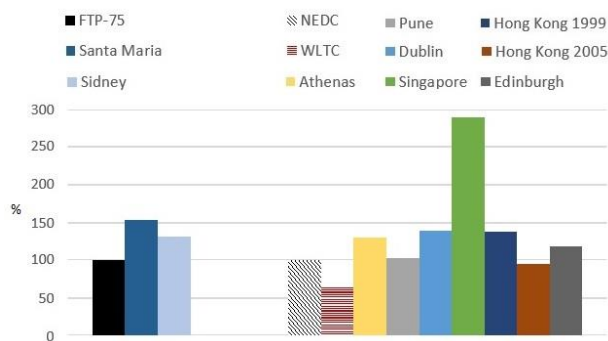


Figura 3. Percentual de emissões de HC para os ciclos reais em relação aos padrões FTP-75 e NEDC

Para as emissões de CO apresentadas na Figura 4, o desenvolvimento do ciclo real de Pune novamente apresentou valores mais próximos aos obtidos para o ciclo padrão NEDC. Além de Cingapura, com o motivo já justificado, o ciclo de Dublin e o de Atenas foram o que apresentaram valores mais distantes do ciclo padrão, sendo de 65% e 47%, respectivamente.

Estas diferenças expressivas atentam para a baixa representatividade dos ciclos padrão nas referidas regiões, onde emissões de gases oriundas do setor de transportes podem estar sendo subestimadas em avaliações de condições ambientais.

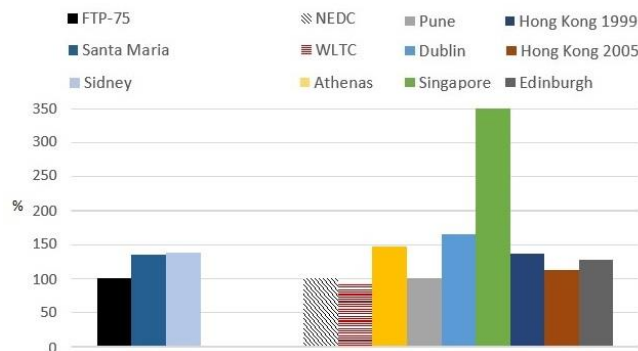


Figura 4. Percentual de emissões de CO para os ciclos reais em relação aos padrões FTP-75 e NEDC

4. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou nove ciclos reais de condução veicular desenvolvidos por pesquisadores de diferentes regiões do mundo, contemplando diferentes parâmetros geográficos e de tráfego. À estes ciclos reais compararam-se os três ciclos padrão utilizados nas respectivas regiões para homologação de emissões. A comparação das características de cada ciclo realizou-se por meio de formulações para determinação de acelerações e energias despendidas para a cobertura do ciclo. Consumo de combustível e emissões de gases foram analisadas utilizando um modelo computacional desenvolvido no software GT-Suite, representativo de um veículo leve de passeio, percorrendo cada um dos treze ciclos avaliados.

O ciclo observado para a cidade de Cingapura destacou-se tanto em suas características individuais de PKE, RMS e RPA, quanto nos resultados obtidos para as emissões de NO_x, CO e HC. Apesar destes resultados induzirem à um ciclo de condução agressiva, a discrepância pode ser atribuída a resolução utilizada para expor os dados do ciclo, com a duração dada em minutos. Usualmente os ciclos relacionam a velocidade instantânea a cada segundo do ciclo, o que proporciona um maior detalhamento das observações.

Ambos os ciclos reais comparados ao FTP-75 apresentaram maiores índices de consumo de combustível e emissões quanto ao observado no ciclo padrão. Isto caracteriza condições mais agressivas de condução nos ciclos reais observados, o que proporciona maiores impactos ambientais do que o definido em normas e acaba por subestimar as emissões do setor de transportes em documentos referentes à poluição atmosférica.

Ciclos de condução desatualizados não consideram as inerentes alterações de tráfego observadas nas grandes cidades. Com isso, mesmo ciclos reais de condução, distorcem as atuais condições atualmente observadas. A simulação de emissões para o ciclo de Pune aproximou-se significativamente dos valores obtidos na simulação do ciclo padrão NEDC. Assim, pode-se considerar que o NEDC é um ciclo extremamente representativo para as condições utilizadas na análise do ciclo de Pune.

O novo ciclo WLTC apresentou características de construção mais próximas aos ciclos reais observados quando comparado ao ciclo padrão NEDC. Entretanto, tal aprimoramento não trouxe benefícios para o consumo de combustível e emissões de gases, onde as emissões médias verificadas para o ciclo NEDC mostram-se mais próximas da maior parte dos ciclos reais, quando comparado ao WLTC.

Apesar de pouco representativos, a existência de ciclos de condução padrão é essencial para a comparação de motores, determinação de legislações e desenvolvimento de tecnologias. A variação das condições de tráfego e rotas interfere diretamente nas características do ciclo. Com isso, ciclos reais são únicos e não representam condições de condução em outros trajetos ou com outras características de tráfego.

5. REFERÊNCIAS

ABNT, A. B. D. N. T.-. **NBR 6601. Veículos rodoviários automotores leves — Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento**: 49 p. 2012.

ACHOUR, H.; CARTON, J. G.; OLABI, A. G. Estimating vehicle emissions from road transport, case study: Dublin City. **Applied Energy**, v. 88, n. 5, p. 1957-1964, 5// 2011. ISSN 0306-2619. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261910005520> >.

ANDRÉ, M. The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions. **Science of The Total Environment**, v. 334-335, p. 73-84, 12/1/ 2004. ISSN 0048-9697. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969704003584> >.

ANDRÉ, M. et al. Real-world European driving cycles, for measuring pollutant emissions from high- and low-powered cars. **Atmospheric Environment**, v. 40, n. 31, p. 5944-5953, 10// 2006. ISSN 1352-2310. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231006000513> >.

BERRY, I. M. The effects of driving style and vehicle performance on the real-world fuel consumption of US light-duty vehicles. 2010.

CHOW, L. C. H. Themes in current Asian energy. **Energy Policy**, v. 31, n. 11, p. 1047-1049, 9// 2003. ISSN 0301-4215. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421502002100> >.

DULAC, J. **Global transport outlook to 2050**. ENERGY, I. e AGENCY 2012.

ESTEVEZ-BOOTH, A. et al. The measurement of vehicular driving cycle within the city of Edinburgh. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 6, n. 3, p. 209-220, 5// 2001. ISSN 1361-9209. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920900000249> >.

GT-SUITE. **Engine Performance Application Manual**. 7.6. ed. [S.l.], 2015.

HO, S.-H.; WONG, Y.-D.; CHANG, V. W.-C. Developing Singapore Driving Cycle for passenger cars to estimate fuel consumption and vehicular emissions. **Atmospheric Environment**, v. 97, p. 353-362, 11// 2014. ISSN 1352-2310. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135223101400644X> >.

HUNG, W.-T. et al. Comparison of driving characteristics in cities of Pearl River Delta, China. **Atmospheric Environment**, v. 39, n. 4, p. 615-625, 2// 2005. ISSN 1352-2310. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231004010040> >.

JOUMARD, R. et al. Influence of driving cycles on unit emissions from passenger cars. **Atmospheric Environment**, v. 34, n. 27, p. 4621-4628, // 2000. ISSN 1352-2310. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231000001187> >.

KAMBLE, S. H.; MATHEW, T. V.; SHARMA, G. K. Development of real-world driving cycle: Case study of Pune, India. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 14, n. 2, p. 132-140, 3// 2009. ISSN 1361-9209. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136192090800148X> >.

KENT, J. H.; ALLEN, G. H.; RULE, G. A driving cycle for Sydney. **Transportation Research**, v. 12, n. 3, p. 147-152, 1978/06/01 1978. ISSN 0041-1647. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/004116477890117X> >.

KUMAR PATHAK, S. et al. Real world vehicle emissions: Their correlation with driving parameters. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 44, p. 157-176, 5// 2016. ISSN 1361-9209. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920916000122> >.

MACIEL FILHO, F. F. Construção de ciclos de condução para estimativa de emissões veiculares para ônibus urbanos, 2013.

MAROTTA, A. et al. Gaseous emissions from light-duty vehicles: moving from NEDC to the new WLTP test procedure. **Environmental science & technology**, v. 49, n. 14, p. 8315-8322, 2015. ISSN 0013-936X.

NESAMANI, K. S.; SUBRAMANIAN, K. P. Development of a driving cycle for intra-city buses in Chennai, India. **Atmospheric Environment**, v. 45, n. 31, p. 5469-5476, 10// 2011. ISSN 1352-2310. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231011006911> >.

ROSO, V. R.; MARTINS, M. E. S. **Simulation of fuel consumption and emissions for passenger cars and urban buses in real-world driving cycles**. SAE TECHNICAL PAPER SERIES: 7 p. 2016.

SCHÄFER, F.; VAN BASSHUYSEN, R. **Reduced emissions and fuel consumption in automobile engines**. Springer Science & Business Media, 2013. ISBN 370913806X.

SMIT, R.; SMOKERS, R.; RABÉ, E. A new modelling approach for road traffic emissions: VERSIT+. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 12, n. 6, p. 414-422, 8// 2007. ISSN 1361-9209. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920907000521> >.

SZWARCFITER, L.; MENDES, F. E.; LA ROVERE, E. L. Enhancing the effects of the Brazilian program to reduce atmospheric pollutant emissions from vehicles. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 10, n. 2, p. 153-160, 3// 2005. ISSN 1361-9209. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920904000902> >.

TIMILSINA, G. R.; SHRESTHA, A. Transport sector CO2 emissions growth in Asia: Underlying factors and policy options. **Energy Policy**, v. 37, n. 11, p. 4523-4539, 11// 2009. ISSN 0301-4215. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421509004236> >.

TONG, H. Y.; HUNG, W. T.; CHEUNG, C. S. Development of a driving cycle for Hong Kong. **Atmospheric Environment**, v. 33, n. 15, p. 2323-2335, 1999/07/01 1999. ISSN 1352-2310. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231099000746> >.

TSAI, J.-H. et al. Development of a local real world driving cycle for motorcycles for emission factor measurements. **Atmospheric Environment**, v. 39, n. 35, p. 6631-6641, 11// 2005. ISSN 1352-2310. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231005006746> >.

TZIRAKIS, E. et al. Vehicle emissions and driving cycles: comparison of the Athens driving cycle (ADC) with ECE-15 and European driving cycle (EDC). **Global NEST Journal**, v. 8, n. 3, p. 282-290, 2006.

VAN DE WEIJER, C. J. T. **Heavy-Duty Emission Factors: Development of representative driving cycles and prediction of emissions in real-life**. na, 1997.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores garantem que o artigo é original, que não infringe os direitos autorais ou qualquer outro direito de propriedade de terceiros, que não foi enviado para publicação em nenhuma outra revista e que não foi publicado anteriormente. Os autores confirmam que a versão final do manuscrito foi revisada e aprovada, de modo a poderem ter responsabilidade pública pelo conteúdo do trabalho.

CORRELATION PARAMETERS OF CONDUCTION CYCLES IN VEHICLE EFFICIENCY AND EMISSIONS

Lucas Daniel Silva Leal, leal.lucas@hotmail.com.br¹

Vinicius Rückert Roso, vinicius.roso@mecanica.ufsm.br¹

Carlos Eduardo Castilla Alvarez, ing.carlos.ufps@gmail.com¹

Fabício José Pacheco Pujatti, pujatti@demec.ufmg.br¹

Ramon Molina Valle, ramon@demec.ufmg.br¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Presidente Antônio Carlos 6627, Pampulha, Belo Horizonte - MG

Abstract. *Urban expansion, especially in large cities, coupled with the inferior quality of urban transport has encouraged the increase of light vehicles number on streets. With this, the increasingly stringent legislation imposes limits of greenhouse gases for the automakers in order to maintain the quality of atmospheric air. However, the procedures of emissions vehicular tests, which are variable in accordance with the legislation of each country, cover different driving conditions that, many times, do not represent the observed in real conditions. These estimates are also used for the drafting of national emission inventories, which ultimately distort the real quality of atmospheric air. Before this, the objective of this study is to make comparisons through computer simulations between the driving cycles used in the approval of vehicles of lightweight ride in different countries, highlighting the characteristics of each of the cycles and the impact of these on the emissions of the main exhaust gases, such as NO_x, HC and CO. The analyzes reveal significant variations between frequencies of acceleration, average speeds and energy dispensed in development of standard driving cycles, depending on the difference between the adopted for approval in various countries and observed in real operating conditions.*

Keywords: *driving cycles, light vehicle emissions, computer simulation.*