# Modelagem da corrente de armadura de uma máquina CC pela resposta em frequência

**André Augusto Ferreira [1,2], Davi Fernandes Lopes[2], Marina Silva Araujo[2], Rafael Malta Neves do Valle[2], André Luiz Marques Leopoldino[2,3] e Vinícius Foletto Montagner [4]**

[1] Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído, Universidade Federal de Juiz de Fora, MG. e-mail: andre.ferreira@ufjf.br

[2] Equipe Capivara de Eficiência Energética, Universidade Federal de Juiz de Fora, MG. e-mail: {marina.araujo, davi.fernandes, rafael.malta}@engenharia.ufjf.br

[3] Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, MG. e-mail: andre.leopoldino@engenharia.ufjf.br

[4] Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, RS. e-mail: vinicius.montagner@ufsm.br

**Abstract:** This paper details the modeling of the armature current in a permanent magnet direct current machine based on its frequency response characteristics. Additionally, the dynamic behavior model of the machine is derived using the conventional methodology, which encompasses three distinct tests: no-load, blocked rotor, and deceleration. The empirical findings corroborate the equivalency of the two models. The experimental approach of transient and frequency response analysis proves to be a successful experience towards the implementation of the new National Curricular Guidelines for Engineering.

**Resumo**: Este artigo apresenta a modelagem da corrente da corrente de armadura de uma máquina de corrente contínua de ímã permanente a partir da resposta em frequência. O modelo do comportamento dinâmico da máquina também é obtido a partir método convencional, que consiste de três ensaios: a vazio, rotor bloqueado e de desaceleração. Os resultados experimentais demonstram que os modelos são equivalentes. A abordagem experimental de análise de resposta transitória e em frequência mostra-se como uma experiência exitosa rumo a implantação das novas Diretrizes Curriculares Nacionais para as Engenharias.

*Keywords:* experimental identification of the transfer function, testing DC machines, engineering education.

*Palavras-chaves:* identificação experimental da função de transferência, ensaio de máquinas CC, educação em engenharia.

## 1. INTRODUÇÃO

Os modernos carros elétricos geralmente utilizam máquinas síncronas de ímãs permanentes, em virtude da sua elevada densidade de potência. No entanto, para a compreensão e aplicação dos conceitos de Controle de Sistemas Dinâmicos, em cursos de graduação, a experiência prévia do acionamento e do controle de uma máquina de corrente contínua (CC) de ímãs permanentes é mais apropriado, do ponto de vista didático.

Para realizar o controle linear de conjugado de uma máquina CC é apropriado conhecer o modelo de comportamento dinâmico da corrente de armadura em função de uma perturbação na tensão de alimentação. A despeito do método tradicional de ensaio de máquinas CC, na disciplina de Laboratório de Controle, ministrada nos cursos de Engenharia Elétrica - Robótica e Automação industrial e Engenharia Elétrica - Energia, um dos experimentos práticos consiste em obter o modelo de uma planta a partir de uma perturbação na razão cíclica de um conversor estático de potência. Se a resposta ao degrau de variação da razão cíclica corresponde a uma resposta transitória de primeira ou de segunda ordem, como é o caso da resposta em velocidade da máquina CC, o modelo é facilmente obtido. Este não é o caso da resposta transitória da corrente de armadura.

A função de transferência da corrente de armadura da máquina CC, apresenta um zero localizado no semiplano esquerdo, o que facilita o controle de conjugado, por ainda se tratar de um sistema de fase mínima. O método convencional de modelagem da máquina consiste em obter os parâmetros da máquina a partir dos ensaios de rotor

⋆ Agradecimentos à FAPEMIG pelo financiamento (Programa Santos Dumont, APQ-00736-19) e ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica e Tecnológica – PIBIC/FAPEMIG/UFJF.

bloqueado, a vazio e de desaceleração, conforme descrito em dos Santos et al. (2017) e em Sen (1996).

De acordo com a revisão bibliográfica realizada por Salah S.Z. and Abdelati (2010), existem diferentes técnicas e ferramentas para identificação do modelo de uma máquina de corrente contínua. Os autores Lord and Hwang (1977) elaboraram um procedimento para determinar os parâmetros do modelo a partir de curvas de resposta transitória de corrente de armadura e de velocidade de servomotores CC. Schulz (1983) descreve um método baseado na em frequência de ressonância, em que os parâmetros da máquina são determinados a partir de um circuito equivalente RLC ressonante série.

Uma outra maneira de obter o modelo de um sistema é a partir identificação experimental de funções de transferência, que é bem descrito em livros de Controle de Sistemas Dinâmicos, como em (Castrucci et al., 2018). Esse método consiste em introduzir uma perturbação senoidal, em diferentes frequências, e comparar com a resposta em regime permanente, também senoidal, de mesma frequência. O registro de um conjunto razoável de medidas de módulo e de defasamento angular entre as curvas de entrada e saída permite construir um diagrama de Bode. A partir de aproximações assintóticas é possível realizar a identificação aproximada do modelo do sistema.

O objetivo principal deste artigo é descrever o procedimento experimental para obtenção do modelo do comportamento dinâmico da corrente de armadura de uma máquina de corrente contínua a partir da identificação da função de transferência. Os objetivos específicos compreendem: *i)* descrever didaticamente um exemplo de experimento que auxilie na implantação das novas Diretrizes Curriculares Nacionais (DCN) das Engenharias nos cursos de Engenharia Elétrica da UFJF; *ii)* validar o modelo obtido pela identificação da função de transferência em comparação com o método convencional.

O artigo está organizado em quatro seções. Na primeira foi apresentada a motivação e os objetivos do trabalho. Na segunda seção é apresentado o modelo dinâmico teórico de uma máquina de corrente contínua de ímãs permanentes. Na terceira seção são descritos: *i)* a montagem experimental; *ii)* os materiais utilizados; *iii)* os ensaios para obter os parâmetros do modelo teórico; *iv)* a metodologia e os resultados para identificação experimental do modelo a partir da função de transferência. Na quarta seção é realizado um relato de experiência da substituição de uma bancada didática pela construção de protótipo para fins de aprimorar o saber fazer dos estudantes de curso de graduação em Engenharia Elétrica. Na última seção são apresentadas as considerações finais.

## 2. MODELO DA CORRENTE DE ARMADURA PARA UMA MÁQUINA DE CORRENTE CONTÍNUA DE ÍMÃS PERMANENTES

Na Fig. 1 é ilustrado o circuito eletromecânico equivalente de uma máquina de corrente contínua de ímãs permanentes. As variáveis e os parâmetros do circuito são descritos a seguir:

- $v_a$: tensão de alimentação ou tensão de armadura;
- $i_a$: corrente de armadura;
- $e_a$: força contraeletromtriz;
- $\omega$: velocidade de rotação;
- $R_a$: resistência de armadura;
- $L_a$: indutância de armadura;
- $J$: momento de inércia;
- $B$: coeficiente de atrito viscoso;
- $\tau_e$: conjugado eletromecânico ou desenvolvido;
- $\tau_m$: conjugado mecânico de carga.

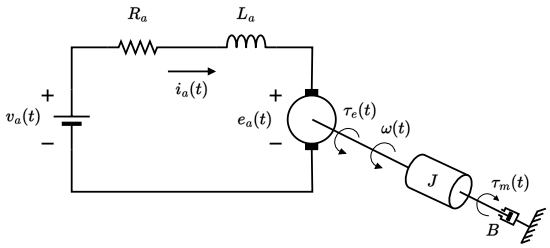


Figura 1. Circuito eletromecânico equivalente de uma máquina de corrente contínua de ímãs permanentes.

O modelo matemático do comportamento dinâmico de uma máquina de corrente contínua pode ser descrito pelas seguintes equações diferenciais (1) e (2):

$$v_a(t) = R_a\ i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_a(t)\,, \tag{1}$$

$$J\ \frac{\omega(t)}{dt} + B\ \omega(t) = \tau_e(t) - \tau_m(t)\,. \tag{2}$$

Como o fluxo no entreferro em uma máquina CC de ímãs permanentes pode ser admitido como constante, é possível utilizar as constantes de velocidade ($K_\omega$) e de conjugado ($K_t$) para expressar a proporcionalidade da força contraeletromoriz com a velocidade e do conjugado eletromecânico com a corrente de armadura, de acordo com as seguintes expressões:

$$e_a(t) = K_\omega\ \omega(t)\,, \tag{3}$$

$$\tau_e(t) = K_t\ i_a(t)\,. \tag{4}$$

Utilizando a transformada de Laplace, com condições iniciais nulas, é possível elaborar o diagrama de blocos ilustrado na Fig. 2.

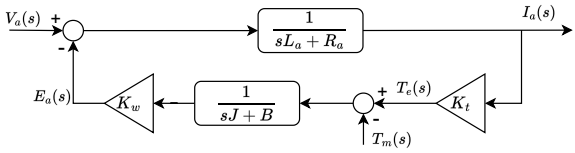


Figura 2. Diagrama de blocos com a dinâmica do motor.

Desprezando o conjugado mecânico de carga ($T_m(s) = 0$), que pode ser interpretado como uma entrada de distúrbio no sistema, é possível escrever a função de transferência que relaciona a corrente de armadura com uma perturbação na tensão de entrada como:

$$G(s) = \frac{sJ + B}{s^2 L_a J + s(L_a B + J R_a) + R_a B + K_t K_\omega}. \quad (5)$$

A função de transferência apresenta dois polos e um zero. Considerando-se uma entrada do tipo degrau, a saída corresponde a resposta transitória de um sistema de segunda ordem ponderada pela derivada desta mesma resposta. Como o efeito do zero não é desprezível na resposta transitória da corrente, não é usual a utilizar para identificar o modelo.

## 3. MODELAGEM EXPERIMENTAL

### *3.1 Montagem experimental*

A bancada experimental foi montada conforme diagrama esquemático apresentado na Fig. 3.

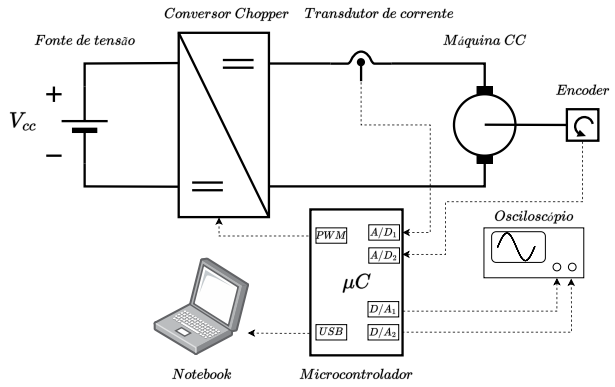


Figura 3. Esquemático da montagem em bancada.

A lista dos materiais usados nos ensaios é descrita a seguir:

- Fonte de tensão CC programável, IT6724H;
- Conversor *chopper* classe E (ponte H), módulo HW-039 BTS7960;
- Placa de desenvolvimento ESP32, ESP-WROOM32;
- Transdutor de corrente LEM, LA-55-P;
- *Encoder* incremental rotativo, LPD3066;
- Máquina CC de 24 V, CM808-028E;
- Osciloscópio digital Tektronix TDS2014-C;
- Sonda de corrente Tektronix A622;
- Disjuntor bipolar CC TOMZN, de 10 A;
- Multímetro digital Amprobe, AM-270;
- Notebook Acer Aspire A515-51-55QD.

### *3.2 Modelo parametrizado*

Nesta subseção foram realizados os ensaios convencionais (de rotor bloqueado, a vazio e de desaceleração) para identificação dos parâmetros do modelo da máquina CC.

*Ensaio de rotor bloqueado.* Neste ensaio, o rotor está bloqueado. Um alicate de pressão foi usado para impedir a rotação da máquina, como ilustrado na Fig. 4. Por questões de segurança térmica e para facilitar os cálculos, a máquina foi ensaiada com corrente de armadura, em regime permanente, de 1 A e 2 A.

Na rotação nula, a força contraeletromotriz também é nula. Portanto, o valor da resistência de armadura pode ser obtido diretamente pela razão entre a tensão de alimentação

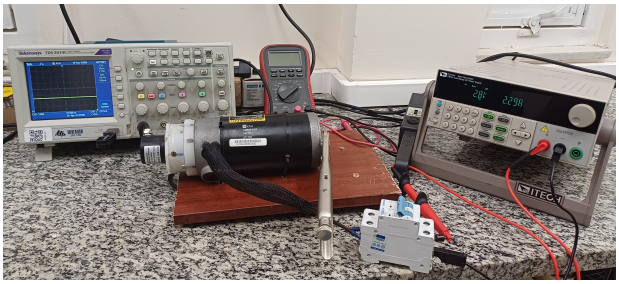

Figura 4. Montagem do experimento em bancada.

e corrente de armadura, ambas em regime permanente, conforme descrito em (6).

$$R_a = \frac{\lim_{t\to\infty} v_a(t)}{\lim_{t\to\infty} i_a(t)} = \frac{V_a}{I_a} \quad (6)$$

Na Tabela 1, estão descritos os valores medidos. Cada coluna, da variável tensão, corresponde ao ensaio para uma determinada posição do rotor travado. Cada linha corresponde a um valor específico de corrente de armadura, descrito na primeira coluna. O valor resistência elétrica varia entre 0,45 Ω e 0,78 Ω.

Tabela 1. Dados obtidos do ensaio de resistência de armadura com o rotor bloqueado.

| $I_a$ $(A)$ | $V_{a1}$ $(V)$ | $V_{a2}$ $(V)$ | $V_{a3}$ $(V)$ | $V_{a4}$ $(V)$ |
|---|---|---|---|---|
| 1,0 | 0,58 | 0,69 | 0,78 | 0,48 |
| 2,0 | 0,97 | 0,97 | 1,05 | 0,90 |

Com o rotor bloqueado, o circuito equivalente de armadura é um simples circuito RL série. Na Fig. 5 é possível observar a curva experimental de resposta transitória da corrente de armadura devido a um degrau na tensão de alimentação, em linha contínua. Em linha vermelha tracejada está a aproximação de primeira ordem, resultante da identificação da resposta transitória. A constante de tempo elétrica ($\tau_a$) corresponde ao intervalo de tempo entre a aplicação do degrau de tensão até alcançar 63,2% do valor de regime permanente da corrente de armadura. No presente caso, seu valor é de aproximadamente de 100 µs.

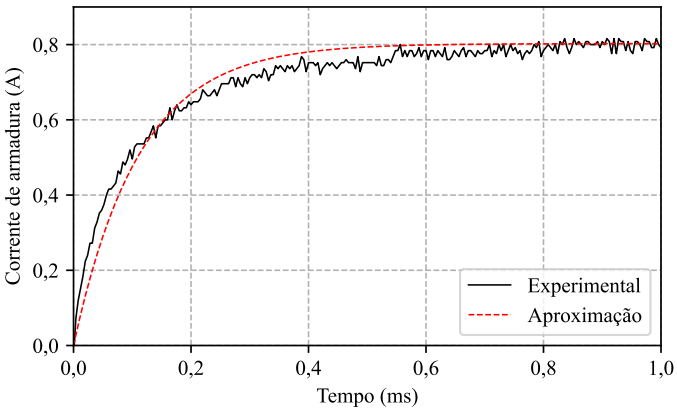


Figura 5. Resposta da corrente de armadura a um degrau na tensão de alimentação.

Foram realizadas diversas medições experimentais, em que foi observado que a constante de tempo elétrica ($\tau_a$) varia de 100 µs até 200 µs. Foi escolhido arbitrariamente os valores de 0,5 Ω para a resistência de armadura e de 200 µs para a constante de tempo elétrica. Em (7), é determinado o valor da indutância de armadura.

$$L_a = \tau_a \; R_a = 200 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}5 = 0{,}1\,\mathrm{mH}\,. \tag{7}$$

As necessárias aproximações na obtenção dos parâmetros, indicam que o modelo dinâmico é aproximado. Em outras palavras, existem variações paramétricas que devem ser consideradas no projeto de controladores.

*Ensaio a vazio.* No ensaio a vazio o rotor da máquina não está acoplado a qualquer carga mecânica em seu eixo. A partir das medições, em regime permanente, de tensão de alimentação ($V_a$) e da corrente de armadura ($I_a$), é possível estimar o valor da tensão contraeletromotriz ($E_a$). Para compensar os efeitos da não linearidade da máquina foram realizadas sete medições para valores diferentes de alimentação, conforme descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Dados obtidos do ensaio a vazio.

| Tensão de alimentação (V) | Corrente de armadura (A) | Rotação (RPM) | Velocidade angular (rad/s) |
|---|---|---|---|
| 21,0 | 1,308 | 3295 | 349,00 |
| 21,5 | 1,318 | 3393 | 356,50 |
| 22,0 | 1,332 | 3492 | 365,40 |
| 22,5 | 1,322 | 3558 | 370,47 |
| 23,0 | 1,330 | 3643 | 378,80 |
| 23,5 | 1,344 | 3723 | 386,50 |
| 24,0 | 1,351 | 3815 | 393,35 |

O valor médio das variáveis corresponde a: $V_a = 22{,}5\,\mathrm{V}$, $I_a = 1{,}329\,\mathrm{A}$ e $\Omega = 372{,}81\,\mathrm{rad/s}$. De acordo com (3), considerando-se a máquina em regime permanente e $\Omega$ representa a velocidade, é possível determinar a constante de velocidade ($K_\omega$), de acordo com (8).

$$K_\omega = \frac{E_a}{\Omega} = \frac{V_a - I_a \cdot R_a}{\Omega} = \; 0{,}06\,\mathrm{V/(rad/s)}\,. \tag{8}$$

A potência convertida pela máquina pode ser determinada pelo produto entre a força contraeletromotriz e a corrente de armadura, que é igual ao produto entre o conjugado eletromecânico e a velocidade angular. Utilizando (3) e (4), em uma máquina CC de ímãs permanentes, as constantes de conjugado e de velocidade são iguais, ou seja, $K_t = K_\omega$.

E ainda, em regime permanente e a vazio, a partir de (2) e (4), é possível obter o coeficiente de atrito viscoso de acordo com (9).

$$B \; = \; \frac{K_t \cdot I_a}{\Omega} \; = \; \frac{0{,}06 \cdot 1{,}329}{372{,}81} \; = \; 213{,}9 \;\; \mu N \cdot m \cdot s\,. \tag{9}$$

*Ensaio de desaceleração.* No ensaio de desaceleração, ilustrado na Fig. 6, o motor é alimentado com tensão nominal (24 V) até alcançar a velocidade de regime permanente. Em seguida, a alimentação é interrompida, ou seja, a corrente no motor torna-se nula. De acordo com (2), como o conjugado é nulo, a resposta transitória pode ser aproximado de um sistema de primeira ordem. A constante de tempo mecânica ($\tau_\omega$), pode ser medida a partir do intervalo de tempo em que a alimentação foi interrompida até a velocidade reduzir 63,2% do seu valor inicial. Foi determinado um valor de $\tau_\omega = 2{,}5\,\mathrm{s}$.

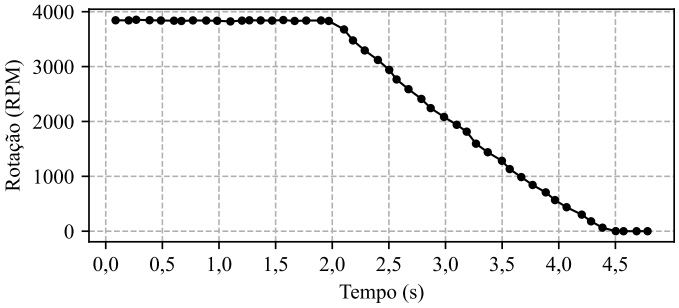


Figura 6. Resposta transitória da velocidade da máquina no ensaio de desaceleração.

O momento de inércia da máquina pode ser calculado a partir de (10).

$$J = B \cdot \tau_\omega = 213{,}4 \cdot 10^{-6} \cdot 2{,}5 = 533{,}5 \;\; \mu kg \cdot m^2\,. \tag{10}$$

*Função de transferência do modelo da corrente de armadura a partir dos parâmetros do sistema.* Na Tabela 3 estão organizadas as informações dos parâmetros da máquina obtidos experimentalmente.

Tabela 3. Parâmetros da máquina CC de ímãs permanentes

| Parâmetro | Valor identificado |
|---|---|
| Resistência de armadura ($R_a$) | 0,5 Ω |
| Indutância de armadura ($L_a$) | 100 µH |
| Momento de inércia (J) | 535,5 $\mu kg \cdot m^2$ |
| Coeficiente de atrito viscoso (B) | 213,4 $\mu N \cdot m \cdot s$ |
| Constante de velocidade ($K_\omega$) | 0,06 $V/rad/s$ |

De acordo com a (5), a função de transferência do modelo parametrizado do sistema $G_p(s)$ pode ser descrito numericamente pela função de transferência em (11).

$$G_p(s) = \frac{I_a(s)}{V_a(s)} = 10000 \frac{s + 0{,}4}{(s + 13{,}9)(s + 4986{,}5)}\,. \tag{11}$$

### *3.3 Modelo da resposta em frequência*

Na Fig. 7 é ilustrado o diagrama esquemático de simulação no *software* PLECS para obtenção da curva de resposta em frequência da corrente de armadura para perturbação na razão cíclica. Em bancada, como ilustrado na Fig. 4, a razão cíclica para acionamento dos interruptores do conversor *chopper* classe E (módulo BTS 7690) é gerado pelo microcontrolador.

Em virtude da não disponibilidade de um analisador de rede vetorial, a perturbação senoidal de entrada foi produzida no ESP32. Uma outra possibilidade seria utilizar um

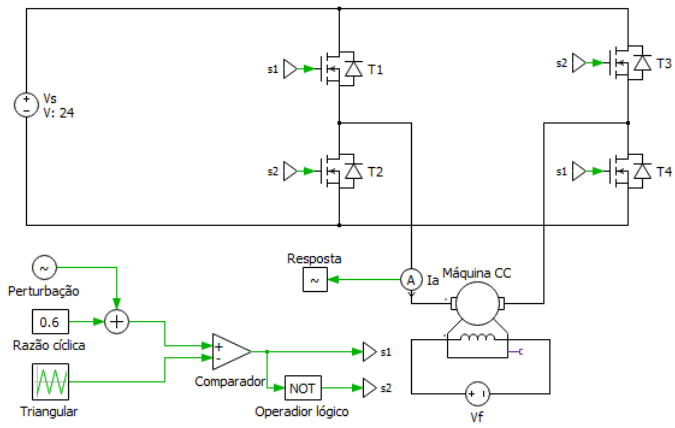


Figura 7. Esquemático da montagem para obtenção da resposta em frequência.

gerador de sinais de bancada, como em (Rodrigues, 2023). No entanto, devido a limitação do gerador de funções para frequências abaixo de 1 Hz, este trabalho utilizou a biblioteca Modulador de Largura de Pulso para Controle de Motor (MCPWM, do inglês, *Motor Control Pulse Width Modulator* disponibilizado pela Espressif Systems (2023, pág. 1203), como descrito em (Valle, 2023).

Como esperado, para um sistema linear invariante no tempo, para uma entrada senoidal, a saída também será senoidal, com a mesma frequência. No entanto, a amplitude e a fase entre as formas de onda podem alterar de acordo com a frequência. Na Fig. 8 são apresentados os sinais de entrada, à esquerda, e de saída, em duas portas distintas do conversor D/A do microcontrolador. É possível observar no gráfico da saída um elevado ruído.

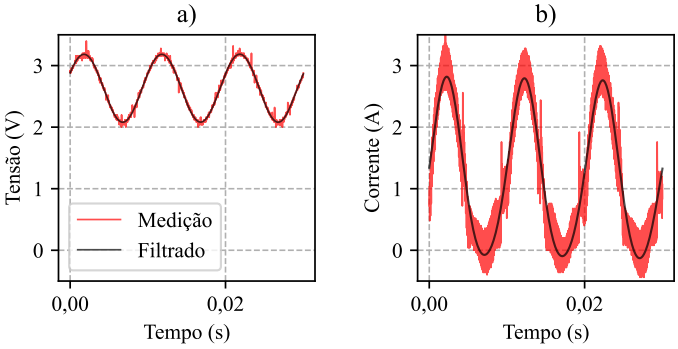


Figura 8. Curvas de entrada *a)* e saída *b)* para uma perturbação em 100 Hz. Em vermelho claro a medição bruta e em preto a medição filtrada.

Para efetuar a análise da amplitude de pico-a-pico e o defasamento angular entre as formas de onda de entrada e de saída, os dados amostrados foram tratados por um filtro digital passa-baixas Butterworth em que a frequência de corte é ajustada para o dobro do sinal de perturbação considerado. Na Fig. 9 são ilustradas as curvas de entrada e de saída, em regime permanente, para uma frequência de 100 Hz.

Foram produzidos 16 sinais de perturbações senoidais, desde na faixa de frequências compreendidas entre 0,01 Hz até 1.000 Hz. Na Tabela 4 estão descritos os valores do módulo da relação logarítmica entre a razão da corrente

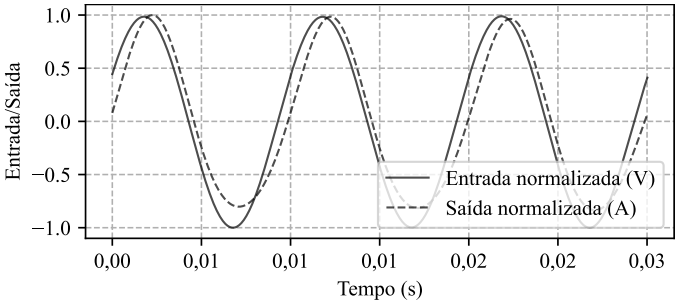


Figura 9. Sinais de entrada e de saída filtrados digitalmente e normalizados para obtenção de defasamento dos sinais na frequência de 100 Hz.

de armadura, $i_a(t)$, a tensão de armadura, $v_a(t)$, e de defasamento angular entre estas mesmas variáveis.

Tabela 4. Resultados do processamento das medições em função da frequência.

| Frequência (Hz) | Módulo (dB) | Fase (graus) |
|---|---|---|
| 0,01 | -21,58 | 16,56 |
| 0,02 | -23,38 | 20,88 |
| 0,05 | -19,05 | 54,72 |
| 0,10 | -13,69 | 67,68 |
| 0,20 | -10,17 | 77,04 |
| 0,50 | -1,91 | 69,84 |
| 1,00 | 2,69 | 63,36 |
| 2,00 | 5,58 | 39,60 |
| 5,00 | 6,67 | 21,60 |
| 10,00 | 6,29 | 2,88 |
| 20,00 | 5,19 | 2,16 |
| 50,00 | 4,16 | -5,40 |
| 100,00 | 8,38 | -14,40 |
| 200,00 | 6,1 | -21,60 |
| 500,00 | 1,68 | -36,00 |
| 1000,00 | -1,62 | -72,00 |

Na Fig. 10 é ilustrado o diagrama de Bode dos dados experimentais descritos na Tabela 4 e das assíntotas. É possível identificar três frequências de quina, uma referente ao zero na posição 0,3 rad/s e duas referentes aos polos nas posições 10 rad/s e 2.000 rad/s. O ganho em baixas frequências é de $-22$ dB, os seja, o ganho CC da planta é de 0,075. Deste modo, é possível escrever que a função de transferência do sistema indicado como o descrito em (12).

$$G_{id}(s) = 5000\frac{s+0{,}3}{(s+10)(s+2000)}\,. \tag{12}$$

Na Fig. 11 é possível observar o diagrama de Bode das curvas de resposta em frequência obtidas pela: *i)* medição da resposta da corrente de armadura a uma perturbação na entrada; *ii)* identificação da função de transferência do modelo a partir das assíntotas; *iii)* modelo parametrizado a partir de ensaios clássicos de máquinas de corrente contínua.

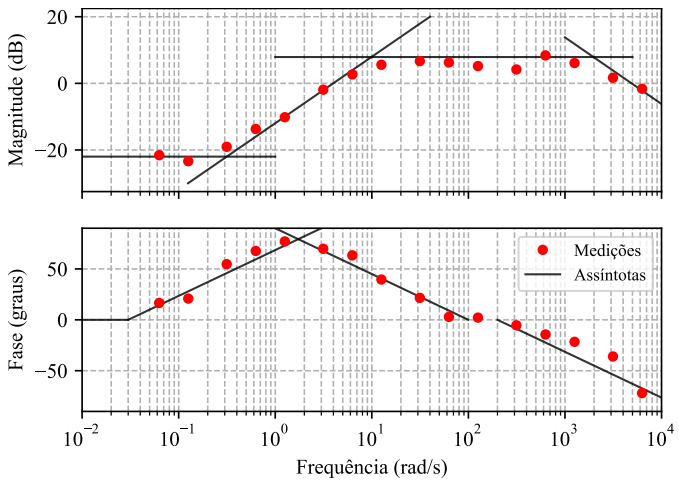


Figura 10. Gráfico de assíntotas e das medições experimentais de módulo e fase em função da frequência.

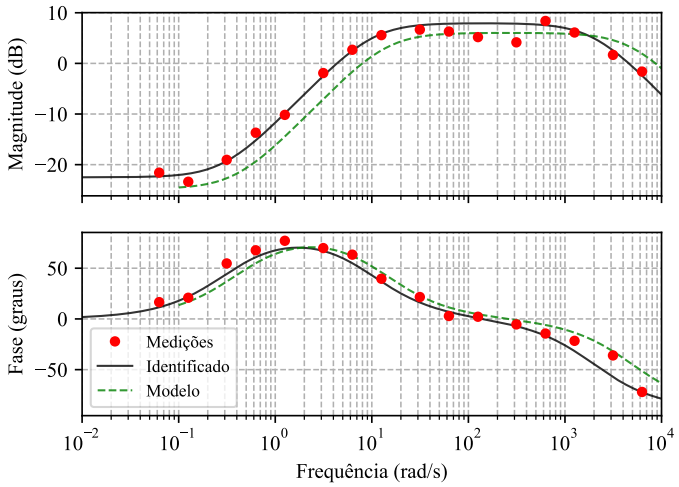


Figura 11. Diagrama de Bode das medições experimentais, identificação do sistema e modelo parametrizado.

É possível constatar uma adequada aproximação entre os resultados das curvas de resposta em frequência.

## 4. DISCUSSÃO

As novas Diretrizes Curriculares Nacionais para Curso de Graduação em Engenharia propõem a transição do modelo de formação por aprendizado de conteúdos para a formação de competências (MEC/CNE, 2019). Na academia, as atividades práticas de laboratório assumem papel crucial para articular o domínio dos saberes teóricos com as suas respectivas aplicações. As novas DCN estimulam a adoção de metodologias de aprendizagem ativa, trabalhos multidisciplinares em equipe, construção de protótipos, apresentações orais, redação de relatórios e outras atividades que estimulem a motivação e a produção intelectual dos estudantes, de acordo com Oliveira (2019).

Nas disciplinas de graduação de Controle de Sistemas Dinâmicos, ministrada em cursos de graduação em Engenharia Elétrica, é recorrente a dificuldade dos estudantes em considerar o amplificador de potência, os atuadores e os sensores no modelo de sistemas. Os livros didáticos rotineiramente simplificam a estrutura de controle, como em (Castrucci et al., 2018), (Franklin et al., 2013), (Maya and Leonardi, 2011), e (Ogata, 2010). A despeito de constarem exemplos práticos, os exercícios geralmente envolvem realimentação unitária e sensores, amplificadores de potência e atuadores são simplificados por ganhos constantes.

Em sistemas reais, é necessário integrar diferentes elementos e correlacionar conhecimentos de diferentes disciplinas. Bancadas didáticas modernas já preveem a integração de módulos e interface com *softwares*, para práticas de laboratório. No entanto, o custo de manutenção das bancadas é geralmente demasiado para grande parte das Instituições Federais de Ensino Superior (IFES). A título de exemplo, na disciplina de Laboratório de Controle eram realizados experimentos em uma bancada didática de servomotor CC para identificar o modelo, projetar controladores e analisar resultados experimentais. A despeito dos diversos experimentos que proporciona, foi observado que os estudantes apenas seguiam as instruções do roteiro e preenchiam os campos de um manual de atividades.

Atualmente, o emprego de microcontroladores de baixo custo, como Arduino e ESP32, para a construção de protótipos possibilita aprimorar significativamente o aprendizado. Os experimentos envolvem a integração de conversores estáticos, transdutores, condicionamento analógico de sinais, circuitos de interfaceamento para acionamento de interruptores e programação para aplicações em tempo real.

A disciplina de Laboratório de Controle tem periodicidade semestral e possui carga horária de 2 horas semanais. Na primeira etapa, os grupos de estudantes constroem um protótipo. Como exemplo de montagens, tem-se conversor elevador de tensão, conversor abaixador de tensão, acionamento de máquina CC, acionamento de máquina BLDC, aquecimento de chaleira, aquecimento de estufa, nível de água de reservatório e outros sistemas. Em seguida, realizam experimentos de resposta ao degrau e em frequência para identificar a função de transferência do modelo do comportamento dinâmico do sistema. Na segunda etapa, os estudantes projetam controladores no domínio $s$, discretizam os controladores e testam em bancada.

A construção de um protótipo e a realização de experimentos possibilita exercitar a formação por competências, uma vez que além das habilidades técnicas (saber fazer), o trabalho em equipe envolve as atitudes (saber ser) dos estudantes. Por intermédio avaliação por pares, é possível as mensurar e fornecer um *feedback* ao avaliado, ainda no curso de graduação.

A abordagem descrita neste artigo tem se revelado exitosa na disciplina ministrada e restrita ao ensino baseado em projeto. Para a formação por competências, é importante acompanhar o trabalho desenvolvidos pelas equipes de competição acadêmica. Nestas, é possível perceber, mais acentuadamente, a dedicação e o entusiasmo dos estudantes envolvidos na construção de um protótipo. Possivelmente, este fato se deve a aplicação dos conhecimentos, ao prestígio acadêmico, *network* profissional, aprendizado intensivo e desenvolvimento de habilidades comportamentais.

## 5. CONCLUSÃO

A principal contribuição do presente artigo é apresentar didaticamente o procedimento para modelagem experimental da corrente de armadura de uma máquina CC para a identificação experimental da função de transferência do modelo dinâmico.

A metodologia convencional consiste em realizar diferentes ensaios (a vazio, rotor bloqueado e desaceleração) para obter experimentalmente os parâmetros do modelo do comportamento dinâmico do sistema, tanto para a corrente de armadura, quanto para velocidade.

O procedimento para identificação experimental da função de transferência é teoricamente mais simples, uma vez que consiste basicamente em injetar uma perturbação e a comparar com a resposta de saída. No entanto, a execução deste tipo de ensaio pode ser bastante trabalhosa. No caso da resposta em frequência, envolve a repetição e registro de medições em uma ampla faixa de frequências. E ainda, modela o comportamento dinâmico de somente uma variável de saída, que no presente estudo é a corrente de armadura. No entanto, no caso de uma máquina CC, para modelar o comportamento dinâmico da velocidade, pode-se utilizar a resposta transitória a um degrau de entrada, pois o comportamento é de segunda ordem.

Uma das contribuições específicas deste trabalho se relaciona com o ensino. A técnica de identificação experimental da função de transferência, pelas respostas transitória ao degrau e em frequência, apesar de bem descritas na literatura, mostra-se adequada para melhorar a compreensão dos estudantes. Embora não tenha sido mensurado aumento do interesse dos estudantes, ele é perceptível em termos de horas dedicadas ao projeto e qualidade dos relatórios.

Os resultados comparativos resposta do modelo parametrizado e de identificação da função de transferência são suficientemente próximos. Ambos os modelos são aproximados. Como a máquina CC possui um comportamento estável, espera-se que a influência dessas aproximações seja desprezível no controle em malha fechada do sistema. Este assunto deverá ser tratado em trabalhos futuros, em especial, considerando-se variações paramétricas do modelo.

## REFERÊNCIAS

Castrucci, P.d.L., Bittar, A., and Sales, R.M. (2018). *Controle automático*. LTC, 2 edition.

dos Santos, A., Kasper, D., de Menezes, D., and Lara, R.X. (2017). *Identificação de parâmetros e simulação de motores cc com ímãs permanentes*. Trabalho de disciplina de graduação, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil.

Espressif Systems (2023). ESP-IDF programming guide. v5.1.2. URL `https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v5.1.2/esp32/esp-idf-en-v5.1.2-esp32.pdf`. [Acessado em: 12 de dez. de 2023].

Franklin, G.F., Powell, J.D., and Emami-Naeini, A. (2013). *Sistemas de controle para engenharia*. Bookman, Porto Alegre, 6 edition.

Lord, W. and Hwang, J.H. (1977). DC dervomotors-modeling and parameter determination. *IEEE Trans. on Ind App.*, IA-13(3), 234–243. doi:10.1109/TIA.1977.4503398.

Maya, P.A. and Leonardi, F. (2011). *Controle Essencial*. Pearson Prentice Hall, São Paulo, 1 edition.

MEC/CNE (2019). *Diretrizes curriculares nacionais do curso de graduação em engenharia*. Conselho Nacional de Educação - Câmara de Educação Superior, Brasília, DF. Resolução CNE/CES n$^0$2, de 24 de abril de 2019.

Ogata, K. (2010). *Engenharia de controle moderno*. Pearson Prentice Hall, São Paulo, 5 edition.

Oliveira, V.F.d.O. (2019). *A Engenharia e as novas DCNs: oportunidades para formar mais e melhores engenheiros*. LTC, Rio de Janeiro, 1 edition.

Rodrigues, C.A. (2023). *Modelagem e controle de motor de corrente contínua para aplicação em veículo elétrico de competição acadêmica*. Monografia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil.

Salah S.Z., M. and Abdelati, M. (2010). Parameters identification of a permanent magnet dc motor. In *Modelling, Identification, and Control*. Innsbruck, Austria. doi: 10.2316/P.2010.675-085.

Schulz, R.A. (1983). A frequency response method for determining the parameters of high-performance dc motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IE-30(1), 39–42. doi:10.1109/TIE.1983.356701.

Sen, P.C. (1996). *Principles of electric machines and power electronics*. John Wiley & Sons, 2 edition.

Valle, R.M.N.d. (2023). *Modelagem e controle do conjugado de um motor CC*. Monografia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil.