



20 A 24 DE MAIO DE 2018 SALVADOR – BA – BRASIL

MÉTODO DE CARACTERIZAÇÃO DE TURBOCOMPRESSORES BASEADO EM CICLOS DE CONDUÇÃO

Oscar Ricardo Sandoval Rodriguez, osc.sandoval@hotmail.com¹

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

Marina V. Fonda, marina.viannafonda@gmail.com²

Larissa Coelho, larissacoelho17@yahoo.com.br²

Ramón M. Valle, ramon@demec.ufmg.br³

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG

²Colegiado de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG

³Centro de Tecnologia da Mobilidade - CTM, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG

Resumo: A crescente competitividade do mercado automotivo e as legislações de emissões veiculares cada vez mais rígidas, conduzem os fabricantes à busca por estratégias de aprimoramento dos motores de combustão interna (MCI). Dentre as estratégias, o turbocompressor tem sido amplamente utilizado para fornecer a sobrealimentação necessária para manter a potência e o torque quando o conceito de "downsizing" é aplicado. Normalmente, testes experimentais em turbocompressores são feitos em bancos de fluxo quente, em função de pontos de trabalho em regime permanente. Tal comportamento não é consistente com as condições de operação do turbocompressor acoplado ao MCI e associado a um veículo em condições reais de condução. Nessas condições, muitos fatores externos modificam o comportamento do MCI, tornando-o cada vez mais transitório. Como artifício de aproximação dos testes experimentais em banco de fluxo às condições habituais, este trabalho busca identificar o comportamento transiente do turbocompressor. Assim, é apresentado um método de avaliação das condições transitórias com base em dados coletados experimentalmente. Através de simulações computacionais de um ciclo padrão de condução, são obtidos como resultados os comportamentos transitórios das principais características do turbocompressor.

Palavras-chave: Turbocompressor, ciclo de condução, simulação computacional, ciclo ETC.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o turbocompressor é amplamente utilizado tanto nos motores de combustão interna (MCI) do ciclo Diesel como nos de ciclo Otto, se transformando em um componente essencial na aplicação de *downsizing*, permitindo que haja reduções no consumo específico de combustível e das emissões de gases, sem prejuízos consideráveis em desempenho (Deligant *et al.*, 2012). No entanto, a eficiência do MCI está fortemente ligada às características de funcionamento do turbocompressor associado a ele. Assim, para possibilitar o desenvolvimento e aprimoramento contínuo dessa tecnologia, diversas técnicas de teste para turbocompressores são utilizadas. Entre elas, destacam-se o teste em banco de fluxo em regime permanente para pesquisas experimentais (Galindo *et al.*, 2006, 2013), assim como pesquisas computacionais através de modelagem CFD e regressão das características do turbocompressor (Zhao *et al.*, 2017; Torregrosa *et al.*, 2017; Serrano *et al.*, 2015; Ding *et al.*, 2017).

O uso de banco de fluxo quente para testes em turbocompressores não consiste em uma metodologia apenas desenvolvida para coletar as gradezas termodinâmicas do compressor e da turbina, mas também é usado para caracterizar o comportamento do turbocompressor quando diferentes causas de falha são inseridas nos sistemas auxiliares ou nos componentes do turbocompressor (Pastor *et al.*, 2012; Lopez-Hidalgo *et al.*, 2017). Métodos para a análise de falhas e estratégias de diagnóstico foram desenvolvidos por pesquisadores da área automotiva, concluindo que pesquisas para avaliar o turbocompressor, quando efetuadas diretamente no MCI, incrementam consideravelmente o tempo de teste se comparadas ao uso de bancos de fluxo quente (Barelli *et al.*, 2009; Barelli and Bidini, 2005). Outras pesquisas, detalham a importância da realização de testes em condições transientes, já que se observa que este tipo de regime modifica as variáveis mais sensíveis do turbocompressor (Serrano *et al.*, 2009; Wu *et al.*, 2017; Lopez-Hidalgo *et al.*, 2017; Moosania and Zheng, 2017; Yang *et al.*, 2018a,b; Zheng *et al.*, 2018).

No MCI, é natural que o comportamento dos subsistemas seja transitório e não permanente, devido à incidência do tráfego e relevo das cidades e rodovias. De tal forma, é comum que a velocidade e as vazões mássicas do turbocompressor

variem frequentemente (Serrano *et al.*, 2017). Em alguns casos, os bancos de fluxo são configurados para simular diversos ciclos transitórios, como Lopez-Hidalgo *et al.* (2017) que determina, a partir da variação em parâmetros de aceleração e desaceleração do turbocompressor, o impacto de uma falha no funcionamento do turbocompressor.

Embora seja possível a configuração de pontos transitórios nos testes do turbocompressor em banco de fluxo quente, na literatura não está consolidada uma metodologia clara que possibilite a obtenção das características a serem consideradas nesse tipo de teste. Parâmetros como rotação máxima, rotação mínima ou taxa de aceleração e desaceleração são fatores importantes para reprodução do comportamento real. Não obstante, outros subsistemas que por sua vez são dependentes das características transientes do MCI são testados seguindo uma metodologia consistente. A avaliação de parâmetros de emissões de um MCI em regime transiente utilizando diversos tipos de ciclos padrões, permitem obter dados próximos da realidade (Zare *et al.*, 2017a,b; García *et al.*, 2017; Roso *et al.*, 2016).

Os ciclos padrões definem diversos pontos de velocidade do veículo em função do tempo, simulando as condições de funcionamento do MCI em condições urbanas, rurais e de rodovia. Sua principal característica é estar em contínua otimização ao longo do tempo, visando representar com maior fidelidade as condições reais de funcionamento de cada MCI submetido à diferentes percursos e topografias que variam de acordo com os trajetos considerados (Roso *et al.*, 2016).

Os ciclos padrões não são os únicos desenvolvidos na literatura, também é possível obter ciclos reais de condução específicos, característicos de uma cidade ou de um percurso desenvolvido por qualquer motorista. Esses ciclos consideram características do local e até mesmo a forma de conduzir de um indivíduo particular (Roso *et al.*, 2016).

Tendo exposto o anterior, o objetivo deste trabalho é conseguir obter a característica transitória de funcionamento de um turbocompressor quando acoplado a um MCI, utilizando uma variação no método apresentado por Roso *et al.* (2016). Para isso, características do turbocompressor operando em pontos estacionários são obtidas experimentalmente e inseridas no modelo computacional como condições de contorno, fazendo com que sejam interpoladas e extrapoladas as condições observadas no ciclo de homologação ETC.

2. PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL

O ciclo ETC (*European Transient Cycle*) é implementado na Europa desde o ano 2000 e conta com três intervalos de 600 segundos, contemplando em cada intervalo, as características de condução em percurso urbano, rural e rodoviário. No primeiro trecho, o urbano, ocorrem paradas características dessa aplicação, com velocidade média de 23 km/h. Já o segundo trecho apresenta velocidade média de 69 km/h e o último, 84 km/h.

Os procedimentos computacionais considerados são compostos pela simulação do veículo com a utilização de mapas característicos do MCI, características construtivas do veículo e o ciclo padrão de condução a ser utilizado.

Para a simulação do veículo, é configurado um modelo comercializado amplamente no Brasil, equipado com o turbocompressor em análise. A simulação das características do veículo é realizada incluindo informações construtivas, características referentes à transmissão, ao MCI, entre outros. O modelo computacional do veículo é apresentado na Fig. (1).

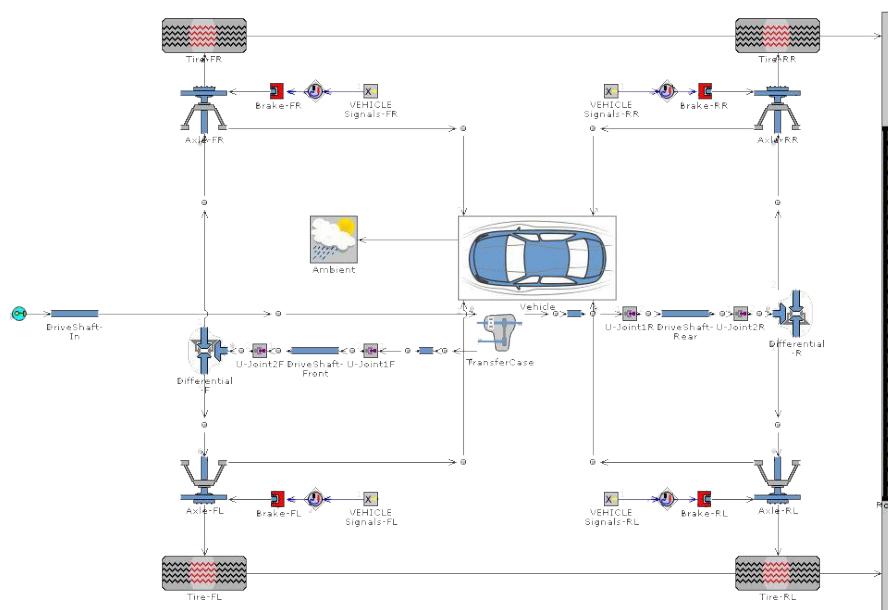


Figura 1: Modelo do veículo no programa GT-Suite

As principais informações referentes ao MCI e ao veículo, utilizadas para a configuração do modelo computacional, são apresentadas na Tab. (1) e Tab.(2).

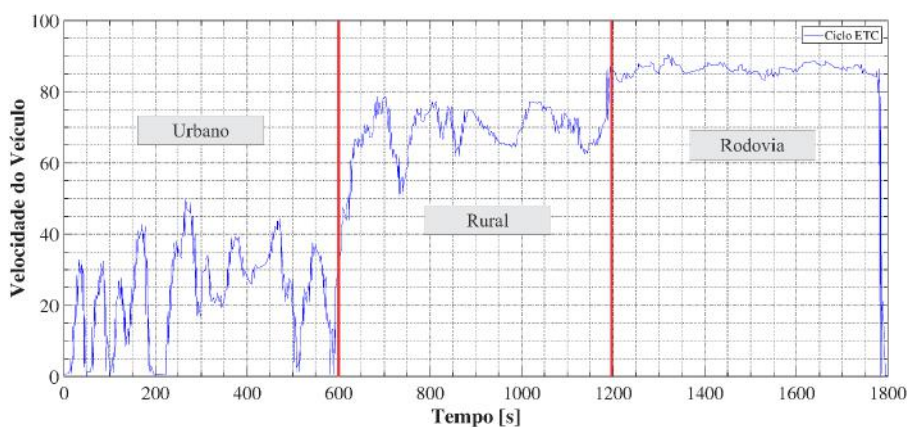
Tabela 1: **Principais características do motor**

Tipo de MCI	Ciclo Diesel com turbocompressor e injeção direta
Volume de deslocamento	1288 cm ³
Razão de compressão	16,5:1
Número de cilindros	6
Torque máximo	2250 Nm
Potência máxima	480cv (1900 rpm)
Ordem de ignição	1-4-2-6-3-5

Tabela 2: **Principais características do veículo**

Massa do veículo	28200 kg
Área frontal do veículo	8,14 m ²
Coefficiente de arrasto	0,5
1º Relação de transmissão	11,54
2º Relação de transmissão	7,93
3º Relação de transmissão	5,46
4º Relação de transmissão	3,82
5º Relação de transmissão	2,53
6º Relação de transmissão	1,74
7º Relação de transmissão	1,20
8º Relação de transmissão	0,84
Relação final do diferencial	3,73

O desenvolvimento do ciclo de condução é realizado pelo modelo computacional através do cálculo do torque demandado para mover o veículo em cada instante de velocidade e tempo (v vs t) definidos pelo ciclo. Conforme mencionado, considerou-se o ciclo de homologação utilizado no Brasil para este veículo, o ETC, caracterizado pelas curvas de velocidade representadas na Fig. (2).

Figura 2: **Ciclo ETC - Lim et al. (2015)**

É válido ressaltar que o ciclo utilizado pode ser modificado de acordo com a avaliação a ser realizada, dependendo da aplicação a qual o turbocompressor será utilizado.

Por fim, são introduzidos mapas de funcionamento do MCI obtidos em banco dinamométrico. Ou seja, pontos de rotação, posição do acelerador e BMEP (do inglês, *Brake Mean Effective Pressure*), que caracterizam o MCI, além da rotação, temperaturas, pressões que caracterizam o turbocompressor para cada ponto de funcionamento do MCI. Esses pontos de funcionamento são utilizados como condições de contorno na simulação computacional.

No modelo computacional, equações diferenciais do movimento para o veículo são integrados no tempo, calculando assim a velocidade e o torque em regime transiente durante o ciclo ETC. Para isso são utilizados os valores de entrada de BMEP, rotação do MCI e posição do pedal de acelerador. Assim, obtém-se dados de funcionamento do turbocompressor ao longo do ciclo a partir de dados de funcionamento em regime estacionário obtidos em banco dinamométrico (*steady-state engine maps*).

2.1 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos se referem à rotação do turbocompressor ao longo do ciclo real de condução ETC, assim como a temperatura e a pressão na entrada e na saída da turbina. Essas últimas duas propriedades termodinâmicas, se tornam muito importantes quando se usa um banco de fluxo a quente, já que auxiliam a caracterização da cinética do escoamento

para uma situação particular em pesquisa. Um exemplo, o teste em um turbocompressor de um MCI particular, o qual precise de perícia ou avaliação de diagnóstico de falhas.

Na Figura (3) se observa a variação da rotação do turbocompressor ao longo do tempo de simulação do ciclo ETC. Esta figura apresenta um comportamento transitório nas três regiões avaliadas do ciclo (urbano, rural e rodoviário). Contudo, e como já era de se esperar, no percurso rodoviário as acelerações e desacelerações são feitas com menor frequência e magnitude.

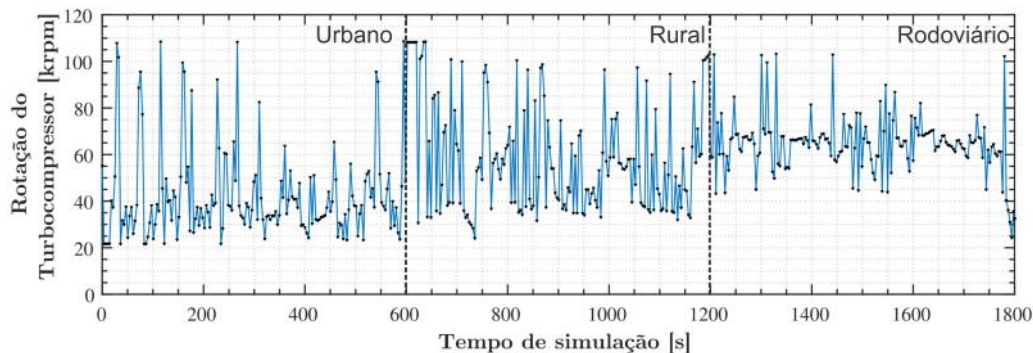


Figura 3: Rotação do Turbocompressor ao longo do ciclo ETC

A aceleração (a) e desaceleração (a') do turbocompressor, apresentadas na Tab. (3), são calculadas pelas taxas de mudança de rotação entre um ponto de tempo de simulação t_i e tempo de simulação posterior t_{i+1} . Os resultados são analisados para determinar a maior aceleração e desaceleração em cada região do ciclo, sendo observado que o Δt é 3,6 s.

Tabela 3: **Aceleração e desaceleração máxima do turbocompressor**

Percurso	a_{max}	a'_{max}
Urbano	$20,1 \text{ krpm.s}^{-1}$	$22,2 \text{ krpm.s}^{-1}$
Rural	$19,5 \text{ krpm.s}^{-1}$	$21,6 \text{ krpm.s}^{-1}$
Rodoviário	$16,2 \text{ krpm.s}^{-1}$	$17,2 \text{ krpm.s}^{-1}$

Com os valores apresentados na Tab. (3) se pode quantificar a variação máxima normal com que as mudanças de rotação devem ser feitas em análise de laboratório para este turbocompressor analisado. O resultado também pode ser usado para avaliar os dados utilizados em testes em situações severas, os quais são feitos comumente para testar os limites de funcionamento das máquinas. Assim, os valores de aceleração e desaceleração conhecidos por este método permitem estipular um ponto de comparação, se conseguindo determinar um índice da severidade que está sendo testada.

Da mesma forma, os resultados equivalentes são obtidos para a temperatura de entrada e saída da turbina, representadas na Fig. (4) e a pressão de entrada e saída da turbina, Fig. (5). Todas essas características são determinadas ao longo do tempo.

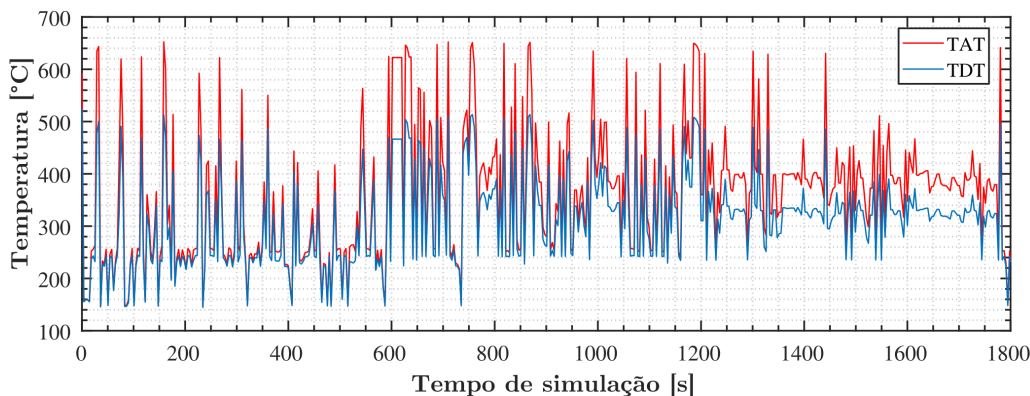


Figura 4: Temperatura antes e depois da turbina ao longo do ciclo ETC

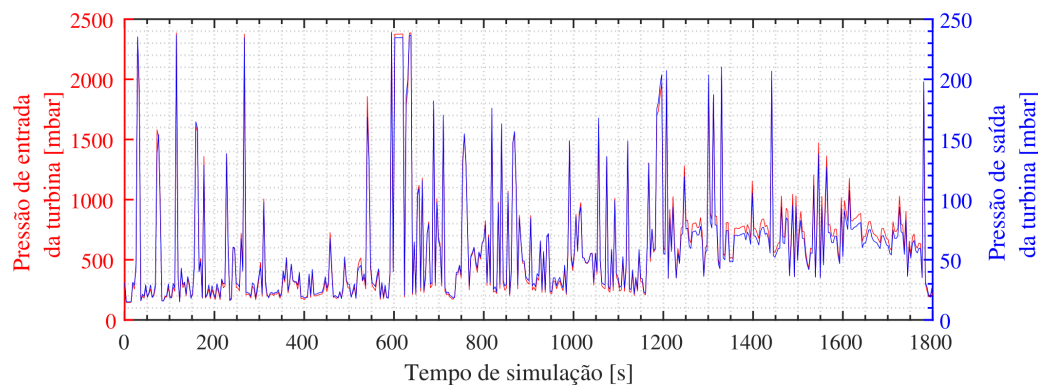


Figura 5: **Pressão de entrada e saída da turbina ao longo do ciclo ETC**

Obter a variação da temperatura em função do tempo, Fig. (4), permite configurar uma temperatura padrão para testes independentes ou específicos. Os testes com padrões internacionais de turbocompressores, para levantamento das grandezas termodinâmicas, são desenvolvidos a temperaturas constantes dos gases de exaustão (gases que simulam a cinética do MCI). O padrão internacional SAEJ1826 (1995) recomenda usar uma temperatura de 600°C. Contudo, se é conhecida a faixa que o turbocompressor trabalha em conjunto com o MCI, podem ser melhorados os mapas de desempenho sendo testado em uma temperatura diferente. A variação da temperatura de teste representa mudanças significativas na transferência de calor dos componentes do turbocompressor (Chung *et al.*, 2018). Este tipo de resultado permite, portanto, uma melhor decisão na hora de selecionar a temperatura de teste para conseguir simulações computacionais com uma correção de temperatura do turbocompressor.

Além do turbocompressor ser testado em banco de fluxo quente para o levantamento das grandezas termodinâmicas, também são feitos diversos tipos de testes mecânicos para observar as suas capacidades, a análise de fadiga térmica é um dos mais feitos. O conhecimento dos ciclos térmicos apresentados na Fig. (4) permite identificar os limites de temperatura que devem se estipular, assim como especificam uma base para extrapolação desses valores.

O comportamento da pressão na entrada e na saída da turbina é apresentada na Fig. (5). A pressão na saída é consequência do turbocompressor implementado. Os principais fatores que interferem na pressão de expansão é a geometria da carcaça expansora, do rotor da turbina, assim como a estratégia de controle do turbocompressor. Nesse caso particular, o MCI turboalimentado estudado tem implementado um controle por *wastegate*, o que permite ter sempre uma razão de expansão igual a 10. Por outra parte, a pressão na entrada da turbina é muito importante quando se deseja realizar uma análise de limites máximos de pressão do MCI, além de servir como data objetivo se a simulação do turbocompressor em banco de fluxo quente é o requerido. O uso da pressão de entrada da turbina e a temperatura de entrada podem ser utilizadas como um *setpoint* variável, e a partir dessas variações, ler as demais propriedades do turbocompressor.

3. CONCLUSÃO

A modificação da metodologia de Roso *et al.* (2016) apresentou dados transientes de funcionamento do turbocompressor, permitindo a caracterização dessa turbomáquina funcionando em um regime próximo das condições reais. A partir desses dados (rotação, pressão e temperatura), é possível formular estratégias de controle, utilizando um banco de fluxo quente, para obter uma simulação experimental em condições próximas as encontradas nas diferentes regiões do ciclo ETC.

A metodologia proposta pode ser aplicada a diversos modelos de turbocompressores e o MCI que o utiliza. Além de poder obter os resultados para uma diversa gama de veículos comerciais que utilizam o mesmo MCI.

Esta metodologia permite a implementação de outros ciclos padrões de condução ou ciclos formulados por pesquisadores para testar condições específicas desejadas.

A quantificação de valores como aceleração e desaceleração de um turbocompressor, assim como rotações máximas atingidas permitem ter uma melhor aproximação quando realizados testes experimentais que buscam validar modelos de diagnóstico de falhas.

4. REFERÊNCIAS

- Barelli, L. and Bidini, G., 2005. "Design of the measurements validation procedure and the expert system architecture for a cogeneration internal combustion engine". *Applied thermal engineering*, Vol. 25, No. 17-18, pp. 2698–2714.
- Barelli, L., Bidini, G. and Bonucci, F., 2009. "Diagnosis methodology for the turbocharger groups installed on a 1 mw internal combustion engine". *Applied energy*, Vol. 86, No. 12, pp. 2721–2730.
- Chung, J.E. *et al.*, 2018. "An Investigation on the Efficiency Correction Method of the Turbocharger at Low Speed". *Energies*, Vol. 11, No. 2, pp. 1–14.
- Deligant, M., Podevin, P. and Descombes, G., 2012. "Experimental identification of turbocharger mechanical friction losses". *Energy*, Vol. 39, No. 1, pp. 388–394.

- Ding, Z. *et al.*, 2017. “A one-dimensional unsteady performance model for turbocharger turbines”. *Energy*, Vol. 132, pp. 341–355.
- Galindo, J., Serrano, J., Guardiola, C. and Cervelló, C., 2006. “Surge limit definition in a specific test bench for the characterization of automotive turbochargers”. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 30, No. 5, pp. 449–462.
- Galindo, J., Tiseira, A., Arnau, F. and Lang, R., 2013. “On-engine measurement of turbocharger surge limit”. *Experimental Techniques*, Vol. 37, No. 1, pp. 47–54.
- García, A., Monsalve-Serrano, J., Roso, V.R. and Martins, M.E.S., 2017. “Evaluating the emissions and performance of two dual-mode rcci combustion strategies under the world harmonized vehicle cycle (whvc)”. *Energy Conversion and Management*, Vol. 149, pp. 263–274.
- Lim, C. *et al.*, 2015. “Performance and emission characteristics of a vehicle fueled with enriched biogas and natural gases”. *Applied Energy*, Vol. 139, pp. 17–29.
- Lopez-Hidalgo, M.A., Serrano-Cruz, J.R. and Dolz-Ruiz, V., 2017. “Fault expertise in internal combustion engine turbocharger”. *DYNA*, Vol. 92, No. 1, pp. 82–87.
- Moosania, S.M. and Zheng, X., 2017. “Effect of internal heat leakage on the performance of a high pressure ratio centrifugal compressor”. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 111, pp. 317–324.
- Pastor, J. *et al.*, 2012. “Study of turbocharger shaft motion by means of non-invasive optical techniques: Application to the behaviour analysis in turbocharger lubrication failures”. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 32, pp. 292–305.
- Roso, V.R. *et al.*, 2016. “Ciclos reais de condução veicular em santa maria e seus impactos em consumo e emissões”. SAEJ1826 (1995), 1995. “Turbocharger gas stand test code”. Standard, SAE International, Warrendale, PA.
- Serrano, J.R. *et al.*, 2015. “Turbocharger heat transfer and mechanical losses influence in predicting engines performance by using one-dimensional simulation codes”. *Energy*, Vol. 86, pp. 204–218.
- Serrano, J.R. *et al.*, 2017. “Radial turbine performance measurement under extreme off-design conditions”. *Energy*, Vol. 125, pp. 72–84.
- Serrano, J., Arnau, F., Dolz, V. and Piqueras, P., 2009. “Methodology for characterisation and simulation of turbocharged diesel engines combustion during transient operation. part 1: Data acquisition and post-processing”. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 1, pp. 142–149.
- Torregrosa, A. *et al.*, 2017. “Local flow measurements in a turbocharger compressor inlet”. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 88, pp. 542–553.
- Wu, B. *et al.*, 2017. “Effects of miller cycle and variable geometry turbocharger on combustion and emissions in steady and transient cold process”. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 118, pp. 621–629.
- Yang, M. *et al.*, 2018a. “Analysis on altitude adaptability of turbocharging systems for a heavy-duty diesel engine”. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 128, pp. 1196–1207.
- Yang, M. *et al.*, 2018b. “Influence of altitude on two-stage turbocharging system in a heavy-duty diesel engine based on analysis of available flow energy”. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 129, pp. 12–21.
- Zare, A. *et al.*, 2017a. “Engine performance during transient and steady-state operation with oxygenated fuels”. *Energy & Fuels*, Vol. 31, No. 7, pp. 7510–7522.
- Zare, A. *et al.*, 2017b. “The influence of oxygenated fuels on transient and steady-state engine emissions”. *Energy*, Vol. 121, pp. 841–853.
- Zhao, B. *et al.*, 2017. “Impact of inlet distortion on turbocharger compressor stage performance”. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 124, pp. 393–402.
- Zheng, Z. *et al.*, 2018. “A theoretical and experimental study on the effects of parameters of two-stage turbocharging system on performance of a heavy-duty diesel engine”. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 129, pp. 822–832.

5. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

COMPUTATIONAL METHOD FOR TURBOCHARGER TRANSIENT CHARACTERIZATION USING REAL DRIVING CONDITIONS DATA

Oscar R. Sandoval, osc.sandoval@hotmail.com¹

Vinicius R. Roso, e-mail¹

Marina V. Fonda, marina.viannafonda@gmail.com²

Larissa Coelho, larissacoelho17@yahoo.com.br²

Ramón M. Valle, e-mail¹

¹Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, UFMG, MG, Brazil

²Colegiado de Graduação em Engenharia Mecânica, UFMG, MG, Brazil

Resumo:

The increasing competitiveness of the automotive market and increasingly stringent vehicle laws have led manufacturers to pursue ways to improve internal combustion engines (ICE). Strategies, such as the use of turbochargers, are used to compensate power and torque losses when the concept of downsizing is applied. Typically, experimental tests on turbochargers are made on hot-flow benches, depending on permanent operating points. Such behavior is not consistent with operating conditions typical of turbochargers coupled to a ICE associated with a vehicle under actual driving conditions. Under these circumstances, many external factors modify ICE behavior, making it more and more transient. As an artifice of approximation of experimental tests in flow benches to the usual conditions, this work aims to identify the transient behavior of turbochargers. Thus, a method of evaluation of the transient conditions is presented based on data collected experimentally. By means of computational simulations of a standard conduction cycle, the transient behavior of the main characteristics of the turbocharger is obtained as results.

Palavras-chave: Turbocharger, conduction cycle, computational simulation, transient regime