

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA PARA O MAPEAMENTO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UM MOTOR A COMBUSTÃO INTERNA PARA APLICAÇÃO EM VEÍCULOS HÍBRIDOS

DIOGO PEREIRA VILELA GALO*, LEONARDO ADOLPHO RODRIGUES DA SILVA†, LANE MARIA RABELO BACCARINI‡

*PPGEL - Programa de pós graduação em Engenharia Elétrica UFSJ/CEFET-MG, Universidade Federal de São João del Rei, Praça Frei Orlando 170 - Centro, 36307-352 São João del Rei, Minas Gerais, Brasil

†DETEM - Departamento das Engenharias de Telecomunicações e Mecatrônica, Universidade Federal de São João del Rei, Campus Alto Paraopeba, Rodovia MG 443 - Km 7, 36420-000, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil

‡DEPEL - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São João Del Rei, Praça Frei Orlando 170 - Centro, 36307-352 São João del Rei, Minas Gerais, Brasil

Emails: diogogalo23@hotmail.com, leonardo@ufs.br, rabelo@ufs.br

Abstract— Due to the need of reducing fossil fuel usage, alternative propulsion technologies are being studied. Lower fossil fuel consumption can be achieved by adopting new technologies, such as hybrid systems. In this context, the paper at hand presents the design and development of a test bench to obtain the performance curves and the specific consumption map of an internal combustion engine. These characteristics are extremely important for the proper development of power management strategies in propulsion systems. In addition, a solution for emulation of mechanical loads, electromagnetic compatibility options and remote control of the throttle are discussed.

Keywords— Dynamometer test bench, hybrid electric vehicles, internal combustion engine, regenerative converter, electric machines and drives

Resumo— Devido a necessidade de redução da utilização de combustíveis fósseis, tem-se buscado tecnologias alternativas a serem aplicadas em propulsão veicular. Tal objetivo pode ser alcançado utilizando novas tecnologias de propulsão, como os acionamentos híbridos. Nesse contexto, esse trabalho propõe o projeto e desenvolvimento de uma bancada experimental para o levantamento das características de desempenho e do mapa de eficiência de um motor a combustão interna, fundamentais para o desenvolvimento de estratégias de gerenciamento de potência em sistemas de propulsão. Uma solução para emulação de cargas mecânicas é apresentada, além de opções para compatibilidade eletromagnética e uma estratégia para comando remoto da válvula de admissão de oxigênio do motor a combustão interna.

Palavras-chave— Bancada dinamométrica, veículos elétricos híbridos, motor a combustão interna, conversor regenerativo, máquinas e acionamentos

1 Introdução

Novas demandas impostas à indústria automobilística por veículos mais eficientes e menos poluentes vem exigindo opções alternativas ao uso de motores a combustão interna como fonte de propulsão predominante adotada em veículos automotores terrestres. Diante de tal cenário, empresas fabricantes de veículos e fornecedoras de componentes têm direcionado suas atividades de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) no projeto de veículos que atendam essa expectativa.

Agências governamentais e organizações têm criado padrões mais rigorosos para consumo de combustível e emissão de gases poluentes. Para cumprir tais níveis de exigência, mesmo com o avanço de tecnologias eletrônicas automotivas que aumentem a eficiência dos motores a combustão e melhorem os índices de filtragem de poluentes, os veículos necessitarão de tecnologias alternativas de tração(Chan, 2007).

Veículos puramente elétricos são uma alterna-

tiva aos veículos movidos a motor a combustão interna (MCI). Entretanto, o seu custo de aquisição elevado, a sua baixa autonomia, longo tempo de recarga e precária infraestrutura são fatores que ainda inviabilizam a disseminação de tais veículos (Castro and Ferreira, 2010).

Os veículos elétricos híbridos surgiram como forma de superar as desvantagens dos veículos movidos a motores a combustão interna, no que se refere a eficiência e emissão de gases poluentes, e dos veículos puramente elétricos, no que se diz respeito a autonomia.

O emprego de motores elétricos trabalhando em conjunto com motores a combustão interna possibilita diversas configurações, nas quais vantagens como otimização do consumo de combustível, aumento do desempenho, redução de emissão de gases poluentes e maior autonomia são obtidas (Westbrook, 2001; Chan, 2007). Além disso, o emprego de motores elétricos em veículos viabiliza características desejáveis pelo condutor, como maior conforto, dirigibilidade e segurança (Amann

et al., 2004; Martinez et al., 2017).

Para que se atinjam as vantagens desejadas de um acionamento híbrido, deve-se desenvolver uma estratégia de gerenciamento de potência dos meios de propulsão na qual a operação do MCI seja priorizada em suas regiões de máxima eficiência (Chan, 2007). O desenvolvimento satisfatório dessa estratégia depende de uma boa caracterização do desempenho e consumo específico do motor a combustão interna a ser empregado. Como essas informações não são disponibilizadas pelos fabricantes, faz-se necessário o desenvolvimento de estratégias para o levantamento dessas características. Para essa tarefa, o emprego de bancadas experimentais aparece como uma solução conveniente.

Bancadas experimentais combinam as vantagens de modelos desenvolvidos em software e equipamentos reais, contribuindo para análises preliminares de estratégias de controle, desempenho e testes de emissão de poluentes (Rassölkin and Vodovozov, 2013).

Levando em consideração esse contexto, o presente estudo apresenta o projeto e desenvolvimento de uma bancada experimental para o levantamento das curvas características de conjugado e do mapa de eficiência de um motor a combustão interna para posterior aplicação em um acionamento híbrido para veículos de pequeno porte.

Uma solução para emulação de cargas mecânicas é implementada através de um acionamento elétrico regenerativo baseado a máquina de indução trifásica. Além disso, é apresentada uma solução de controle da abertura de borboleta acionada por servomotor comandado por sistema embarcado microcontrolado.

Por fim, são expostas opções de compatibilidade eletromagnética projetadas e implementadas para assegurar uma relação sinal/ruído adequada para os sinais amostrados e para os sinais de comando da borboleta.

2 Topologia da Bancada

2.1 Acionamentos

A configuração do acionamento apresentado nesse artigo é do tipo híbrido paralela. Tal configuração emprega um motor a combustão interna e uma máquina elétrica, possibilitando que ambas as fontes de tração atuem simultaneamente sobre o mesmo eixo. Além da máquina elétrica utilizada para tração, um segundo motor elétrico é empregado para emular cargas mecânicas. A disposição dos elementos empregados está apresentada na Figura 1.

A bancada foi elaborada com uma relação de alguns componentes comercialmente disponíveis e outros feitos sob medida para atender as demandas específicas do projeto. Foi utilizado um motor

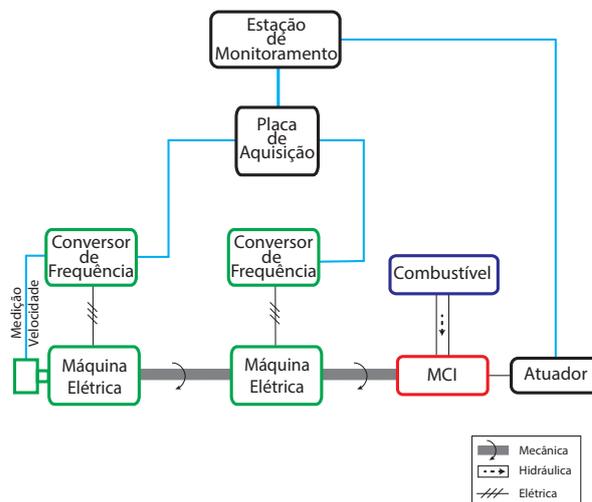


Figura 1: Dispositivos empregados na construção da bancada.

a combustão interna estacionário, monocilíndrico, quatro tempos de 5,5 CV. As especificações técnicas desse motor estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1: Especificações técnicas do MCI.

Capacidade do tanque:	3,6 L
Cilindrada	163 cm ³
Curso do pistão:	45 mm
Diâmetro do cilindro:	68 mm
Dimensões CxLxA:	395x335x390 mm
Peso:	15 Kg
Potência:	5,5 cv a 3600 rpm
Taxa de compressão:	8,5 : 1
Conjugado máximo:	1,1 Kgf.m/2500 rpm
Rotação máxima:	3600 rpm

O acionamento elétrico utilizado na bancada é baseado a motor elétrico de indução trifásico (M1) de 1,5 CV alimentado por um conversor de frequência. A Tabela 2 apresenta os dados desse acionamento.

Tabela 2: Máquina de indução utilizada como propulsão

Alimentação:	Trifásica
Potência:	1,5 CV
Número de pólos:	8
Rotação nominal:	855 rpm
Tensão nominal:	220 V
Corrente nominal:	6,04 A
Frequência de alimentação:	60 Hz
Fator de serviço:	1,15
Classe de isolamento:	F (ΔT 80K)
Grau de proteção:	IP 55
Ventilação:	Autoventilado

A máquina elétrica (M2) utilizada para emular impedâncias e cargas mecânicas apresenta as especificações técnicas apresentadas na Tabela 3.

Trata-se de um motor de indução trifásico de 7,5 CV. Essa máquina é alimentada por um conversor de frequência regenerativo. Tal conversor permite que a máquina elétrica opere nos quatro quadrantes da sua curva de conjugado, viabilizando a emulação de cargas sob ciclos de direção específicos.

Tabela 3: Máquina de indução utilizada para emular cargas mecânicas

Alimentação:	Trifásica
Potência:	7,5 CV
Número de polos:	4
Rotação nominal:	1745 rpm
Tensão nominal:	220 V
Corrente nominal:	21 A
Frequência de alimentação:	60 Hz
Fator de serviço:	1,15
Classe de isolamento:	F (ΔT 80K)
Grau de proteção:	IP 44
Ventilação:	Autoventilado

2.2 Aquisição de sinais

A aquisição dos sinais de velocidade e conjugado são realizadas através de uma placa de aquisição de dados. O dispositivo utilizado permite a aquisição de sinais analógicos de 0 a 10 V com uma resolução de 16 bits a uma taxa de amostragem de 250 kHz.

Para medição de velocidade o motor de propulsão de 1,5 CV conta com um encoder de 1024 ppr do tipo diferencial line driver. O sinal de velocidade medido pelo encoder é enviado para o conversor de frequência que aciona o motor, bem como para a placa de aquisição de dados.

O controle de conjugado da máquina que sintetiza cargas mecânicas é feito através de um controlador DTC (*Direct Torque Control*), que comanda o conversor regenerativo. Tal tecnologia foi desenvolvida pela fabricante ABB (Tiitinen and Surandra, 1996). Esse método, segundo o fabricante, garante um erro de no máximo 4% no controle de torque na aplicação sem a utilização de encoder, o que é aceitável para a aplicação proposta. Dessa forma, a estimação do conjugado feita pelo conversor será utilizada como forma de medição.

De maneira similar à medição de velocidade, o conversor de frequência envia um sinal em corrente de 4 a 20 mA para a placa de aquisição, correspondente ao conjugado estimado. Entretanto, como a placa de aquisição de dados permite apenas a leitura de sinais em tensão, foi utilizado um trimpot ajustado em 500 Ω para conversão do sinal de 4 a 20 mA para 2 a 10 V.

2.3 Transmissão

Pode-se notar nas especificações dos motores empregados que as suas velocidades nominais não são compatíveis umas com as outras. Para compatibilizar as velocidades dos acionamentos, optou-se por uma transmissão através da combinação polias e correias em V, considerando que esse tipo de transmissão possui rendimento na ordem de 97% (Silva, 2015).

Para a transmissão do MCI e o motor M2 foi utilizada uma relação de polias de 2:1. As polias escolhidas foram de 140mm do tipo B de três canais para o M2 e de 70mm do tipo B de dois canais para o MCI. A transmissão do M2 para o M1 foi feita com uma relação de 1:1 utilizando uma polia de 140mm do tipo B de um canal.

A montagem da transmissão, disposição dos motores e dos demais componentes que constituem a bancada estão apresentados na Figura 2.



Figura 2: Bancada experimental.

3 Princípio de Funcionamento da Bancada

A aplicação de MCIs como meio de propulsão veicular exige um conhecimento detalhado das suas características de desempenho e das suas curvas de eficiência. Usualmente, apenas a curva de conjugado por velocidade com máxima abertura de borboleta é fornecida pelos fabricantes. Para a utilização de um MCI no contexto de aplicação de um veículo elétrico híbrido é necessário conhecer as curvas de conjugado por velocidade para diferentes níveis de admissão de oxigênio, além do seu mapa de consumo específico.

O MCI adotado na construção da bancada é do tipo estacionário. Esse tipo de motor vem dotado de um dispositivo mecânico para controle automático de velocidade, denominado governador. Tal dispositivo é composto de um elemento centrífugo acoplado ao eixo do motor, que por sua vez é conectado a uma alavanca. Essa alavanca se move em resposta às alterações de velocidade,

atuando na borboleta de admissão de oxigênio automaticamente, de forma a controlar a velocidade (Catterson, 1966; Schmidt and Hotz, 1990). Esse dispositivo impede que sejam estabelecidas posições fixas de abertura de borboleta para a realização dos ensaios de desempenho do MCI.

A solução encontrada para realizar os ensaios foi remover o governador e adaptar um servomotor para atuar diretamente na borboleta de admissão de oxigênio do carburador. O tanque de combustível originalmente instalado sobre o bloco do motor foi retirado e no local foi instalada uma chapa de fibra de madeira de média densidade para fixação do servomotor. Essa solução está ilustrada na Figura 3.

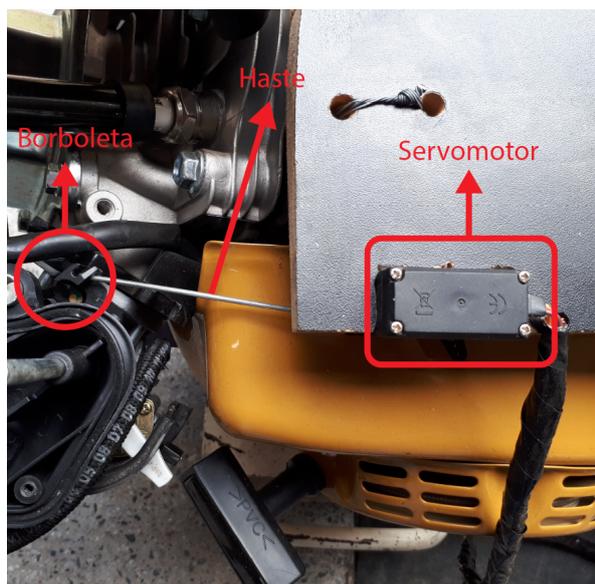


Figura 3: Servomotor para controle da borboleta de admissão de oxigênio.

O princípio de operação da bancada é baseado no estabelecimento do MCI no modo motor e da máquina elétrica em modo carga. Para que as características de desempenho sejam extraídas em uma ampla faixa de velocidade, o acionamento elétrico é configurado para operar em modo de regulação de velocidade.

Nesse modo de controle é escolhido um valor desejado para velocidade de operação da máquina elétrica e o conversor de frequência alimenta o motor para que ele aplique no eixo mecânico o conjugado necessário para que a velocidade seja mantida. Dessa forma, ao escolher um valor de velocidade com o sistema ainda em repouso, a máquina elétrica atua no modo motor de forma a dar partida no motor a combustão interna.

Com o sistema em regime permanente, tem-se por segunda lei de Newton, que o conjugado desenvolvido pelo MIT será igual ao desenvolvido pelo MCI. E então, o torque que no eixo do MIT é obtido pelo observador embarcado no inversor.

4 Solução para atenuação de ruídos

A presença de ruídos de modo comum nos circuitos elétricos/eletrônicos é inerente ao princípio de funcionamento dos equipamentos que constituem a bancada.

Uma das fontes de ruído é caracterizada pela circulação de sinais de corrente de modo comum de alta frequência provenientes da modulação PWM do conversor. Essas correntes surgem devido ao chaveamento dos IGBT's do conversor de frequência, o qual produz pulsos de tensão com taxa de variação na ordem de $300V/\mu s$ (Silva, 2015). Essa variação de tensão nos terminais da máquina de indução está representada na Figura 4.

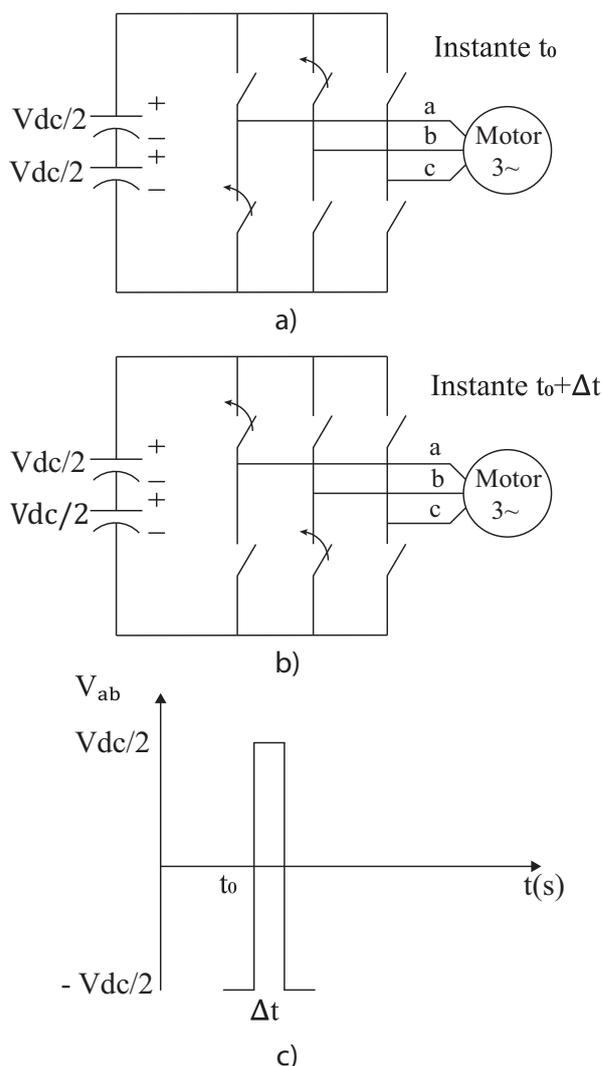


Figura 4: Alta taxa de variação da tensão nos terminais da máquina elétrica.

Esses pulsos são aplicados aos terminais da máquina de indução através de condutores de cobre envolvidos por um material isolante, como PVC ou EPR. Tal configuração constitui um capacitor entre os condutores de cobre e a carcaça da máquina elétrica, possibilitando assim a circu-

lação de corrente capacitiva entre os dispositivos.

A carcaça da máquina elétrica está apoiada em uma base metálica, assim como o motor a combustão interna. O protótipo inicial contava com uma base metálica para o apoio do servomotor, que por sua vez também possui uma carcaça metálica. Havia então um caminho para a condução de ruído até o microcontrolador.

Uma segunda fonte de ruído pode ser caracterizada pela presença de centelhas inerentes ao sistema de ignição de motores ciclo Otto.

Em MCI's estacionários de baixa complexidade, o sistema de ignição é do tipo magnético. Tal sistema é composto de um ímã permanente alocado em um volante acoplado ao eixo do MCI. A cada revolução, o ímã induz uma tensão em uma bobina presente em uma armadura estacionária na carcaça do motor (Trost and Schieber, 1995).

A tensão de ignição de tal sistema pode ultrapassar $10kV$ em um curto intervalo de tempo (Maly, 1984). Essa tensão elevada é aplicada nos terminais da vela de ignição, permitindo um curto circuito entre o eletrodo central da vela e o eletrodo que está aterrado na carcaça do MCI de elevado di/dt .

A presença de corrente com alto di/dt faz com que apareçam linhas de campo magnético variável que enlaçam a carcaça do MCI e do servomotor, bem como os cabos de cobre presentes na montagem. Isso caracteriza um acoplamento indutivo e permite a circulação de correntes indutivas. Tal efeito está ilustrado na Figura 5.

A presença de sinais de elevado dv/dt e di/dt configuram uma forma de acoplamento de circuitos que são eletricamente desacoplados. Essas fontes de ruído vão produzir um circuito como mostrado na Figura 6. Observa-se que os sinais de ruído irão se sobrepôr aos sinais que comandam o servomotor e àqueles que são enviados à placa de aquisição.

O circuito de acionamento da borboleta estava originalmente instalado em uma plataforma metálica acoplada ao motor, permitindo a presença de um caminho para que esses pulsos cheguem ao microcontrolador e conseqüentemente no computador e na placa de aquisição.

Como forma de atenuar os efeitos de ruídos conduzidos sobre o microcontrolador foram propostas duas soluções. A primeira delas foi a substituição da placa metálica em que o servomotor estava apoiado por uma placa de um material isolante. O material escolhido foi uma placa de fibra de madeira de média densidade. Tal solução está ilustra na Figura 3.

Outra solução adotada foi a criação de um caminho alternativo para que o ruído de modo comum retorne à fonte que o produziu antes que seja acoplado ao microcontrolador e à placa de aquisição de sinais. Esse caminho foi criado aplicando uma camada de material metálico em

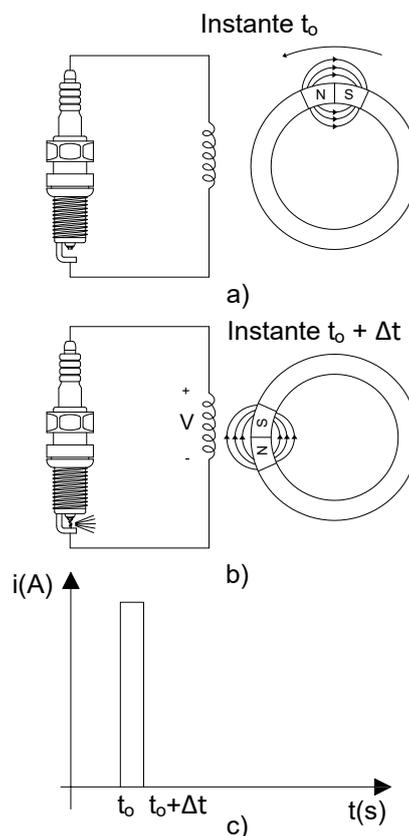


Figura 5: Alta taxa de variação da corrente entre os eletrodos da vela de ignição.

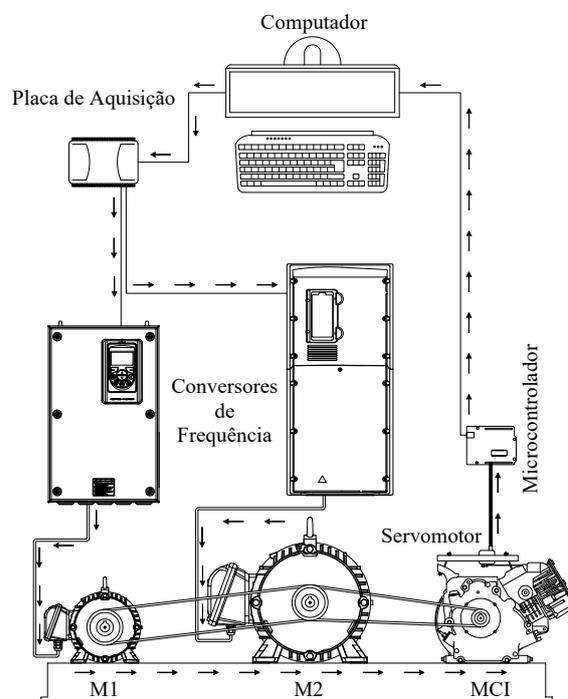


Figura 6: Circuito para ruído de modo comum.

torno dos cabos originalmente instalados, caracterizando um acoplamento capacitivo de baixa im-

pedância (Silva, 2015).

5 Resultados e Discussões

5.1 Curvas de Conjugado x Velocidade

Os ensaios para obtenção das curvas de conjugado foram realizados para oito posições distintas da borboleta de admissão de oxigênio. Para cada posição da borboleta o levantamento foi realizado contemplando quatorze velocidades distintas, dispostas na Tabela 4.

Tabela 4: Velocidades de ensaio referidas ao eixo do MCI (rpm)

Velocidade (rpm)						
1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200
2400	2600	2800	3000	3200	3400	3600

As características de conjugado por velocidade estão dispostas na Figura 7. Percebe-se que para uma mesma variação de abertura de borboleta as curvas de conjugado se comportam de maneira diferente. Para aberturas iniciais, existem um aumento considerável nos níveis de conjugado produzidos pelo MCI. Já nos níveis finais de excursão da borboleta, o conjugado desenvolvido pouco se altera.

Cabe ressaltar que a produção máxima de conjugado acontece em torno de 2500 rpm.

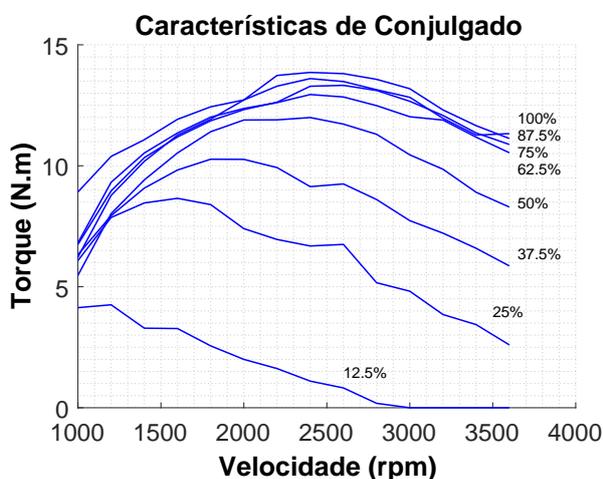


Figura 7: Curvas de conjugado do MCI sob ensaio.

5.2 Mapa de Eficiência

O mapa de eficiência de um motor a combustão interna é um gráfico constituído por curvas referentes ao consumo específico de combustível. O consumo específico corresponde ao consumo de combustível por unidade de potência produzida em uma hora. É definido em gramas por quilowatt-hora produzido (g/kWh).

Para a obtenção desse mapa, além dos registros de velocidade e conjugado, é necessário realizar a medição do consumo de combustível. A solução adotada foi baseada no procedimento desenvolvido por Agostinho (2014)

O procedimento consiste em retirar o tanque originalmente fixado sobre o bloco do MCI de forma que seja possível posicioná-lo em cima de uma balança. A massa medida corresponde à massa do tanque, da mangueira de combustível e do líquido presente no tanque. Com o uso da balança obtêm-se o consumo de combustível em gramas que foi consumido registrando os valores iniciais e finais de medição para um determinado intervalo de tempo. Essa solução está ilustrada na Figura 8.



Figura 8: Solução para registro do consumo de combustível.

Determinado o procedimento para a realização dos ensaios, foi escolhido um intervalo de dois minutos para efetuar cada registro. A medição do tempo é realizada com o MCI funcionando em regime permanente, sem que haja alterações de velocidade e conjugado de carga. Os ensaios foram realizados considerando as mesmas posições de borboleta e os mesmos intervalos de velocidade adotados no ensaio anterior.

O mapa de eficiência está disposto na Figura 9. É interessante ressaltar que a região de máxima eficiência do MCI coincide com as regiões de máxima produção de conjugado pela máquina e não em sua rotação nominal. Dessa forma, sugere-se que para aplicação em acionamentos híbridos, a estratégia de gerenciamento de potência adotada priorize tais regiões de operação para o MCI.

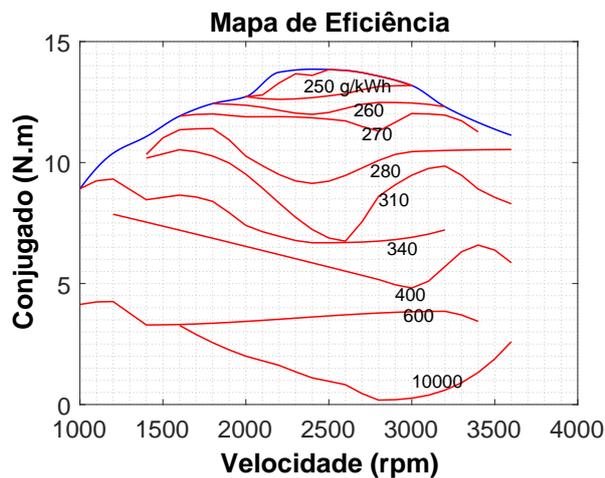


Figura 9: Mapa de consumo específico do MCI sob ensaio.

6 Conclusões

Esse trabalho apresentou o projeto e desenvolvimento de uma bancada experimental para o levantamento das curvas características de um motor a combustão interna. Ao contrário do que os fabricantes tipicamente apresentam, o procedimento de ensaio proposto viabiliza um ensaio mais completo, em uma ampla faixa de torque.

A bancada construída permite de maneira simples, através do ajuste de poucos parâmetros em software, o ensaio para qualquer abertura de borboleta e velocidade do motor a combustão interna. A possibilidade de realizar o procedimento sem contato com partes mecânicas, principalmente as rotativas, garante uma maior segurança no processo de levantamento das curvas do MIT.

Por fim, são apresentadas estratégias para garantir a operação do sistema em um ambiente eletromagneticamente ruidoso. A configuração da bancada ainda garante a partida do MIT sem a necessidade motor de arranque e apresenta a opção de regenerar energia para a rede durante os ensaios.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se a aplicação das características levantadas no desenvolvimento de um sistema de propulsão para veículos de pequeno porte.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, à CAPES, à FAPEMIG, ao INERGE e ao PPGEL-UFSJ/CEFET-MG.

Referências

Agostinho, L. C. M. (2014). *Emulação de um motor de combustão interna através de um acionamento eletromecânico de velocidade variável*

utilizando um motor de indução trifásico, PhD thesis, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Amann, N., Bocker, J. and Prenner, F. (2004). Active damping of drive train oscillations for an electrically driven vehicle, *IEEE/ASME Transactions on mechatronics* **9**(4): 697–700.

Castro, B. H. R. d. and Ferreira, T. T. (2010). Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades, *BNDES Setorial*, n. 32, set. 2010, p. 267-310.

Catterson, R. K. (1966). Internal combustion engine governor. US Patent 3,242,741.

Chan, C. C. (2007). The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles, *Proceedings of the IEEE* **95**(4): 704–718.

Maly, R. (1984). Spark ignition: its physics and effect on the internal combustion engine, *Fuel economy*, Springer, pp. 91–148.

Martinez, C. M., Hu, X., Cao, D., Velenis, E., Gao, B. and Wellers, M. (2017). Energy management in plug-in hybrid electric vehicles: Recent progress and a connected vehicles perspective, *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **66**(6): 4534–4549.

Rassõlkin, A. and Vodovozov, V. (2013). A test bench to study propulsion drives of electric vehicles, *Compatibility and Power Electronics (CPE), 2013 8th International Conference on*, IEEE, pp. 275–279.

Schmidt, G. R. and Hotz, P. (1990). Mechanical governor for internal combustion engines. US Patent 4,977,879.

Silva, C. E. (2015). Projeto e implementação da estrutura mecatrônica de potência para um exoesqueleto robótico de membros superiores, *Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São João del Rei*.

Tiitinen, P. and Surandra, M. (1996). The next generation motor control method, dtc direct torque control, *Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth, 1996., Proceedings of the 1996 International Conference on*, Vol. 1, IEEE, pp. 37–43.

Trost, J. and Schieber, E. (1995). Magnetic ignition system. US Patent 5,477,841.

Westbrook, M. H. (2001). *The Electric Car: Development and future of battery, hybrid and fuel-cell cars*, number 38, Iet.