

OTIMIZAÇÃO DE UM CONCEITO DE TURBOCOMPRESSOR DE BAIXA TEMPERATURA PARA UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA EM GT-POWER

Guilherme Yago Zulian, guilherme.zulian@gmail.com¹
Jackson Mayer Dapper, jackson.dapper@acad.ufsm.br¹
Andrey Avila da Silva Pereria, andrey.pereira@acad.ufsm.br¹
Thompson D. M. Lanza Nova, lanzanova@gmail.com¹
André Schaan Casagrande, andre.casagrande@duoengenharia.com²
Natal de Avila Antonini, natal_antonini@hotmail.com²

¹Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima nº 1000, Santa Maria - RS, Prédio 9-D, CEP: 97105-900.

²DUO Engenharia Criativa Ltda, Av. Vicente da Fontoura 2352 sala 401, Petrópolis, Porto Alegre, CEP 90640-002.

Resumo. Conceitos que visam o aumento de eficiência energética em motores de combustão interna (MCIs) através da redução de temperatura de admissão vêm sendo largamente estudados por pesquisadores, visando, por exemplo, downsizing e até mesmo redução de emissões específicas. A simulação de MCIs em softwares comerciais 1-D vem se tornando uma ferramenta imprescindível não só para a pesquisa e desenvolvimento (P&D), como também para a simulação de diferentes alternativas inovadoras visando otimizar ao máximo os resultados. O presente estudo traz a otimização de um modelo em GT-Power, utilizando uma tecnologia denominada turbocompressor de baixa temperatura (TCBT). Esse sistema é composto por 3 turbinas, um compressor e um intercooler, além de válvulas wastegate. Esse dispositivo funciona basicamente com um turbocompressor, reaproveitando mais a energia na exaustão proveniente da combustão e comprimindo mais o ar no compressor para seu posterior resfriamento em duas etapas, no intercooler e através de uma turbina denominada turbina fria (TF) que também está conectada ao eixo do conjunto. As simulações sempre compararam o motor com turbocompressor e intercooler standard com o motor utilizando o TCBT. A otimização foi realizada buscando máxima potência com ambos os modelos, tendo como importantes limitações a detonação em alta carga e uma eficiência mínima com o modelo TCBT. Com isso, foi possível alcançar um aumento de 23 HP de potência de eixo com o TCBT, enquanto mantém a mesma eficiência de eixo. Por fim, uma redução de temperatura de aproximadamente 21K na admissão foi alcançada, operando com uma pressão de admissão superior quando comparado ao modelo original (TC).

Palavras chave: Ciclo Regenerativo. Software de modelagem e simulação. Turbocompound.

Abstract. Concepts aimed at increasing energy efficiency in internal combustion engines (ICE) by reducing the intake temperature have been widely studied by researchers, aimed, for example, at downsizing and even reducing specific emissions. The simulation 1-D commercial software has become an essential tool not only for research and development (R&D), but also for simulating of different innovative alternatives looking the best results in the optimization process. The present study brings the optimization of a model in GT-Power, using a technology called low temperature turbocharger (TCBT). This system consists of 3 turbines, a compressor and an intercooler, in addition to wastegate valves. This device works as a turbocharger basically, reusing the energy in the exhaust from combustion, comprising higher the air for cooling after in two stages, in the intercooler and then through a turbine called cold turbine (TF) which is also connected to the same shaft. The simulations were always done using both models, standard turbocharged and intercooled engine and another using TCBT. The optimization was carried out seeking maximum power with both models, having as important limitations the detonation at high load and a minimum efficiency with the TCBT model. With this, it was possible to achieve an increase of 23 HP of axle power with the TCBT, while maintaining the same brake efficiency. Finally, a temperature reduction of approximately 21 K at the inlet was achieved, operating with a higher inlet pressure when compared to the original model (TC).

Keywords: Regenerative cycle. Modeling and simulation software. Turbocompound.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho consiste na modelagem e otimização de um motor turbocomprimido (TC) seguido pela adaptação do modelo para operar com um sistema de turbocompressor de baixa temperatura (TCBT) em GT-Power.

Quando se refere a motores, o estudo da redução temperatura de admissão é de suma importância para o melhor rendimento volumétrico do motor. É válido porque quanto menor a temperatura do ar, maior a massa de ar admitida na câmara de combustão e, conseqüentemente, maior também a massa de combustível para uma mesma razão estequiométrica, proporcionando um aumento de potência.

A utilização de intercoolers é comum para redução de temperatura da mistura a ser admitida em motores sobrealimentados. Frente a isso, a estratégia TCBT busca trazer redução de temperatura ainda maior quando comparada com a aplicação de intercooler, propondo um avanço tecnológico neste sentido.

O sistema TCBT, com patente adquirida junto ao INPI (BR 102017014513-1) consiste em um conjunto turbocompressor, somado a duas turbinas adicionais interligadas a um mesmo eixo, além de um intercooler. Com o objetivo de reduzir a temperatura de admissão do motor a combustão interna (MCI), visando ganho de desempenho e possíveis reduções de emissões. Na simulação, o motor desempenhou com combustível etanol hidratado (E96W4).

1.1 Objetivo geral

O objetivo desse trabalho foi partindo de modelagem e validação computacional prévias, efetuar uma otimização em 2 modelos: original (TC) com *intercooler* e TCBT. Em seguida, investigar os efeitos da redução de temperatura de admissão efetuando uma análise comparativa dos resultados de desempenho dos sistemas otimizados, investigando os efeitos da redução de temperatura de admissão, operando em plena carga e variando parâmetros dos sistemas. Para tal, utilizou-se *software* de dinâmica de gases computacional 1-D, GT-Power.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A quantidade de combustível que pode ser oxidada dentro do cilindro do motor, tem relação com a potência máxima que o veículo pode fornecer. Porém, isso é limitado pela quantidade de ar que é introduzido em cada cilindro, a cada ciclo. Dessa maneira, a sobre alimentação tem como finalidade comprimir o ar, antes de entrar no cilindro, a uma densidade mais alta daquela do ar ambiente, permitindo um aumento do volume de mistura ar-combustível na câmara de combustão e conseqüentes aumento da carga máxima e potência máxima e potencial redução no tamanho do motor (*downsizing*). Existem duas formas básicas de se sobrealimentar um motor ativamente: *supercharging* e *turbocharging* (López et al., 2020).

O *supercharging* ocorre por meio de um compressor ou bombas externas, acionados mecânica ou eletricamente para comprimir o ar de admissão. O sistema retira energia do eixo do motor, tornando-se um trabalho “parasita”. Neste sentido, estudos acerca dessa estratégia mostraram redução no consumo de combustível (BSFC, do inglês *Brake Specific Fuel Consumption*), apresentando um decréscimo de 12% no consumo específico de combustível de eixo (Wetzel, 2013).

Segundo Teo et al., 2019, em um motor naturalmente aspirado, cerca de 22-46% da energia contida no combustível é expelida para a exaustão, e apenas cerca de 15 a 32% da energia contida no combustível é convertida em trabalho útil do motor. O *turbocharging* se utiliza dessa energia desperdiçada para movimentar uma turbina, ligada a um eixo comum. Esta abordagem não retira trabalho do eixo do motor, porém, pode-se pontuar a restrição na exaustão causada pelo sistema, o que compreende um aumento no trabalho de bombeamento, que pode ser atenuado pela maior pressão de admissão (Wetzel, 2013).

Além das estratégias ativas já citadas, adaptações como *turbocoumpound*, *intercooler* ou *aftercooler* vem sendo largamente estudados visando otimização dessas ferramentas de sobrealimentação (Aghaali and Ångström, 2015). As principais desvantagens talvez sejam o tamanho do sistema e sua complexidade. Além disso, a sobre alimentação aumenta a temperatura da mistura na admissão (Zare, 2020), trazendo a necessidade de novos acessórios para atenuar esse aumento. Diversas alternativas vem sendo criadas visando a solução desse problema. Walter F. Isley (1973) e Klingbeil, A. E.; Lavertu (2016) desenvolveram sistemas de arrefecimento da mistura no coletor de admissão após o gás ser comprimido por um *supercharger*.

O turbocompressor de baixa temperatura (TCBT) é um sistema de turbocompressão para motores de combustão interna. Composto por 3 turbinas (quente (TQ), fria (TF) e de retorno (TR)) e um compressor (C) todos ligados por um mesmo eixo, além de um intercooler (IC) e uma válvula de controle (V), similar a uma válvula *wastegate*, ligados ao motor (M).

Os gases de combustão são expulsos pelo motor em 9 e impulsionam a turbina quente, que transmite a potência para o compressor. Na admissão, o ar succionado da atmosfera em 1 é somado ao escoamento proveniente do ponto 7, sendo a vazão resultante do ponto 2 comprimida pelo compressor. O ar passa então pelo *intercooler*, saindo arrefecido entre os pontos 3 e 4 à uma pressão aproximadamente constante. O papel da turbina fria (TF) é expandir o ar para a pressão e temperatura que será admitido pelo motor, direcionando por 5. Na posição 5 há um controle, acionado pela válvula, caso o escoamento se encontre a uma pressão igual ou menor que a pressão de operação desejada, a válvula se encontrará

completamente fechada e o ar prosseguirá ao ponto 8 onde será admitido pelo motor. Caso a pressão elevar mais que a desejada, a válvula abre parcial ou totalmente, liberando parte da vazão para o ponto 6, por onde é conduzida à turbina de retorno, que expande o escoamento à pressão de sucção do compressor no ponto 7, reduzindo ainda mais a temperatura do ar. O ciclo se reinicia unindo os pontos 1 e 7 e prosseguindo para o compressor.

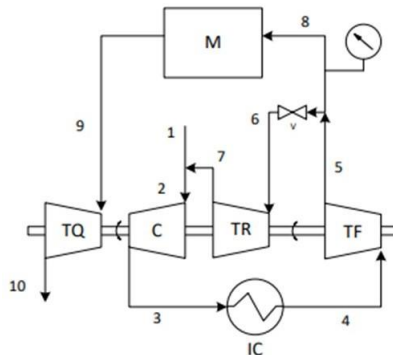


Figura 1: Adaptado de HARTMANN (2016)

O processo de combustão dentro do cilindro é comumente caracterizado como uma função da queima da carga que foi admitida. A primeira lei da termodinâmica é aplicada em um volume de controle que delimita a câmara de combustão. Assim, tratando a carga admitida pelo cilindro como uma mistura de produtos e reagentes homogêneos (STONE, 1999).

A função de *Wiebe* representa a evolução da fração de massa queimada no tempo (HEYWOOD, 2018) que é representada numericamente conforme a Eq. 1:

$$x_b = 1 - \exp \left[-a \left(\frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta} \right) \right] \quad (1)$$

onde x_b é a fração de massa queimada, θ é o ângulo do eixo de manivelas, θ_0 é o ângulo do eixo onde inicia a combustão, $\Delta\theta$ é a duração total da combustão. A função *Wiebe* é largamente utilizada para aproximar o perfil da fração de massa queimada em modelos computacionais, e apenas impõe a taxa de queima em um modelo computacional, logo, não caracteriza um modelo preditivo de combustão.

3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consistiu em adaptar um modelo computacional validado no *software* de dinâmica de fluidos unidimensional para motores *GT-Power* para operação com um sistema TCBT. Na sequência realizou-se uma otimização e posteriormente um estudo comparativo entre o modelo original TC e o modelo com a tecnologia TCBT.

O motor base utilizado foi um *Volkswagen AP 1.8* Litros de 4 cilindros originalmente naturalmente aspirado (NA), o qual recebeu um turbocompressor, operando com combustível etanol hidratado (E96W4). Parâmetros do motor são apresentados na Tabela 1:

Tabela 2: Parâmetros básicos do motor modelado.

Parâmetros	Dados
Número de cilindros	4
Diâmetro (mm)	81.5
Curso (mm)	86.4
Volume deslocado total (cm ³)	1802
Razão de compressão	8.11
Diâmetro da válvula de admissão (mm)	40
Diâmetro da válvula de exaustão (mm)	33
<i>Lift</i> (medido) da válvula de admissão (mm)	8.5
<i>Lift</i> (medido) da válvula de exaustão (mm)	8.5

A aquisição dos dados foi realizada através de ensaio do motor em dinamômetro de bancada. Os dados adquiridos foram utilizados para a validação do modelo computacional TC, utilizando ferramentas do *software*. Também foram obtidos os dados geométricos para a modelagem do TC.

3.1. Metodologia de modelagem e critérios de convergência

O comportamento em regime permanente ou transiente, utiliza a forma de resoluções de volumes finitos incorporado no GT-Power. Para isto, é necessário definir critérios de convergência dentro do *setup* do *software*, fazendo assim, a discretização dos volumes onde ocorre o escoamento. Para cada volume, aplica as equações de equilíbrio e energia (solução explícita), ou entalpia (solução implícita) e *momentum* (Lanzasova, 2013). Além disso, no centro de cada volume calculam-se valores como densidade, pressão e temperatura.

A função *Wiebe* é executada para o cálculo de combustão, o qual representa a evolução da fração de massa queimada no tempo. Dentro do *template* do objeto de combustão (função de *Wiebe*, um modelo de detonação *standard* Douaud&Eyzat foi fixado para delimitar a operação em altas cargas do motor, com o objetivo de definir uma potência máxima de operação o número de octanas do combustível é o único dado de entrada necessário para modelagem, partindo da Eq. 2:

$$I(t) = \int_0^t \frac{1}{\tau} dt \quad (2)$$

onde I é a integral do tempo de indução, t é o tempo decorrido do início de compressão do *end-gas* e τ o tempo de indução. No Douaud&Eyzat, a predição de detonação ocorre no ângulo de virabrequim no qual a integral do tempo de indução (IT) iguala ou ultrapassa o valor de 1. A octanagem, baseado no AKI (*Anti-Knock Index*) utilizadas nesse trabalho foi de 100 octanas, aproximando para o que afirma MELO et al., (2012).

As turbinas e compressor foram modeladas como *TurbineSimple* e *CompressorSimple*, respectivamente, uma abordagem que não necessita dos mapas de operação do dispositivo. Essa metodologia de modelagem de turbina e compressor é comumente usada durante os estágios iniciais de desenvolvimento de motores para encontrar os principais parâmetros para a correspondência do turbocompressor (Martins e Lanzasova, 2015).

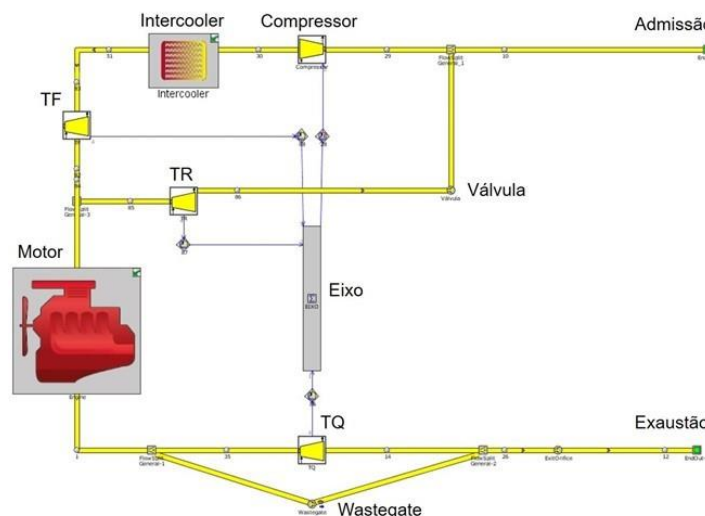


Figura 2: Modelagem do sistema TCBT em GT-Power

A duração mínima da simulação foi definida como 80 ciclos para convergência. A duração máxima foi setada como 150 ciclos. A Fig. 2 apresenta o modelo TCBT programado em GT-Power.

3.2 Metodologia de otimização

A ferramenta GT-Optimizer oferece 2 versões de otimização: *Advanced optimizer* e *Standard Optimizer*. A versão utilizada foi a *Advanced*, que disponibiliza mais funcionalidades que a *Standard*, com a capacidade de realizar um processo individual para cada interação de otimização e a habilidade de executar “*case sweep*”. Foi utilizado o algoritmo genético (NSGA-III) (Deb e Jain, 2014), ele requer a definição do número de populações e gerações. A multiplicação desses fatores definirá o número máximo de interações, critério de parada da otimização. O número de gerações inicial é de 10, sugerido pela GAMMA (2016). Esse algoritmo é o mais indicado para solução de problemas com variáveis não lineares.

O *Advanced Direct Optimizer* encontra uma ótima variável de saída, na qual altera uma ou mais variáveis independentes de entrada escolhidas no *software*. Outra ferramenta é a opção de *sweep* de variável, ou seja, é possível

encontrar um valor ótimo de diâmetro de turbina para diferentes rotações, mesmo ajustando um outro parâmetro independentemente.

Inicialmente, otimizou-se o modelo original (TC) buscando máxima potência de eixo, variando o diâmetro de turbina (*case sweep*), a abertura da *wastegate* e o ângulo de 50% de massa queimada (CA50). Como restrição, utilizou-se o IT menor que 1. A otimização no TCBT foi realizada buscando alcançar a máxima potência de eixo. As variáveis a serem alteradas no TCBT foram as seguintes:

- Diâmetro da Turbina Quente (*case sweep*);
- Diâmetro da Turbina de Retorno (*case sweep*);
- Diâmetro da Turbina Fria (*case sweep*);
- Abertura da *Wastegate* (independente);
- Abertura da Válvula (independente);
- Ângulo de CA50 (independente).

As restrições (*constraints*) segundo GAMMA (2016) definem um intervalo de limitação para as variáveis independentes. No presente trabalho, utilizou-se 3 restrições e limites: Integral de tempo de indução de detonação de 0,80 à 0,99 (Original e TCBT); Eficiência de eixo (somente no TCBT); Potência de eixo (somente no TCBT). A potência de eixo, e a Eficiência de eixo foram definidas pelo resultado da otimização da variável na mesma rotação no modelo original.

A otimização e posterior comparativo foi realizada em 3 rotações (2000 rpm, 4000 rpm e 6000 rpm). O fato de excesso de ar – λ – foi fixado em 1, trabalhando de maneira estequiométrica e assim possibilitando a utilização de um catalisador de 3 vias (TWC).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Buscando alcançar o objetivo proposto de investigar a influência da redução de temperatura de admissão no TCBT e efetuar um comparativo com o modelo original em ambiente de simulação 1-D, fixaram-se parâmetros em ambos os modelos, como λ (1) e duração de combustão (30 graus APMS).

A pressão de cilindro por ângulo de virabrequim é um bom indicativo para análise do ciclo, especialmente da combustão. A Fig. 3 apresenta os resultados comparativos de pressão de cilindro. O TCBT apresenta uma pressão máxima superior àquela pressão encontrada com o TC (em todas as rotações). O modelo TCBT chega a alcançar 81 bar de pressão máxima de cilindro em 6000 rpm. O alcance desse regime, sem detonação, se dá pelo fato de uma menor temperatura de admissão, diminuindo a reatividade da mistura admitida e possibilitando uma maior pressão de admissão.

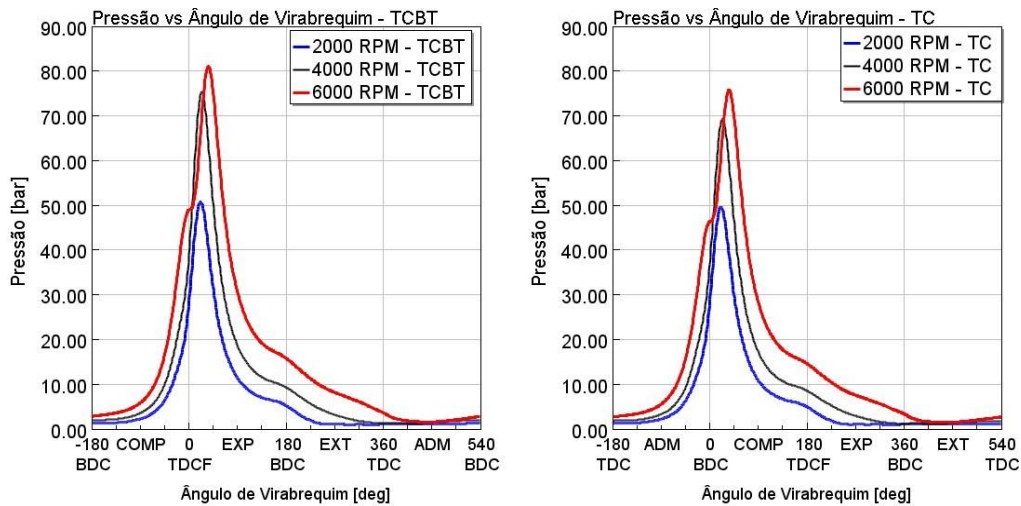


Figura 3: Resultados Comparativos de pressão de cilindro

Outro fator que influenciou para a maior pressão máxima de cilindro é o ângulo de 50% de massa queimada (CA50), que foi uma variável independente da otimização.

O TCBT apresentou uma redução máxima de aproximadamente 13 K, em 6000 rpm (Fig. 4 (b)), mesmo com pressão de admissão superior no TCBT (aproximadamente 0.21 bar a mais em 6000 rpm) quando comparado ao modelo TC. A Fig. 4 também apresenta a pressão de admissão, em um segundo eixo y (a direita). A pressão é uma influência principalmente da potência gerada na TQ. A potência na TQ é um parâmetro que depende de variáveis independentes da otimização realizada nesse trabalho, como CA50 e abertura de *Wastegate*. Ao lado de cada marcador apresenta-se, em kW, o resultado da potência gerada na turbina quente.

A pressão de admissão deixa explícito o porquê de uma maior pressão máxima de cilindro com o TCBT; maiores pressões de admissão, menores temperaturas de admissão: condições físico químicas para a combustão em maiores pressões de cilindro. Foi alcançada uma pressão máxima de admissão de 3.21 bar com o modelo TCBT.

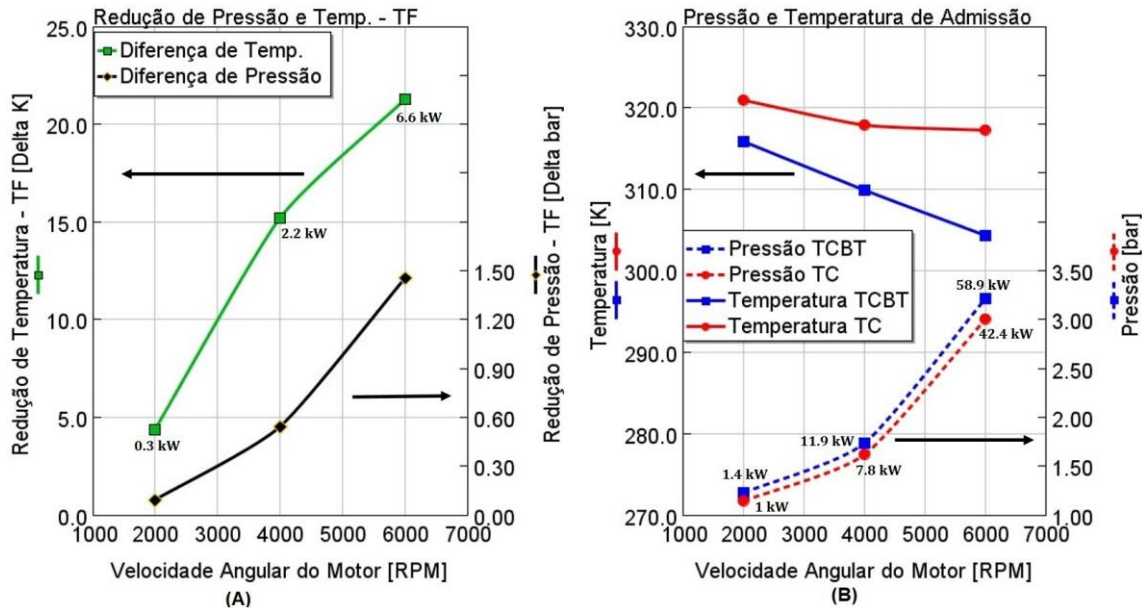


Figura 4: (A) Redução de temp. e pressão devido ao trabalho gerado na TF - (B) Temp. E Pressão TC vs TCBT

É possível comprovar a eficiência da turbina em reduzir a temperatura. Visivelmente, a TF é mais eficiente em maior velocidade angular do motor. Em 6000 rpm, a TF chega a reduzir aproximadamente 21 K de temperatura. Essa maior redução de temperatura em alta rotação é justificada pelo maior trabalho gerado pela TF, ocorrência de uma maior diferença de entalpia antes e depois dessa turbina nesse regime.

Essa redução de temperatura tem diversos impactos na operação do motor. Entre eles, um potencial redução no consumo específico de combustível e consequente aumento de eficiência.

A eficiência de eixo (Fig. 5) é um importante parâmetro para análise da capacidade do motor em transformar a energia do combustível em energia útil no eixo. Seria possível alcançar maiores eficiências nesse motor se a metodologia utilizada fosse em busca de uma maior eficiência de eixo ao invés de priorizar uma maior potência. Contudo, na abordagem adotada nesse trabalho, a eficiência inicialmente alcançada com o modelo TC foi utilizada como eficiência mínima no TCBT.

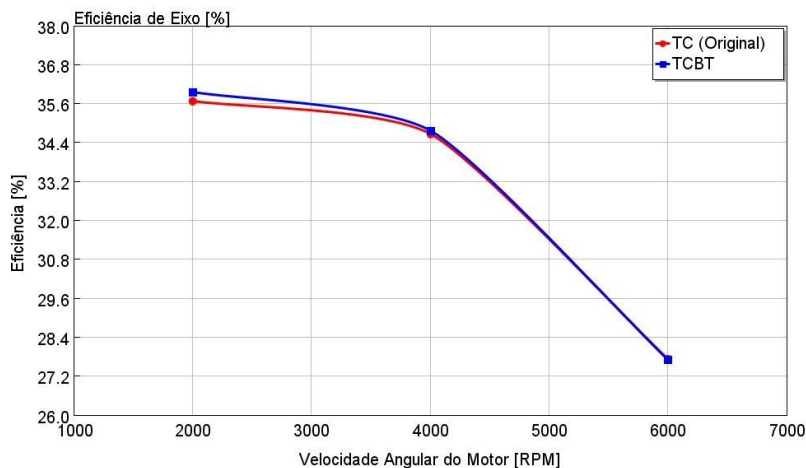


Figura 5: Eficiência de eixo, TC vs TCBT

Complementarmente, a Fig. 6 apresenta um histograma discreto demonstrando o aproveitamento da energia total fornecida pelo combustível. Através dela pode-se concluir que, da energia total do combustível, o TCBT teve uma menor perda para transferência de calor, justificada pela menor temperatura de admissão. Contudo, tem uma maior perda de energia para o escape, potencialmente devido a uma maior massa de combustível injetada, o que é possível devido ao arrefecimento da massa de ar na admissão. Essa energia do escape é utilizada para movimentar a TQ.

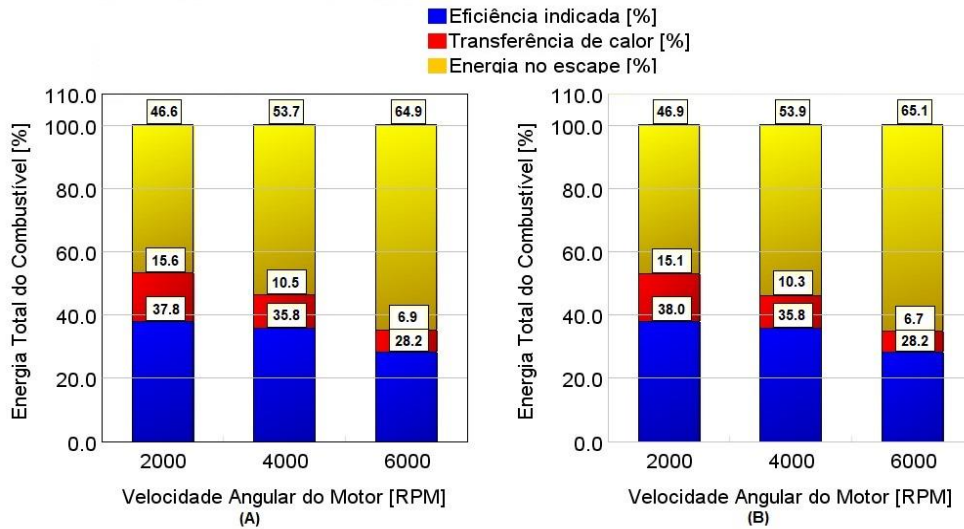


Figura 6: Histograma do aproveitamento da energia total do combustível, no qual (A) TC e (B) TCBT.

Finalmente, a Fig. 7 apresenta, em HP, um gráfico comparativo da potência de eixo do TC e do TCBT.

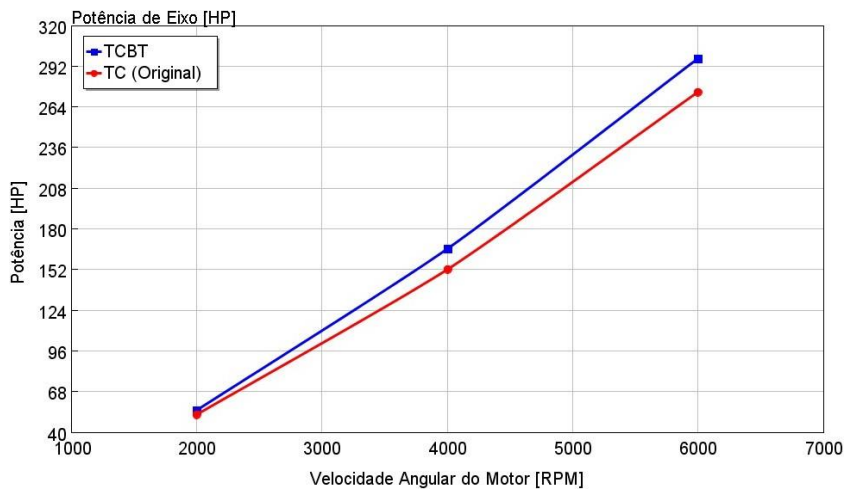


Figura 7: Potência de eixo, TC vs TCBT

Um ganho de potência de eixo de aproximadamente 23 HP em 6000 rpm foi alcançado com o modelo TCBT, mostrando o potencial do sistema para atender aos desafios do mercado.

A maior potência de eixo alcançada com o TCBT justifica-se pela redução da temperatura de admissão. Essa redução proporciona, por exemplo, o alcance de maior pressão de admissão e maior pressão máxima de cilindro, sem detonação.

O modelo TCBT permite que o motor produza mais trabalho, uma vez que, para uma mesma duração de combustão, o TCBT alcança maiores pressões durante o ciclo de potência. A Eq. 3 apresenta o cálculo do trabalho indicado por ciclo, onde a integral cíclica da pressão de cilindro é realizada. Enquanto que a Eq. 4, mostra que, para o cálculo da potência indicada, necessita-se do trabalho, validando a influência da pressão durante o ciclo de potência.

$$W_{c,i} = \oint p \, dV \quad (3)$$

onde p é a pressão e dV o diferencial de volume. Dessa forma, a potência pode ser definida com o trabalho produzido por tempo, como mostra a Eq. 4.

$$P_{c,i} = \frac{W_{c,i} N}{n_R} \quad (4)$$

onde N é a velocidade angular do motor (em $\frac{rad}{s}$) e n_R é o número de revoluções por ciclo de potência.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou o aumento de potência em um MCI adaptado para operação com uma tecnologia de turbocompressor de baixa temperatura (TCBT), mantendo a mesma eficiência de eixo alcançada no modelo do motor original em um ambiente de simulação 1-D. A análise e discussão de resultados de parâmetros de operação e desempenho foi realizada e, tendo em vista os objetivos específicos traçados e os principais resultados que os correspondem, conclui-se que:

- Foi alcançada uma redução máxima de temperatura de admissão de 21 K em 6000 rpm com emprego do TCBT;
- Foi possível aumentar a potência em até 23 HP em 6000 rpm com o TCBT. Isso foi possível através da redução da temperatura de admissão do motor;
- O TCBT funcionou em todos os regimes simulados, reduzindo a temperatura de admissão em todas as rotações otimizadas. Contudo, há uma tendência para a sua melhor operação em altas rotações, onde tem-se uma maior energia de exaustão disponível.
- Diferentes ajustes de turbina beneficiariam o TCBT em regimes diferentes, sobretudo em altas rotações

Como apanhado geral, os resultados foram extremamente satisfatórios para o objetivo proposto. Os resultados pós processados, de maneira geral, estão dentro do esperado. É visível o funcionamento do TCBT e o impacto da redução da temperatura de admissão na operação do motor, sobretudo em altas rotações configuradas nos parâmetros do motor original.

Diferentes ferramentas que proporcionam adaptação de motores em modelos computacionais e a exploração de regimes de difícil alcance experimentalmente facilitam e trazem uma larga redução nos custos no desenvolvimento de MCIs e de tecnologias agregáveis à motores.

Portanto, pode-se concluir que a realização de simulação computacional prévia a qualquer procedimento experimental é imprescindível na pesquisa e desenvolvimento (P&D) de MCIs.

6. REFERÊNCIAS

- Aghaali, Habib, and Hans Erik Ångström. 2015. "A Review of Turbocompounding as a Waste Heat Recovery System for Internal Combustion Engines." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49: 813–24.
- DEB, Kalyanmoy, and Himanshu Jain. 2014. "An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Nondominated Sorting Approach, Part I: Solving Problems with Box Constraints." *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 18(4): 577–601.
- Heywood, John B. 2018. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. second edi. McGraw-Hill.
- Klingbeil, A. E.; Lavertu, M. T. 2016. "TURBOCHARGED POWER UNIT AND METHOD OF OPERATING UNDER HIGH LOAD CONDITIONS." : 16.
- LANZANOVA, Thompson Diordinis Metzka. 2013. "Avaliação Numérica e Experimental Do Desempenho de Um Motor Otto Operando Com Etanol Hidratado." 53(9): 1689–99.
- López, J. Javier et al. 2020. "Potential of a Two-Stage Variable Compression Ratio Downsized Spark Ignition Engine for Passenger Cars under Different Driving Conditions." *Energy Conversion and Management* 203.
- MANUAL, GT-SUITE OPTIMIZATION. 2016. "OPTIMIZATION MANUAL." : 58.
- Martins, Mario E.S., and Thompson D.M. Lanzaova. 2015. "Full-Load Miller Cycle with Ethanol and EGR: Potential Benefits and Challenges." *Applied Thermal Engineering* 90: 274–85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.06.086>.
- MELO, Tadeu C. Cordeiro De et al. 2012. "Hydrous Ethanol-Gasoline Blends - Combustion and Emission Investigations on a Flex-Fuel Engine." *Fuel* 97: 796–804. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.03.018>.
- Stone, Richard. 1999. *Introduction to Internal Combustion Engine*. second edi. MACMILLAN PRESS LTD, ISBN0-0333-74013-0.
- Teo, A. E. et al. 2019. "Performance Evaluation of Low-Pressure Turbine, Turbo-Compounding and Air-Brayton Cycle as Engine Waste Heat Recovery Method." *Energy* 166: 895–907. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.035>.
- Walter F. Isley. 1973. "TEMPERATURE CONTROL SYSTEM FOR SUPERCHARGED INTERNAL COMBUSTION ENGINE."
- Wetzel, Philip. 2013. "Downspeeding a Light Duty Diesel Passenger Car with a Combined Supercharger and Turbocharger Boosting System to Improve Vehicle Drive Cycle Fuel Economy." *SAE Technical Papers* 2.
- Zare, V. 2020. "Performance Improvement of Biomass-Fueled Closed Cycle Gas Turbine via Compressor Inlet Cooling Using Absorption Refrigeration; Thermoeconomic Analysis and Multi-Objective Optimization." *Energy Conversion and Management* 215(May): 112946. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112946>.