



Latin American Journal of Energy Research – Lajer (2020) v. 7, n. 1, pp. 34–45  
<https://doi.org/10.21712/lajer.2020.v7.n1.p34-45>

**Avaliação da eficiência na geração de energia elétrica de um motor híbrido  
(combustão + ar comprimido) a partir de testes em protótipo real**  
*Evaluation of the efficiency in generating electric power of hybrid engine  
(combustion + compressed air) from tests in real prototype*

Rodrigo Gasparini Croce<sup>1,\*</sup>, Antônio Dariva<sup>2</sup>, Emerson Pereira Trarbach<sup>3</sup>,  
Filipe Arthur Firmino Monhol<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Aluno do Programa de Pós-Graduação em Eficiência Energética, Instituto Federal do Espírito Santo – IFES, campus Vitória

<sup>2</sup> Fundador da empresa de soluções automotivas Dariva Motors, Vila Velha, ES

<sup>3</sup> Engenheiro responsável da empresa Dariva Motors, Vila Velha, ES

<sup>4</sup> Professor do Programa de Pós-Graduação em Eficiência Energética, Instituto Federal do Espírito Santo – IFES, campus Vitória

\*Autor para correspondência, E-mail: [gaspar@hotmail.com](mailto:gaspar@hotmail.com)

Received: 03 June 2020 | Accepted: 25 June 2020 | Published online: 13 July 2020

**Resumo:** A contínua pesquisa de combustíveis limpos ou fontes de energia de baixa emissão, aliados ao baixo custo, são o desafio tecnológico atualmente. Motores de combustão interna são amplamente utilizados devido ao custo relativamente baixo, quando comparados ao sistema de veículos elétricos, por exemplo. Mas, infelizmente, os motores de combustão interna não possuem uma boa eficiência energética, sendo que somente entre 20% a 25% da energia do combustível é convertida em energia mecânica. Uma nova abordagem do motor de combustão interna trabalhando em um conjunto híbrido utilizando ar comprimido e etanol simultaneamente é apresentada neste artigo. Este protótipo consegue reduzir o consumo específico do sistema ao utilizar parte da energia em forma de ar comprimido provida de tanques de ar. Através da medição do consumo específico de etanol e do volume de ar comprimido, fornecido via compressor externo, foi possível calcular o rendimento do motor ao acionar um gerador estacionário conectado a uma carga elétrica conhecida. Neste artigo é apresentado o funcionamento básico dos motores a combustão interna e híbridos a ar comprimido, com especial atenção ao motor híbrido desenvolvido. Será descrita a metodologia de realização dos ensaios, sendo apresentados os resultados dos experimentos e possibilidade de uso em um automóvel futuramente.

Palavras chave: ar comprimido, eficiência energética, energia elétrica, motor híbrido.

**Abstract:** The continuous research for high efficiency and low emission engines are the technological challenges nowadays. Internal combustion engines are widely used due to low-cost if compared to the electrical vehicles' propulsion systems. Unfortunately, internal combustion engines have low efficiency; about 20%-25% are converted to mechanical power. A new hybrid approach engine running on ethanol and compressed air is presented in this paper. As a result, the global engine efficiency is improved once a part of energy comes from compressed air stored in an external reservoir. By measuring the ethanol consumption and the compressed air flux is possible to calculate the global engine efficiency when it runs a stationary electric generator connected to a known load. This paper presents a conceptual working flow of an Internal Combustion Engine and a Hybrid Engine but focused to the prototype developed. The test procedures and results are shown and the potential to apply this new concept in a vehicle.

Keywords: compressed air, energy efficiency, electric power, hybrid engine.

## 1. Introdução

Motores de combustão interna (MCI) podem ser definidos como máquinas térmicas em que a energia química do combustível é transformada em trabalho mecânico. Esses motores atualmente são os principais

propulsores dos mais diversos tipos de veículos, desde pequenas motocicletas até grandes navios e aeronaves (Carvalho, 2011; Machado, 2015).

Embora o MCI possa transformar energia química em mecânica, durante operações reais, o motor precisa ser acelerado ou desacelerado para lidar com as demandas de torques e velocidades variáveis devido às condições de terreno. Como consequência, o motor não pode ser mantido sempre em condições ótimas de funcionamento, causando assim uma combustão incompleta de gases e gerando emissões tóxicas de escape de monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC), resultando em poluição do ar e desperdício de energia (Huang e Tzeng, 2005).

Além disso, outros fatores também contribuem para a diminuição da eficiência dos MCI: atritos entre os diversos elementos do motor, trocas térmicas entre componentes e fluidos, geração de entropia no sistema de escapamento devido a pressão e temperaturas elevadas e expansões não resistidas nos gases de exaustão (Carvalho, 2011).

Basicamente, em torno de 21% da energia de entrada (combustível) é convertida em energia mecânica. Porém, somente 15% é realmente transformada em movimento.

O balanço energético médio de um veículo acionado por um MCI está ilustrado na Figura 1. Foi considerando que 100% da energia do combustível é injetada no motor (Huang e Tzeng, 2005).

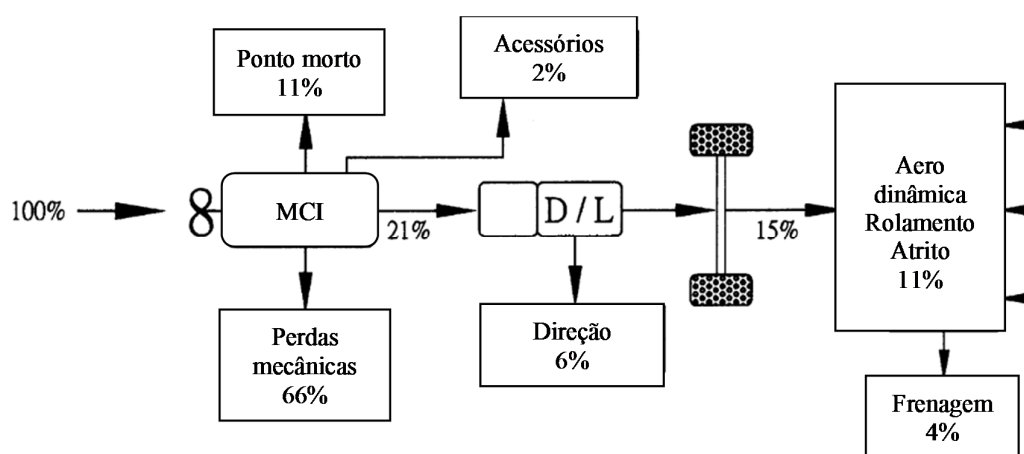


Figura 1. Diagrama da eficiência energética de um MCI. Fonte: Adaptado de Huang e Tzeng (2005).

Como pode ser observado, a eficiência energética de um MCI é bastante precária. Desta forma, fabricantes e engenheiros estão continuamente pesquisando formas de aumentar a eficiência na conversão de energia tanto para diminuir o consumo de combustível como para reduzir as emissões de gases. Grandes avanços nas áreas de materiais, processos de fabricação, controles eletrônicos, melhorias nos combustíveis utilizados, controle dos sistemas de injeção, ignição e recirculação de gases de escape proporcionaram uma significativa melhoria na confiabilidade, longevidade, eficiência térmica e emissões (Carvalho, 2011; Goswami e Kreith, 2017; Machado, 2015).

Porém, não foram encontradas publicações referentes a ensaios práticos de algum motor de combustão interna que tenha uma eficiência energética bem acima da média.

Assim, para melhorar a eficiência energética dos motores a combustão, e consequentemente diminuir as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que esses equipamentos liberam após a transformação de energia química (injeção de gasolina ou etanol nos cilindros) em mecânica (movimento), foi desenvolvido um motor híbrido que utiliza dois tipos de insumos: etanol e ar comprimido (Dariva, 2013).

Há mais de 25 anos, o autor do projeto, o técnico mecânico Antônio Dariva, iniciou as pesquisas com ar comprimido para mover os pistões de um motor. Com o aprimoramento das invenções e pesquisas, percebeu-se que o desenvolvimento de um motor híbrido teria maior eficiência e possibilitaria uma melhor economia de combustível (Dariva, 2013).

O uso do ar comprimido juntamente com combustível tradicional (etanol) em um motor de quatro tempos poderá aumentar sua eficiência, de forma que o consumo desse combustível seja reduzido. Essa análise será apresentada neste artigo.

O objetivo deste artigo é relatar o procedimento de ensaios realizados no motor híbrido desenvolvido quando o mesmo acionou um gerador de energia elétrica. Desta forma, pretende-se mostrar a eficiência energética que esse equipamento obteve e assim definir se o motor híbrido (ar comprimido + etanol) poderá ser produzido de forma comercial.

## 2. Referencial teórico

### 2.1 Motor de combustão interna com ciclo de quatro tempos

Motores com ciclo de quatro tempos são bastante usuais, devido a seu rendimento térmico, obtendo-se assim melhores variações de velocidade e um maior número de rotações (Dariva, 2013).

Inventado em 1862 por Beau de Rochas e empregado pela primeira vez por Otto em 1878, esse equipamento funciona com ciclos de quatro cursos do pistão, como mostrado na Figura 2.

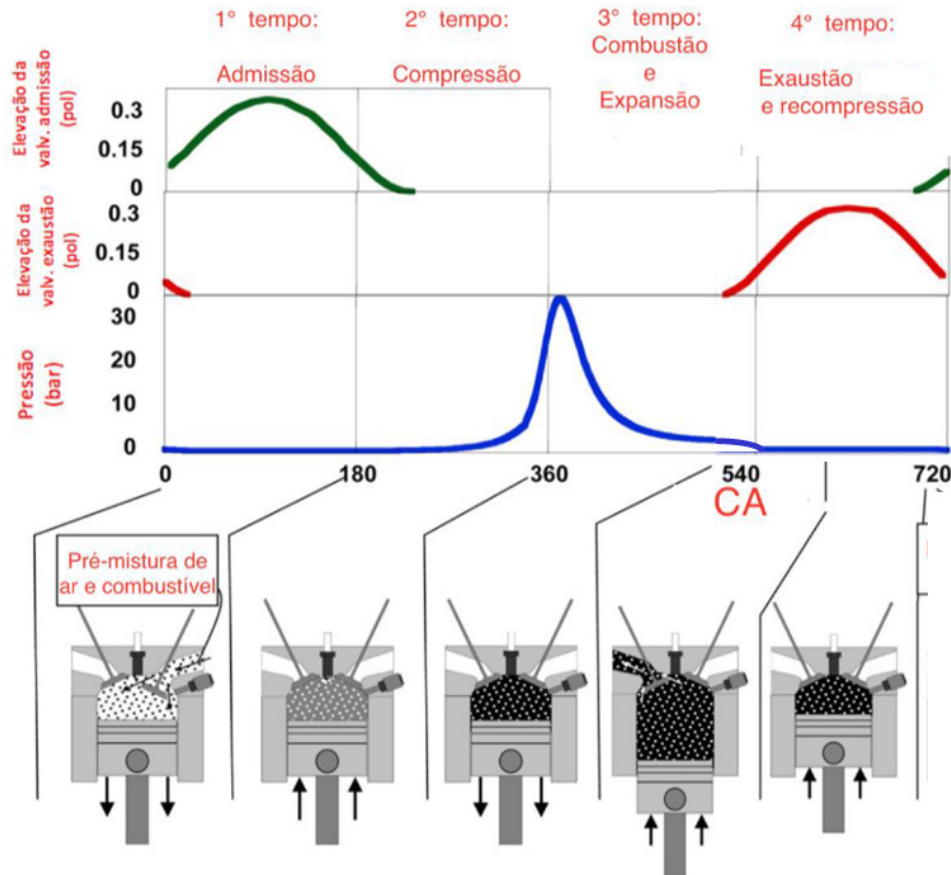


Figura 2. Ciclos do motor de combustão interna. Fonte: Adaptado de Machado (2015).

Um ciclo de trabalho estende-se por duas rotações da árvore de manivelas, ou seja, quatro cursos do pistão ou duas voltas de giro (720°).

O primeiro tempo (0 a 180°), o pistão desenvolve movimento descendente e ocorre a aspiração da mistura de ar e combustível (admissão). O cilindro encontra-se a uma pressão baixa quando a válvula de admissão é aberta.

No segundo tempo (180° a 360°), ocorre a compressão da mistura do primeiro ciclo. O pistão está em movimento ascendente. Pouco antes do pistão completar o curso, ocorre a ignição da mistura por meio das velas (no motor Otto).

No terceiro tempo (360° a 540°), a combustão da mistura provoca a expansão dos gases e faz a temperatura e a pressão elevar-se bruscamente, atingindo o máximo valor. O pistão inicia movimento descendente. Tem-se a transferência de energia ao pistão (tempo motor).

No quarto tempo (540° a 720°), com o pistão novamente em movimento ascendente, ocorre a exaustão e recompressão. Nesse ciclo os gases são lançados para a atmosfera após a abertura da válvula de descarga.

Nesse processo, somente houve transmissão de trabalho ao pistão durante um ciclo (3º tempo) (Conklin e Szybist, 2010; Machado, 2015; Martinelli, [s.d.]; Soares, Silva e Sousa, 2009).

Basicamente, todos os outros motores a combustão interna desenvolvidos ou adaptados utilizam os conceitos mostrados na Figura 2.

## 2.2 Motores de combustão interna híbridos

Motores de combustão híbridos são equipamentos que funcionam com pelo menos dois tipos de combustíveis. Várias técnicas foram desenvolvidas para tornar os MCI híbridos mais eficientes e menos poluentes que os motores atuais. Esses híbridos podem utilizar além de gasolina (ou etanol) outros fluidos como água ou ar comprimido. Literaturas pesquisadas mencionam motores híbridos a gasolina com vapor de água, com ciclos de 6 tempos (Conklin e Szybist, 2010; Kiran, 2013; Machado, 2015; Reddy e Mahesh, 2018). Além desses, existem também motores híbridos de 4 tempos utilizando gasolina e ar comprimido (Cai, Kawashima e Kagawa, 2006; Dimitrova e Maréchal, 2015; Dou et al., 2017; Fazeli, Khajepour e Devaud, 2011; Liu et al., 2015; Shi et al., 2016).

A combinação de um MCI convencional e um sistema a ar comprimido é uma possibilidade factível para conseguir melhorar a eficiência do motor e consequentemente obter menores consumo de combustível e poluição gerada quando aplicado em sistemas onde a regeneração de energia e desejável.

## 2.3 Conceitos básicos dos motores híbridos a ar comprimido

Um veículo híbrido pneumático utiliza além do tanque de combustível normal, um cilindro de ar comprimido para o armazenamento dessa energia. O motor de combustão interna é capaz de funcionar em modos puramente pneumáticos, atuando como bomba pneumática ou motor sem injeção de combustível. Esse conceito resultante chama-se Motor Híbrido Pneumático (Dimitrova e Maréchal, 2015).

Um exemplo de pistão e válvulas do um motor híbrido (gasolina + ar comprimido) é mostrado na Figura 3. O cilindro do motor é modificado pela adição de uma válvula de carga (CV) na cabeça do cilindro que é conectada ao tanque de ar.

O ar comprimido pode ser utilizado de duas formas: como assistência ao ciclo de combustão convencional ou alimentando somente com ar comprimido. Neste caso, o fluxo de combustível do motor é cortado (Dimitrova e Maréchal, 2015; Dou et al., 2017).

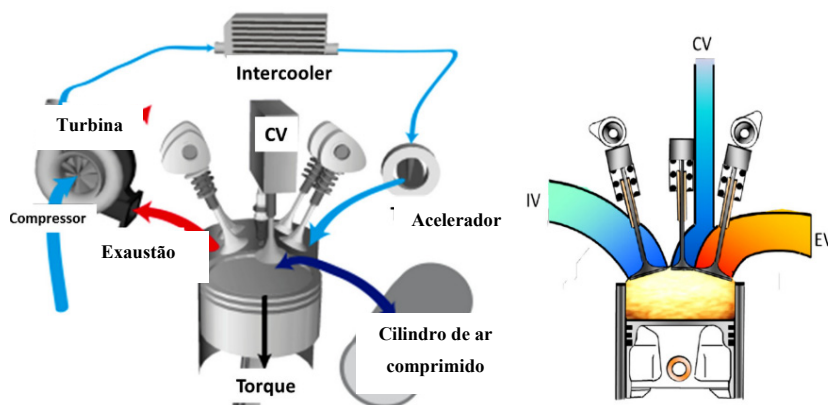


Figura 3. Esquema do pistão do Motor Híbrido Pneumático. Fonte: Adaptado de Dimitrova e Maréchal (2015).

A maioria dos sistemas pneumáticos híbridos propostos está focado no sistema de um tanque. Porém existem estudos baseados em dois cilindros de ar comprimido (Dou *et al.*, 2017; Fazeli, Khajepour e Devaud, 2011).

## 2.4 Funcionamento básico do motor híbrido proposto (combustão + ar comprimido)

O motor híbrido proposto tem o funcionamento baseado no motor de combustão interna com ciclo de 4 tempos. A Figura 4 detalha a parte interna do motor e seus componentes. É um motor de 4 cilindros sendo que em 2 cilindros é injetado etanol e nos outros 2 o propulsor é o ar comprimido.

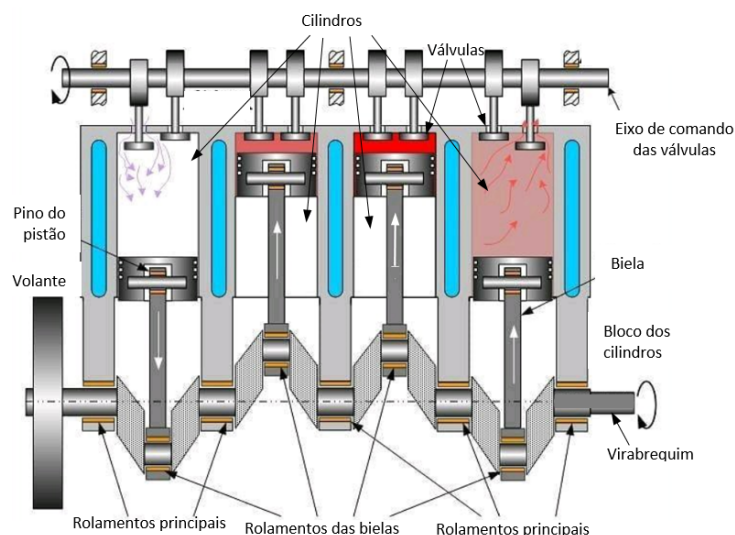


Figura 4. Parte interna do motor híbrido (ar comprimido + etanol) 4 tempos. Fonte: Adaptado de <www.substech.com> (2020).

O esquema simplificado do modelo proposto é representado na Figura 5. Sendo C1 a C4 os cilindros do motor, A1 a A4 as válvulas de admissão e D1 a D4 as válvulas de descarga.

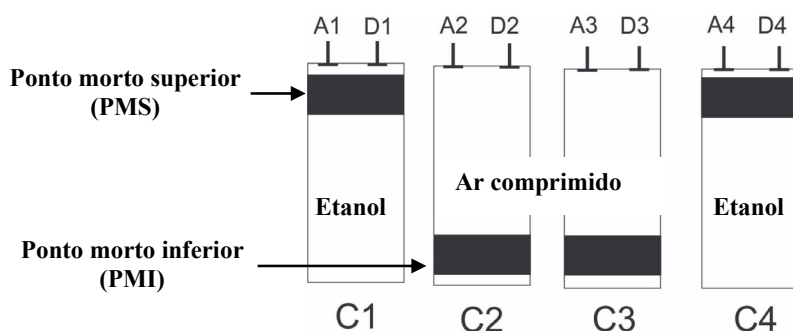


Figura 5. Representação dos cilindros do motor híbrido (ar comprimido + etanol) 4 tempos.

Os cilindros C1 e C4 são abastecidos com etanol, enquanto os cilindros C2 e C3 são alimentados pelo ar comprimido. Assim como na Figura 4, os cilindros C1 e C4 movem-se em mesma fase angular. De forma recíproca C2 e C3.

O funcionamento do ciclo híbrido é descrito a seguir e visualizado pelo diagrama da Figura 6:

Primeiro tempo ( $0 < T1 < 180^\circ$ ): o pistão do cilindro C1 está em movimento descendente, a partir do ponto morto superior (PMS), juntamente com a admissão de etanol. Nos cilindros C2 e C3 está ocorrendo a exaustão do ar comprimido, durante o movimento ascendente dos seus pistões. No cilindro C4 tem-se a ignição das velas fazendo a combustão do etanol em alta pressão. O pistão iniciará movimento descendente a partir do PMS realizando trabalho.

Segundo tempo ( $180^\circ < T2 < 360^\circ$ ): inicia a compressão em C1 a partir do ponto morto inferior (PMI). Os pistões de C2 e C3 começam movimento descendente a partir do PMS com admissão e expansão do ar comprimido no seu interior. Nesse ciclo a realização de trabalho acontece nestes dois cilindros. Em C4 ocorre a descarga dos gases (durante movimento ascendente) gerados pela combustão do etanol ocorrida no ciclo anterior.

Terceiro tempo ( $360^\circ < T3 < 540^\circ$ ): o trabalho é desenvolvido em C1 através da combustão e expansão dos gases comprimidos neste cilindro que tem movimento descendente a partir do PMS. Em C2 e C3 está sendo realizada a descarga do ar comprimido de seu interior, durante a subida de seus pistões. O pistão do cilindro C4 realiza movimento descendente com a admissão de etanol.

Quarto tempo ( $540^\circ < T4 < 720^\circ$ ): é o ciclo em que acontece a exaustão dos gases de C1 durante o movimento do PMI para o PMS. A força motriz é novamente produzida em C2 e C3 devido a admissão e a expansão do ar comprimido injetado. Os pistões movimentam-se do PMS para o PMI. Dentro do cilindro C4 o pistão passa do PMI para o PMS comprimindo o etanol para que ocorra a ignição no final desse ciclo.

A Figura 6 resume o processo do funcionamento descrito. As células destacadas referem-se às fases motrizes do motor em estudo.

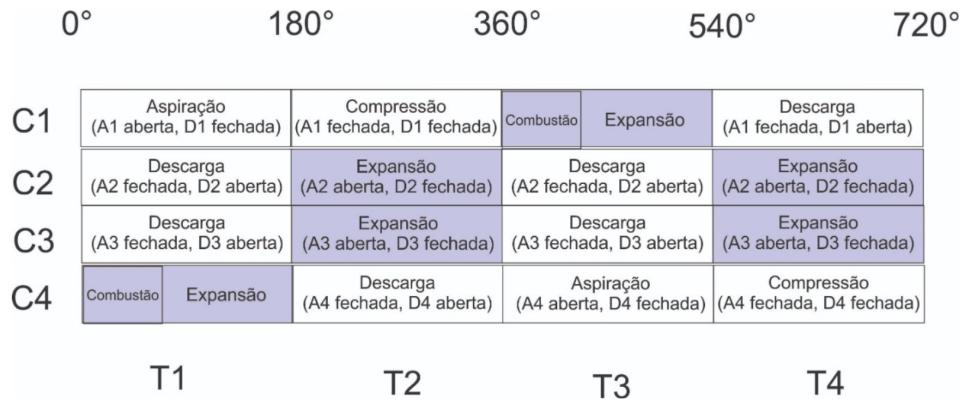


Figura 6. Diagrama de fases do motor híbrido (etanol + ar comprimido).

Para este motor a economia de etanol ocorre de fato, pois somente em duas câmaras é fornecido esse combustível. Porém existe a energia transferida pelo ar comprimido que foi obtido através de um compressor externo e armazenada em um tanque para ser utilizada nos outros dois cilindros. Desta forma, a energia total transformada em força motriz é a soma da combustão do etanol, que ocorre nos cilindros C1 e C4, mais a pressão e expansão de ar comprimido injetado nos cilindros C2 e C3, menos as perdas internas inerentes ao processo.

Com um sistema adequado de controle externo, a energia neste tipo de topologia pode ser regenerada em forma de ar comprimido, sendo armazenada em tanque de ar externo, por exemplo na aplicação de automotiva durante uma frenagem. Outro ponto de destaque é a ausência de motor de partida pois ele pode ser acionado diretamente com o ar comprimido.

## 2.5 Formulação matemática

A proposta para estimar a eficiência energética do motor híbrido será a utilização dele como máquina primária para acionamento do eixo de um gerador de energia elétrica. Assim, o rendimento desse motor será calculado pela relação entre a energia elétrica consumida e a energia fornecida pelo etanol e ar comprimido.

A energia que o eixo do motor híbrido transfere para acionar o gerador é calculada conforme Eq. (1):

$$W_m = \frac{W_E}{\eta_G}, \quad (1)$$

sendo  $W_m$  a energia, em kWh, fornecida pelo eixo do motor;  $W_E$  a energia elétrica, em kWh, medida e  $\eta_G$  o rendimento do gerador de energia elétrica.

Em motores de combustão interna, a energia do combustível injetado é definida pela relação entre a vazão mássica desse combustível e o seu poder calorífico inferior (PCI), como mostrado na Eq. (2) (Carvalho, 2011):

$$W_C = 1,162 \times 10^{-3} \dot{m} \text{ PCI } t, \quad (2)$$

onde  $W_C$  é a energia do combustível, em kWh, injetada no motor;  $\dot{m}$  a vazão mássica, em kg/h, do combustível;  $\text{PCI}$  é o poder calorífico inferior em kcal/kg;  $t$  é o tempo de funcionamento, em horas, e a constante numérica é a correlação entre caloria e Wh. ( $1 \text{ kcal} \rightarrow 1,162 \times 10^{-3} \text{ kWh}$ ).

A quantidade de etanol consumida (vazão mássica) é determinada pela variação de massa do combustível no interior do tanque.

A potência do ar comprimido é proporcional ao fluxo de ar injetado no cilindro a uma determinada pressão (Cai, Kawashima e Kagawa, 2006; Shi et al., 2019; Yu, Hao e Tan, 2017).

Essa potência é definida através da Eq. (3) (Shi et al., 2019):

$$P_{ac} = p_{ac} q_{ac} \ln\left(\frac{p_{ac}}{p_{atm}}\right), \quad (3)$$

em que  $P_{ac}$  é a potência do ar comprimido, em kW;  $p_{ac}$  a pressão, em N/m<sup>2</sup>, do ar comprimido;  $q_{ac}$  a vazão, em m<sup>3</sup>/s, do ar comprimido e  $p_{atm}$  a pressão atmosférica em N/m<sup>2</sup>.

Medindo-se o tempo de funcionamento do motor tem-se a energia total fornecida pelo ar comprimido, dada pela Eq. (4):

$$W_{ac} = P_{ac} t, \quad (4)$$

sendo  $W_{ac}$  a energia, em kWh, fornecida pelo ar comprimido;  $P_{ac}$  a potência do ar comprimido, em kW, (Eq. (3)) e  $t$  o tempo, em horas, de funcionamento do sistema.

A eficiência energética do motor híbrido pode ser estimada através da relação entre a energia de saída no eixo do motor ( $W_m$ ) e as energias fornecidas pelo etanol ( $W_c$ ) e ar comprimido ( $W_{ac}$ ), conforme mostrado pela Eq. (5):

$$\eta_{Mh} = \frac{W_m}{(W_c + W_{ac})} 100\%, \quad (5)$$

onde  $\eta_{Mh}$  é o rendimento, em %, do motor híbrido proposto;  $W_m$  a energia, em kWh, transmitida para o eixo do motor híbrido, Eq. (1);  $W_c$  a energia, em kWh, fornecida pelo etanol, Eq. (2); e  $W_{ac}$  a energia, em kWh, suprida pelo ar comprimido, Eq. (4).

### 3. Metodologia

#### 3.1 Descrição da bancada de testes

O motor híbrido, tanque e bomba de combustível, controle de injeção, gerador de energia elétrica, sistema de ar comprimido, carga elétrica e medidores (energia, vazão e pressão) foram montados em uma área de testes conforme mostrado na Figura 7.

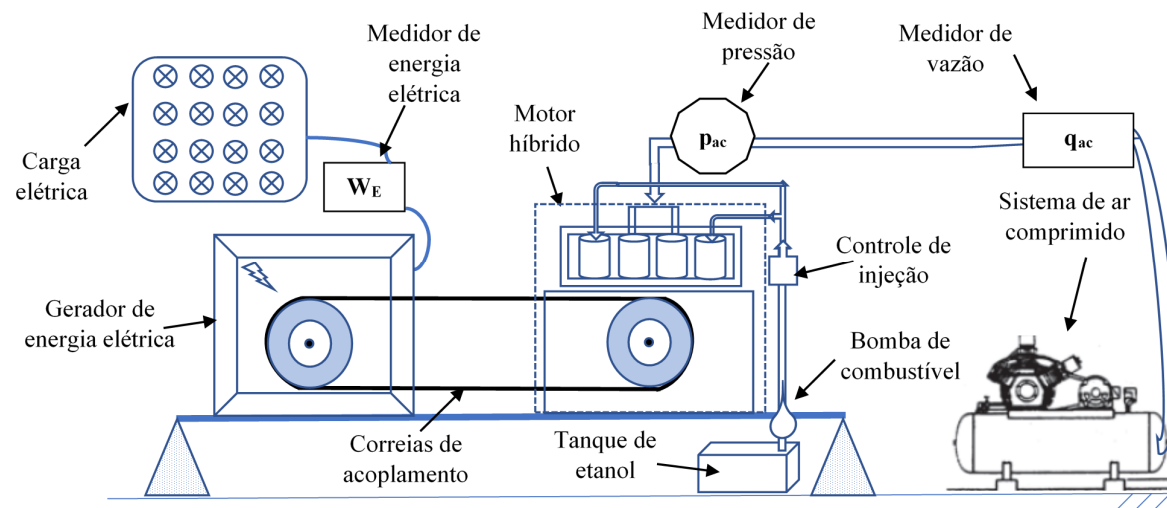


Figura 7. Representação esquemática da bancada de ensaio do motor híbrido.

Os principais componentes utilizados para os ensaios estão mostrados na Figura 8a e 8b.

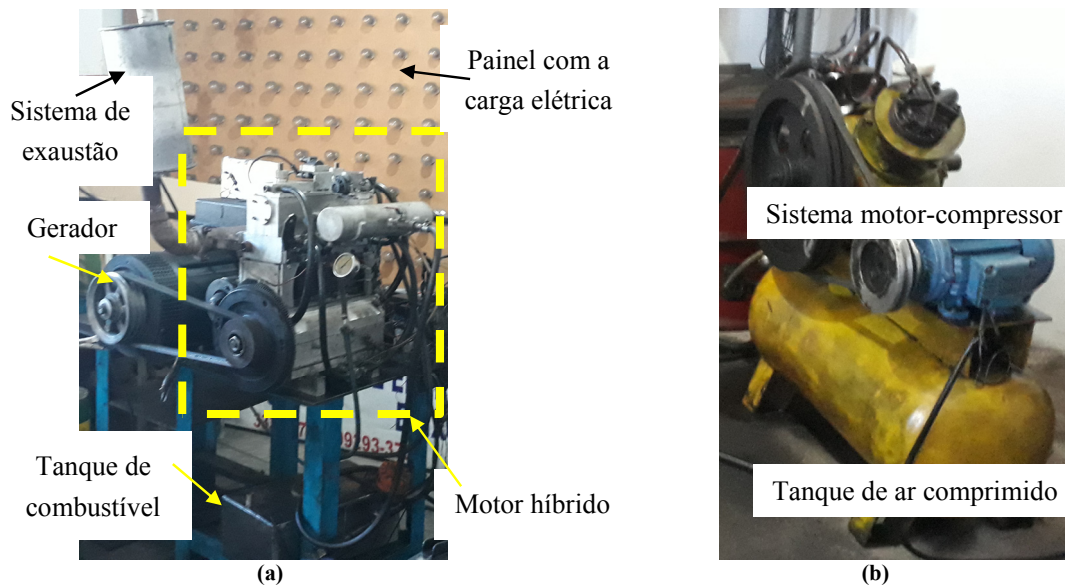


Figura 8. Fotos da área de ensaios do motor híbrido: (a) Bancada de testes com o motor híbrido, gerador de energia elétrica, tanque de combustível e painel de lâmpadas. (b) Sistema de ar comprimido.

Na Tabela 1 consta a especificação dos componentes e insumo que foram utilizados nos ensaios do motor híbrido. Maiores detalhes do motor foram suprimidos devido a futura requisição de patente.

Tabela 1. Descrição dos equipamentos e insumo utilizados nos testes realizados.

Equipamento/insumo	Característica	Observação
Motor Híbrido	1,6 litro; 4 cilindros; 25 cv	Bloco base utilizado
Gerador de energia elétrica	25 kW; 3Ø – 220 V; 60Hz; 1.800 rpm	Similar ao modelo WEG – GTA161AI22 IP21 B3T
Tanque de combustível	30 litros	Tanque de aço inoxidável
Sistema de ar comprimido	100 litros; 140 libras por po- legada quadrada (psi)	SCHULZ 140 PSI 100 litros
Medidor de energia	80-300 V AC ( $\pm 1\%$ ); 100 A ( $\pm 0,1\%$ )	KETOTEK D52-2047 AC80-300V 100A multifuncional digital
Medidor de vazão de ar	1,3-8,7 m <sup>3</sup> /h (0,1%)	RÜCKEN tipo turbina TCM12
Medidor de pressão do ar	100 psi	Manômetro WIKA com glicerina
Balança de precisão	0,1 g a 3 kg ( $\pm 0,1\%$ )	Balança de precisão QUIMIS de mesa
Bomba de combustível	3 bar – 85 litros/h	BOSCH (kit F 000 TE1 59A)
Sistema de injeção eletrônica	Kit completo	MAGNETI MARELLI
Carga elétrica	15,4 kW	Painel com lâmpadas incandescentes
Combustível	Etanol hidratado	Adquirido em posto de combustível.
Termômetro infravermelho	-60 a +500 °C ( $\pm 2\%$ )	ZÜRICH TZD.IV
Tacômetro automotivo digital	100 a 20.000 rpm ( $\pm 1$ rpm)	MINIPA MAT-100
Cronômetro digital	99 h, 59 min, 59 s (1/100 s)	ANY TIME – XI-021



### 3.2 Metodologia dos ensaios

Durante o processo de ensaio foram realizadas as seguintes medições: rotação e temperatura do motor, energia elétrica fornecida pelo gerador, pressão e vazão do ar comprimido, variação do peso do combustível utilizado e o tempo de funcionamento.

Os ensaios foram realizados com os equipamentos e insumo, mostrados na Tabela 1, considerando a sequência a seguir:

- Adição de volume conhecido de etanol hidratado ao tanque de combustível e realização de calibração através do peso incremental.
- Após a partida do motor com etanol, o ar comprimido é aberto e o conjunto estabilizado em 1.800 rpm com plena carga elétrica acionada. A medição da rotação do eixo do motor foi realizada utilizando tacômetro digital.
- Aguarda-se o aquecimento do bloco do motor e ao atingir 90°C – medição realizada através de termômetro infravermelho – o teste é iniciado tomando-se este instante como  $t_0$ , onde o nível inicial do combustível é registrado e os medidores de energia e fluxo de ar são zerados. Anota-se a pressão do ar comprimido medida através do medidor de pressão. Essa medição do combustível é realizada utilizando uma pipeta inserida no tanque, retirando-se o volume de etanol que ficou internamente à pipeta. Pesa-se esse combustível com a balança de precisão e registra-se essa massa como sendo a quantidade de combustível inicial do processo em  $t_0$ .
- Após 10 minutos (final do intervalo  $t_0 \rightarrow t_1$ ), uma nova coleta de dados é efetuada, sempre com o motor acionado. Mede-se novamente o nível de combustível, valores de energia elétrica, fluxo e pressão do ar comprimido.
- O processo se repete por cinco vezes obedecendo este espaço de 10 minutos entre medidas.
- Como os dados são cumulativos e referentes ao instante inicial  $t_0$ , deve-se calcular o intervalo entre duas sequências para se obter dentro daquele intervalo o valor específico.
- A média curta entre os intervalos ( $t_0 \rightarrow t_1$ ;  $t_1 \rightarrow t_2$ ;  $t_2 \rightarrow t_3$ ;  $t_3 \rightarrow t_4$  e  $t_4 \rightarrow t_5$ ) é comparada com a medida total desde  $t_0$  até  $t_5$ . A verificação entre a média curta e a medida total de operação e comparada para verificação de algum desvio significativo. Assim, o valor final das medidas é obtido com média simples entre o instante  $t_0 \rightarrow t_5$  e as médias curtas de intervalo para maior rigidez e redução de erros.

### 3.3 Tratamento dos dados

Nos processos de ensaios do motor híbrido os resultados de cinco testes convergiram para os valores apresentados na Figura 9a e 9b, que mostram as médias da energia elétrica consumida e os valores médios de pressão e vazão do ar comprimido, respectivamente, registrados durante os ensaios do motor híbrido.

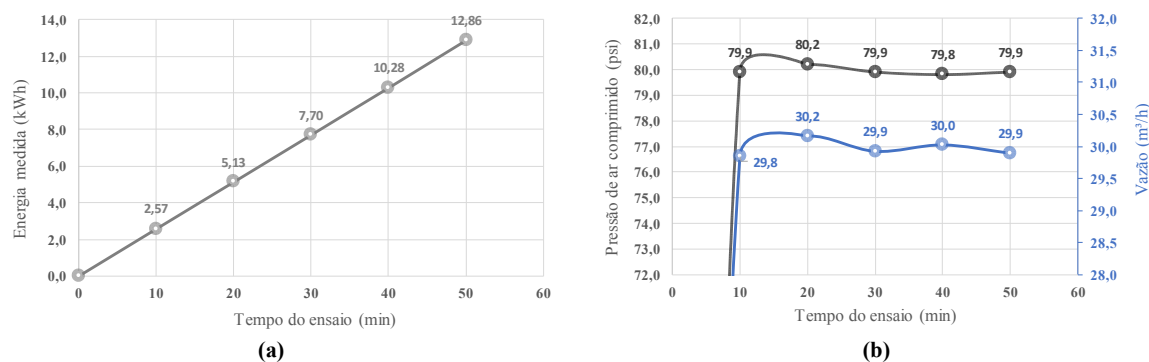


Figura 9. Médias das medições realizadas nos ensaios: (a) Energia elétrica na saída do gerador (kWh); (b) Pressão (psi) e vazão (m³/h) do ar comprimido injetado no motor híbrido.

O gerador supriu um conjunto de lâmpadas incandescentes totalizando uma potência ativa de em média 15,4 kW (Tabela 1). Em 50 minutos de ensaios o consumo médio foi de 12,86 kWh, como mostrado na Figura 9a.

Como o rendimento considerado para o gerador ( $\eta_G$ ) foi de 91 % – fornecido pelo manual do equipamento (referência: modelo similar ao gerador síncrono WEG – GTA161AI22 IP21 B3T, Tabela 1) – a energia mecânica na ponta do eixo do motor é determinada pela Eq. (1), resultando em  $W_m = 14,1$  kWh.

O consumo médio do etanol hidratado durante os ensaios foi de 4,43 kg em 50 minutos de testes.

O poder calorífico inferior (PCI) do etanol hidratado foi considerado como sendo de 6.300 kcal/kg (Carvalho, 2011). Utilizando-se a Eq. (2) calcula-se a energia fornecida por esse combustível, obtendo-se o valor de  $W_c = 32,4$  kWh.

Conforme mostrado na Figura 9b, em média, a pressão de ar comprimido foi de 79,9 psi, que equivale a  $5,51 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup>. A vazão média do ar comprimido injetado nos cilindros C2 e C3 do motor foi em torno de 30 m<sup>3</sup>/h (Figura 9b).

Através da Eq. (3) e considerando a pressão atmosférica ao nível do mar igual a  $1,01 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup> calcula-se a potência do ar comprimido como sendo  $P_{ac} = 7,79$  kW.

A energia fornecida pelo ar comprimido é determinada pela Eq. (4), sendo que o tempo de duração dos ensaios foi de 50 minutos. Desta forma, tem-se que  $W_{ac} = 6,49$  kWh.

A partir desses cálculos e utilizando a Eq. (5), estima-se a eficiência do motor híbrido como sendo de  $\eta_{Mh} = 36,3$  %

#### 4. Resultados e discussões

A metodologia proposta para determinação da eficiência energética de um protótipo de motor híbrido, funcionando com etanol e ar comprimido, mostrou-se adequada pois com os valores médios calculados pode-se estimar o rendimento desse motor, sem erros expressivos.

Esses ensaios iniciais foram desenvolvidos para uma verificação preliminar do rendimento desse motor híbrido, sem elevados custos para realização dos testes.

Com a metodologia descrita na Seção 3.2, os resultados medidos e mostrados na Figura 9, as equações pesquisadas em literaturas e descritas na Seção 2.5 conseguiu-se estimar a eficiência energética do motor híbrido como sendo em torno de 36%.

Quando comparado ao um motor de combustão interna clássico, o motor híbrido ensaiado obteve uma boa performance de eficiência energética, sendo que em média um MCI tem rendimento na faixa de 20 a 30% (Huang e Tzeng, 2005).

Outros motores híbridos com funcionamento de ciclos de 6 tempos com injeção de água obtiveram eficiências de 35%, porém com algumas desvantagens: motor mais pesado, projeto mais complexo (devido aos 2 tempos adicionais) e a água em alta temperatura em contato com metal da parede do cilindro, reduzindo a vida útil devido a corrosão (Kiran, 2013; Reddy e Mahesh, 2018).

Simulações computacionais em sistemas híbridos paralelos (MCI e motor pneumático) chegaram a uma eficiência energética total do sistema de 32,9% (Yang, Sung e Huang, 2017).

Ensaio realizados em motores modificados para trabalharem somente com ar comprimido mostram eficiência baixa, em torno de 13% (Huang et al., 2013). Outros motores de ar comprimido de baixa potência e baixa rotação obtiveram rendimento de 25% (Yu e Cai, 2015; Yu, Hao e Tan, 2017).

Estudos teóricos de sistemas híbridos (MCI + motor pneumático) propõem o uso de gases de exaustão com o ar comprimido para aumentar a pressão do sistema, permitindo assim que o motor pneumático gere maior potência e torque. Assim, a eficiência desse sistema seria de 33% (Huang e Tzeng, 2005).

Para o caso do protótipo testado, os resultados alcançados mostram que o motor híbrido tem potencial para ser utilizado de forma comercial, porém há necessidade de realização de outros tipos de testes para comprovar o seu rendimento, como por exemplo o ensaio dinamométrico, além de verificações das emissões de gases.

#### 4. Considerações finais

Um estudo teórico fundamentado em motores a combustão foi relatado nesse artigo mostrando como pode-se melhorar a eficiência desse equipamento usando o ar comprimido como auxiliar no propulsor. O método para que isso ocorra é tornar o MCI como motor híbrido. Pode-se considerar que uma grande vantagem desse tipo de topologia é a possibilidade de armazenar energia em forma de ar comprimido dispensando o uso tradicional de baterias. Além disso, a simplicidade e robustez do modelo acarreta maior confiabilidade ao sistema como um todo.

Com a metodologia proposta para estimar a eficiência energética do motor híbrido obteve-se um rendimento de 36%, índice este acima das eficiências de MCI utilizados em veículos automotores que possuem rendimentos na faixa de 20 a 25% em média (Huang e Tzeng, 2005).

Pretende-se com os resultados obtidos nos ensaios continuar as pesquisas para que esse motor possa ser produzido para acionar geradores de energia. Assim, os atuais equipamentos a diesel de pequeno e

médio porte, que produzem alta poluição poderiam ser eliminados, contribuindo desta forma para diminuição da emissão de gases na atmosfera.

Além do uso como máquina primária para acionar geradores elétricos, o motor híbrido pode ser preparado para ser utilizado como motor veicular.

Vale destacar que utilizando esse motor híbrido em veículos automotores o sistema de ar comprimido pode ser alterado para aproveitar a recuperação de energia durante a frenagem e assim manter o cilindro de ar abastecido, maximizando a sua eficiência. E no caso de geradores estacionários, a energia pode ser armazenada fora do horário de maior custo para ser utilizada nos períodos de custo elevado.

Para continuação de estudos futuros, sugere-se além da análise dos gases emitidos e testes dinamométricos, adaptar o motor em um veículo e comparar os consumos de combustíveis e os gastos financeiros totais (etanol + ar comprimido) realizados em relação a um motor de mesma potência, mas convencional.

Pode-se realizar também outros estudos usando simulações computacionais para observação de variáveis como torque, velocidade além de avaliação de qual seria o ponto ótimo para operação do motor, alterando-se a vazão e a pressão do ar comprimido ‘injetado’.

## Referências bibliográficas

Cai, M, Kawashima, K e Kagawa, T (2006) ‘Power assessment of flowing compressed air’, *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, v. 128, n. 2, pp. 402–405. <<https://doi.org/10.1115/1.2170129>>.

Carvalho, MAS (2011) *Avaliação de um motor de combustão interna ciclo Otto utilizando diferentes tipos de combustíveis*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA.

Conklin, JC e Szybist, JP (2010) ‘A highly efficient six-stroke internal combustion engine cycle with water injection for in-cylinder exhaust heat recovery’, *Energy*, v. 35, n. 4, pp. 1658–1664. <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.12.012>>.

Dariva, A (2013) *Tecnologia mecânica em motores de combustão e de ar comprimido*. 1. ed. Vitória: [s.n.].

Dimitrova, Z e Maréchal, F (2015) ‘Gasoline hybrid pneumatic engine for efficient vehicle powertrain hybridization’, *Applied Energy*, v. 151, pp. 168–177, 2015. <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.057>>.

Dou, W, Li, D, Lu, Y, Yu, X e Roskilly, AP (2017) ‘Evaluation of ideal double-tank hybrid pneumatic engine system under different compression cycle scenarios’, *Energy Procedia*, v. 142, pp. 1388–1394. <<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.524>>.

Fazeli, A, Khajepour, A e Devaud, C (2011) ‘A novel compression strategy for air hybrid engines’, *Applied Energy*, v. 88, n. 9, pp. 2955–2966. <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.03.008>>.

Goswami, DY e Kreith, F (2017) *Energy conversion*, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press (Taylor & Francis Group, LLC).

Huang, CY, Hu, CK, Yu, CJ e Sung, CK (2013) ‘Experimental investigation on the performance of a compressed-air driven piston engine’, *Energies*, v. 6, n. 3, pp. 1731–1745. <<https://doi.org/10.3390/en6031731>>.

Huang, KD e Tzeng, SC (2005) ‘Development of a hybrid pneumatic-power vehicle’, *Applied Energy*, v. 80, n. 1, pp. 47–59. <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2004.02.006>>.

Kiran, P (2013) ‘A Feasibility study on waste heat recovery in six stroke IC engine’, *International Journal on Mechanical Engineering and Robotics*, v. 1, n. 1, pp. 113–117.

Liu, CM, You, JJ, Sung, CK e Huang, CY (2015) ‘Modified intake and exhaust system for piston-type compressed air engines’, *Energy*, v. 90, pp. 516–524, 2015. <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.085>>.

Machado, TAD (2015) *Análise exergetica de um motor a seis tempos por injeção de vapor*. IFES São Mateus, ES.

Martinelli, C (...) *Máquinas térmicas I - motores de combustão interna*. Unijuí: [s.n., s.d.].

Reddy, BR, Mahesh, B (2018) ‘Six stroke engine’, *International Journal of Science and Research*, v. 7, n.

4, pp. 239–241, 2018.

Shi, Y, Li, F, Cai, M e Yu, Q (2016) ‘Literature review: present state and future trends of air-powered vehicles’, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, v. 8, n. 2. <<https://doi.org/10.1063/1.4944970>>.

Shi, Y, Cai, M, Xu, W e Wang, Y (2019) ‘Methods to evaluate and measure power of pneumatic system and their applications’, *Chinese Journal of Mechanical Engineering* (English Edition), v. 32, n. 1. <<https://doi.org/10.1186/s10033-019-0354-6>>.

Soares, FLM, Silva, MMS e Sousa, PJD (2009) *Motores de combustão interna*. [s.l: s.n.].

Yang, SY, Sung, CK e Huang, CY (2017) ‘Optimization of power management strategy for parallel air-fuel hybrid system’, *Energy Procedia*, v. 105, pp. 530–536. <<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.352>>.

Yu, Q e Cai, M (2015) ‘Experimental analysis of a compressed air engine’, *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, v. 3, n. 4, pp. 144–153. <<https://doi.org/10.4236/jfcmv.2015.34014>>.

Yu, Q, Hao, X e Tan, X (2017) ‘Comparative study on air distribution system for piston-type compressed air engine’, *Advances in Mechanical Engineering*, v. 9, n. 4, pp. 1–11. <<https://doi.org/10.1177/1687814017697625>>.