

# Aproximação polinomial da potência de regime do motor de combustão interna emulado por motores de indução trifásicos

Jen Wuu Wang\* Márcio V. R. Campos\*\* Lucas Jonys R. Silva\*\*  
Amilcar F. Q. Gonçalves\* Rodolpho V. A. Neves\*\*\*  
Ricardo Q. Machado\*\* Vilma A. Oliveira\*\*

\* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São Carlos, SP, (e-mail: jenwang, amilcarf@ufscar.br).

\*\* Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, (e-mail: marciovonrondow, lucasjonys, rquadros, voliveira@usp.br).

\*\*\* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Viçosa, MG, (e-mail: rodolpho.neves@ufv.br).

---

**Abstract:** Improving the efficiency of hybrid electric vehicles (HEVs) is essential for advancing sustainable transportation. This study focuses on modeling the power supply of a combustion system in a scaled-down prototype that emulates the interaction between an internal combustion engine (ICE) and an electric generator of an HEV, using Hardware-in-the-Loop (HIL) technology. The adopted approach allows for emulating the energy generation system in steady-state operation, based on the rotation and torque difference between the machines, influenced by the angular movement of the throttle valve. In this context, a polynomial model was developed and validated using the *Curve Fitting Toolbox* in MATLAB<sup>®</sup>, accurately capturing the relationships between power, speed, and valve opening. The proposed polynomial equation can be applied in ICE energy distribution strategies, reducing computational overhead and increasing operational efficiency. The quantitative results indicate that the polynomial approximation is suitable for practical prototype testing, opening new opportunities for developing more effective and sustainable energy solutions.

**Resumo:** O aumento da eficiência dos veículos híbridos elétricos (VEHs) é essencial para o avanço do transporte sustentável. Este estudo foca na modelagem do fornecimento de potência de um sistema de combustão em um protótipo em escala reduzida que emula a interação entre um motor a combustão interna (MCI) e um gerador elétrico de um VEH, utilizando a tecnologia *Hardware-in-the-Loop* (HIL). A abordagem adotada permite emular o sistema de geração de energia em regime permanente, com base na rotação e na diferença de torque entre as máquinas, influenciada pelo movimento angular da válvula borboleta. Neste contexto, foi desenvolvido e validado um modelo polinomial utilizando o *Curve Fitting Toolbox* do MATLAB<sup>®</sup>, que captura com precisão as relações entre potência, velocidade e abertura da válvula. A equação polinomial proposta pode ser aplicada em estratégias de distribuição de energia do MCI, reduzindo o gasto computacional e aumentando a eficiência operacional. Os resultados quantitativos indicam que a aproximação polinomial é adequada para testes práticos do protótipo, abrindo novas oportunidades para o desenvolvimento de soluções energéticas mais eficazes e sustentáveis.

*Keywords:* Hybrid Electric Vehicles (HEVs); Internal Combustion Engine (ICE); Polynomial Equation.

*Palavras-chaves:* Veículos elétricos híbridos (VEHs); Motor a Combustão Interna (MCI); Equação Polinomial.

---

## 1. INTRODUÇÃO

À medida que a sociedade se torna cada vez mais consciente dos impactos ambientais associados aos transportes convencionais, a demanda por soluções inovadoras e sustentáveis cresce exponencialmente (International Energy Agency, 2024). Nesse cenário, os veículos elétricos híbridos (VEHs) surgem como uma alternativa promissora, combinando eficiência energética com a redução significativa das emissões de poluentes. A eficácia desses veículos depende diretamente da otimização de seus sistemas, incluindo aqueles responsáveis pela geração de energia, tais como o sistema de combustão interna (Mei et al., 2023). Assim, o desenvolvimento de protótipos de bancadas para a emulação de VEHs, bem como o uso de prototipagem rápida por meio de simulações computacionais são ferramentas que se alinham na compreensão e melhoria da dinâmica de geração de energia, tornando-se um elemento essencial no desenvolvimento de novas técnicas de controle a fim de se alcançar uma eficiência energética aprimorada e um desempenho ambiental superior, destacando a importância de se replicar com precisão as condições operacionais reais dos sistemas de combustão.

No campo de simulações, a tecnologia *Hardware-in-the-Loop* (HIL) desempenha um papel fundamental para projetos de controladores aplicados aos VEHs, que permite o desenvolvimento e a validação de sistemas de gerenciamento de energia (SGEs) de forma segura e eficaz. A utilização da tecnologia HIL possibilita a reprodução precisa dessas condições operacionais de maneira controlada, eliminando os custos e riscos associados aos testes com protótipos físicos, o que é essencial para garantir a viabilidade e eficácia das soluções propostas (Fajri et al., 2018). Além disso, a ferramenta possui grande potencial para testar e comparar diferentes sistemas de armazenamento de energia em VEHs, influenciando diretamente a seleção de componentes e o design dos sistemas de propulsão elétrica (Trigui et al., 2009).

Os ensaios experimentais em sistemas híbridos que integram fontes à combustível e baterias somam o uso de bancadas de ensaios associadas ao HIL para testes, visando maximizar a eficiência energética e o desempenho operacional dessas fontes (Gauchia and Sanz, 2010). Junto a essa vantagem, a aplicação do HIL para a simulação de veículos elétricos urbanos é relevante, pois auxilia nos ensaios para o desenvolvimento de estratégias de controle do SGE. Assim, a plataforma HIL pode ser eficaz para testar e desenvolver métodos de controle com o objetivo de avançar no desenvolvimento tecnológico de VEH ajustados às necessidades urbanas (Tabbache et al., 2012).

A abordagem prática proporcionada pelas bancadas de teste HIL complementa e enriquece as estratégias de controle preditivo usadas para ajustar dinamicamente o consumo de combustível e a potência em VEHs. Esses controles são vitais para o ajuste fino de estratégias operacionais com base nas características específicas de design do motor e no tipo de combustível utilizado (Szpica, 2019). Além disso, a eficácia do controle preditivo modelado, que utiliza trajetórias de referência para otimizar a economia de combustível em condições reais de rodagem, foi comprovadamente significativa, resultando em economias

substanciais (Golebiewski et al., 2023). De forma similar, a implementação de um modelo otimizado de controle baseado em MATLAB<sup>®</sup> e *Simulink* em VEHs, visa a minimização do uso do motor de combustão interna (MCI), mantendo o desempenho do veículo, o que demonstra uma redução acentuada na dependência dos MCIs e sublinha o potencial destes sistemas para melhorar tanto a eficiência operacional quanto a sustentabilidade ambiental (Narwaria et al., 2023). Essas técnicas avançadas de gestão de energia, quando combinadas com a simulação precisa proporcionada pelas bancadas de teste, apresentam um caminho promissor para o desenvolvimento de tecnologias de veículos mais eficientes e ambientalmente responsáveis

Portanto, com foco no estudo e desenvolvimento de estratégias de controle aplicadas a VEHs, este trabalho utiliza uma bancada em escala reduzida para emular, por meio de dois motores elétricos trifásicos, o funcionamento de um MCI acoplado em uma máquina elétrica trifásica que opera como gerador, visando explorar a geração de energia para o barramento de corrente contínua (CC) de um VEH, desenvolvida no âmbito do projeto ROTA2030. Dessa forma, este estudo avança ao desenvolver um modelo matemático equacional polinomial que descreve as relações entre potência, velocidade e abertura de válvula em um sistema de combustão, empregando a ferramenta *Curve Fitting Toolbox* do MATLAB<sup>®</sup>. Este modelo não apenas reflete as estratégias de otimização identificadas na literatura relacionada, mas também estabelece uma base robusta para o desenvolvimento de estratégias de controle refinadas para a gestão de energia em VEHs.

Finalmente, os resultados mostram a validação do modelo matemático, demonstrando uma correlação robusta entre os dados experimentais e os resultados simulados, enfatiza a precisão e a aplicabilidade do modelo, proporcionando um caminho para refinamentos mais precisos em comparação com métodos que focam apenas em componentes individuais ou em controle preditivo, sem um modelo detalhado do comportamento do sistema de combustão. Portanto, este enfoque permite não apenas simular a eficiência do sistema de forma mais controlada, mas também ajustar as estratégias de controle com base em dados detalhados de desempenho, oferecendo potencial para melhorias contínuas em tecnologias de veículos elétricos híbridos.

*Notação:* Os conjuntos  $\mathbb{R}$  e  $\mathbb{Z}$  denotam o conjunto dos números reais e o conjunto dos números inteiros, respectivamente.

## 2. EMULAÇÃO DE UM MCI UTILIZANDO MITS

O diagrama da bancada, que emula o conjunto de um motor a combustão interna (MCI) e um gerador elétrico, é composto por dois motores de indução trifásicos (MITs) acoplados pelo eixo, cujas especificações são apresentadas na Tabela 1. O MIT<sub>C</sub> é responsável por emular o MCI, enquanto o MIT<sub>G</sub> é encarregado de gerar eletricidade para o barramento de corrente contínua. A configuração detalhada desse sistema é ilustrada na Figura 1. A base de operação da bancada é que quando um MIT opera com velocidade superior à velocidade síncrona o valor do escorregamento se torna negativo e, assim, o MIT passa a operar como gerador. Dessa forma, se a velocidade angular do MIT<sub>G</sub> ( $\omega_G$ ) for inferior à velocidade angular do MIT<sub>C</sub> ( $\omega_C$ ) haverá um fluxo de energia para o barramento CC do VEH.

\* Reconhecimentos aos suportes financeiros: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) processo nº 2022/00628-9 e 2020/05865-3, CNPq 311959/2021-0 e 312664/2021-4, e Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa-Fundep Rota 2030/Linha V 27192/27.

Tabela 1. Especificação dos MITs utilizados na bancada experimental construída.

Parâmetro	Valor
Frequência	60 Hz
Tensão	220 V
Corrente nominal	2,26 A
Potência	0,55 kW (0,75 cv)
Conjugado nominal	0,156 kgfm
Número de polos	2
Rotação síncrona	3440 rpm

Nesse ponto em diante, o presente trabalho também irá nomear o MIT<sub>G</sub> como sendo equivalente a um gerador elétrico (GE), uma vez que o protótipo experimental não envolve o controle local desse tipo de máquina e, por questões de custo e simplificação, optou-se por utilizar as máquinas de indução para o estudo geral de estratégias de gerenciamento a nível superior de controle. A plataforma construída em laboratório é exibida na Figura 2.

Para atingir esse objetivo, tanto o acionamento do MIT<sub>C</sub>, quanto a retificação das tensões produzidas pelo MIT<sub>G</sub> foram feitas utilizando-se os conversores de potência WEG modelo CFW300, controlados através da entrada analógica de tensão. Assim, os conversores utilizam um controle tensão-frequência (V/f) ou vetorial para ajustar a velocidade angular  $\omega_G$  e  $\omega_C$  das máquinas, proporcionalmente aos valores analógicos de tensão  $v_G$  e  $v_C$ , respectivamente, ambos enviados pela central de controle implementada no MicroAutoBox II da fabricante dSPACE.

Por fim, vale destacar que para os ensaios aqui realizados as referências de velocidade angular dos MITs são definidas manualmente pelo operador. Em uma aplicação prática, um nível de controle superior será realizado por um sistema de gerenciamento de energia (SGE), desenvolvido para garantir a operacionalidade eficiente entre as fontes de energia do protótipo, controlando a distribuição de potência entre a fonte primária MCI e as fontes armazenadoras auxiliares como baterias e ultracapacitores (UCs).

### 2.1 Obtenção do mapa de potência

Para a obtenção do mapa de potência do protótipo que emula o MCI acoplado ao GE, as velocidades de giro dos MITs foram variadas manualmente através da plataforma ControlDesk/dSPACE. Quando os dois MITs operam à mesma velocidade ( $\omega_C = \omega_G$ ), observa-se um fluxo de energia reduzido para o barramento CC, refletindo um cenário de baixa demanda de torque por parte do MCI. Alternativamente, quando o MIT que emula o MCI opera a uma velocidade superior à do MIT que simula o GE, energia adicional é canalizada para o sistema de tração. Dessa forma, a potência fornecida ao barramento CC é controlada ajustando-se a diferença de velocidade entre os MITs, conforme:

$$\Delta\omega = \omega_C - \omega_G. \quad (1)$$

Considerando-se uma aplicação real do acoplamento de um MCI com um GE em um VEH, a diferença de velocidade entre os MITs do protótipo pode ser relacionada de forma análoga à abertura angular de uma válvula borboleta que controla a mistura de ar e combustível para a câmara de combustão do MCI.

Com a variação de velocidade dos MITs é possível se obter informações para diferentes pontos de operação

do protótipo. Desse modo, um modelo tridimensional equivalente ao mapa de potência de um MCI pode ser obtido relacionando a potência gerada ( $P$ ) com a diferença de velocidade e o ponto de operação do MIT<sub>C</sub> como:

$$P = f(\omega_C, \Delta\omega), \quad (2)$$

sendo  $f$  uma função a ser determinada.

### 2.2 Coleta de dados de potência para diferentes pontos de operação

A coleta dos dados de potência gerada para diferentes pontos de operação da plataforma foi realizada em laboratório. A tensão analógica de controle dos inversores de frequência foi variada de forma que  $\Delta\omega > 0$ , sendo os limites superiores  $\omega_C^{\max} = \omega_G^{\max} = 35$  Hz, um valor limite definido para manter a corrente elétrica da bancada em um nível seguro, conforme os limites físicos dos componentes elétricos e eletrônicos que foram aplicados. A escolha da frequência máxima de 35Hz foi adotada para garantir uma faixa de potência entre 100 a 200W, proporcionando uma margem de segurança adequada para o projeto e minimizando a vibração no acoplamento dos eixos. Para cada valor de  $\Delta\omega$ , uma potência gerada é associada. Por exemplo, se  $\omega_C = 35$  Hz, então  $\omega_G$  precisa variar de 0 a 35 Hz. Seguindo essa metodologia de coleta de dados, foram realizadas variações sequenciais nos valores de  $\omega_C$  de 35 Hz decrescendo até 0 Hz. Para cada valor de  $\omega_C$  selecionado,  $\omega_G$  foi ajustado em uma sequência decrescente correspondente, garantindo  $\Delta\omega > 0$ .

## 3. APROXIMAÇÃO POLINOMIAL DA POTÊNCIA DO MCI EMULADO

Após a análise inicial dos dados do sistema de combustão, a obtenção de modelo matemático foi realizada através da *Curve Fitting Toolbox* do *software* MATLAB<sup>®</sup>, especializada em ajuste de curvas e superfícies. Esta ferramenta permite a comparação de modelos e a eliminação de valores discrepantes e possui uma biblioteca que oferece parâmetros de resolução otimizados com condições iniciais para aprimorar a qualidade dos ajustes. Projetada para otimizar o gerenciamento de recursos computacionais, minimizar o consumo de memória e maximizar a rapidez das respostas, esta *toolbox* permite a seleção de até três conjuntos de dados diferentes, ideal para a construção de modelos tridimensionais complexos.

Considerando duas variáveis de entrada, denominadas  $x$  e  $y$ , e uma variável de saída, denominada  $z$ , é possível obter um modelo equacional polinomial para expressar a relação entre elas. Para desenvolver um modelo equacional polinomial que articule uma relação matemática entre potência, velocidade e abertura da válvula foram escolhidos  $x = \omega_C$  para representar a velocidade do motor,  $y = \Delta\omega$  como a diferença de velocidade e  $z = P$  para representar a potência, o que permite reescrever (2) como:

$$z = f(x, y). \quad (3)$$

Para a aproximação polinomial, a função  $f$  em (3) é expressa em termos de potências das variáveis  $x$  e  $y$  como:

$$f(x, y) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N p_{mn} x^m y^n, \quad (4)$$

sendo  $M \in \mathbb{Z}$  e  $N \in \mathbb{Z}$  o máximo grau selecionado para as potências das variáveis  $x$  e  $y$ , respectivamente, e  $p_{mn} \in \mathbb{R}$  os coeficientes do polinômio.

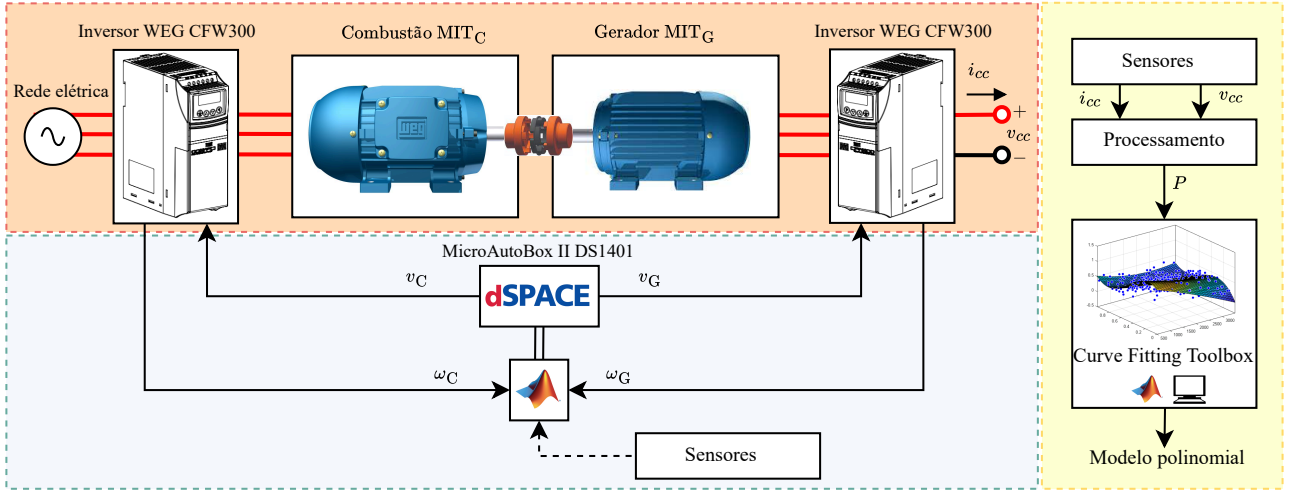


Figura 1. Diagrama esquemático da bancada em escala reduzida para emulação do acoplamento entre um MCI e um GE através de MITs. Os dados de corrente e tensão para diferentes pontos de operação são coletados e processados para obtenção de um modelo polinomial.

Tabela 2. Grau máximo para as potências dos modelos polinomiais avaliados.

Modelos	Coeficientes máximos	
	M	N
1	3	1
2	4	2
3	5	3

A metodologia de busca pela aproximação polinomial que melhor representasse o comportamento entre as variáveis do sistema de combustão foi feita através de variações nos coeficientes máximos M e N das variáveis de entrada. Três modelos foram implementados, com as características exibidas na Tabela 2.

Para avaliação da precisão dos modelos foram analisados como parâmetros de desempenho o coeficiente R-quadrado ( $R_2$ ), o coeficiente R-quadrado ajustado ( $R_2^a$ ) e raiz do erro quadrático médio (RMSE), sendo calculados como:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k (P_i - \hat{P}_i)^2}{\sum_{i=1}^k (P_i - \bar{y})^2}, \quad (5)$$

$$R_a^2 = 1 - \frac{(1 - R^2)(k - 1)}{k - p - 1}, \quad (6)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (P_i - \hat{P}_i)^2}{k}}, \quad (7)$$

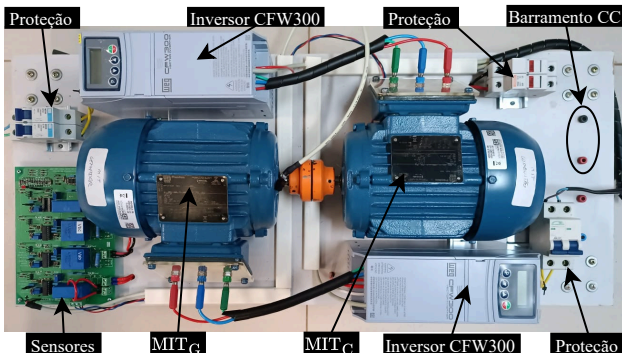


Figura 2. Bancada em escala reduzida para emulação do acoplamento entre um MCI e um GE através de MITs.

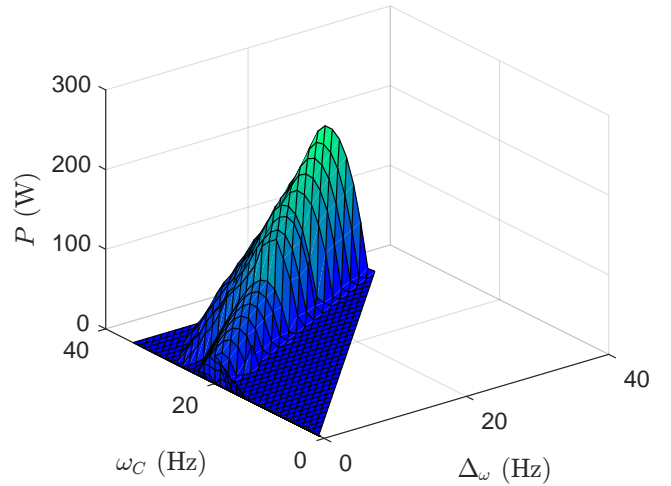


Figura 3. Potência na saída do MIT<sub>G</sub> da emulação do MCI.

sendo  $k$  o número total de observações,  $P$  os dados experimentais de potência coletados,  $\hat{P}$  os valores de potência previstos pelo modelo e  $p$  o número de preditores no modelo, onde  $p$  exclui explicitamente o termo de intercepto.

#### 4. RESULTADOS OBTIDOS

Nesta seção serão apresentados os resultados da modelagem matemática para o protótipo do sistema de combustão descrito, obtida através da *Curve Fitting Toolbox*.

##### 4.1 Mapa de potência obtido

A Figura 3 apresenta uma superfície construída a partir dos dados experimentais coletados na bancada, que delinea a relação entre a velocidade  $\omega_C$ , a diferença de velocidade  $\Delta\omega$  e a potência gerada  $P$ . Através da análise desta superfície, identificou-se um aumento significativo de potência correlacionado ao incremento de  $\Delta\omega$  na região de 20 a 30 Hz de  $\omega_C$ . Esta relação é particularmente notável na faixa de  $\Delta\omega$  de 20 a 27, zona mais acentuada na cor verde, que sinaliza o regime de máxima potência do MIT<sub>C</sub>. Esses valores destacam a importância de operar o sistema dentro de parâmetros que otimizem a interação entre torque e velocidade.

## 4.2 Modelos polinomiais

A aproximação polinomial realizada através da *Curve Fitting Toolbox* para diferentes combinações de  $M$  e  $N$ , apresentadas na Tabela 2, são exibidas nas Figuras 4, 5 e 6, onde cada modelo é comparado com os dados experimentais obtidos. É possível notar que o modelo 3 (Figura 6) apresenta melhor desempenho que os demais, especialmente na região de maior potência, uma vez que a curva traçada se aproxima melhor dos dados experimentais.

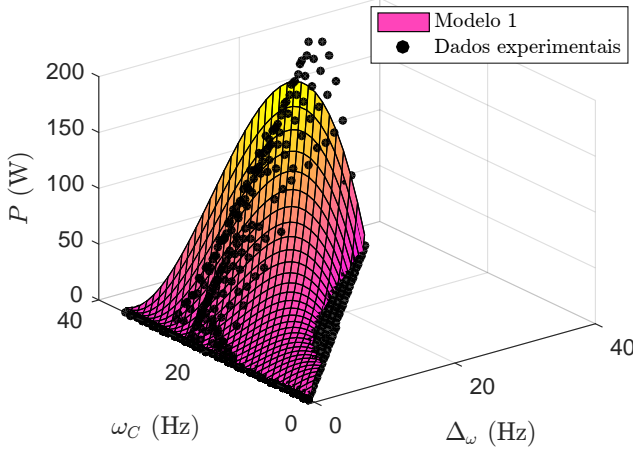


Figura 4. Comparação do ajuste do modelo 1 em relação aos dados experimentais.

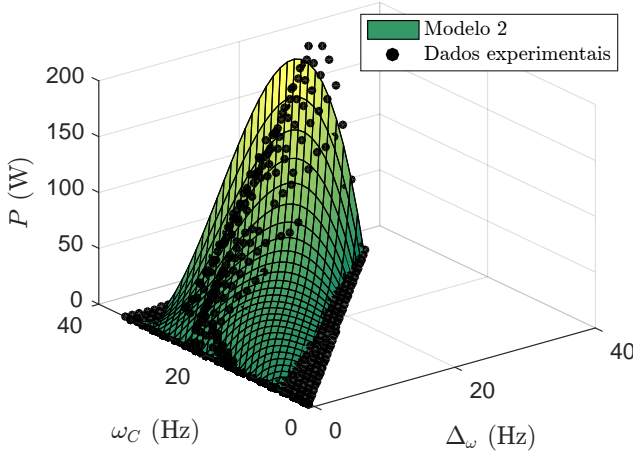


Figura 5. Comparação do ajuste do modelo 2 em relação aos dados experimentais.

Os coeficientes obtidos são expressos nas Tabelas 3, 4, 5. Os coeficientes para os três modelos polinomiais revelam um aumento na complexidade de modelagem, com o modelo 1 sendo o mais simples e o modelo 3 o mais complexo. No modelo 1, os coeficientes variam moderadamente, capturando tendências básicas. O Modelo 2, com graus mais altos tanto em  $M$  quanto em  $N$ , ajusta variações mais complexas e sutis nos dados. Já o modelo 3, com a maior complexidade entre eles, podendo modelar dinâmicas detalhadas dos dados.

O Modelo 3 se sobressai em relação aos Modelos 1 e 2, conforme demonstrado pelos parâmetros de desempenho avaliados da Tabela 6, apresentando os maiores valores de  $R^2$  e  $R_a^2$ , indicando que explica uma proporção significativamente maior da variabilidade dos dados, mesmo

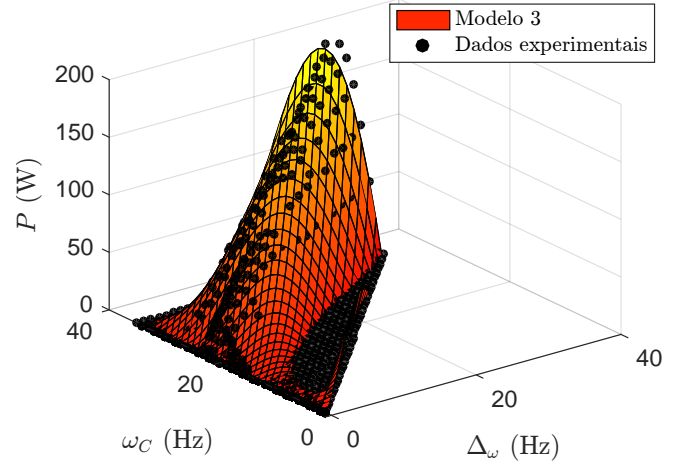


Figura 6. Comparação do ajuste do modelo 3 em relação aos dados experimentais.

Tabela 3. Coeficientes do modelo 1

		N	
		0	1
M	0	-0,9527	0,1591
	1	3,4	-0,1824
	2	-0,3655	0,0432
	3	-0,0310	0

Tabela 4. Coeficientes do modelo 2

		N		
		0	1	2
M	0	0,2755	-0,01295	0,002694
	1	-12,45	2,269	-0,06214
	2	-0,7008	-0,09056	0,00457
	3	0,08355	-0,003577	0
	4	-4,329e-05	0	0

Tabela 5. Coeficientes do modelo 3.

		N			
		0	1	2	3
M	0	1,075	$-6,58 \times 10^{-1}$	$7,49 \times 10^{-2}$	$-1,84 \times 10^{-3}$
	1	$6,12 \times 10^{-1}$	$5,03 \times 10^{-1}$	$-5,67 \times 10^{-2}$	$1,45 \times 10^{-3}$
	2	$-3,45 \times 10^{-1}$	$-2,48 \times 10^{-1}$	$3,42 \times 10^{-2}$	$-8,56 \times 10^{-4}$
	3	$3,36 \times 10^{-1}$	$-6,28 \times 10^{-2}$	$1,84 \times 10^{-3}$	0
	4	$2,48 \times 10^{-2}$	$-1,08 \times 10^{-3}$	$1,65 \times 10^{-3}$	0
	5	$1,37 \times 10^{-4}$	0	0	0

considerando ajustes para o número de preditores. Com o menor RMSE, suas previsões também são as mais próximas aos valores reais observados. Estas métricas reforçam a superioridade do Modelo 3 entre os modelos polinomiais analisados.

Tabela 6. Parâmetros de desempenho para análise dos modelos polinomiais obtidos.

Parâmetros	Modelo		
	1	2	3
$R^2$	0,7404	0,7717	0,8824
$R_a^2$	0,7392	0,7696	0,8807
RMSE (W)	19,1	17,9553	12,92

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho demonstrou a aplicabilidade de uma bancada em escala reduzida para emular um sistema de combustão e coletar dados essenciais para o mapeamento de potência. Utilizando o *Curve Fitting Toolbox* do software MATLAB<sup>®</sup>, ajustou-se o controle dos inversores de

frequência para manter  $\Delta\omega > 0$ , com  $\omega_C$  e  $\omega_G$  variando até o limite superior de 35 Hz, conforme os limites físicos do protótipo. Esta metodologia permitiu a associação de distintos níveis de potência com cada configuração de  $\Delta\omega$ , evidenciando a eficiência do método na avaliação da performance do sistema. Adicionalmente, com os dados coletados, gerou-se uma superfície analítica no *Curve Fitting App*, onde as variáveis  $x = \omega_C$ ,  $y = \Delta\omega$ , e  $z = P$  foram definidas como representantes da velocidade do motor, diferença de velocidade, e potência, respectivamente.

O principal objetivo deste estudo foi desenvolver um modelo equacional polinomial que descreve a relação matemática entre potência, velocidade e abertura da válvula, com o propósito de aplicá-lo em estratégias de controle para o gerenciamento de energia. Para atingir esse objetivo, foram realizadas várias simulações utilizando o *Curve Fitting App*, selecionando o modelo polinomial que mais adequadamente representa a superfície gerada pelo mapa de potência. Este processo meticuloso assegurou a escolha de um modelo que não apenas facilita a predição precisa, mas também a otimização das operações do sistema. O resultado obtido através da análise dos modelos polinomiais desenvolvidos para um protótipo de sistema de combustão demonstrou que o Modelo 3 é superior aos demais modelos considerados. As métricas de desempenho, conforme apresentadas na Tabela 6, destacam a eficácia do Modelo 3. Este modelo alcançou o maior valor de  $R^2 = 0,8824$  e  $R_a^2 = 0,8807$ , evidenciando sua capacidade de explicar uma proporção significativa da variabilidade dos dados, o que é essencial para a confiabilidade nas previsões de desempenho do sistema. A precisão das previsões foi ainda reforçada pelo menor RMSE de 12,92 W, corroborando a superioridade do Modelo 3 sobre os modelos anteriores.

Portanto, é possível projetar estratégias de controle a partir do modelo de polinomial final, que apresenta uma aproximação muito próxima do comportamento original, criando possibilidades de implementação que refletem de maneira mais precisa à situação real simulada pelo sistema.

#### AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao suporte financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) processo nº 2022/00628-9 e 2020/05865-3, CNPq 204540 e 312664/2021-4 (PQ), FAPEMIG APQ – 01028-19, CAPES 88887.682783/2022-00 e Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa-Fundep Rota 2030/Linha V 27192/27.

#### REFERÊNCIAS

Fajri, P., Lotfi, N., and Ferdowsi, M. (2018). Development of a series hybrid electric vehicle laboratory test bench

with hardware-in-the-loop capabilities. In *2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia)*, 3223–3228. IEEE. doi:10.23919/IPEC.2018.8507697. URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/8507697>.

Gauchia, L. and Sanz, J. (2010). A per-unit hardware-in-the-loop simulation of a fuel cell/battery hybrid energy system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(4), 1186–1194. doi:10.1109/TIE.2009.2036641. URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/5340635>.

Golebiewski, W., Prajowski, K., Danilecki, K., Lisowski, M., and Abramek, K.F. (2023). Reducing the fuel consumption of an hybrid electric vehicle with the use of model predictive control - case study. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 72(9), 11458–11467. doi:10.1109/TVT.2023.3266829. URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/3266829>.

International Energy Agency (2024). Global ev outlook 2024: Moving towards increased affordability. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>. Accessed on 20 April 2024.

Mei, P., Karimi, H.R., Xie, H., Chen, F., Huang, C., and Yang, S. (2023). A deep reinforcement learning approach to energy management control with connected information for hybrid electric vehicles. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 123, 106239. doi:10.1016/j.engappai.2023.106239. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197623004232>.

Narwaria, A., Sachan, S., and Swarnkar, P. (2023). A review on hybrid electric vehicle drive and its controlling using optimized control algorithm. In *Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Innovations in High-Speed Communication and Signal Processing*, 353–358. IEEE, Bhopal, India. doi:10.1109/IHCSP56702.2023.10127146.

Szpicca, D. (2019). New leiderman–khlystov coefficients for estimating engine full load characteristics and performance. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 32, 95. doi:10.1186/s10033-019-0417-8. URL <https://doi.org/10.1186/s10033-019-0417-8>.

Tabbache, B., Aboub, Y., Marouani, K., Kheloui, A., and Benbouzid, M. (2012). A simple and effective hardware-in-the-loop simulation platform for urban electric vehicles. In *2012 First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology*, 251–255. IEEE. doi:10.1109/REVET.2012.6195279. URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/6195279>.

Trigui, R., Jeanneret, B., Malaquin, B., and Plasse, C. (2009). Performance comparison of three storage systems for mild hevs using phil simulation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(8), 3959–3969. doi:10.1109/TVT.2009.2028146. URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/5170043>.