

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Maria Fernanda Possebon Mazer

**COMPARAÇÃO DE CICLOS DE CONDUÇÃO PADRÃO APLICADOS
A UM VEÍCULO DE PASSAGEIROS OPERANDO COM ETANOL**

Santa Maria, RS

2020

Maria Fernanda Possebon Mazer

**COMPARAÇÃO DE CICLOS DE CONDUÇÃO PADRÃO APLICADOS A UM
VEÍCULO DE PASSAGEIROS OPERANDO COM ETANOL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

Orientador: Macklini Dalla Nora

Santa Maria, RS

2020

Maria Fernanda Possebon Mazer

**COMPARAÇÃO DE CICLOS DE CONDUÇÃO PADRÃO APLICADOS A UM
VEÍCULO DE PASSAGEIROS OPERANDO COM ETANOL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em 02 de outubro de 2020:

Macklini Dalla Nora, PhD. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Mario Eduardo Santos Martins, PhD (UFSM)

Vinícius Bernardes Pedrozo, PhD (Volkswagen do Brasil)

Santa Maria, RS
2020

AGRADECIMENTOS

Tenho plena consciência de que me tornei a pessoa que sou devido a contribuição de cada indivíduo que, em algum momento, se fez presente em minha vida. Qualquer mérito proveniente deste trabalho pertence à comunidade em que vivo e me relaciono, na qual aprendi e desenvolvi meus valores, e espero ter conseguido representar todos de alguma forma nos próximos parágrafos.

Este trabalho só foi possível graças à generosa ajuda de meus colegas integrantes do Grupo de Pesquisa em Motores (GPMOT-UFSM). Eles representam o que há de melhor no compromisso com o ensino e a pesquisa e, certamente, me ensinaram os valores de responsabilidade, comprometimento e trabalho em grupo. Agradecimentos especiais ao professor Mario Martins pelas oportunidades e ensinamentos ao longo dos anos.

Agradeço profundamente a meu orientador Macklini Dalla Nora por sua paciência, sabedoria e orientação, que instruíram minha crença na dedicação e no trabalho duro. E, em especial, aos caros Igor e Leonardo, que me proporcionaram a honra de caminhar lado a lado nessa trajetória e ser testemunha de vosso conhecimento. Todo o apoio, entusiasmo e ajuda foram essenciais e, a eles, sou eternamente grata.

Gostaria também de agradecer a minha mãe, Sonia, e meu irmão, João Victor, pelo apoio perene, a vocês devo minha postura, caráter e reverência a vida. A Willian, melhor amigo e companheiro, agradeço ao consolo, a compreensão e afeto ao longo dos anos.

RESUMO

COMPARAÇÃO DE CICLOS DE CONDUÇÃO PADRÃO APLICADOS A UM VEÍCULO DE PASSAGEIROS OPERANDO COM ETANOL

AUTOR: Maria Fernanda Possebon Mazer

ORIENTADOR: Macklini Dalla Nora

Ensaio de homologação têm sido realizados em dinamômetros de chassis para medir consumo de combustível e emissões de poluentes de veículos. Os ciclos de condução padrão FTP-75 (atualmente incorporado na legislação brasileira) e o Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle (WLTC) foram realizados em um dinamômetro de chassis em que o motorista, o veículo e o combustível foram mantidos constantes para que a comparação entre os ciclos se mantivesse justa. O veículo selecionado foi um FIAT sedan de 1.4 dm³ de volume deslocado e que apresenta potência máxima de 60 kW em 5500 rpm de rotação do motor, com torque máximo de 122 Nm em 2250 rpm. Os cinco pontos de operação mais representativos foram selecionados para testes em regime estacionário operando com etanol comercial e foram avaliados segundo o consumo de combustível e o fator de excesso de ar. Os resultados obtidos mostraram que o ciclo FTP-75 exigiu valores maiores de aceleração média e máxima, demonstrando condições de dirigibilidade mais agressivas. O ciclo WLTC apresentou um mapa de aceleração por velocidade mais homogêneo, proporcionando um valor médio de velocidade e desvio padrão maior (i.e., comportamentos mais transientes). Foi possível observar que o WLTC preencheu mais faixas de operação do motor com pontos mais dispersos em comparação com o FTP-75. Ainda, o ciclo WLTC apresentou pontos de maior carga resultando em maior consumo de combustível comparado ao FTP-75. As condições de operação exigidas pelo FTP-75 foram similares e condensadas em certas áreas do mapa do motor. Portanto, foi possível concluir que o ciclo FTP-75 pode ser considerado previsível, pois possui muitos pontos de operação repetidos. Além disso, observou-se que, dependendo das especificações impostas para a realização dos ciclos, o motorista tem larga capacidade de influenciar os resultados.

Palavras-chave: FTP-75. WLTC. Ciclos de Condução. Desempenho. Operação Transiente.

ABSTRACT

COMPARISON BETWEEN THE FTP-75 AND WLTC CYCLES APPLIED TO A PASSENGER VEHICLE RUNNING ON EHTANOL

AUTHOR: Maria Fernanda Possebon Mazer

ADVISOR: Macklini Dalla Nora

The forecast scenarios regarding the environmental pollution raises a question whether the current vehicle emission certification is reliable enough to assure fleet agreement with the legal limits. Standardized procedures such as the FTP-75 proposed in the United States (currently incorporated in the Brazilian legislation) and the Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle (WLTC) are discussed in this paper. Both cycles were performed in a chassis dynamometer with the driver, vehicle and fuel kept constant so the comparison between the cycles would not be compromised. The vehicle chosen was a 1.4 dm³ displaced volume FIAT sedan with maximum power of 60 kW at 5500 rpm and maximum torque of 122 Nm at 2250 rpm. The five points estimated as the most representative of both tests were selected for steady-state investigations in terms of fuel consumption and air excess factor and conducted using hydrous-ethanol (E97W03) – ethanol blend available in Brazilian fuel stations. The results showed that the FTP-75 demanded greater average and maximum acceleration values, implying on more aggressive driving conditions. The WLTC presented a more homogeneous acceleration per speed diagram, providing higher average speed and speed standard deviation (i.e., more transient conditions). It could be seen that the WLTC covers a wider range of engine operation conditions holding more dispersed points than the FTP-75. In addition, the WLTC contained points with higher load, which made the results for fuel consumption to be higher compared to FTP-75. The engine operation points provided by the FTP-75 were excessively condensed. Therefore, it could be concluded that the FTP-75 can be a predictable test with repeated points of operation. Also, it could be observed that depending on the test specifications the driver can largely influence the performance of the vehicle.

Keywords: FTP-75. WLTC. Driving Cycles. Operation Demand. Transient Behavior.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Emissões antrópicas de CO ₂ associadas à matriz energética brasileira no ano de 2018.	12
Figura 2 – Histórico do padrão europeu de limites de emissões dos gases poluentes NO _x para veículos leves.	13
Figura 3 – Configuração de um teste padrão de certificação veicular.	18
Figura 4 – California 7-mode cycle.	19
Figura 5 – Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS).	21
Figura 6 – Representação dos 15 modus operandi do ciclo de condução padrão ECE-15.	22
Figura 7 – Comparação entre os ciclos de condução NEDC e ECE+EUDC.	23
Figura 8 – Ciclo de condução padrão FTP-75.	24
Figura 9 – Tolerâncias de velocidade para o ensaio do ciclo FTP-75.	25
Figura 10 – Ciclo WLTC classe 3b.	28
Figura 11 – Tolerâncias de velocidades estabelecidas para o ciclo WLTC.	28
Figura 12 – Aparato experimental.	35
Figura 13 – Comparação entre o percurso real realizado e o ciclo teórico do WLTC.	51
Figura 14 – Comparação entre o percurso real realizado e o ciclo teórico do FTP-75.	52
Figura 15 – Comparação entre velocidade real, velocidade teórica e tolerâncias do ciclo WLTC.	53
Figura 16 – Comparação entre velocidade real, velocidade teórica e tolerâncias do ciclo FTP-75.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do ciclo FTP-75.....	24
Tabela 2 – Classificação do ciclo WLTC para veículos leves.....	27
Tabela 3 – Parâmetros teóricos do ciclo WLTC classe 3b.	27
Tabela 4 – Informações do veículo de testes.	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BMEP	Break Mean Effective Pressure – Pressão media efetiva de eixo
BSFC	Break Specific Fuel Consumption – Consumo específico de combustível
CO ₂	Dióxido de carbono
E97W03	97% v/v etanol e 3% v/v de água
ECU	Engine Control Unit – Unidade de controle do motor
EEC	European Economic Community – Comunidade econômica europeia
EPA	Environmental Protection Agency – Agência de proteção ao meio ambiente dos Estados Unidos
EUA	Estados Unidos da América
EUDC	Extra Urban Driving Cycle – Ciclo de condução urbano extra
FTP	Federal Test Procedure – Procedimento nacional de teste (EUA)
HWFET	Highway Fuel Economy Test – Teste de economia de combustível de estrada
MCI	Motor de Combustão Interna
NEDC	New European Driving Cycle – Novo ciclo de condução europeu
NO _x	Óxidos nitrosos
PROCONVE	Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores
RPA	Relative Positive Acceleration – Aceleração positiva relativa
SAE	Society of Automotive Engineers – Sociedade dos engenheiros automotivos
SFTP	Supplemental Federal Test Procedure – Procedimento nacional suplementar de teste (EUA)
UDDS	Urban Dynamometer Driving Schedule – Ciclo de condução urbano dinamométrico
WLTC	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle – Ciclo universal de condução de veículos leves
ANP	Agência Nacional do Petróleo

LISTA DE SÍMBOLOS

$\left(\frac{A}{F}\right)_R$	Razão de ar-combustível real
a_i^+	Aceleração positiva no instante i
\dot{m}_f	Vazão mássica de combustível
P_b	Potência de eixo
Q_{LHV}	Poder calorífico inferior
V_d	Volume deslocado
n_R	Fator de conversão de motores que operam no ciclo de 4 tempos (=2)
v_i	Velocidade no instante i
η_f	Eficiência de conversão de combustível
η_v	Eficiência volumétrica
$\rho_{a,i}$	Densidade atmosférica do ar
Δt	Acréscimo de tempo
N	Frequência de operação do motor
x	Distância percorrida
Mt	Mega tonelada

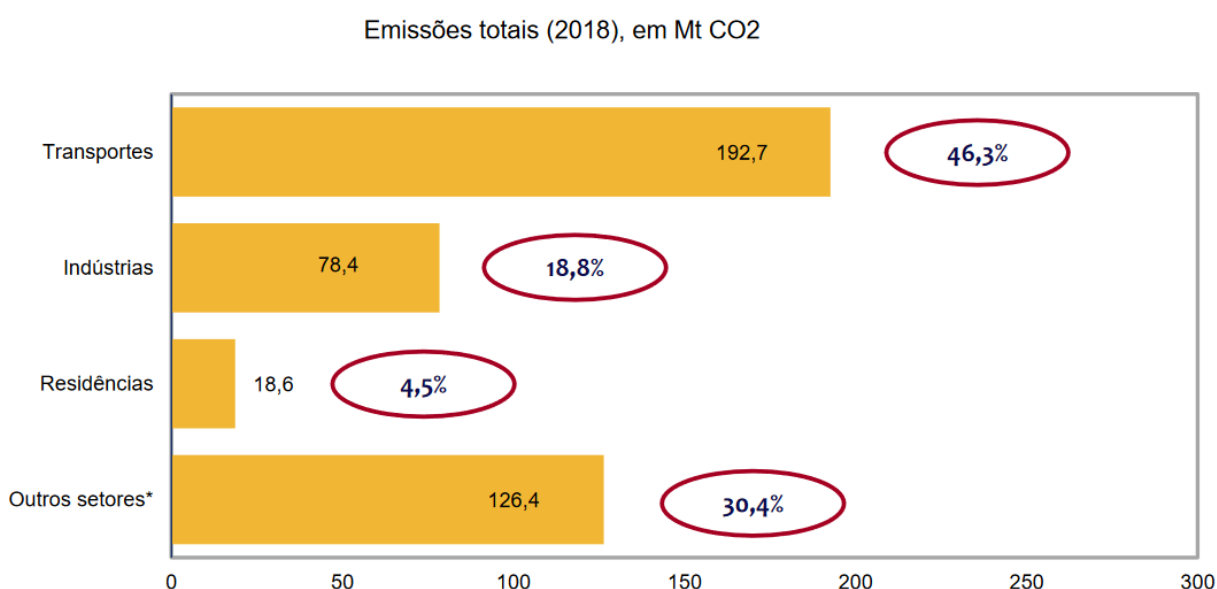
SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
1.1.	OBJETIVOS.....	15
1.1.1.	Objetivos Específicos.....	15
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1.	CICLOS DE CONDUÇÃO E LEGISLAÇÕES DE EMISSÕES.....	17
2.1.1.	Federal Test Procedure 75 (FTP-75).....	23
2.1.2.	Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Cycle (WLTC).....	26
2.2.	PARÂMETROS DE ANÁLISE.....	29
2.2.1.	Parâmetros analíticos do ciclo.....	29
2.2.2.	Parâmetros de desempenho.....	31
2.3.	ETANOL.....	32
3.	METODOLOGIA.....	34
3.1.	APARATO EXPERIMENTAL.....	34
3.2.	ENSAIO DOS CICLOS PADRÃO DE CONDUÇÃO.....	36
3.3.	SELEÇÃO DOS PONTOS DE OPERAÇÃO.....	37
3.4.	PARÂMETROS DOS CICLOS.....	38
3.5.	PARÂMETROS DE OPERAÇÃO DO MOTOR.....	38
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
4.1.	ARTIGO PUBLICADO E APRESENTADO EM CONGRESSO.....	40
4.2.	RESULTADOS ADICIONAIS.....	51
5.	CONCLUSÕES.....	56
	REFERÊNCIAS.....	58

1. INTRODUÇÃO

A emissão de gases poluentes devido à exploração de recursos energéticos, principalmente dos derivados de petróleo, tem sido reportada como responsável pela degradação do meio ambiente e da qualidade do ar nos centros urbanos (IPCC, 2018). No Brasil, segundo o Balanço Energético Nacional de 2018, o setor de transportes foi responsável por gerar a maior parte das emissões antrópicas associadas à matriz energética (Figura 1) (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019a). Apesar da grande contribuição dos veículos pesados para esses índices, o transporte de passageiros foi responsável, no ano de 2019, por cerca de 74% das emissões de monóxido de carbono, um gás tóxico que reduz a qualidade do ar (SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA (SEEG), 2020). Portanto, visto que a utilização de combustíveis fósseis e os produtos de sua queima são prejudiciais para a qualidade do ar e, conseqüentemente, para a saúde pública, o desempenho da frota de veículos em economia de combustível e emissão de poluentes é de interesse dos governos e de suas gestões ambientais.

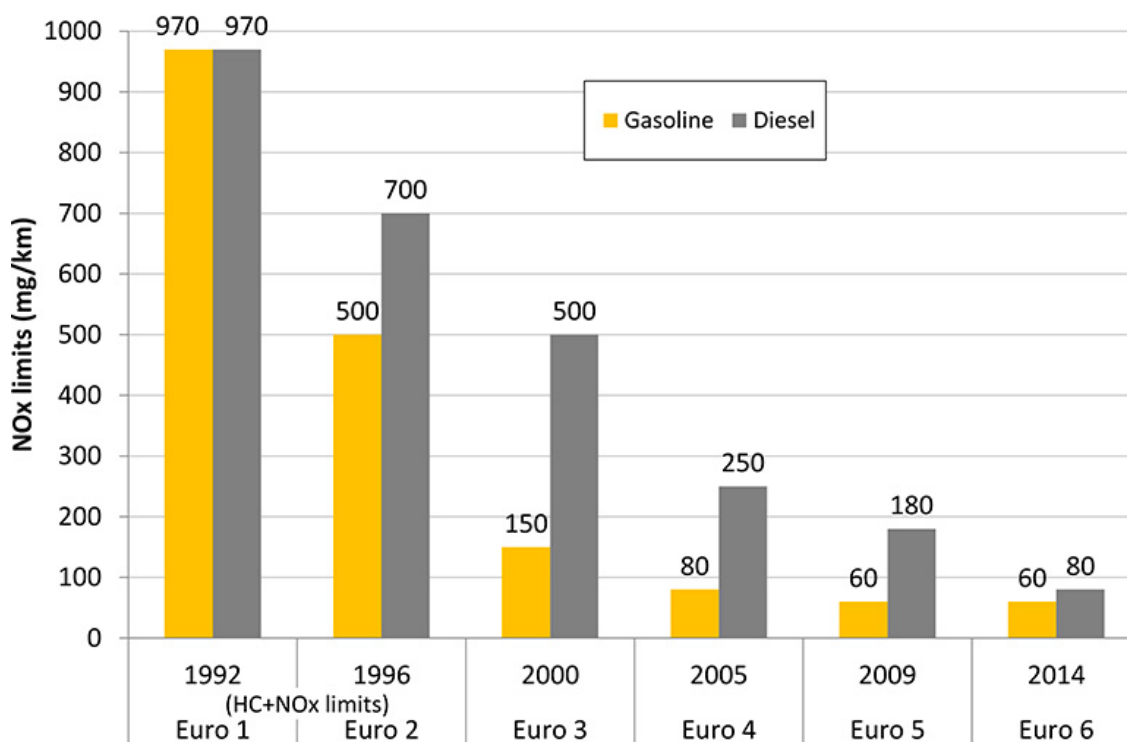
Figura 1 – Emissões antrópicas de CO₂ associadas à matriz energética brasileira no ano de 2018.



Fonte: (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019b, p.137).

Como mecanismo de controle, no mundo todo, órgãos governamentais vêm regulamentando limites mais rigorosos de emissões e consumo de combustível. Na União Europeia, os limites permitidos de emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x), vistos na Figura 2, têm sido cada vez mais restringidos e a legislação já prevê uma redução de 27% nos limites aceitáveis de dióxido de carbono (CO_2) em g/km para os veículos de passageiros produzidos no ano de 2020 (MOCK, 2014). Nos Estados Unidos da América (EUA), a Agência de Proteção ao Meio Ambiente (EPA, do inglês, *Environmental Protection Agency*), através de seu mais recente programa, *Tier 3*, estabeleceu padrões de emissões severos, reduzindo as concentrações admissíveis de poluentes emitidos por veículos de passeio e caminhões (EPA, 2014). O Brasil, correspondendo à tendência mundial, também vêm regulamentando padrões mais rigorosos para o controle dos poluentes atmosféricos da frota de veículos com o Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS, 2011).

Figura 2 – Histórico do padrão europeu de limites de emissões dos gases poluentes NO_x para veículos leves.



Fonte: (AECC, [s.d.])

Os padrões impostos pelos governos aos fabricantes de automóveis são fiscalizados através de processos de homologação. Para que um veículo seja licenciado, é necessário que este seja testado através de ensaios dinamométricos onde o consumo de combustível (ou emissão de CO₂) e as emissões de poluentes são medidas e monitoradas. Esses ensaios consistem na implementação de um perfil de velocidades a ser desempenhado pelo veículo em um dinamômetro de chassi. Os denominados ciclos de condução possuem a incumbência de reproduzir as condições de operação em vias urbanas e de estrada e concentrá-las em um ensaio de curto espaço de tempo, de modo a fazê-lo aplicável e prático. Na União Europeia, o ciclo de condução padrão empregado para a certificação de veículos leves é o *Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle* (WLTC), criado para suprir deficiências de seu predecessor (TUTUIANU et al., 2014). O Brasil utiliza o ciclo de condução FTP-75 (*Federal Test Procedure*), desenvolvido pela Agência de Proteção ao Meio Ambiente dos EUA, para o ensaio que determina os fatores de emissões para veículos leves (ABNT NBR 6601, 2005) e também para o ensaio que avalia o desempenho em consumo de combustível, com a adição de um ciclo de condução de estrada (ABNT NBR 7024 2017, 2017).

Esses dois ciclos de condução — WLTC e FTP-75 — podem ser considerados os mais empregados no mundo na tentativa de simular condições reais de tráfego para veículos leves. Dessa forma, diversos governos têm como referência para o controle e gestão do meio ambiente os dados de performance dos veículos nesses testes. Portanto, é preciso avaliar a capacidade desses ciclos em abordar ao máximo o mapa de operação do motor e exigir do veículo condições de aceleração e carga satisfatórias e compatíveis com o mundo real, de modo que não haja imprevistos em relação ao que os veículos de fato irão emitir e consumir, e ao que lhes é imposto por meio do teste legal.

Portanto, este trabalho busca avaliar e comparar os dois principais ciclos de condução empregados na certificação veicular de emissões e consumo de combustível. Os ciclos WLTC e FTP-75 foram desempenhados por um veículo leve de passageiros — considerado uma boa representação da frota brasileira — utilizando o mesmo motorista e combustível para que a comparação dos dados obtidos não seja comprometida. Os ciclos foram avaliados segundo parâmetros como perfil de velocidades e acelerações, características transientes de aceleração, e carga exigida

nas viagens desempenhadas pelo veículo. Também foram comparados os parâmetros analíticos dos ciclos, como duração, velocidade e aceleração máximas, e porcentagem de marcha lenta presente no teste, além de ter sido realizada uma análise sobre a competência de cada ciclo em cobrir mais pontos de operação no mapa do motor. Do mesmo modo, as cinco condições que, em decorrência do ciclo, incidem com maior frequência sobre a operação do motor, foram testadas em regime estacionário para avaliação de consumo de combustível, potência, frequência de operação do motor, temperatura de exaustão e fator de excesso de ar.

1.1. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo analisar e comparar os dois principais ciclos de condução empregados na certificação veicular de emissões e consumo de combustível: WLTC e FTP-75.

1.1.1. Objetivos Específicos

As metas específicas do trabalho que irão encaminhar o trabalho a seu objetivo geral são:

- Realização dos ciclos de condução por um veículo leve de passageiros, com o mesmo motorista e combustível.
- Avaliação dos parâmetros analíticos dos ciclos (e.g., duração, distância total, valores máximos e mínimos de velocidade e aceleração, perfil de velocidades etc.).
- Avaliação do mapa de operação do motor e sua distribuição das condições de operação durante o ciclo.
- Determinação dos pontos de operação com maior tempo de residência no ciclo.
- Realização de testes em regime estacionário para avaliação de consumo de combustível, potência, frequência de operação do motor e fator de excesso de ar.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre ciclos de condução padrão, legislações de certificação veicular e parâmetros aplicados à análise desses

ciclos para a melhor compreensão dos resultados. No capítulo 3, é descrita a metodologia que se optou para abordar o problema, assim como os equipamentos e materiais utilizados. Por fim, os resultados desse trabalho são apresentados no capítulo 4, contendo um artigo apresentado no Congresso SAE Brasil International 2019 (seção 4.1.), alguns resultados adicionais (seção 4.2.) e uma breve discussão. As conclusões acerca desse trabalho são apresentadas no capítulo 5.

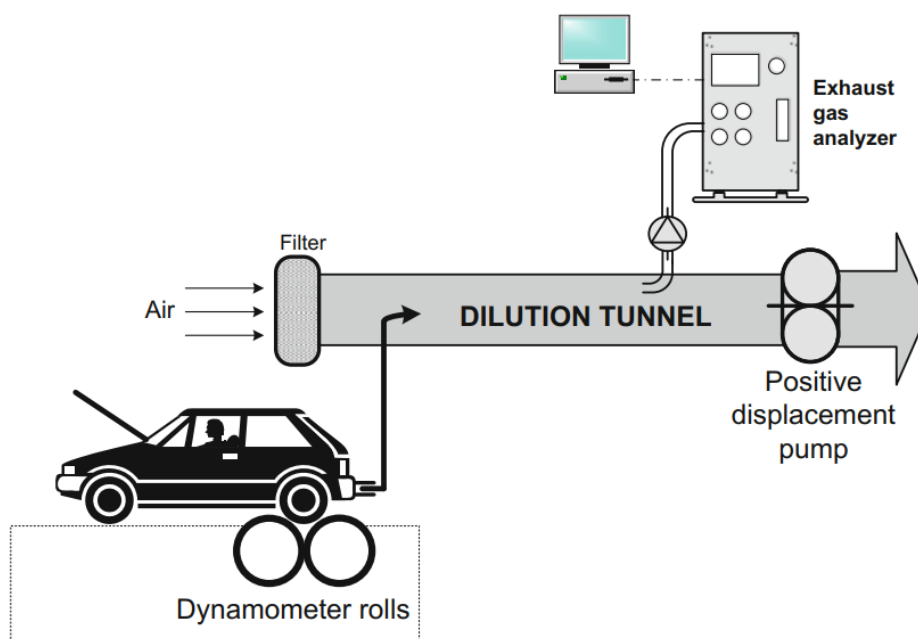
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. CICLOS DE CONDUÇÃO E LEGISLAÇÕES DE EMISSÕES

Um ciclo de condução consiste em uma série de pontos de testes, geralmente definidos pela velocidade do veículo a ser estudado ou pela rotação/torque do motor em questão, separados por instantes de tempo. O conceito base da utilização desse tipo de teste está no maior alcance das faixas de operação do motor, não apenas testando pontos isolados como máximo torque ou máxima potência (GIAKOUMIS, 2017). Sua criação está pautada no desenvolvimento de mecanismos legais para o controle de gases poluentes dos automóveis. Ainda, alguns ciclos de condução, geralmente os previstos por lei, também possuem roteiros de troca de marchas bem definidos e tolerâncias para as velocidades desempenhadas pelo veículo. Para respeitar essas tolerâncias e manter o veículo o mais próximo possível das velocidades especificadas, um motorista treinado costuma realizar o teste (BARLOW et al., 2009).

Apesar de cada país possuir a autonomia de regulamentar diferentes procedimentos, limites, testes e padrões para a certificação veicular, todos compartilham um mesmo objetivo: a manutenção e o controle da qualidade do ar. O consumo de combustível e os produtos da combustão de um motor de combustão interna (MCI) podem variar conforme condições ambientes diversas como temperatura, umidade relativa e altitude. Haja vista a variedade de resultados que podem ocorrer, os veículos devem ser testados em ambientes controlados e com roteiros definidos. Portanto, com as tecnologias atualmente disponíveis, os ensaios de homologação apresentam configurações similares (Figura 3). Geralmente são realizados em ambientes laboratoriais controlados em que o veículo a ser homologado é posicionado com as rodas sobre os rolos de um dinamômetro de chassis, os quais podem ser ajustados para simular resistência aerodinâmica e inércias equivalentes (BARLOW et al., 2009). As concentrações das espécies de poluentes regulamentadas são diluídas por uma dada quantidade de ar para evitar a condensação dos gases. Uma parte dessa mistura diluída é coletada em bolsas de amostras para serem analisadas ao final do ensaio (STONE, 2012).

Figura 3 – Configuração de um teste padrão de certificação veicular.



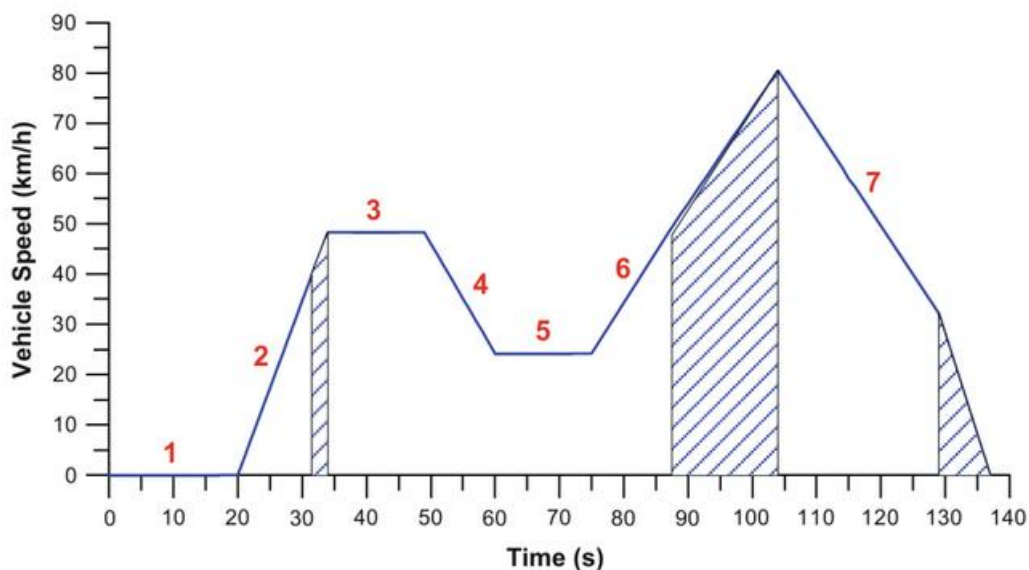
Fonte: (GIAKOUMIS, 2017).

A necessidade de estabelecer legislações restritivas às emissões de poluentes, principalmente dos automóveis, teve início na década de 50 no estado da Califórnia nos EUA. Na época, a frota veicular havia crescido demasiadamente e as emissões de hidrocarbonetos e NO_x desses veículos eram responsáveis pela baixa qualidade do ar e pelo fenômeno fotoquímico conhecido como “smog”, um tipo de poluição atmosférica caracterizado por um nevoeiro contaminado. Dessa forma, o estado da Califórnia é considerado o pioneiro na introdução de padrões de emissões obrigatórios para os veículos e no desenvolvimento do primeiro procedimento de medição desses gases poluentes aplicados em um ciclo de condução em um dinamômetro de chassis (BERG, 2003).

O “California 7-mode cycle” (Figura 4) foi o primeiro ciclo de condução desenvolvido no mundo, criado com base no tráfego urbano diurno, durava cerca de 137 segundos e apresentava velocidade média de 41,8 km/h e máxima de 80 km/h. O tempo em marcha lenta do ciclo era pequeno, cerca de 14,6%, e o modo de velocidade de cruzeiro era representado por 21,9%. Esse ciclo possuía segmentos bem definidos de marcha lenta, velocidade de cruzeiro, e acelerações e desacelerações constantes. Foi utilizado como ciclo de condução padrão no estado

da Califórnia para os veículos fabricados entre 1966 e 1971. As regiões preenchidas abaixo da curva de velocidade do ciclo (Figura 4) representam os momentos, durante o teste, em que os dados não são considerados (GIAKOUMIS, 2017).

Figura 4 – Califórnia 7-mode cycle.



Fonte: (GIAKOUMIS, 2017).

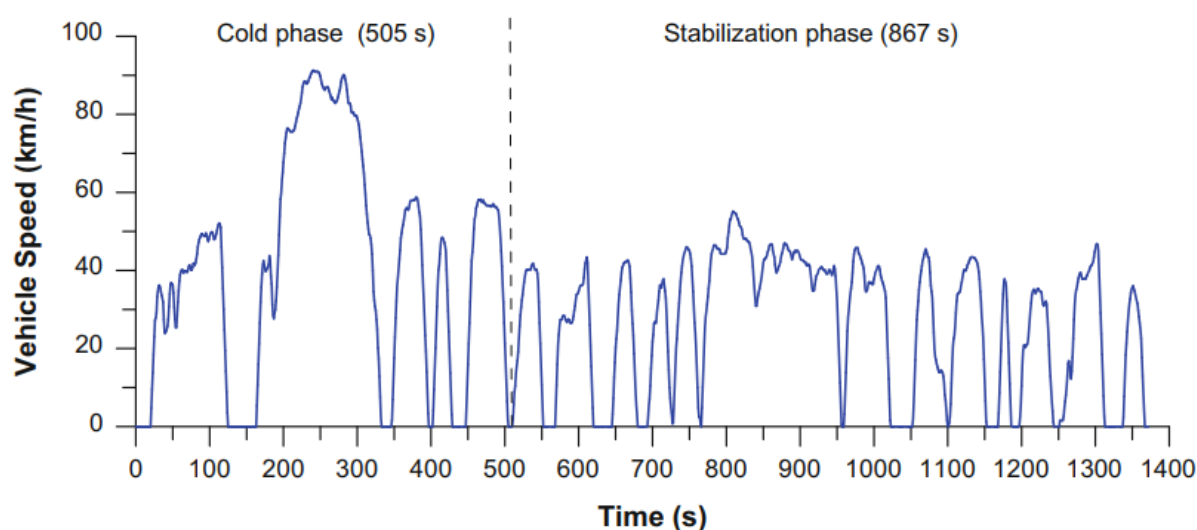
No início de seu emprego como teste de certificação de veículos, o *7-mode cycle* já era tido como um ciclo deficiente, pois compreendia apenas esses sete modos operandi (Figura 4), o que sujeitava os fabricantes a aprimorarem apenas essas condições no desenvolvimento dos veículos. Além disso, na época, acreditava-se que o horário de pico do tráfego da manhã seria a condição de maior contribuição para as emissões de poluentes e esse ciclo não abarcava esse comportamento. Mais tarde, fora reconhecido também que as linhas retas no perfil de velocidades não eram condizentes com a performance do veículo e com os reflexos dos motoristas no pedal de aceleração. O último, era um fator ainda mais agravante, pois a inerente variação no pedal de aceleração se refletia diretamente na movimentação da borboleta que, por sua vez, afeta a razão ar-combustível e, conseqüentemente, a economia de combustível e as emissões de poluentes (AUSTIN et al., 1993).

Em busca do desenvolvimento de um ciclo de condução padrão mais aperfeiçoado e se desvirtuando da abordagem do tipo modal, a EPA criou o ciclo conhecido como "*Urban Dynamometer Driving Schedule*" (UDDS). O UDDS (Figura 5)

foi desenvolvido com base no percurso de uma rota real na cidade de Los Angeles conhecida como LA4. Essa rota foi escolhida como um trajeto padrão a ser utilizado para o desenvolvimento de um novo ciclo para certificação veicular por conter diversos seguimentos que simulavam a viagem diária para o trabalho durante o período da manhã. Essa rota originalmente era considerada muito longa (aproximadamente 30.4 km) e sofreu alterações para viabilizar seu emprego em um ciclo dinamométrico de ensaio padrão. Porém, essas alterações foram realizadas preservando as características da rota e suas proporções como velocidade média, número de paradas, período de marcha lenta etc. Além disso, alguns ajustes nas acelerações e desacelerações do ciclo, devido às limitações técnicas dos dinamômetros de chassis para evitar escorregamento entre os pneus do veículo e o rolo do dinamômetro, foram realizados. O ciclo UDDS foi então utilizado como ciclo de condução padrão para veículos de passageiros e caminhões leves a partir do ano de 1972 nos EUA, e por isso é também conhecido como FTP-72 (KRUSE; HULS, 1973). Este foi o primeiro ciclo de condução padrão utilizado na certificação veicular que empregou o método de análise de poluentes por diluição dos gases da exaustão para análise posterior em bolsas separadas de amostras e, a partir do ano de 1973, passou a contemplar a medição de óxidos nitrosos (NO_x) através da tecnologia de quimiluminescência (GIAKOUMIS, 2017).

Em retrospecto ao seu predecessor, o FTP-72 é um ciclo mais realista e transiente, diferentemente da abordagem modal, e que simula os trajetos urbanos/suburbanos. Como é possível observar na Figura 5, este costuma ser classificado em duas fases: *Cold phase* (fase fria, um início transiente em que o motor do veículo ainda não alcançou sua temperatura de operação) e *Stabilization phase* (fase de estabilização, referida assim haja vista que a temperatura do motor já está estabilizada). O ciclo FTP-72 apresenta duração de quase 23 minutos, distância total percorrida de 11,9 km, velocidade média de 36,6 km/h e máxima de 91,15 km/h (BARLOW et al., 2009). Posteriormente, uma variação do FTP-72 com a adição de uma “terceira fase” foi implementada na legislação a partir do ano de 1975, esse ciclo, denominado FTP-75, que é parte do tema de estudo nesse trabalho, é abordado com maiores detalhes na seção 2.1.1.

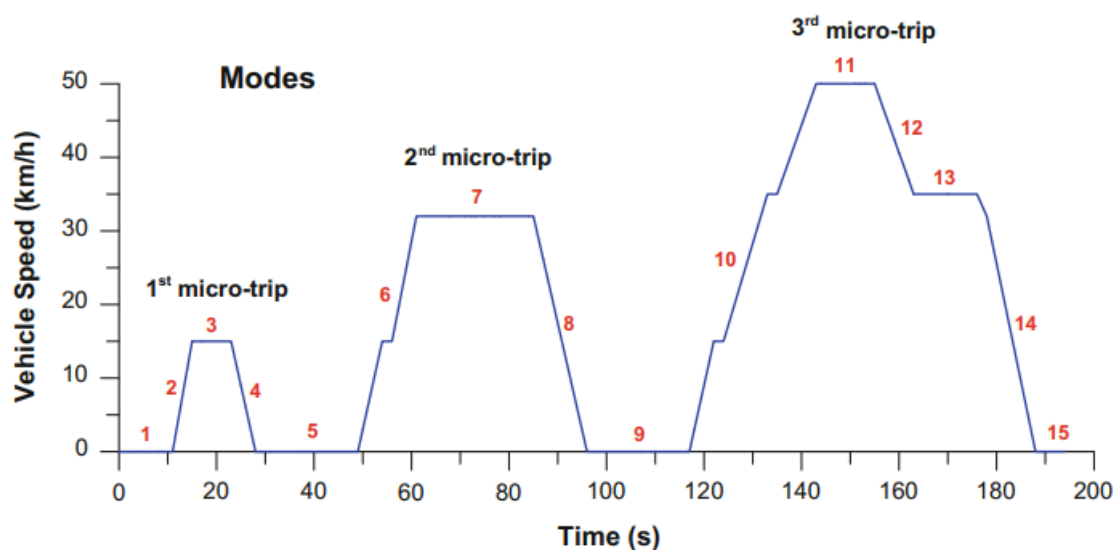
Figura 5 – Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS).



Fonte: (GIAKOUMIS, 2017).

A Europa, centro de grande importância no desenvolvimento e exportação de veículos, onde diversas montadoras estão situadas, restringiu o limite de poluentes de forma conjunta, pela primeira vez, no início da década de 70. Através de diretivas, a Comunidade Econômica Europeia (EEC do inglês, *European Economic Community*) estabeleceu limites para hidrocarbonetos não queimados e monóxido de carbono (CO), e em seguida desenvolveu o primeiro ciclo de condução padrão europeu, o ECE-15 (BERG, 2003). O ciclo, apresentado na Figura 6, e também conhecido como “*Urban Driving Cycle*”, é um ciclo do tipo modal, compreendendo 15 modos de operação, com linhas retas e perfil de velocidades bem definido que se repete quatro vezes, apresentando, no total, 13 min de duração e 4052 m de distância. Além da curta distância, apresenta valores inferiores de velocidades máxima e média, 50 km/h e 18,7 km/h, respectivamente, em comparação ao FTP-75. O ciclo ECE-15 foi desenvolvido para que contemplasse as condições encontradas em cidades típicas da Europa como Paris, Roma, etc. (TZIRAKIS et al., 2013).

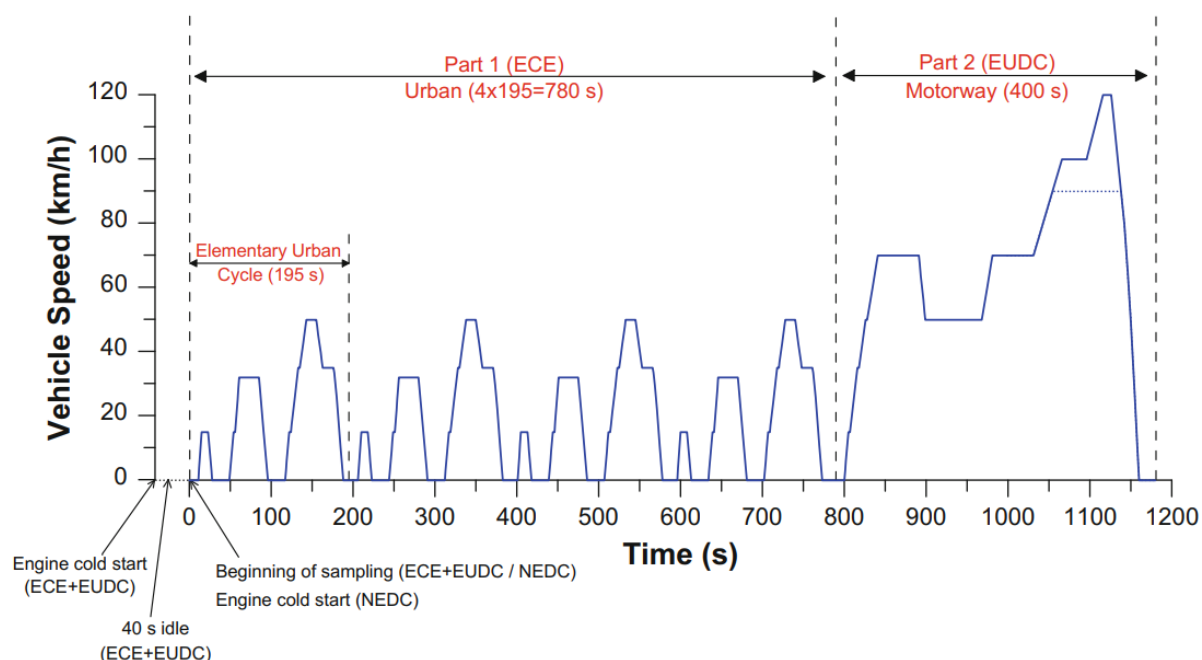
Figura 6 – Representação dos 15 modos operandi do ciclo de condução padrão ECE-15.



Fonte: (GIAKOUMIS, 2017).

Após algumas discussões devido à baixa velocidade do ciclo ECE-15, foi incorporada uma nova fase denominada “*Extra Urban Driving Cycle*” (EUDC), também do tipo modal, a partir do ano de 1991 e o ciclo de condução padrão passou a ser uma combinação: quatro repetições do ECE-15 mais a fase EUDC. Essa nova fase foi adicionada como complemento ao desempenho de um veículo leve e seria responsável por representar as condições nas estradas com velocidades de até 120 km/h. A partir do ano de 2000, um marco regulatório foi implementado nos procedimentos de certificação veicular que incluía a medição dos gases poluentes de teor imediato, de forma que as medições passaram a ser aplicadas a partir da partida do veículo, e não era mais permitido um intervalo de tempo de 40 segundos de aquecimento do motor. Assim, a partir dessa nova resolução de partida a frio o ciclo ficou conhecido como *New European Driving Cycle* (NEDC), e por mais de 20 anos foi o ciclo de condução padrão para emissões de poluentes e consumo de combustível empregado na Europa. Na Figura 7 é apresentado um esquema do ciclo NEDC – caracterizado pela medição imediata de emissões – composto de uma primeira parte “urbana”, que é a repetição de quatro ciclos ECE, e de um último segmento de “rodovia”, que é o próprio complemento EUDC.

Figura 7 – Comparação entre os ciclos de condução NEDC e ECE+EUDC.



Fonte: (GIAKOUMIS, 2017)

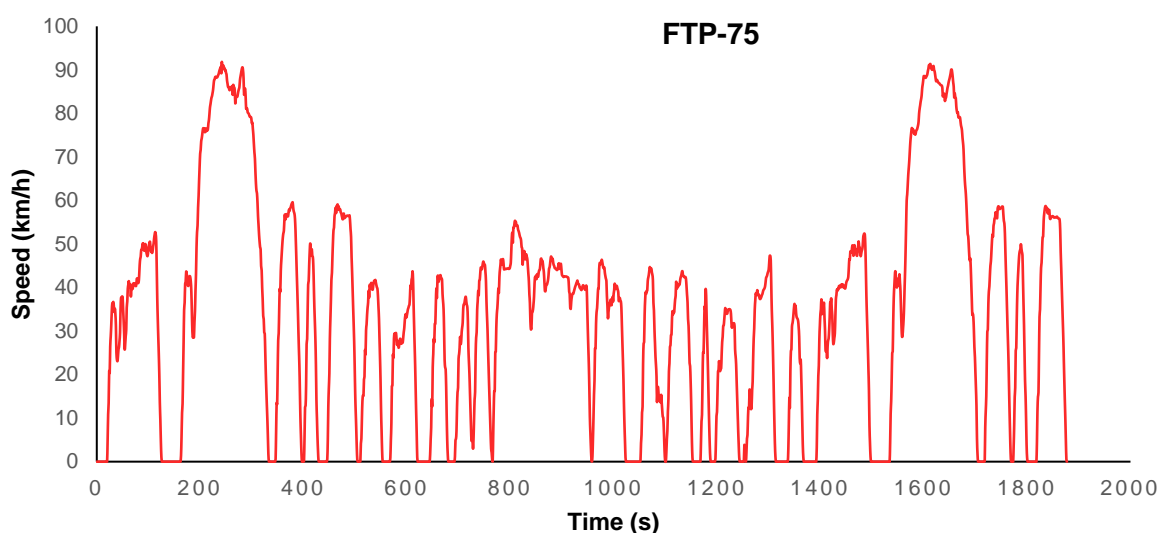
O ciclo NEDC é amplamente conhecido por negligenciar diversos pontos de operação do motor e não conter acelerações condizentes com a realidade. Além de ser um ciclo do tipo modal, em que as linhas retas no perfil de velocidades não representam o comportamento dos motoristas, a fase urbana é excessivamente repetitiva e a maior aceleração encontrada no ciclo ocorre da marcha lenta até 50 km/h em 28 segundos (KAGESON, 1998). O ciclo NEDC possui um tempo de duração de pouco mais de 19 minutos, velocidade média de 42,24 km/h e máxima de 120,09 km/h (BARLOW et al., 2009). Após vários anos como o ciclo de condução padrão na Europa, o NEDC foi substituído pelo ciclo WLTC, válido a partir do ano de 2019, que é um dos ciclos abordados nesse trabalho e tratado com maiores detalhes na seção 2.1.2.

2.1.1. Federal Test Procedure 75 (FTP-75)

O ciclo FTP-75 é uma variação do FTP-72 com a adição de uma “terceira fase” – que é na verdade a repetição da primeira (*cold phase*) – e foi implementado na legislação americana a partir do ano de 1975. Esse ciclo, que é parte do tema de

estudo desse trabalho, é um dos principais ciclos legislativos do mundo e tem sido a base desde então como ciclo de condução padrão para certificações de veículos leves nos EUA. O FTP-75 (apresentado na Figura 8) é um ciclo transiente derivado de seu predecessor (FTP-72), e que possui três fases: *cold start* (505 segundos), *transient phase* (867 segundos) e *hot start* (505 segundos). Alguns parâmetros do ciclo são apresentados na Tabela 1.

Figura 8 – Ciclo de condução padrão FTP-75.



Fonte: (Autor, 2020).

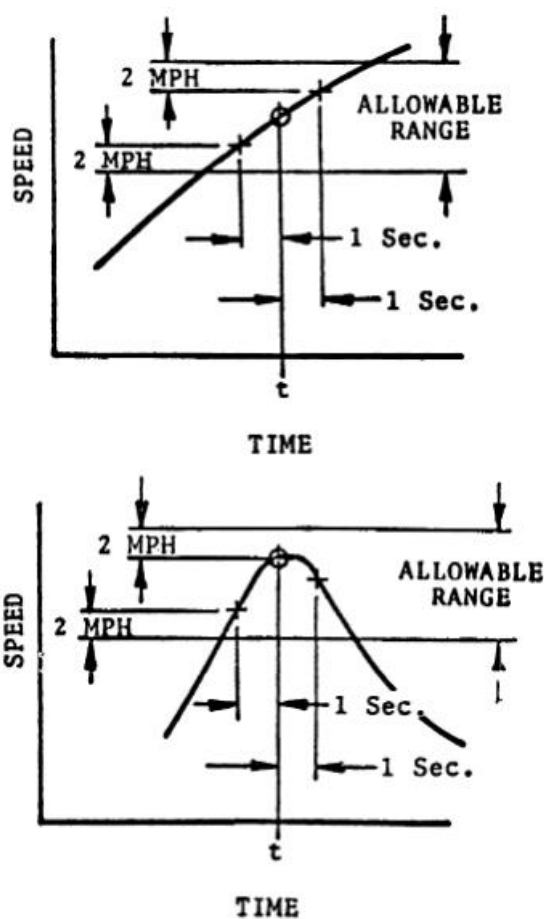
Tabela 1 – Parâmetros do ciclo FTP-75.

FTP-75	
Duração (s)	1877
Distância percorrida (km)	17,77
Velocidade máxima (km/h)	91,25
Velocidade média (km/h)	34,06
Desvio padrão de velocidade (km/h)	25,67
Aceleração máxima (m/s ²)	1,48
Aceleração positiva média (m/s ²)	0,20
Desvio padrão de aceleração positiva (m/s ²)	0,38
RPA média	0,16
Regime em marcha lenta (%)	22,20

Fonte: (Autor, 2020).

A norma da EPA estabelece limites considerados aceitáveis de desvios do perfil de velocidades do FTP-75. O limite superior de tolerância de um dado ponto no ciclo é o maior valor entre as velocidades do intervalo de tempo de 1 s do ponto anterior e posterior, com acréscimo de 2 mi/h. De forma análoga, o limite inferior de tolerância de um dado ponto no ciclo é o menor valor entre as velocidades dos intervalos de tempo de 1 s do ponto anterior e posterior, com decréscimo de 2 mi/h. Na Figura 9 é apresentado um esquema com exemplos da aplicação dessas tolerâncias.

Figura 9 – Tolerâncias de velocidade para o ensaio do ciclo FTP-75.



Fonte: (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA), 2016)

O ciclo FTP-75 é criticado pelos baixos valores de aceleração – o valor máximo em todo o ciclo não passa de $1,48 \text{ m/s}^2$ – devido à época de sua elaboração, final dos anos 60, quando a tecnologia dos dinamômetros de chassi era um fator limitante a esses valores (GIAKOUMIS, 2017). Ainda, o FTP-75 não contempla todos os modos

de operação de um veículo leve, haja vista que a EPA vem regulamentando testes adicionais aos veículos leves, como o SFTP (do inglês, *Supplemental Federal Test Procedure*), para aplicar altas velocidades (de até 130 km/h) e altas acelerações e, ainda, o ciclo HWFET (do inglês, *Highway Fuel Economy Test*) para avaliar o desempenho do veículo em rodovias (TUTUIANU et al., 2014). A partir do ano de 2008, a EPA passou a considerar – além do FTP-75 e HWFET – outros três ciclos complementares para a homologação de veículos leves, são eles: o “*cold temperature FTP procedure*” (o ciclo UDDS realizado a cerca de -6 °C), o SC03, e o EPA US06 (SFTP). Os três ciclos adicionais foram implementadas para ponderar o desempenho dos veículos em condições de baixas temperaturas, uso de ar condicionado, e altas velocidades, respectivamente (DE MELO et al., 2018).

A legislação brasileira prevê no ensaio de certificação de gases poluentes o ciclo FTP-75 como ciclo de condução padrão, porém de forma segmentada em duas etapas. Primeiro, são realizadas as duas primeiras fases do FTP-75 (*cold start* e *stabilized phase*) com o veículo “frio”. Após o término da fase *stabilized*, o veículo é desligado e deixado em “repouso” por cerca de 10 minutos quando se realiza a última fase do FTP-75, só que dessa vez a partida é a quente (ABNT NBR 6601, 2005). Já para se estimar o consumo de combustível dos veículos leves, a legislação prevê dois valores de consumo de combustível: urbano e de estrada. O consumo de combustível urbano é estimado de acordo com o desempenho do ciclo FTP-75 (*cold start + stabilized phase + hot start*) e o de estrada é estimado a partir do ciclo HWFET (ABNT NBR 7024 2017, 2017).

2.1.2. Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Cycle (WLTC)

O ciclo WLTC foi desenvolvido através de um grupo de trabalho patrocinado pela União Europeia, Suíça e Japão, embora países como Índia, EUA e Coreia do Sul também contribuíram. O objetivo era de se desenvolver um ciclo baseado em dados reais de tráfego obtidos no mundo todo, através de uma base de dados unificada com quase 765.000 km de dados, tentando contemplar ao máximo as condições de dirigibilidade encontradas (TUTUIANU et al., 2014). Como resultado, foram desenvolvidos três ciclos de condução para três categorias de veículos leves baseados na razão de potência e peso (W/kg) e velocidade máxima do veículo (conforme apresentado na Tabela 2).

Tabela 2 – Classificação do ciclo WLTC para veículos leves.

	Razão potência/peso (W/kg)	Velocidade máxima (km/h)
WLTC classe 1	≤ 22	
WLTC classe 2	> 22 e ≤ 34	
WLTC classe 3a	> 34	< 120
WLTC classe 3b	> 34	≥ 120

Fonte: (Autor, 2020).

Os ciclos são compostos por quatro fases: *low*, *medium*, *high* e *extra-high*. Na Figura 10 é apresentado o ciclo para a classe de veículos 3b – mesma classe do veículo de testes utilizado nesse trabalho. O ciclo WLTC-3B possui, ao todo, 1800 segundos de duração, sendo, 589 s na fase *low*, 433 s na fase *medium*, 455 s na fase *high* e 323 na fase *extra-high*. Mais informações sobre alguns parâmetros teóricos são apresentados na Tabela 3.

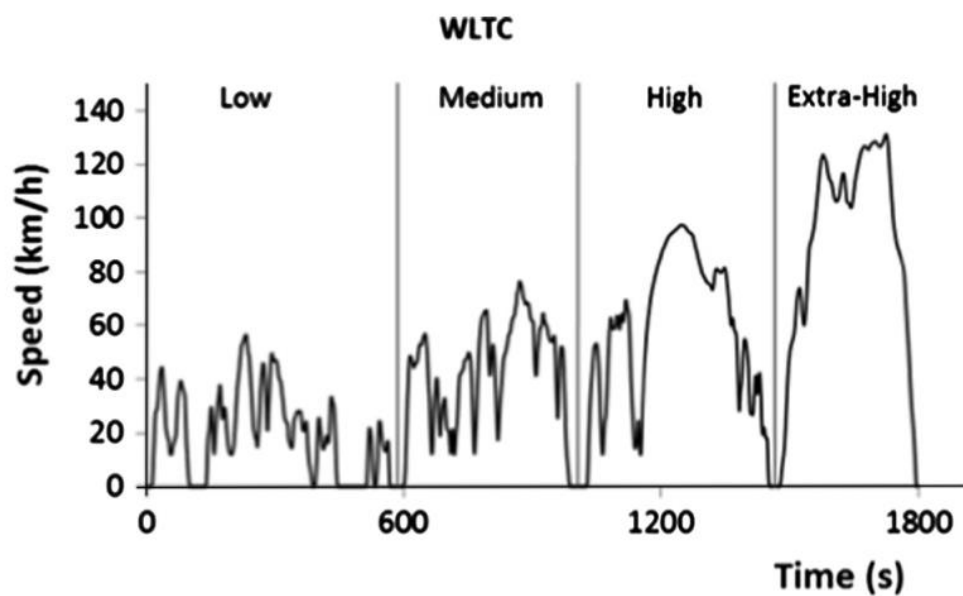
Tabela 3 – Parâmetros teóricos do ciclo WLTC classe 3b.

WLTC-3B	
Duração (s)	1800
Distância percorrida (km)	23,27
Velocidade máxima (km/h)	131,30
Velocidade média (km/h)	46,51
Desvio padrão de velocidade (km/h)	36,12
Aceleração máxima (m/s ²)	1,67
Aceleração positiva média (m/s ²)	0,18
Desvio padrão de aceleração positiva (m/s ²)	0,32
RPA média	0,15
Regime em marcha lenta (%)	14,71

Fonte: (Autor, 2020).

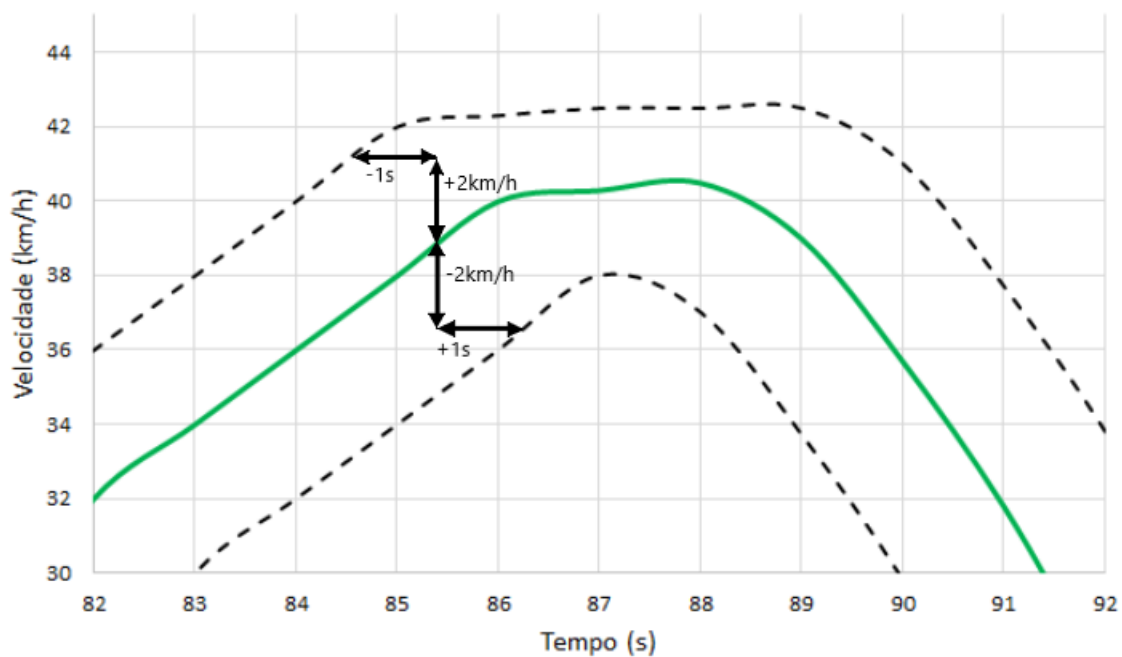
Para a realização do ensaio dos ciclos WLTC são previstas as seguintes tolerâncias em relação a velocidade teórica do ciclo: máxima de 2 km/h em relação a maior velocidade da curva em ± 1 segundo do dado ponto; e mínima de 2 km/h em relação a menor velocidade da curva em ± 1 segundo do dado ponto. O ensaio só é considerado válido se o número de violações – quando a velocidade real não respeita as tolerâncias citadas acima por mais de 1 segundo – não ultrapassar o valor de 10. Um exemplo de como são aplicadas as tolerâncias no perfil de velocidades do ciclo é mostrado na Figura 11.

Figura 10 – Ciclo WLTC classe 3b.



Fonte: (SUAREZ-BERTOIA et al., 2015).

Figura 11 – Tolerâncias de velocidades estabelecidas para o ciclo WLTC.



Fonte: (Autor, 2019).

A inclusão do ciclo WLTC na Europa, em comparação ao seu antecessor (NEDC), representa um grande avanço para a avaliação de desempenho de novos veículos, pois é um ciclo mais dinâmico e incorpora mais comportamentos transientes, haja vista que por muito tempo um ciclo modal e repetitivo foi empregado como padrão para testar o desempenho dos veículos leves. Ainda em comparação com o ciclo anterior (NEDC), o ciclo WLTC cobre mais que o dobro da distância e apresenta valores maiores de velocidades média e máxima, aceleração máxima e a aceleração positiva relativa (RPA, do inglês, *Relative Positive Acceleration*) (GIAKOUMIS, 2017).

2.2. PARÂMETROS DE ANÁLISE

Nessa seção serão abordados alguns parâmetros e métricas utilizados para analisar ciclos de condução e ponderar suas influências no desempenho dos veículos. Como esse trabalho busca comparar e avaliar apenas os ciclos de condução em estudo, a estratégia de troca de marchas e a força resistiva ao rolamento aplicada pelo dinamômetro de chassi foram mantidas constantes para a realização dos testes. Assim, entende-se que, ao manter essas condições iguais, a análise dos parâmetros será independente de fatores dos procedimentos de testes e os dados obtidos são resultados exclusivamente do perfil de velocidades.

2.2.1. Parâmetros analíticos do ciclo

Primeiramente, tem-se parâmetros elementares como os valores de velocidade e aceleração exigidos em cada ciclo e sua relação com a carga e a frequência de operação do motor, de forma que dois cenários são passíveis de contribuição para a frequência de operação e a carga do motor: em condições urbanas são influenciadas por acelerações “bruscas”; e em regimes de condução em estradas e rodovias são influenciadas pelos valores altos de velocidade. No regime urbano de baixas velocidades, a carga e a frequência de operação do motor são muito influenciadas pela aceleração do veículo. Devido à baixa velocidade do veículo nessas condições a inércia a ser vencida para movimentar o carro se torna muito relevante quando eventos transientes de mudança de velocidade são exigidos (tanto em frequência quanto em magnitude), pois o aumento de velocidade exigido nesse tipo de condução

urbana é maior. Já na condução em rodovias os valores de aceleração são relativamente menores, pois a variação de velocidade exigida é inferior em termos de magnitude e o fator dominante nesse caso se torna a própria velocidade, pois a carga e a rotação do motor são influenciadas pela força de resistência aerodinâmica que, por sua vez, aumenta com o quadrado da velocidade (GIAKOUMIS; ZACHIOTIS, 2018).

Outros fatores relacionados aos padrões de condução que podem afetar as emissões de poluentes e o consumo de combustível são as oscilações de velocidade e aceleração (ANDRÉ, 2014; ERICSSON, 2001). A medida de dispersão dos valores de velocidade e aceleração pode ser expressa através do desvio padrão. Valores altos de desvio padrão indicam comportamento transiente, pontos do ciclo mais dispersos e, conseqüentemente, maior alcance do teste (GIAKOUMIS, 2017).

Além disso, outra métrica importante quando se trata de ciclos de condução é a aceleração positiva relativa (RPA, do inglês, *Relative Positive Acceleration*). Este é, inclusive, um parâmetro utilizado pelo grupo de trabalho encarregado da composição do ciclo WLTC para caracterizar as “viagens” dos dados de tráfego reunidos. O termo viagem representa toda a operação do veículo desempenhada entre dois intervalos de repouso. A RPA pode ser interpretada como o trabalho específico da aceleração de uma dada viagem. É uma métrica utilizada para estimar a carga ou exigência de cada viagem do ciclo, em que uma viagem corresponde ao desempenho entre um período de marcha lenta e outro (SILEGHEM et al., 2014).

$$RPA = \frac{\sum_{i=1}^n a_i^+ \cdot v_i \cdot \Delta t}{x} \quad (1)$$

A aceleração positiva relativa pode ser calculada a partir da equação 1, onde v_i e a_i^+ são a velocidade e aceleração positiva observadas no instante i , respectivamente Δt é o acréscimo de tempo (1 s) e x corresponde a distância percorrida durante a viagem. Assim, apenas os pontos em que a aceleração é positiva são somados para estimar a demanda e a contribuição de cada viagem.

2.2.2. Parâmetros de desempenho

A pressão média efetiva de eixo (*bmep*, do inglês, *Break Mean Effective Pressure*) foi utilizada como parâmetro de carga da operação do MCI. É um fator muito empregado na análise de motores de combustão interna por ser independente do tamanho, número de cilindros e da frequência de operação do motor (STONE, 2012).

$$bmep = \frac{P_b \cdot n_R}{V_d \cdot N} \quad (2)$$

O parâmetro *bmep* pode ser estimado de acordo com a equação 2, onde P_b é a potência de eixo, V_d é o volume deslocado pelo motor de combustão interna, N é a frequência de operação do motor e n_R é um fator de conversão de acordo com o ciclo de operação do MCI (i.e. n_R é igual a 2 para motores do ciclo de quatro tempos e igual a 1 para motores do ciclo de dois tempos).

A operação de um motor de combustão interna também pode ser analisada em termos de eficiência energética. O consumo de combustível pode ser avaliado com base na potência de eixo entregue pelo motor através do consumo específico de combustível (*bsfc*, do inglês, *Break Specific Fuel Consumption*) estimado de acordo com a equação 3, onde \dot{m}_f é a vazão de combustível medida. De forma análoga, um parâmetro adimensional que avalia a capacidade do motor em produzir potência a partir da quantidade de energia entregue através do combustível em uma determinada condição de operação é a eficiência de conversão de combustível. Esta pode ser estimada de acordo com a equação 4, onde Q_{LHV} é o poder calorífico inferior do combustível (HEYWOOD, 1988).

$$bsfc = \frac{\dot{m}_f}{P_b} \quad (3)$$

$$\eta_f = \frac{P_b}{\dot{m}_f \cdot Q_{LHV}} \quad (4)$$

Haja vista que o desenvolvimento de potência de um motor de combustão interna está relacionado com a energia química do combustível, essa, por sua vez, depende da disponibilidade de ar para que ocorra a oxidação o combustível. Dessa

forma, o desempenho de um MCI também pode ser avaliado de acordo com sua capacidade de admitir uma nova mistura de ar e preencher o volume do cilindro. Uma métrica utilizada para tal é a eficiência volumétrica (η_v) que pode ser estimada de acordo com a equação 5, onde $\rho_{a,i}$ corresponde a densidade atmosférica do ar (STONE, 2012).

$$\eta_v = \frac{2 \cdot \dot{m}_f \left(\frac{A}{F}\right)_R}{\rho_{a,i} \cdot V_d \cdot N} \quad (5)$$

2.3. ETANOL

As misturas de etanol surgem como uma possível alternativa para substituir a utilização dos combustíveis fósseis no setor de mobilidade individual, haja vista que as atuais tecnologias empregadas nos veículos leves são capazes de acomodar o uso desse biocombustível (DARDIOTIS et al., 2015).

O etanol, um combustível renovável, é produzido a partir do processo de fermentação dos açúcares de culturas como a cana-de-açúcar, milho e mandioca. Devido à sua origem vegetal, as emissões da queima de etanol em um MCI são inferiores em comparação a queima de gasolina e de diesel de origem fóssil. Haja vista que o carbono desse biocombustível é derivado unicamente do CO₂ da atmosfera, através do processo de fotossíntese das culturas orgânicas (SOARES, L. H. DE B.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, 2009).

Além disso, o etanol possui um número de octanas superior à gasolina e maior calor de vaporização que, combinado com a baixa razão ar-combustível estequiométrica, pode resultar no resfriamento da carga de admissão (SILEGHEM et al., 2015). Esse efeito, por sua vez, diminui as temperaturas dentro do cilindro, reduzindo as emissões de NO_x e aumentando a eficiência térmica do ciclo (NAKATA et al., 2006).

Ainda, a aplicação do etanol super hidratado (etanol com maiores concentrações de água do que a definida pela ANP) em veículos leves vêm sendo discutida. Devido à característica azeotrópica da mistura etanol-água, o gasto de energia do processo de destilação sobe exponencialmente para concentrações acima de 95,6% (v/v de etanol) (MARTINEZ-FRIAS; ACEVES; FLOWERS, 2007). Dessa

forma, considerando que grande parcela da energia gasta na produção do etanol procede da destilação e desidratação, o uso desse combustível com maiores teores de água beneficia o balanço de energia.

Portanto, tendo em vista que, no futuro, não existirá uma solução única e derradeira para a fonte de energia, e, se tratando de combustíveis renováveis as soluções são dependentes de características regionais, como solo, clima e infraestrutura. No Brasil, que possui uma experiência de mais de 30 anos lidando com a produção e a distribuição de álcool no país, o uso de misturas de etanol pode ser uma solução tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental.

3. METODOLOGIA

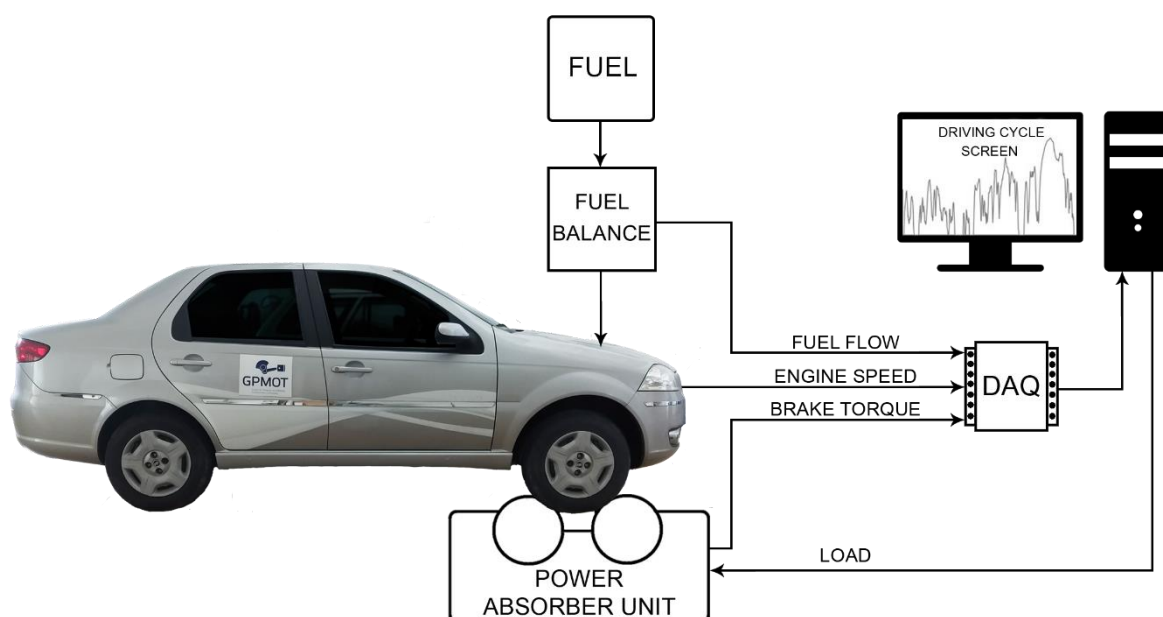
Para os propósitos desse trabalho a fase *extra-high* do ciclo WLTC-3B fora retirada, assim como o ciclo suplementar SFTP que não foi realizado em conjunto com o FTP-75. Portanto, o termo “WLTC” utilizado nesse trabalho se refere ao ciclo WLTC-3B sem sua última fase *extra-high*. A abordagem utilizada neste trabalho é baseada em três etapas: análise de parâmetros referentes as características dos ciclos (e.g. máxima aceleração, desvio padrão da velocidade); análise dos mapas de operação do veículo durante o ciclo; e análise em regime estacionário dos cinco principais pontos de operação do ciclo.

3.1. APARATO EXPERIMENTAL

O veículo utilizado foi um sedan flex-fuel FCA Siena com um motor de ignição por centelha de 1,4 litros de volume deslocado. Maiores informações do motor e do veículo são apresentadas na Tabela 4. A escolha desse modelo é baseada na participação dos veículos leves, em especial os modelos flex-fuel, que foram responsáveis por cerca de 76% de novos licenciamentos no ano de 2018 no Brasil (ANFAVEA, 2019). Um esquema do aparato experimental utilizado nesse trabalho é apresentado na Figura 12.

O dinamômetro de chassis utilizado, tanto para a realização dos ciclos WLTC e FTP-75, quanto para aplicar carga nos testes estacionários, foi um dinamômetro de freio por correntes parasitas (Foucault). O modelo do equipamento é identificado por “*Mustang MD-150 series*”, possui dois rolos de 218 mm de diâmetro, suporta velocidades de até 240 km/h e consegue absorver cargas de até 466 kW. As informações de velocidade do veículo, potência e torque foram obtidas e armazenadas com o auxílio do software embarcado. A frequência de operação do motor foi estimada através da análise da frequência do sinal de um dos injetores do veículo. Dessa forma, foi possível obter, mediante os dados do software do dinamômetro, os mapas de operação do veículo durante o ensaio dos ciclos de condução padrão (e.g. frequência de operação do motor x potência de eixo).

Figura 12 – Aparato experimental.



Fonte: (Autor, 2019).

Tabela 4 – Informações do veículo de testes.

Veículo	
Modelo	Siena Tetrafuel
Massa (kg)	1200
Razão potência/massa (W/kg)	49,67
Transmissão	Manual de 5 marchas + ré
Relação de transmissão (1° marcha)	4,273
Relação de transmissão (2° marcha)	2,238
Relação de transmissão (3° marcha)	1,444
Relação de transmissão (4° marcha)	1,029
Relação de transmissão (5° marcha)	0,872
Motor FIAT Fire 1.4	
Volume deslocado (cm ³)	1386
Curso (mm)	84
Diâmetro (mm)	72
Número de cilindros	4
Razão de compressão	10,35±0,15:1
Potência máxima (kW)	59,6 @5500 rpm (Etanol hidratado)
Torque máximo (Nm)	121,6 @2250 rpm (Etanol hidratado)
ECU (<i>engine control unit</i>)	IAW 4SF Magneti Marelli

Fonte: (Autor, 2020).

O fator de excesso de ar (λ) foi monitorado através de um sensor UEGO Bosch LSU 4.2 com o auxílio de um datalogger FuelTech WB-O2. As temperaturas da exaustão e admissão foram monitoradas a partir de termopares do tipo K e a temperatura do óleo no motor por um termistor NTC. Ainda, a pressão da admissão foi estimada através de um sensor de pressão Bosch piezoresistivo código 0 261 230 030. Medições de consumo de combustível foram realizadas através de um sistema gravimétrico desenvolvido no próprio laboratório com precisão de até 3% (SILVEIRA et al., 2018).

3.2. ENSAIO DOS CICLOS PADRÃO DE CONDUÇÃO

Os ciclos WLTC e FTP-75 foram realizados em um dinamômetro de chassis, de forma que os dados de frequência de operação do motor, potência de eixo na roda e velocidade do veículo foram observados e armazenados para cada segundo do teste. Os dois ciclos foram realizados pelo mesmo motorista com o mesmo veículo e combustível (etanol hidratado com 92% de etanol e 8% de água em volume v/v) para eliminar variáveis que pudessem vir a comprometer a comparação entre esses. Os ciclos de condução foram realizados respeitando as tolerâncias de velocidade permitidas de acordo com a legislação de cada um: ± 2 mi/h e ± 1 s para o FTP-75; e ± 1 km/h e ± 1 s para o WLTC. Da mesma forma o número máximo permitido de violação dessas tolerâncias no perfil de velocidade desempenhado pelo veículo também foi respeitado para que o ensaio fosse válido. Ainda, cada legislação, seja a brasileira ou europeia, especifica uma série de procedimentos para esse tipo de ensaio, incluindo estratégias para troca de marchas e calibração de coeficientes de resistência no dinamômetro. Dessa forma, para que os resultados obtidos refletissem apenas o assunto em estudo – comparação dos ciclos de condução – e não os procedimentos estabelecidos nas leis em si, optou-se por utilizar o mesmo critério para ambos os ciclos. No caso da troca de marchas, foram seguidas as recomendações segundo o manual do próprio veículo, enquanto os mesmos coeficientes de potência resistiva do rolo foram utilizados para simular o arrasto e a resistência ao rolamento do veículo.

3.3. SELEÇÃO DOS PONTOS DE OPERAÇÃO

A partir dos dados de frequência de operação do motor e potência na roda obtidas para cada segundo dos ciclos, obteve-se um mapa de operação do motor com um espaço amostral de 1477 e 1877 para o ensaio WLTC e FTP-75, respectivamente. Para determinar os cinco pontos que mais se repetiram no ciclo e avaliá-los minuciosamente em regime estacionário, uma abordagem baseada na ferramenta histograma foi aplicada. Dessa forma, as variáveis observadas, frequência de operação e potência média efetiva de eixo (b_{mep}), foram divididas em um número de classes K obtido ao dividir a diferença entre os valores máximo e mínimo do espaço amostral pelo tamanho de classe T , como exemplificado na equação 6 para a variável b_{mep} .

Considerou-se um tamanho de classes T de 50 rpm e 0,1 bar para as variáveis de frequência de operação do motor e b_{mep} , respectivamente. Esses valores estão dentro da incerteza de medição observada para as medições de frequência de operação do motor (2,67 rpm) e pressão média efetiva de eixo (0,1 bar).

$$K = \frac{(b_{mep_{max}} - b_{mep_{min}})}{T} \quad (6)$$

Por exemplo, os valores máximo e mínimo observados durante o ciclo de WLTC para a frequência de operação do motor foram 750 rpm e 3200 rpm e para pressão média efetiva de eixo (b_{mep}) foram 7,4 bar e 0 bar. Ao aplicar a equação 6 tem-se que o número de classes das variáveis frequência de operação do motor e b_{mep} , considerando uma amplitude de classe de 50 rpm e 0,1 bar, é de 49 e 75, respectivamente. Ou seja, os dados do ciclo WLTC de frequência de operação do motor foram divididos em 49 colunas de amplitude de 50 rpm e os dados de b_{mep} em 75 colunas de amplitude de 0,1 bar.

Assim, é possível analisar a dispersão dos pontos dentro dos intervalos estabelecidos para cada variável, em que o grau de concentração de pontos dentro de um intervalo implica em maior frequência, ou seja, a contribuição dessa condição para o teste do ciclo padrão. Dessa forma, as cinco zonas que concentram o maior número de pontos (i.e. mais segundos, mais tempo de residência no ciclo) foram selecionadas para serem testadas. Assim, para avaliar o desempenho nessas zonas

de operação, o veículo foi testado em regime permanente com as condições de frequência de operação do motor e potência média efetiva de eixo fixadas. Esses valores de velocidade e carga selecionados correspondem aos valores médios observados em cada uma das cinco zonas de operação.

3.4. PARÂMETROS DOS CICLOS

A análise das métricas dos ciclos foi estimada através de ferramentas estatísticas de conhecimento geral, como a média aritmética dos dados obtidos, e os desvios padrão, calculados considerando-se o número de pontos dos testes obtidos como a população total. Conforme abordado no capítulo anterior, um dos parâmetros que avalia a dinamicidade e demanda dos ciclos de condução é a aceleração relativa positiva das viagens. Aqui, o termo “viagem” corresponde a todo o ocorrido entre dois instantes de velocidade do veículo nula, ou seja, se refere ao desempenho do veículo entre sair e retornar ao estado de repouso. A RPA de cada viagem observada foi calculada de acordo com a equação 1 apresentada na seção 2.2.1.

3.5. PARÂMETROS DE OPERAÇÃO DO MOTOR

Os parâmetros de operação apresentados na seção 2.2.2 foram utilizados para avaliar o desempenho do veículo em regime estacionário nos pontos de operação mais relevantes dos ciclos de condução. Para os ensaios em regime estacionário o veículo e o motor foram pré-aquecidos até que a temperatura do óleo do motor estabilizasse em cerca de 90 °C. E todas as medições foram realizadas sempre observando a manutenção dessa temperatura de operação. Além disso os testes foram realizados utilizando etanol comercial como combustível, haja vista que como mencionado anteriormente nesse trabalho, por ser um combustível renovável é considerado uma boa solução para a mobilidade sustentável no Brasil.

A pressão média efetiva de eixo, um parâmetro que avalia a carga aplicada ao motor, foi calculada segundo a equação 2, em que os valores utilizados foram os de potência de eixo (observada no software do dinamômetro) e frequência de operação do motor (obtida pela análise da frequência do sinal de um dos injetores do veículo).

O consumo específico de combustível, que mede a habilidade do motor em utilizar o combustível para produzir trabalho em uma condição de operação específica, foi calculado de acordo com a equação 3, em que a vazão mássica de combustível foi estimada através do sistema gravimétrico.

A eficiência de conversão de combustível foi estimada através da equação 4, em que o poder calorífico inferior (Q_{LHV}) utilizado se refere ao poder calorífico inferior do combustível (E97W03) de 25,885 MJ/kg – estimado com base na fração mássica de etanol anidro presente na mistura.

A eficiência volumétrica, que mede a habilidade do motor no processo de admitir uma nova mistura de ar, foi calculada conforme a equação 5, em que os valores de $\left(\frac{A}{F}\right)_R$ – a razão de ar-combustível real – foram obtidos com o auxílio do sensor de oxigênio e $\rho_{a,i}$ – densidade do ar admitido – foi estimada a partir dos dados de temperatura e pressão da admissão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. ARTIGO PUBLICADO E APRESENTADO EM CONGRESSO

Os resultados do presente trabalho foram publicados nos anais do congresso SAE Brasil International, organizado pela SAE Brasil no ano de 2019, sob a identificação DOI: 10.4271/2019-36-0144, conforme o artigo que segue. Na sequência, são apresentados resultados adicionais sobre a comparação dos resultados prático e teórico e um breve resumo dos resultados e discussões.

**Comparison between the WLTC and the FTP-75 driving cycles
applied to a 1.4 L sedan vehicle running on ethanol**

**MARIA FERNANDA POSSEBON MAZER
LEONARDO SONEGO HATSCHBACH
MACKLINI DALLA NORA
MARIO EDUARDO SANTOS MARTINS
IGOR RODRIGUES DOS SANTOS
ROBERTO ANTONIO GARLET
JULIANO PEREIRA SILVEIRA**

**SAE BRASIL
SAE BRASIL**

**Congresso 2019
SAE BRASIL**
VEÍCULOS E VIAS INTELIGENTES -
O CAMINHO PARA A MOBILIDADE SUSTENTÁVEL

SAE
INTERNATIONAL®

28th SAE BRASIL International
Congress and Exhibit
São Paulo, Brasil
October, 14th to 18th

Comparison between the WLTC and the FTP-75 driving cycles applied to a 1.4 L light-duty vehicle running on ethanol

Maria F. P. Mazer, Leonardo S. Hatschbach, Igor R. dos Santos, Juliano P. Silveira, Roberto A. Garlet, Mario E. S. Martins, Macklini Dalla Nora
Federal University of Santa Maria

Abstract

The forecast scenarios regarding the environmental pollution raises a question whether the current vehicle emission certification is reliable enough to assure fleet agreement with the legal limits. Type approval tests have been performed on chassis dynamometer in order to evaluate the emission factors and fuel consumption for passenger cars. Standardized procedures such as the FTP-75 proposed in the United States (currently incorporated in the Brazilian legislation) and the Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle (WLTC), a transient driving cycle model designed by the European Union to overcome the shortcomings of the New European Driving Cycle (NEDC), are discussed in this paper. Both cycles were performed in a chassis dynamometer with a flex-fuel passenger car running on ethanol blend (E92W08). The driver, vehicle and fuel were kept constant so the comparison between the cycles would not be compromised. The vehicle chosen was a 1.4 dm³ displaced volume FIAT sedan with maximum power of 60 kW at 5500 rpm and maximum torque of 122 Nm at 2250 rpm. The cycle dynamics and the engine operation points were assessed in this paper. The five points estimated as the most representative of both tests were selected for steady-state investigations conducted using hydrous-ethanol (E97W03), which is the ethanol blend available in Brazilian fuel stations. These points were evaluated in terms of fuel consumption and air excess factor. The results showed that the FTP-75 demanded greater average and maximum acceleration values, implying on more aggressive driving conditions. The WLTC presented a more homogeneous acceleration per speed diagram, providing higher average speed and speed standard deviation (e.g. more transient conditions) which is more like the real drive conditions. It could be seen that the WLTC covers a wider range of engine operation conditions holding more dispersed points than the FTP-75. In addition, the WLTC contained points with higher load, which made the results for fuel consumption to be higher compared to FTP-75. The engine operation points provided by the FTP-75 were excessively condensed. Therefore, it could be concluded that the FTP-75 can be a predictable test with repeated points of operation. The WLTC does not have sufficient number of trips in its schedule, which is different from the behavior expected in real-world driving conditions. Also, it could be observed that depending on the test specifications the driver can largely influence the performance of the vehicle.

Introduction

Engine out emissions have been repeatedly reported as potential causes for poor air quality in large cities and global warming main player on CO₂ emissions [1,2,3]. In order to minimize the hazards resulted from pollutant emissions from internal combustion engines, exhaust limits are regulated by laws. As a major trend in the world, governments are drafting political programs to gradually restrain such compounds. For instance, the EU has established, in their new legislation, the reduction of NO_x emissions and other compounds from light passenger and commercial vehicles [4]. In the United States the Environmental Protection Agency (EPA) has proposed a Tier 3 program establishing new vehicle emissions and fuel economy standards [5].

Each country decides the best way to regulate and supervise these vehicle parameters from the fleets produced by the industry. Usually, type approval tests are implemented to certificate vehicles according to emission factors and fuel economy. These tests consist of performing a standard cycle on a chassis dynamometer throughout emissions data measurement. These procedures simulated traffic conditions, idling periods, urban and highway running, in a standardized procedure to be reproduced in the laboratory. Studies regarding the effects of these driving situations in the vehicle performance are fundamentally helpful for the organizations that regulates such certification tests. The repeatability and reliability of legal certification tests have been a major issue addressed in the transportation community. A recent study showed the driving style and scenario encountered in the real-world can widely differ from the speed profile presented by EPA driving cycles, which can affect fuel economy performance [6]. The brand-new technology known as PEMS (Portable Emissions Measurement System) has been extensively used in studies that aim to evaluate the real-world contribution to vehicles emissions [7] [8] [9], the so-called RDE (Real Driving Emissions). Other study suggests a new approach in designing driving cycles based on the use of virtual environments [10]. Although RDE can be a prominent source of data from the real-world it still needs study and development to become a more consistent and uniform procedure [11]. Despite, the legal tests will always be a part of vehicle's certification procedure. A standardized test is needed for regulating equal environment and schedules to be the comparison basis all over the world of emission factors. The driving cycles also represent a major trend in the automotive industry [12] as it could be a catalyst for change in the manufacturing process by motivating the creation of new technologies and improvements in vehicle performance. Given the role that legal certification tests play in the environment and industry, the efficiency of such tests in representing real driving

conditions is vital for understanding and controlling the impact of vehicle emissions and energy demand.

The New European Driving Cycle (NEDC) has been the standard certification test for light-duty vehicles in Europe and several countries for almost 20 years. Its weaknesses are known for overlooking acceleration profiles and engine operation points [13,14,15,16]. The Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP) has been developed by the UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) to replace the NEDC procedures. The transition to the new type approval test is to occur by 2019.

The WLTP arranges vehicles based on their curb mass and maximum speed. Its driving schedule, the Worldwide Harmonized Light vehicles Test Cycle (WLTC), comprises four phases: low, medium high, and the extra-high (which is supposed to account for high road performance). In comparison to the NEDC schedules, the WLTC presents greater mean vehicle speed and distance traveled. Also, it demands more transient behavior in terms of acceleration and speed standard deviation compared to the steady speed periods performed in the NEDC. In the United States the type approval test for light-duty vehicle emissions and fuel economy certification is the FTP-75 (Federal Test Procedure 75). It is composed by a cold start, followed by the transient phase and a repetition of the first phase but at hot conditions. For vehicles produced after 2000 the legislation demands an additional schedule called Supplemental Federal Test Procedure (SFTP). This makes up for the deficiency of the FTP-75 on highspeed profile content. For vehicles with a power-to-mass ratio higher than 34 W/kg and maximum speed higher than 120 km/h, the WLTC Class 3B is determined. Both driving cycles schedules are displayed in figure 1 (the extra-high phase of WLTC-3B is suppressed). Theoretical data and schedule characteristics are exposed in table 1.

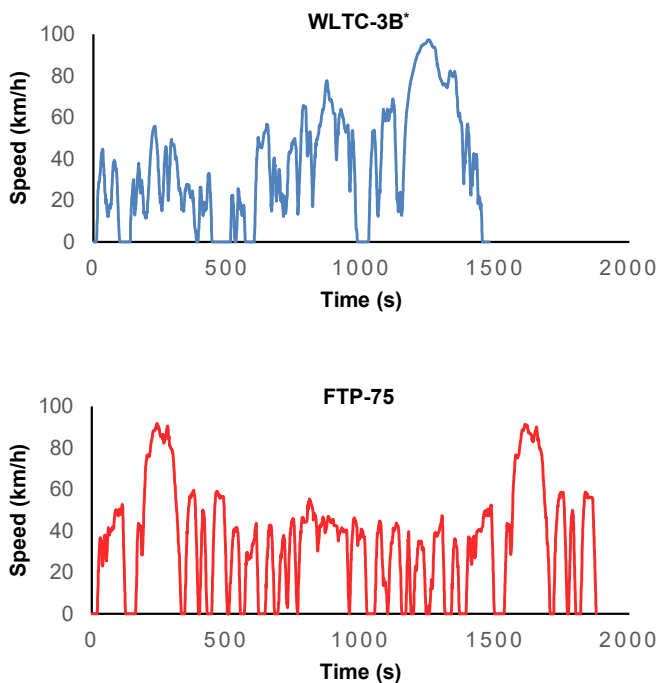


Figure 1. The driving schedules for type approval tests WLTC-3B and FTP-75. WLTC-3B* stands for the WLTC-3B cycle without the extra-high phase.

Table 1. Dynamic characteristics of the WLTC-3B and FTP-75 schedules.

	WLTC-3B*	FTP-75
Speed tolerance	± 2 km/h	± 2 mi/h
Duration (s)	1477	1877
Distance (km)	15.02	17.77
Av. Speed (km/h)	36.46	34.06
Max. Speed (km/h)	97.40	91.25
Speed Standard Deviation (km/h)	27.46	25.67
Av. Positive Acceleration (m/s ²)	0.18	0.20
Max. Acceleration (m/s ²)	1.67	1.48
Pos. Acc. Standard Deviation (m/s ²)	0.33	0.38
Relative Positive Acceleration	0.16	0.16
Idling (%)	17.72	22.20

The optimization of driving schedules applied in type approval tests are a persistent topic of research as it could better reach real world driving conditions [17]. Several studies comparing different standard driving cycles have been already performed [18,19,20,21,22]. The first is a bibliography review about the fuel economy of different vehicles (ICE, hybrid and electric) according to NEDC, WLTC and EPA driving cycles that concluded the first procedure was the least severe and the last the most demanding. In [19] the vehicle tested was a turbocharged diesel van and it was concluded that more transient cycles result on higher amounts of pollutant emissions and fuel consumption. It was also demonstrated in [20] that the WLTC lacks accelerations points during high speeds 70-100 km/h and that NO_x emissions are dependent on vehicle speed. The study comparing emissions and fuel economy of a flex-fuel vehicle from different driving cycles [21] showed the effects of speed profiles in engine warm-up and exhaust temperatures. In the latter study the effects of ethanol containing blends of gasoline on emissions over the WLTC were evaluated. NO_x and CO emissions obtained were higher in the WLTC compared to the NEDC.

Given these facts, the present work provides a new perspective into type approval and vehicle certification tests by comparing WLTC to the current based type approval test FTP-75 for vehicle certification in Brazil and United States. It was evaluated the acceleration and engine operation map, fuel consumption, engine load, and brake efficiency for a light-duty passenger vehicle running on ethanol.

Methodology

The vehicle used in this research was a FIAT 1.4 L flex-fuel passenger car with additional information described in table 2. For the purpose of this research the extra-high phase of the WLTC-3B was not incorporated and so the SFTP from the FTP due to scope limitation in assessing the daily basis effect of type approval test (e.g. urban performance). Therefore, the use of the term 'WLTC' over the course of the paper denotes the cycle WLTC-3B without the extra-high phase. The standard driving cycles FTP-75 and WLTC were incorporated as chassis dynamometer schedules. The chassis dynamometer model was an eddy current power absorber *Mustang MD-150* with 218 mm diameter rolls spaced 457 mm in between. The driver and the fuel (both cycles were conducted with E92W8) were kept constant so the comparison would not be compromised. Data concerning engine speed, brake power and torque were logged every second by the dynamometer software. Thus, it was possible to obtain a map (engine

speed x brake mean effective pressure) of the engine operation points during the performance of both cycles. The brake mean effective pressure (bmep) was calculated according to equation 1 [23].

$$bmep = \frac{P_b \cdot \eta_R}{V_d \cdot N} \quad (1)$$

Table 2. Engine properties for the vehicle tested.

Type	Sedan
Passengers capacity	5
Displaced volume	1386 cm ³
Stroke	84 mm
Bore	72 mm
Compression ratio	10.35±0.15 :1
Number of cylinders	4
Engine Control Unit	IAW 4SF Magneti Marelli
Maximum power	80 kW @ 5500 rpm
Maximum torque	120 Nm @ 2250 rpm
Maximum speed	166 km/h
Curb mass	1200 kg
Power to mass ratio	54.16 W/kg
Gear ratio (1 st gear)	4.273
Gear ratio (2 nd gear)	2.238
Gear ratio (3 rd gear)	1.444
Gear ratio (4 th gear)	1.029
Gear ratio (5 th gear)	0.872

The parameters of the cycle dynamics were calculated according to statistical known concepts. The average values were all obtained through the arithmetic mean value. The standard deviation values were calculated considering the number of test points as the population. To support the transient analyses of the schedules, post-data of both cycles were structured and composed in terms of trips. A trip was the vehicle's performance between two idling periods. Thus, the relative positive acceleration (RPA) concept was used to assess the transient behavior and the contribution of each trip to the whole schedule. The RPA is an important factor that represents the specific load of the trip and it was calculated as described in equation 2.

$$RPA = \frac{\sum_{i=1}^n a_i^+ \cdot v_i \cdot \Delta t}{x} \quad (2)$$

Where: x represents the total distance of the trip, Δt is the time increase (1 s), v_i is the vehicle speed at time i , and a^+ is the positive acceleration. Which means that only the points of positive acceleration were accounted for.

The engine speed (rpm) and break mean effective pressure (bmep) were binned in steps of 50 rpm and 0.1 bar, respectively. These points were evaluated according to their frequency of occurrence. The five points estimated as the most representative of both tests were selected for steady-state investigations. Hence, five points from the WLTC and FTP-75 tests were evaluated in terms of fuel consumption and air excess factor. These tests were conducted using hydrous ethanol

(E97W03), which is the ethanol blend available in Brazilian fuel stations.

The engine air excess factor was estimated through a wideband UEGO sensor *Bosch LSU 4.2* and a *FuelTech* WB-O2 datalogger. Both inlet and exhaust temperatures were measured with K type thermocouples and the oil temperature with an NTC-sensor. A *Bosch* absolute-pressure sensor was coupled to the intake. The fuel consumption was measured by a gravimetric system developed in-house, with accuracy better than 3%. The brake specific fuel consumption ($bsfc$) was estimated by equation 3 [23]. Where: \dot{m}_f is the fuel mass consumption obtained through the fuel flow measurement system and P_b is the brake power acquired by the dynamometer software. Based on the brake specific fuel consumption, the brake fuel efficiency was estimated throughout equation 4. The Q_{LHV} was the heating value of E97W3 estimated by the mass fraction of anhydrous ethanol contained in the solution (25.885 MJ/kg). The volumetric efficiency was calculated according to equation 5 [23]. The actual air fuel ratio $\left(\left(\frac{A}{F}\right)_R\right)$ was obtained based on data from the lambda sensor. The density of the inlet air was estimated based on intake pressure and temperature.

$$bsfc = \frac{\dot{m}_f}{P_b} \quad (3)$$

$$\eta_f = \frac{1}{bsfc \cdot Q_{LHV}} \quad (4)$$

$$\eta_v = \frac{2 \cdot \left(\frac{A}{F}\right)_R \cdot \dot{m}_f}{\rho_{a,i} \cdot V_d \cdot N} \quad (5)$$

Results and discussions

The results are represented in three sections. First the general analytical comparison between the cycles (e.g. cycle duration, distance, average speed and acceleration). Then, an analysis of the trips through RPA bubble charts and the points coverage of the engine operation map. Finally, highlights from the stationary tests of the most representative points.

Cycle Parameters

In table 3 the main parameters obtained from vehicle performance of the driving schedules are presented. These results represent the general dynamics of the cycles.

The WLTC cycle exhibited greater average values for speed and power. Also, the speed standard deviation (e.g. transient behavior) was higher compared to the FTP-75. In terms of acceleration, FTP-75 driving schedule demanded higher average and maximum values. In addition, the idling percentage of the test was greater for the FTP-75.

Table 3. The experimental data and parameters obtained from the cycles performed.

	WLTC-3B*	FTP-75
Duration (s)	1477	1877
Distance (km)	15.01	17.85
Av. Speed (km/h)	36.56	34.22
Max. Speed (km/h)	97.35	91.84
Speed Standard Deviation (km/h)	27.24	25.57
Av. Acceleration (m/s ²)	0.20	0.22
Max. Acceleration (m/s ²)	2.45	2.73
Acceleration Standard Deviation (m/s ²)	0.36	0.44
Relative Positive Acceleration	0.17	0.18
Av. Brake Power (kW)	5.45	4.92
Idling (%)	17.05	21.62

For the analytical assessment the WLTC had higher values of speed (average, maximum and standard deviation values). Although it is not known the true contribution of speed parameters in terms of emissions and energy factors despite of more energy spent on drag resistance, the high-speed standard deviation could represent a more transient behavior. The average, maximum and standard deviation were higher for the FTP-75 values of acceleration, which indicated more aggressive driving conditions. During acceleration the vehicle might have operated with rich mixtures increasing HC and CO emissions [23] and hindering fuel efficiency.

The divergencies between the theoretical and practical acceleration values rely on the different speed tolerances for the schedules. The FTP-75 tolerance of 2 mi/h allowed the values for acceleration to be higher than expected since the driver had a wider admissible range of speed variation. The human influence in the tests for vehicle certification certainly affect emission factors and fuel economy [24]. This could be a factor of importance to be addressed by the organizations that legally develop these procedures.

Maps and Trip Analysis

Throughout the data of vehicle speed and acceleration, a scatter chart was built. Each point of the map (displayed in figures 2 and 3 for the WLTC and the FTP-75, respectively) represents one second of the driving schedule.

There are six major outcomes that can be drawn from the acceleration map: the WLTC has better distribution of points, although it had a low density of points between 0-15 km/h and did not exhibit high-speed acceleration. The FTP-75 lacked acceleration points in the area between 60 and 75 km/h and had a gap below 20 km/h. Also, it was excessively concentrated in a few areas.

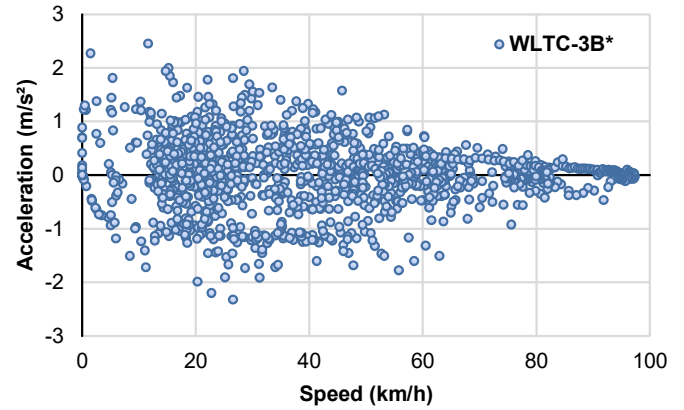


Figure 2. Dispersion chart of the experimental speed and acceleration points for the WLTC cycle.

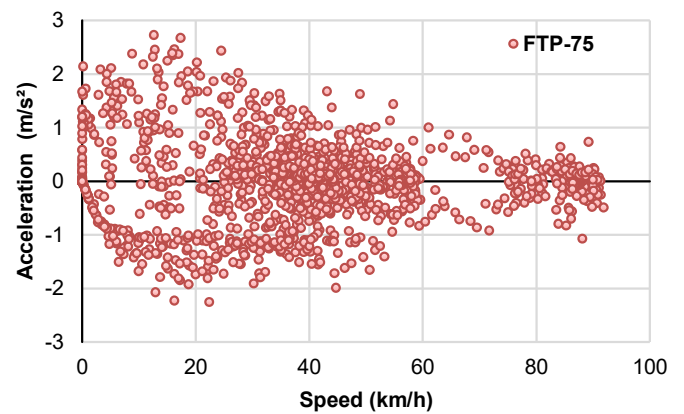


Figure 3. Dispersion chart of the experimental speed and acceleration points for the FTP-75 cycle.

The division of the cycle into trips (delimited between two idle conditions) provided the evaluation of specific load of each section and its contribution to the whole test. The trips of both cycles are displayed as bubble points in figure 4, where the kernel is the average speed and relative positive acceleration. The radius of the bubble represents the extent of duration of the trip, in seconds.

As it can be seen the FTP-75 had more trips compared to the WLTC, 21 to 7, respectively. The reduced number of trips from the WLTC balanced off with their long duration. The FTP-75, contrasting to the WLTC, had trips with RPA higher than 0.35 m/s²; although these did not last longer than 30 seconds. Both cycles did not have trips with low average speed. It can also be pointed out that due to the fact that the FTP-75 was composed by two equal segments (cold and hot start) some bubbles are repeated twice.

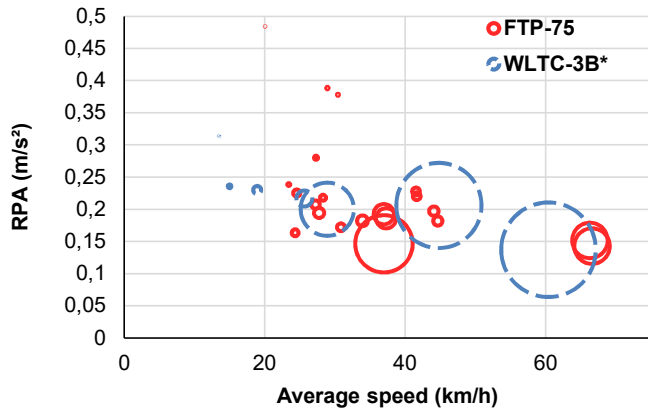


Figure 4. Bubble chart of the trips developed in each cycle. The bubbles are placed by average speed and RPA, and their size is proportional to the duration of the trip.

The acceleration and speed map for both cycles were close to the ones performed in the literature [15,19,20]. The WLTC again, in comparison to the FTP-75, filled the map more completely, which indicated a schedule comprising more possibilities of engine operation points. The acceleration range for the WLTC cycle remained between $\pm 1.5 \text{ m/s}^2$ which is similar to [25]. In terms of relative positive acceleration, the FTP-75 had a greater number of trips with short duration. According to a previous work [20] short trips are considered to be more likely to the real-world conditions and hence the presence of almost duplicated bubbles for the FTP-75 is a consequence of the repeat schedules (cold and hot start). The average RPA for both cycles was higher for FTP-75 (0.18 m/s^2) compared to WLTC (0.17 m/s^2). This could affect soot and NO emissions [19].

The data provided by the driving cycle performance was plotted in a scatter map (displayed in figures 5 and 6 for the WLTC and FTP-75, respectively). Each engine operation point was represented by engine speed and bmep values in one second of the test.

Both of the cycles are limited in load by 7.5 bar of bmep. The WLTC cycle managed to cover more area of the engine map compared to the FTP-75. It can be seen that the WLTC held more dispersed points, whereas the FTP-75 points were excessively condensed. The engine speed values were limited to 3200 rpm. The FTP-75 operation covered a wider range of engine speed values with bmep restricted to 7 bar. The FTP-75 failed to set up performance conditions in areas between 900–1250 rpm and 2000–3250 rpm. Also, it concentrated a high percentage of points in low and medium speed areas.

The analysis of the engine operation indicated that the WLTC had a better map distribution. Although it still holds a condensed amount of points around the idle condition and around 2 bar of bmep and 1500–2000 rpm. The FTP-75 operation map revealed a high concentration of the schedule in specific areas, particularly, at idle and around 1750 rpm and 2.5 bar. The majority of the cycle was focused in these two regions. This was due to the fact that the FTP-75 was composed by three phases where two of them were on the same schedule i.e. cold start and hot start. This duplication of schedules could not add different points to the map. Although the FTP-75 cycle lasted longer than the WLTC, it did not necessarily mean this extra time amount would produce more possibilities of operation points. This could cause the effect of ‘cycle beating’, which is already a problem addressed by the European Federation for Transport and Environment (T&E) [14]. This

could potentially restrain the efforts from manufacturers to improve vehicle performance at only certain points of operation.

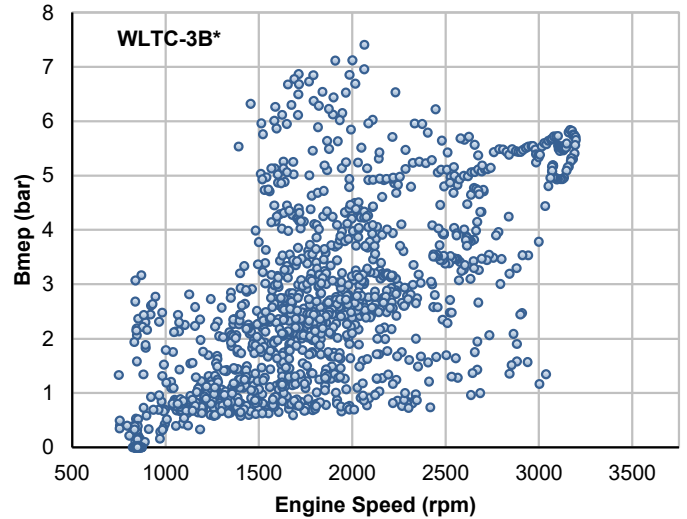


Figure 5. Scatter chart of the engine operation points during the tests of the WLTC cycle.

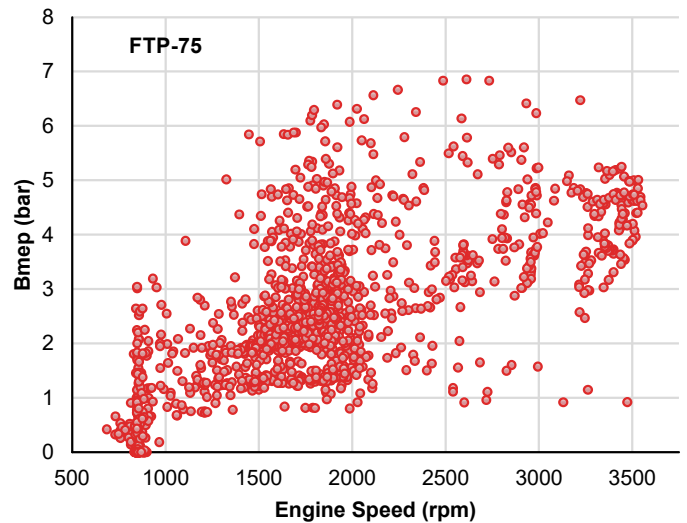


Figure 6. Scatter chart of the engine operation points during the FTP-75 cycle.

The five points with the longest durations on the WLTC and FTP-75 were selected for steady-state tests (tables 4 and 5, respectively). For both cycles the first point was the idle condition. The FTP-75 points were very close to each other (e.g. condensed engine operation points) with a bmep almost constant at 2.0 bar and engine speed between 1550–1725 rpm. Whereas the WLTC points were diversified at high (5.5 bar), medium (3.9 bar) and low (2–2.5 bar) loads.

Table 4. The points selected as the most representative for the WLTC.

WLTC-3B*		
Measured Point	Engine Speed (rpm)	Bmep (bar)
1	850	0.0
2	1800	2.0
3	1900	2.5
4	2500	3.9
5	3150	5.5

Table 5. The points selected as the most representative for FTP-75.

FTP-75		
Measured Point	Engine Speed (rpm)	Bmep (bar)
1	850	0.0
2	1550	2.0
3	1600	2.1
4	1725	2.0
5	1850	2.7

Steady state test results

As it can be observed in tables 6 and 7 for all the points tested the air excess factor was close to stoichiometric to ensure the three-way catalyst proper operation. In the average, the WLTC points had lower bsfc values and it also comprised the lowest one from measure point 5. Consequently, as the brake fuel efficiency was dependent on bsfc, the values were in average higher for the WLTC. The exhaust temperatures are lower for the FTP-75 cycle.

Table 6. Experimental data and parameters from the WLTC test.

WLTC-3B*					
Measure Point	1	2	3	4	5
Engine Speed (rpm)	861	1809	1906	2504	3172
Bmep (bar)	0.00	2.03	2.51	3.92	5.55
Inlet Pressure (bar)	0.35	0.44	0.46	0.58	0.71
Inlet Temperature (°C)	42	37	37	36	36
Exhaust Temperature (°C)	268	393	427	513	586
Air Excess Factor (λ)	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00
Fuel consumption (g/s)	0.28	2.89	1.00	1.69	2.74
Bsfc (g/kWh)	-	751.0	652.6	537.7	486.1
Brake Fuel Efficiency (%)	-	18.52	21.31	25.87	28.61
Volumetric Efficiency (%)	64.71	74.02	74.88	77.24	81.16

Table 7. Experimental data and parameters from the FTP-75 test.

FTP-75					
Measure Point	1	2	3	4	5
Engine Speed (rpm)	858	1558	1603	1721	1853
Bmep (bar)	0.00	2.08	2.08	2.01	2.68
Inlet Pressure (bar)	0.36	0.44	0.43	0.42	0.48
Inlet Temperature (°C)	46	40	39	40	40
Exhaust Temperature (°C)	229	370	379	395	426
Air Excess Factor (λ)	1.01	1.00	1.00	0.99	1.00
Fuel consumption (g/s)	0.28	0.75	0.76	0.79	0.97
Bsfc (g/kWh)	-	725.5	714.3	712.2	610.5
Brake Fuel Efficiency (%)	-	19.17	19.47	19.53	22.78
Volumetric Efficiency (%)	64.12	74.07	74.79	72.97	73.84

In figure 7 a bubble chart comprising the points tested for both cycles is displayed. The kernel of the bubbles are the operating conditions for engine speed and bmep, and the radius values are proportional to the brake specific fuel consumption. The WLTC points had lower bsfc (g/kWh) at higher engine speeds and loads. Also, as the FTP-75 points were very similar, they also exhibited similar bsfc values.

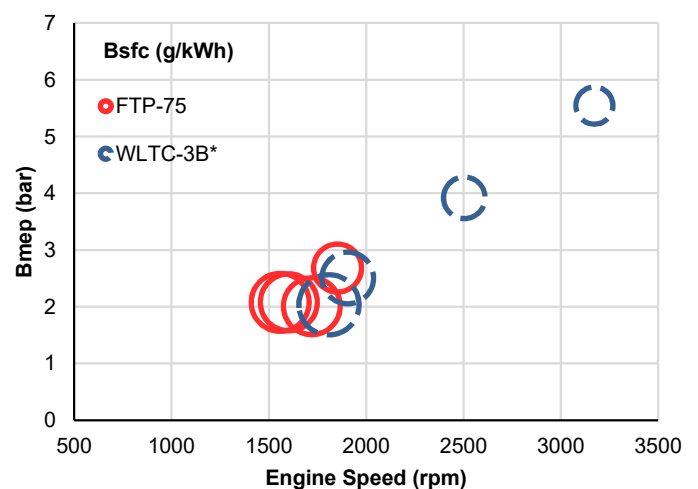


Figure 7. Bubble chart of the measure points from both cycles, where the size of the bubble is proportional to the brake specific fuel consumption.

The major difficult was to make a fair judgment of these cycles based on an approach limited by steady-state tests. By selecting only five points from each cycle the analysis was limited by a fraction of the total test time. Also, the transient conditions were not included because such characteristics were not comprised in stationary investigations. Therefore, for both cycles the first point was the idle condition due to the idle percentage of these schedules (table 3). The selection of the points reflected the visual data provided by the dispersion chart of engine speed and bmep. Thus, the measure points for the WLTC were distinct from each other in terms of both engine speed and load, while the FTP-75 five main points were similar and concentrating near 1700 rpm and 2 bar of load. In addition, two of the five main points from the WLTC had higher bmep values than any point from FTP-75, which indicates that the WLTC was more demanding.

The break specific fuel consumption of the WLTC cycle was found lower than that the FTP-75 due to the higher brake power developed. The regulated fuel economy factor depends on the distance traveled and the mass or volumetric fuel consumption. Thus, as the distance traveled in the WLTC was lower and its fuel consumption was higher, then the fuel economy was lower than FTP-75. It should be stated that the compression ratio (10.35±0.15 :1) is not ideal for ethanol operation. also, these efficiencies take in account the mechanical and friction losses of both engine and transmission system. The volumetric efficiency indicates a relationship between break specific fuel consumption. Since the vehicle operates close to stoichiometric operation the amount of fuel injected depends on the air flow. So, if the volumetric efficiency is rather low, then less power is delivered. This reflects in the bsfc values for the measured points. FTP-75 points have, in average, 74.0% of volumetric efficiency and consequently higher bsfc values compared to WLTC.

The higher exhaust temperature values for the WLTC can be reflected in the NO_x emissions [23]. So, the FTP-75 compared to WLTC, could be neglecting these pollutant concentrations. Therefore, based on the data obtained in this work, it is safe to say that WLTC is a better tool for regulating such emissions.

Conclusions

The results obtained in this work suggests that the WLTC evidenced a better driving cycle. Its characteristics allow a better real driving simulation in laboratory environment. The WLTC was a resourceful test that comprised a great amount of engine operation conditions. Also, the results of load and temperature, as well the speed and acceleration standard deviations prove that the WLTC could evaluate the vehicle operation not just in a reliable way, but also demanding performance in almost all its operation range. The stationary points tested indicated poorer fuel consumption values for the WLTC, demonstrating that the test can be more demanding and better improved. The steady-state analyses also demonstrated that FTP-75 can be a predictable test and with not many variations. Due to its repetitiveness, it focuses in just two main operation points. Thus, it is susceptible to cycle-beating techniques, although the WLTC is still to be improved. It became clear by comparing it to the FTP-75 that it needs to exhibit more compatibility with real-world by adding more trips to the schedule. Another conclusion to be stated is the influence of the driver on the test. It was shown in this work that some values of acceleration exceeded the theoretical ones predicted through the legal schedule. Due to higher tolerances of speed, the FTP-75 permitted the driver to go through higher variations of speed, and thus higher acceleration values. So, the human influence can be a factor to be observed in legal certification tests. Although approval tests will never be fully representative of real-world conditions, the WLTC can be considered a completer and more demanding test. At this point it should be reminded that the WLTC had a phase that was not included in this paper analyses, the extra-high. This segment of the test is supposed to represent high speed and high-way performances and the United States legislation has additional tests to make up for the shortcomings of FTP-75. Therefore, it is safe to say that because the WLTC (with all phases) unifies different conditions in one single test, rather than FTP-75 that needs more supplementary tests, it is a more fully realized test. In Brazil the law that regulates the procedures for vehicle certification (NBR 6601 from 2012) establishes only the performance of the FTP-75 schedule according to its particular sequence of phases: the cold start plus the transient phase and a repetition of these two under hot conditions. Therefore, a correction or upgrade is needed to properly manage and regulate the vehicle fleet agreement with emissions factors.

References

1. Krzyzanowski, Michal, Birgit Kuna-Dibbert, and Jürgen Schneider. 2005. *Health Effects of Transport-Related Air Pollution*. Edited by Michal Krzynawoski. Copenhagen: World Health Organization.
2. Laumbach, Robert J., and Howard M. Kipen. 2012. "Respiratory Health Effects of Air Pollution: Update on Biomass Smoke and Traffic Pollution." *Journal of Allergy and Clinical Immunology* 129 (1): 3–11. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2011.11.021>.
3. Sydbom, A., A. Blomberg, S. Parnia, N. Stenfors, T. Sandström, and S-E. Dahlén. 2001. "Health Effects of Diesel Exhaust Emissions." *European Respiratory Journal* 17 (4): 733–46. <https://doi.org/10.1183/09031936.01.17407330>.
4. European Parliament, and Council of the European Union. "Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council." *Official Journal of the European Communities* 2007, no. June (2007): 1–16. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:139:001:0054:en:PDF>
5. Council, International. "Tier 3 Motor Vehicle Emission and Fuel Standards EPA Notice of Proposed Rulemaking." *International Council on Clean Transportation*, no. May 2013 (2017).
6. Rios-torres, Jackeline, Jun Liu, and Asad Khattak. "Fuel Consumption for Various Driving Styles in Conventional and Hybrid Electric Vehicles : Integrating Driving Cycle Predictions with Fuel Consumption Optimization" 8318 (2019). <https://doi.org/10.1080/15568318.2018.1445321>.
7. Donateo, T. and Giovinazzi, M., "Some Repeatability and Reproducibility Issues in Real Driving Emission Tests," *SAE Technical Paper* 2018-01-5020, 2018, <https://doi.org/10.4271/2018-01-5020>.
8. Merkisz, J., Pielecha, J., Bielaczyc, P., and Woodburn, J., "Analysis of Emission Factors in RDE Tests As Well as in NEDC and WLTC Chassis Dynamometer Tests," *SAE Technical Paper* 2016-01-0980, 2016, <https://doi.org/10.4271/2016-01-0980>.
9. Thomas, D., Li, H., Wang, X., Song, B. et al., "A Comparison of Tailpipe Gaseous Emissions for RDE and WLTC Using SI Passenger Cars," *SAE Technical Paper* 2017-01-2391, 2017, <https://doi.org/10.4271/2017-01-2391>.
10. Kay, P., "Feasibility of Virtual Environments to Develop Future Driving Cycles," *SAE Technical Paper* 2018-01-1816, 2018, <https://doi.org/10.4271/2018-01-1816>.
11. Varella, Roberto A, Marta V Faria, Pablo Mendoza-villafuerte, Patricia C Baptista, Luis Sousa, and Gonçalo O Duarte. "Assessing the Influence of Boundary Conditions , Driving Behavior and Data Analysis Methods on Real Driving CO₂ and NO_x Emissions" 658 (2019): 879–94. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.053>.
12. Esser, A., Zeller, M., Foulard, S., and Rinderknecht, S., "Stochastic Synthesis of Representative and Multidimensional Driving Cycles," *SAE Int. J. Alt. Power.* 7(3):263-272, 2018, <https://doi.org/10.4271/2018-01-0095>.
13. Kamguia Simeu, S. and Kim, N., "Standard Driving Cycles Comparison (IEA) & Impacts on the Ownership Cost," *SAE Technical Paper* 2018-01-0423, 2018, <https://doi.org/10.4271/2018-01-0423>.
14. Kageson, Per. "Cycle-Beating and the EU Test Cycle for Cars." *European Federation for Transport and Environment* 98/3, no. November 1998 (1998): 10.
15. Pelkmans, Luc, and Patrick Debal. "Comparison of On-Road Emissions with Emissions Measured on Chassis Dynamometer Test Cycles." *Transportation Research Part D: Transport and*

- Environment 11, no. 4 (July 2006): 233–41. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2006.04.001>.
16. Weiss, Martin, Pierre Bonnel, Jörg Kühlwein, Alessio Provenza, Udo Lambrecht, Stefano Alessandrini, Massimo Carriero, et al. "Will Euro 6 Reduce the NOx Emissions of New Diesel Cars? – Insights from on-Road Tests with Portable Emissions Measurement Systems (PEMS)." *Atmospheric Environment* 62, no. 2 (December 2012): 657–65. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.08.056>.
 17. Nyberg, Peter, Erik Frisk, and Lars Nielsen. "Driving Cycle Adaption and Design Based on Mean Tractive Force." *IFAC Proceedings Volumes* 46, no. 21 (2013): 689–94. <https://doi.org/10.3182/20130904-4-JP-2042.00113>.
 18. de Melo, T., Botero, S., de Carvalho, R., Villela, A. et al., "Light duty vehicle fuel economy – Comparison of ice, hybrid and electric vehicles based on different driving cycles," *SAE Technical Paper* 2018-36-0035, 2018, <https://doi.org/10.4271/2018-36-0035>.
 19. Giakoumis, Evangelos G., and Alexandros T. Zachiotis. "Comparative Evaluation of Eight Legislated Driving Schedules in Terms of Cycle Metrics and Emissions from a Diesel-Powered Turbocharged Van." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 58, no. December 2017 (January 2018): 139–54. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.11.002>.
 20. Sileghem, Louis, Dirk Bosteels, John May, Cécile Favre, and Sebastian Verhelst. "Analysis of Vehicle Emission Measurements on the New WLTC, the NEDC and the CADC." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 32 (October 2014): 70–85. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.07.008>.
 21. Olmos, A., Banhara, R., Engler Pinto, C., and Georges, M., "Emissions, fuel economy and energy consumption of a flex fuel vehicle in different driving cycles," *SAE Technical Paper* 2018-36-0225, 2018, <https://doi.org/10.4271/2018-36-0225>.
 22. Suarez-Bertoa, R., A.A. Zardini, H. Keuken, and C. Astorga. "Impact of Ethanol Containing Gasoline Blends on Emissions from a Flex-Fuel Vehicle Tested over the Worldwide Harmonized Light Duty Test Cycle (WLTC)." *Fuel* 143, no. 2015 (March 2015): 173–82. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.10.076>.
 23. Heywood, John B. 1988. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGrawHill Series in Mechanical Engineering. Vol. 21, 1988. <https://doi.org/10987654>.
 24. PARK, J., and H. WI. "ANALYZING UNCERTAINTY IN EVALUATION OF VEHICLE FUEL ECONOMY USING FTP-75" *14*, no. 3 (2013): 471–77. <https://doi.org/DOI.10.1007/s12239-013-0051-x>.
 25. Pathak, S., Singh, Y., sood, V., and Channiwala, S., "On-Road Vehicle Driving and Energy Requirements and Impact on Unregulated Exhaust Emissions under Urban Driving Conditions," *SAE Int. J. Engines* 10(4):1866-1879, 2017, <https://doi.org/10.4271/2017-01-1013>.

Acknowledgments

The authors would like to thank the financial support received for research and studies over the years from the University of Santa Maria (FIEN, FIPE, FIEX) and the Research Support Foundation of Rio Grande do Sul – FAPERGS (PROBIC, PROBITI).

Definitions/Abbreviations

WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure
WLTC	Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle
FTP	Federal Test Procedure
NEDC	New European Driving Cycle
GHG	Green House Gas
EU	European Union
NO_x	Nitrogen oxides
EPA	Environmental Protection Agency
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
SFTP	Supplemental Federal Test Procedure
CO	Carbon monoxide
E92W8	Mixture containing on a volume basis 92% of ethanol and 8% of water
BMEP	Brake Mean Effective Pressure
RPA	Relative Positive Acceleration
P_b	Brake Power

Contact Information

Maria Fernanda Possebon Mazer
Federal University of Santa Maria
Engine Research Group (GPMOT)
E-mail: m.fernandapossebon@gmail.com

Macklini Dalla Nora
Federal University of Santa Maria
Engine Research Group (GPMOT)
E-mail: mack@gepoc.ufsm.br

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of SAE.

ISSN 0148-7191

Copyright © 2019 SAE International

Positions and opinions advanced in this paper are those of the author(s) and not necessarily those of SAE. The authors solely responsible for the content of the paper.

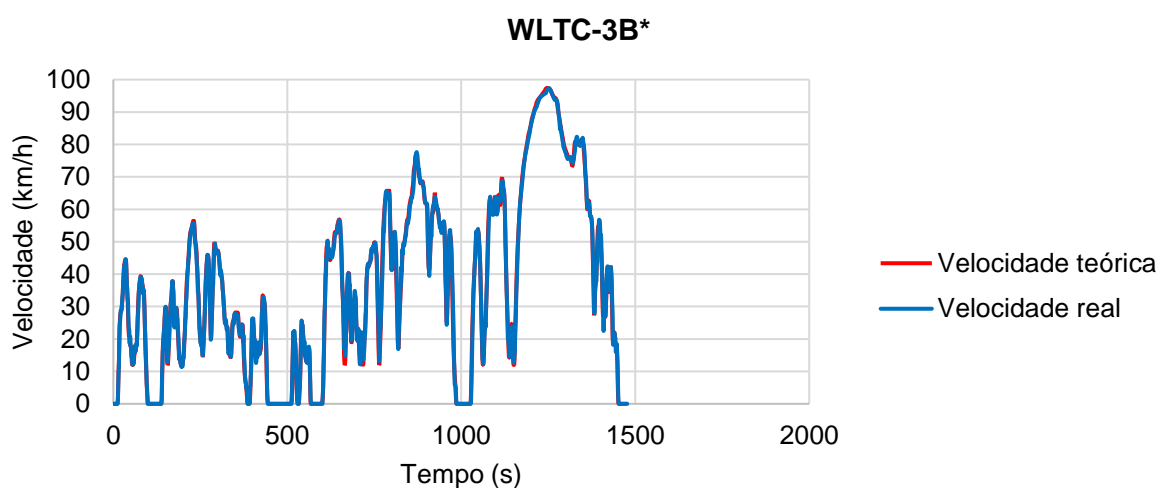
4.2. RESULTADOS ADICIONAIS

Além dos resultados apresentados no artigo, alguns dados serão mostrados na sequência para embasar algumas das discussões trazidas nesse trabalho.

Ambos os ciclos foram realizados com um número de violações dentro do permitido pela determinação de cada ciclo padrão. Primeiro, as principais métricas e parâmetros analíticos entre os dois ciclos foram comparados. Podem-se destacar os valores médios de potência de eixo e velocidade do veículo superiores do WLTC, assim como o desvio padrão de velocidade. O fato de os maiores valores de potência de eixo e velocidade média observados corresponderem ao mesmo ciclo condiz com o que se espera da relação entre a velocidade e a potência necessária para movimentar um veículo. Os valores médio, máximo e o desvio padrão de aceleração do ciclo FTP-75 foram superiores comparados ao WLTC.

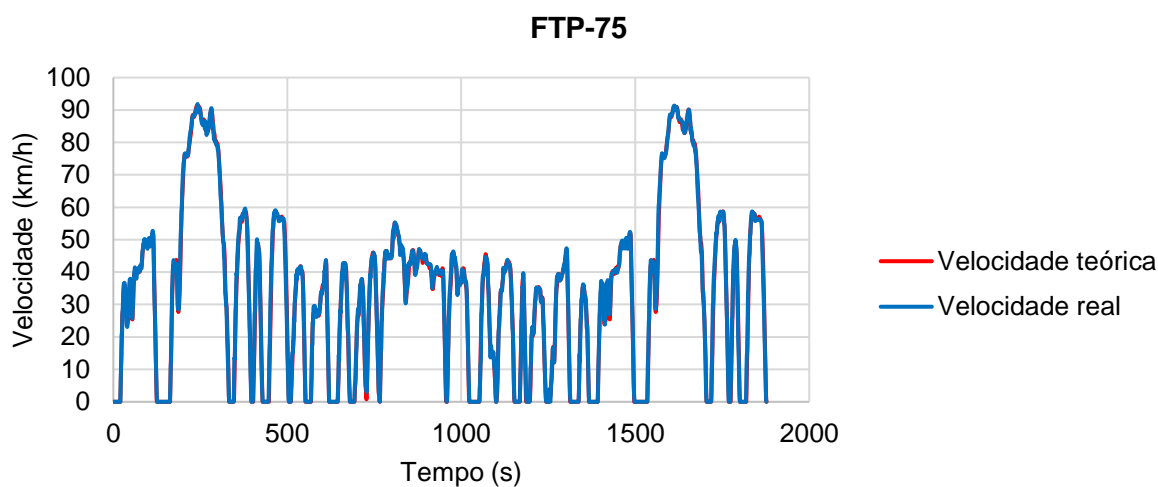
Os resultados de velocidade real desempenhada pelo veículo em contraste com a teórica dos ciclos padrão WLTC e FTP-75 são apresentadas nas figuras Figura 13 e Figura 14, respectivamente.

Figura 13 – Comparação entre o percurso real realizado e o ciclo teórico do WLTC.



Fonte: (Autor, 2020).

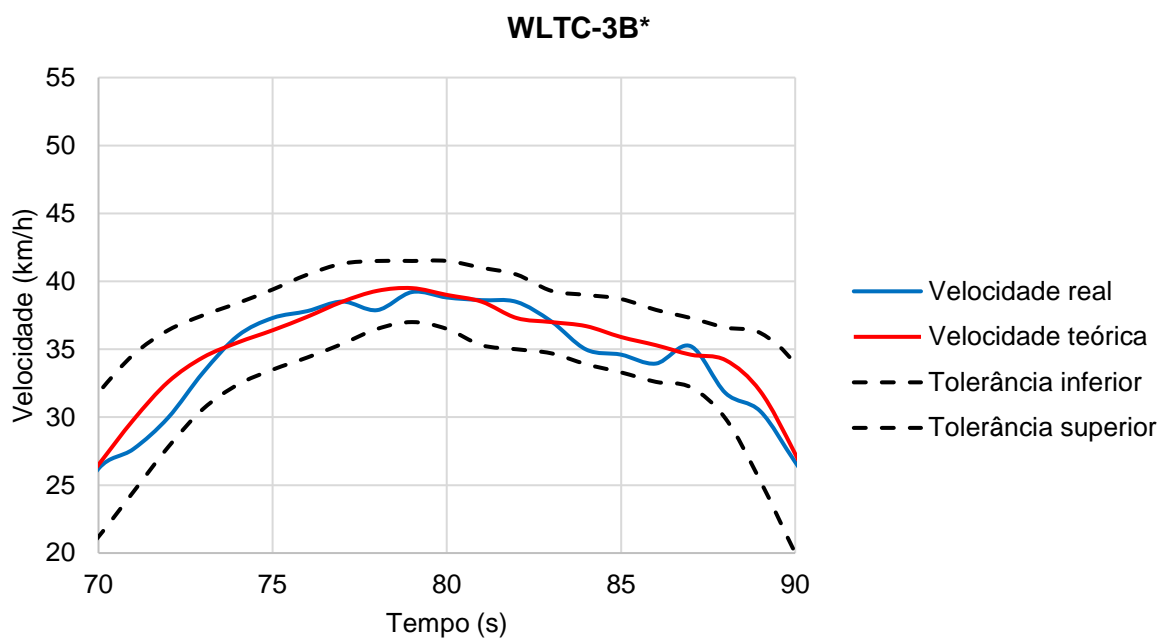
Figura 14 – Comparação entre o percurso real realizado e o ciclo teórico do FTP-75.



Fonte: (Autor, 2020).

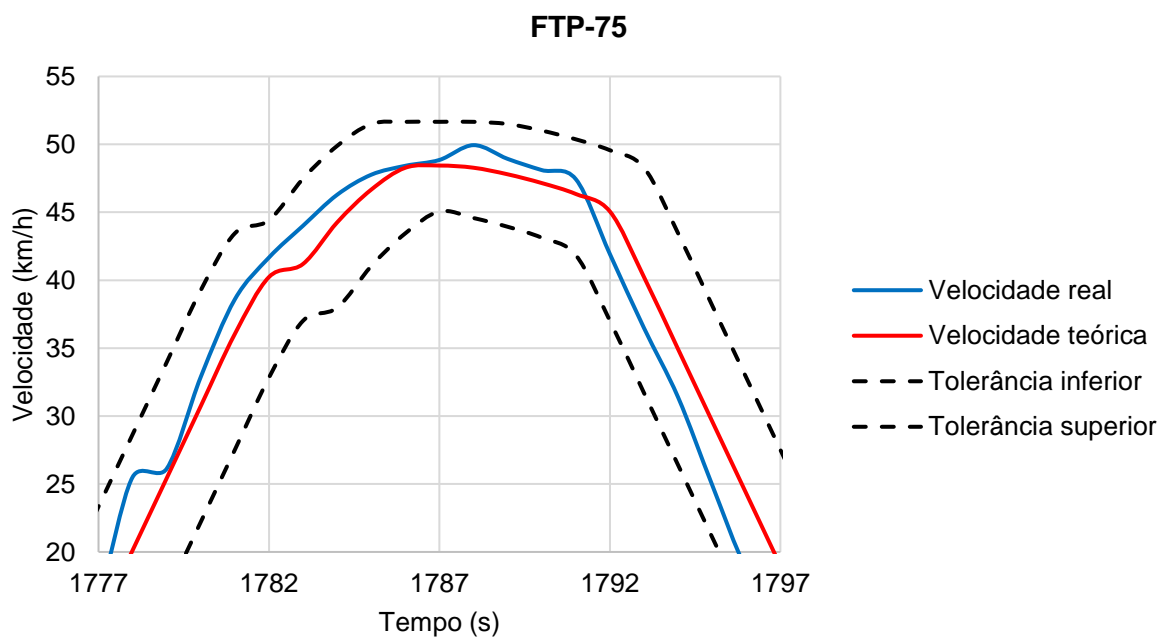
Tratando da comparação entre o real e o teórico, os valores de aceleração média experimental foram superiores ao esperado para ambos os ciclos. Porém, o que se destaca é a diferença entre os valores máximo e médio de aceleração obtidos para o ciclo FTP-75 em comparação com os respectivos valores teóricos. Essa diferença poderia ser explicada, além da inexperiência do motorista, pela faixa de velocidades permitida sem que haja uma violação do ciclo. Essa faixa é ainda maior para o ciclo FTP-75, em que a tolerância é de ± 2 mi/h ($\pm 3,22$ km/h), em comparação com o WLTC, que é de ± 2 km/h. Nas figuras Figura 15 e Figura 16 são apresentados os resultados dos valores reais de velocidade em comparação com os limites e o ciclo teórico para o WLTC e FTP-75. A influência da magnitude desses valores pode ser observada ao se comparar, em um gráfico com a mesma escala de tempo (eixo x) e velocidade (eixo y), os valores reais e teóricos, como demonstrado nas figuras Figura 15 e Figura 16 do WLTC e FTP-75, respectivamente. Ainda, essa variação de aceleração do ciclo FTP-75 pode ser observada no valor de desvio padrão de aceleração ($0,44$ m/s²), em comparação ao WLTC que é de $0,36$ m/s².

Figura 15 – Comparação entre velocidade real, velocidade teórica e tolerâncias do ciclo WLTC.



Fonte: (Autor, 2020).

Figura 16 – Comparação entre velocidade real, velocidade teórica e tolerâncias do ciclo FTP-75.



Fonte: (Autor, 2020).

Na análise dos mapas de aceleração e velocidade é possível destacar do ciclo WLTC a falta de pontos de operação entre as velocidades de 0-15 km/h e em altas velocidades (possivelmente devido ao fato de que a última fase do ciclo *extra-high* não foi realizada nesse trabalho). O ciclo FTP-75 apresentou deficiências em exigir acelerações na faixa de velocidades entre 60-75 km/h e abaixo de 20 km/h. Ainda, comparando os ciclos, é possível observar que o mapa de aceleração do ciclo WLTC possui os pontos posicionados de forma mais dispersa do que o FTP-75.

Através da decomposição dos ciclos em viagens, proposta por esse trabalho, destaca-se o grande número total de viagens do FTP-75 comparado ao WLTC. Ainda, o ciclo FTP-75 apresentou viagens, mesmo com durações menores de 30 segundos, com carga específica de aceleração (RPA) maiores que $0,35 \text{ m/s}^2$. O que coincide com os valores altos de aceleração máxima e média observados nos parâmetros analíticos do ciclo abordados anteriormente. Ambos os ciclos não demonstraram viagens com baixa velocidade média. Ainda foi possível destacar a duplicidade de bolhas (que representam as viagens) no gráfico do FTP-75, o que evidencia o fato de que o roteiro desse ciclo possui fases repetidas.

A análise dos mapas de operação do motor (bmep x frequência de operação do motor) indicou que ambos os ciclos foram limitados em carga por cerca de 7,5 bar bmep e, em termos de frequência de operação do motor, o ciclo FTP-75 ficou limitado por cerca de 3500 rpm, enquanto o WLTC por cerca de 3200 rpm. O ciclo FTP-75 apresentou áreas de operação concentradas no regime de marcha lenta e por volta de 1750 rpm de frequência de operação e 2,5 bar de bmep. Ainda, demonstrou ausência de pontos nas zonas próximas de 900-1250 rpm e 2000-3250 rpm. Já no mapa de operação do ciclo WLTC, foi possível observar uma concentração de pontos ao redor da linha de carga de 2,5 bar de bmep, na faixa de frequência de operação do motor próxima de 1750 rpm e na zona de operação em marcha lenta. Além disso, na comparação entre os ciclos, foi possível destacar que o WLTC foi capaz de cobrir mais áreas de operação, enquanto o ciclo FTP-75 demonstrou um mapa com pontos de operação pouco dispersos (possivelmente devido à presença de duas fases repetidas em seu roteiro).

A definição dos cinco pontos mais representativos, em termos de tempo de residência no ciclo, através da ferramenta do histograma proposta nesse trabalho, corroborou algumas das observações feitas na análise do mapa de operação. Como

foi possível observar, para ambos os ciclos o primeiro ponto de operação que mais se repetiu foi a marcha lenta. Ainda, para o ciclo FTP-75 os outros quatro pontos de operação ficaram próximos da faixa de frequência de operação do motor de 1750 rpm e o ponto de maior carga de pressão média efetiva de eixo não passou de 2,7 bar bmep. Já os outros quatro pontos de operação considerados do ciclo WLTC foram mais distintos entre si, com cargas variando de 2 a 5,5 bar de bmep e frequências de rotação de até 31150 rpm (ponto 5). A análise em regime estacionário dos pontos mais relevantes dos ciclos mostrou que a operação do veículo se manteve próxima do regime estequiométrico. Considerando as atuais tecnologias utilizadas na indústria automotiva, a garantia de mistura estequiométrica na exaustão é fundamental para a operação eficiente dos catalisadores que convertem os poluentes no sistema de exaustão. Desse modo, todos os pontos testados do WLTC e FTP-75 testados mantiverem o fator de excesso de ar próximo de 1 (estequiométrico). Outro fator determinante para a conversão catalítica dos poluentes é a temperatura de exaustão (STONE, 2012), que para os pontos testados com carga se manteve alta o suficiente para promover o correto funcionamento de um catalisador de três vias utilizado atualmente nos veículos leves. Porém, a operação em marcha lenta que, em termos de tempo de residência no ciclo, é a mais relevante pode ser um problema, já que a temperatura da exaustão ficou abaixo de 300 °C.

O ciclo WLTC apresentou, dentro da análise pontos de operação mais relevantes em termos de tempo de residência no ciclo, condições com mais carga e maiores frequências de operação, o que seria um indicativo de um ciclo mais exigente. Porém, os resultados em regime permanente, de eficiência de conversão de combustível do ciclo FTP-75 foram piores. Essa diferença entre os resultados pode ser explicada pelo fato de que os pontos estacionários testados do WLTC demandaram mais potência. Além disso, a eficiência volumétrica pode ter sido afetada pelo efeito de bombeamento encontrado em motores do tipo SI quando operados com baixa carga – condições em que a borboleta parcialmente fechada exige maior trabalho para a admissão de ar. Haja vista que os pontos testados estacionariamente do FTP-75 foram condições de baixa carga e o valor médio de eficiência volumétrica foi inferior em comparação com os pontos do WLTC.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho investigou os dois principais ciclos de condução veicular padrão e seus impactos no desempenho de um veículo leve de passageiros. Foi possível realizar os ciclos WLTC e FTP-75 dentro do número de violações prevista e com a mesma base experimental – utilizando o mesmo combustível e a mesma estratégia de troca de marchas, assim como o mesmo motorista, de forma a possibilitar uma comparação válida e imparcial dos dados obtidos desses ensaios.

Através da análise dos mapas de operação do motor, foi possível observar que ambos os ciclos concentram muitos pontos na operação em marcha lenta e são limitados em carga por cerca de 7,5 bar de pressão média efetiva de eixo. Entre as regiões que mais reúnem pontos de operação do ciclo WLTC, pode-se destacar as zonas próximas de 2 bar bmep e 1500-2000 rpm. Já o ciclo FTP-75 demonstrou áreas com alta concentração de pontos no mapa de operação do motor em torno de 2,5 bar de bmep e 1750 rpm. De modo geral, foi possível concluir que o WLTC abrange mais pontos de operação, demonstrando maior capacidade de testar diversas zonas de operação do veículo em comparação com o FTP-75. Ainda, foi possível observar que o FTP-75 é um ciclo previsível, pois tanto o mapa de aceleração do veículo quanto o de operação do motor demonstraram pouca dispersão dos pontos e zonas excessivamente concentradas. A análise que elencou os cinco pontos de operação com mais tempo de residência nos ciclos evidenciou essa falta de repertório do FTP-75, haja vista que esses pontos se localizaram muito próximos uns dos outros. O fato de que o FTP-75 possui um roteiro de velocidades que se repete (a última fase é equivalente a primeira) demonstra que esse tipo de arranjo recursivo não agrega ao teste nenhuma possibilidade de buscar novas condições ou zonas de operação do veículo ainda não contempladas.

Os resultados obtidos de desvio padrão de velocidade demonstram que o WLTC é um ciclo mais transiente. Além disso, os valores de consumo de combustível da análise em regime estacionário foram maiores para o ciclo WLTC, porém os valores de eficiência de conversão de combustível e consumo específico foram melhores. A diferença entre o consumo específico de combustível pode ser explicada pelo fato de que os pontos testados do WLTC exigiram mais potência. Ademais, a eficiência volumétrica média dos testes estacionários do FTP-75 foi inferior, e, devido à baixa carga exigida (perdas de bombeamento observadas em motores SI), pode ter afetado

o desempenho geral de eficiência de conversão de combustível. A análise em regime estacionário dos pontos mais relevantes dos ciclos mostrou que a operação do veículo se manteve próxima do regime estequiométrico. Porém, a mistura estequiométrica na exaustão não é suficiente para garantir a operação eficiente dos catalisadores que convertem os poluentes no sistema de exaustão. De modo que os resultados desse trabalho mostraram que a temperatura de exaustão durante a operação em marcha lenta (condição mais relevante em termos de tempo de residência no ciclo) pode ser um problema a conversão catalítica de poluentes.

Ainda, em termos de parâmetros analíticos do ciclo, o FTP-75 apresentou valores maiores de aceleração média e máxima, o que sugere uma direção mais agressiva. Através da divisão ciclo em viagens no gráfico de bolhas foi possível analisar a carga específica desses segmentos do ciclo e suas contribuições. O ciclo FTP-75 demonstrou um número maior de viagens em comparação com o WLTC. Além disso, o FTP-75 apresentou viagens com aceleração relativa positiva (RPA) – que avalia a carga específica de aceleração – maiores que 0,35 m/s. Além do mais, resultados de comparação entre os dados experimentais e o ciclo teórico demonstraram que os valores previstos de aceleração para o FTP-75 foram menores que os observados experimentalmente. De forma que a tolerância maior pode permitir ao motorista utilizar uma faixa mais ampla de velocidades e, conseqüentemente, admitir maior aceleração. Também, vale ressaltar que nesse trabalho a última fase do ciclo WLTC (*extra-high*) não foi realizada, assim como alguns testes adicionais do FTP-75, que, supostamente, são responsáveis por simular desempenhos em estrada e de alta velocidade.

REFERÊNCIAS

ABNT 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. Esta Norma estabelece os requisitos de apresentação e os critérios básicos para a elaboração de índices. Esta Norma aplica-se, no que couber, aos índices automatizados. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2005. p. 8.

ABNT NBR 7024 2017. Quarta edição 11.05.2017 Versão corrigida 26.06.2017 Veículos rodoviários automotores leves — Medição do consumo de combustível — Método de ensaio Light. Esta Norma estabelece os requisitos de apresentação e os critérios básicos para a elaboração de índices. Esta Norma aplica-se, no que couber, aos índices automatizados. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2017.

AECC. Light-duty vehicles - current EU legislation. [s. l.], [s.d.]. Disponível em: <<https://www.aecc.eu/legislation/light-duty-vehicles/>>. Acesso em: 13 abr. 2020.

ANDRÉ, Michel. SAE TECHNICAL Driving Cycles Development : Characterization of the Methods Meeting Lubricants. [s. l.], n. 412, 2014.

ANFAVEA, Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores-. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2019**. 1. ed. São Paulo: Gráfica Mundo, 2019.

AUSTIN, T. C. et al. **Characterization of Driving Patterns and Emissions from Light-Duty Vehicles in California**, 1993.

BARLOW, T. et al. A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions. **TRL Published Project Report**, [s. l.], p. 280, 2009. Disponível em: <http://www.trl.co.uk/online_store/reports_publications/trl_reports/cat_traffic_and_the_environment/report_a_reference_book_of_driving_cycles_for_use_in_the_measurement_of_road_vehicle_emissions.htm%5Cnhttps://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/a>

BERG, Wolfgang. Legislation for the reduction of exhaust gas emissions. **Handbook of Environmental Chemistry**, [s. l.], v. 3, p. 175–253, 2003.

DARDIOTIS, Christos et al. Emissions of modern light duty ethanol flex-fuel vehicles over different operating and environmental conditions. **Fuel**, [s. l.], v. 140, p. 531–540, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.085>>

DE MELO, Tadeu Cavalcante Cordeiro et al. Light duty vehicle fuel economy - Comparison of ice, hybrid and electric vehicles based on different driving cycles. **SAE Technical Papers**, [s. l.], n. September, 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2019: Ano base 2018**. Rio de Janeiro.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Relatório Síntese. BEN 2019, ano base

2018. [s. l.], p. 67, 2019. b. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/>>

EPA, US. Control of Air Pollution from Motor Vehicles: Tier 3 Motor Vehicle Emission and Fuel Standards Final Rule Regulatory Impact Analysis. **Epa Usa**, [s. l.], p. 619, 2014.

ERICSSON, Eva. Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use and exhaust emission factors. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s. l.], v. 6, n. 5, p. 325–345, 2001. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1361920901000037>>

GIAKOUMIS, Evangelos G. **Driving and Engine Cycles**. Cham: Springer International Publishing, 2017. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-49034-2>>

GIAKOUMIS, Evangelos G.; ZACHLOTIS, Alexandros T. Comparative evaluation of eight legislated driving schedules in terms of cycle metrics and emissions from a diesel-powered turbocharged van. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s. l.], v. 58, n. December 2017, p. 139–154, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.11.002>>

HEYWOOD, John B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. [s.l: s.n.]. v. 21

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **PROCONVE/PROMOT - Programa de controle da poluição do ar por veículos automotores**. 3. ed. Brasília: Ibama, 2011.

IPCC. Global Warming of 1.5 °C. In: MASSON-DELMOTTE, V. et al. (Eds.). [s.l.] : Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018. p. 601.

KAGESON, Per. Cycle-Beating and the EU Test Cycle for Cars. **European Federation for Transport and Environment**, [s. l.], v. 98/3, n. November 1998, p. 10, 1998. Disponível em: <<http://www.transportenvironment.org/publications/cycle-beating-and-eu-test-cycle-cars-te-9803>>

KRUSE, Ronald E.; HULS, Thomas A. Development of the Federal Urban Driving Schedule. In: SAE TECHNICAL PAPERS 1973, **Anais...** [s.l: s.n.] Disponível em: <<https://www.sae.org/content/730553/>>

MARTINEZ-FRIAS, Joel; ACEVES, Salvador M.; FLOWERS, Daniel L. Improving ethanol life cycle energy efficiency by direct utilization of wet ethanol in HCCI engines. **Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME**, [s. l.], 2007.

MOCK, Peter. EU CO2 standards for passenger cars and light-commercial vehicles. **International Council on Clean Transportation**, [s. l.], n. January, p. 1–9, 2014. Disponível em: <<http://www.theicct.org/eu-co2-standards-passenger-cars-and-lcvs>>

NAKATA, Koichi et al. The effect of ethanol fuel on a spark ignition engine. In: SAE TECHNICAL PAPERS 2006, **Anais...** [s.l: s.n.]

SILEGHEM, Louis et al. Analysis of vehicle emission measurements on the new WLTC, the NEDC and the CADC. **Transportation Research Part D: Transport and**

Environment, [s. l.], v. 32, p. 70–85, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2014.07.008>>

SILEGHEM, Louis et al. Experimental Investigation of a DISI Production Engine Fuelled with Methanol, Ethanol, Butanol and ISO-Stoichiometric Alcohol Blends. In: SAE TECHNICAL PAPERS 2015, **Anais...** [s.l: s.n.]

SILVEIRA, Juliano P. et al. DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL LÍQUIDO DE BAIXO CUSTO. **33ª Jornada Acadêmica Integrada**, [s. l.], v. 1, 2018.

SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA (SEEG). **Emissão CO (t) por setor 2019 Brasil**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://plataforma.seeg.eco.br/economic_activity>.

SOARES, L. H. DE B.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil. **Circular técnica**, [s. l.], p. 14, 2009. Disponível em: <<http://www.cnpab.embrapa.br/publicacoes/download/cit027.pdf>>

STONE, Richard. **Introduction to Internal Combustion Engines**. 4. ed. [s.l.] : Palgrave Macmillan UK, 2012.

SUAREZ-BERTOIA, R. et al. Impact of ethanol containing gasoline blends on emissions from a flex-fuel vehicle tested over the Worldwide Harmonized Light duty Test Cycle (WLTC). **Fuel**, [s. l.], v. 143, n. 2015, p. 173–182, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.10.076>>

TUTUIANU, Monica et al. Development of a World-wide Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle. **Technical Report**, [s. l.], v. 03, n. January, p. 7–10, 2014.

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**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 282–290, 2013. Disponível em: <<https://journal.gnest.org/publication/376>>

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Appendix I to part - CONTROL OF EMISSIONS FROM NEW AND IN-USE HIGHWAY VEHICLES AND ENGINES - dynamometer schedules. . 2016, p. 1095–1148.