



ESTIMADOR AUTOMÁTICO DE VELOCIDADE DE MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA UTILIZANDO VARIÁVEIS ELÉTRICAS E PLATAFORMA ARDUINO

AUTOMATIC SPEED ESTIMATOR FOR A DC MOTOR USING ELECTRICAL VARIABLES AND THE ARDUINO PLATFORM

Enio Vieira Soares¹, Anderson Lúcio Figueiredo Silva¹, Guilherme Batista de Andrade¹, Bárbara Fernandes Caldeira¹, Gabriel de Oliveira Gomes¹ e Eben-Ezer Prates da Silveira¹

¹Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Campus de Itabira, Itabira – MG, Brasil.

Resumo

Este artigo apresenta o desenvolvimento e a avaliação experimental de um estimador automático de velocidade para motor de corrente contínua de excitação independente. As medições de tensão e corrente de armadura são processadas pela plataforma Arduino Nano para calcular a força contraeletromotriz e estimar a velocidade. A avaliação do desempenho metrológico do estimador aplicado ao motor foi realizada utilizando o tacômetro como referência, em dois pontos de operação estabilizados: sem carga e com carga resistiva. O erro absoluto, definido como a diferença em rotações por minuto em relação ao tacômetro, foi de 8 rpm sem carga e 5 rpm com carga; o erro relativo, obtido pela razão percentual entre essa diferença e a leitura de referência, foi de 0,44% e 0,29%, respectivamente. Também são apresentados o modelo dinâmico com a componente indutiva, uma extensão algorítmica de compensação térmica e uma análise teórica da resolução de quantização. Os resultados sustentam o uso do protótipo como prova de conceito didática e experimental nas condições avaliadas, sem constituir validação para baixas rotações, regimes transitórios ou operação industrial contínua.

Palavras-chave: Máquina de corrente contínua, Estimação de velocidade, Plataforma Arduino, Força contraeletromotriz, Instrumentação didática.

Abstract

This paper presents the development and experimental evaluation of an automatic speed estimator for a separately excited direct current motor. Armature voltage

and current measurements are processed by the Arduino Nano platform to calculate the back electromotive force and estimate speed. The metrological performance of the estimator applied to the motor was evaluated using a tachometer as reference at two stabilized operating points: no load and resistive load. The absolute error, defined as the difference in revolutions per minute with respect to the tachometer, was 8 rpm at no load and 5 rpm under load; the relative error, calculated as the percentage ratio between this difference and the reference reading, was 0.44% and 0.29%, respectively. The paper also presents the dynamic model including the inductive component, a proposed thermal-compensation algorithm, and a theoretical quantization-resolution analysis. The results support the use of the prototype as an educational and experimental proof of concept under the evaluated conditions, but do not constitute validation for low-speed operation, transient regimes, or continuous industrial operation.

Keywords: Direct current machine, Speed estimation, Arduino platform, Back electromotive force, Educational instrumentation.

1. INTRODUÇÃO

Motores de corrente contínua (MCCs) são máquinas elétricas de conversão eletromecânica amplamente utilizadas em bancadas didáticas, laboratórios de máquinas elétricas, instrumentação, robótica, acionamentos de velocidade variável e aplicações em que se deseja controle relativamente simples de conjugado e velocidade. Embora acionamentos em corrente alternada tenham se consolidado

em grande parte das aplicações industriais modernas, os MCCs continuam relevantes para o estudo de princípios fundamentais de conversão de energia, controle de velocidade e manutenção de máquinas rotativas (Chapman, 2012; Kosow, 2005; Umans, 2014).

A importância didática e técnica do MCC está associada à relação direta entre a tensão aplicada à armadura, a corrente de armadura, a força contraeletromotriz, o fluxo de campo e a velocidade de rotação. Em regime de fluxo aproximadamente constante, a velocidade pode ser relacionada à tensão de armadura descontada da queda ôhmica na resistência de armadura. Essa característica permite estimar a velocidade por meio de grandezas elétricas acessíveis, sem necessariamente instalar sensores mecânicos no eixo (Krause et al., 2013; Leonhard, 2001).

A medição direta de velocidade em máquinas rotativas pode ser realizada por tacômetros, encoders, sensores Hall e tacogeradores. Esses dispositivos fornecem boa referência experimental, mas aumentam a quantidade de componentes, exigem acoplamento mecânico ou acesso físico ao eixo, podem adicionar pontos de falha e, em determinadas condições de manutenção, dificultar a instrumentação da máquina. Por esse motivo, técnicas de estimação sem sensor mecânico, frequentemente denominadas *sensorless*, têm sido estudadas para reduzir custo, simplificar a instrumentação e aumentar a robustez de sistemas de acionamento (Gamazo-Real et al., 2010; Radcliffe & Kumar, 2015; Vázquez-Sánchez et al., 2012, 2017).

Em motores CC com escovas, a estimação de velocidade pode ser realizada por diferentes abordagens, incluindo métodos baseados no modelo dinâmico da máquina, na força contraeletromotriz, na ondulação de corrente e em técnicas computacionais de reconhecimento de padrões. Métodos mais complexos podem empregar observadores, filtros, redes neurais ou algoritmos de identificação. Contudo, para aplicações didáticas e experimentais, uma solução baseada na força contraeletromotriz apresenta a vantagem de ser simples, de baixo custo e compatível com microcontroladores de uso difundido (Mellah et al., 2018; Radcliffe & Kumar, 2015; Vázquez-Sánchez et al., 2012).

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo desenvolver e avaliar um estimador automático de velocidade para um MCC de excitação indepen-

dente, utilizando medições de tensão e corrente de armadura processadas pela plataforma Arduino Nano. O sistema proposto foi implementado em um protótipo de baixo custo com condicionamento analógico de sinais, placa de circuito impresso e display LCD. A avaliação experimental foi realizada utilizando medições obtidas por tacômetro e tacogerador, considerando dois pontos de operação estabilizados: sem carga e com carga resistiva. Para quantificar o desempenho metrológico, adotaram-se o erro absoluto, definido como a diferença em rpm entre cada leitura e o tacômetro, e o erro relativo, correspondente a essa diferença dividida pela leitura do tacômetro e expressa em percentual.

A contribuição didática consiste em permitir que o estudante relacione, em uma mesma montagem, a tensão de armadura, a corrente, a força contraeletromotriz e a velocidade, além de observar efeitos de calibração, resolução do conversor analógico-digital e variação de parâmetros da máquina. Desse modo, o protótipo pode apoiar atividades de aprendizagem baseada em experimentação, nas quais o modelo matemático é comparado diretamente com medições de bancada.

O artigo caracteriza-se como técnico-aplicado e como prova de conceito. Seu escopo experimental está restrito aos dois pontos estabilizados registrados na campanha de ensaios. Portanto, os resultados não são generalizados para toda a faixa de 0 a 1800 rpm, para regimes transitórios ou para operação industrial contínua. Como complementação teórica, apresentam-se o modelo dinâmico da armadura, uma proposta de compensação térmica e uma análise da resolução de quantização do sistema.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

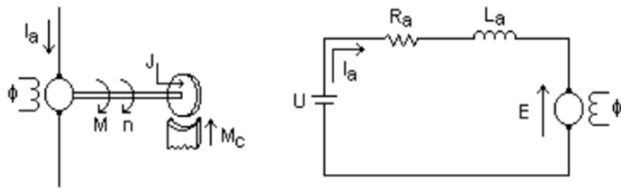
2.1. Modelo elétrico do MCC

A Figura 1 apresenta a representação simplificada da parte elétrica da armadura e da parte mecânica de um MCC com excitação independente. Nessa configuração, o circuito de campo é alimentado separadamente do circuito de armadura, permitindo manter o fluxo magnético aproximadamente constante durante os ensaios e facilitando a análise da relação entre tensão, corrente e velocidade.

O conjugado eletromagnético produzido por um MCC pode ser representado por

$$T_e = K_t \cdot \phi \cdot I_a, \quad (1)$$

Figura 1. Representação simplificada do circuito de armadura e da parte mecânica do MCC com excitação independente.



Fonte: Adaptado do material técnico utilizado no desenvolvimento do estudo.

em que T_e é o conjugado eletromagnético, K_t é a constante de torque, ϕ é o fluxo magnético e I_a é a corrente de armadura (Chapman, 2012; Krause et al., 2013).

A formulação dinâmica do circuito de armadura, que inclui a resistência, a indutância e a força contraeletromotriz, é dada por (Krause et al., 2013; Mellah et al., 2018)

$$V_a(t) = E(t) + R_a(T)I_a(t) + L_a \frac{dI_a(t)}{dt}, \quad (2)$$

em que V_a é a tensão de armadura, E é a força contraeletromotriz, $R_a(T)$ é a resistência de armadura dependente da temperatura, L_a é a indutância de armadura e dI_a/dt é a derivada temporal da corrente. A força contraeletromotriz é proporcional ao fluxo e à velocidade da máquina, conforme

$$E = k \cdot \phi \cdot n, \quad (3)$$

sendo k uma constante construtiva e n a velocidade de rotação. Para fluxo aproximadamente constante, define-se um coeficiente de calibração K_n , em rpm/V, que relaciona a força contraeletromotriz à velocidade. A formulação dinâmica do estimador pode, então, ser escrita como

$$n_{est,d} = K_n \left[V_a - R_a(T)I_a - L_a \frac{dI_a}{dt} \right]. \quad (4)$$

Nos pontos de operação estabilizados avaliados neste trabalho, dI_a/dt é aproximadamente nulo. Adotando também a resistência de referência utilizada na calibração, a Equação (4) reduz-se à expressão implementada no protótipo:

$$n_{est} = K_n (V_a - R_{a,ref} I_a). \quad (5)$$

Essa separação entre o modelo completo e a aproximação implementada deixa explícito que o estimador foi concebido para regime quase permanente. Em transientes rápidos, a omissão do termo indutivo pode produzir erro adicional, sobretudo quando a corrente varia de forma acentuada.

2.2. Compensação térmica proposta

A resistência do enrolamento de armadura varia com a temperatura. Considerando a aproximação linear usual para condutores de cobre, uma compensação simples por software pode ser expressa por (Mellah et al., 2018)

$$R_a(T) = R_{a,ref} [1 + \alpha_{Cu}(T - T_{ref})], \quad (6)$$

em que $R_{a,ref}$ é a resistência medida na temperatura de referência T_{ref} e α_{Cu} é o coeficiente térmico adotado para o cobre. A resistência compensada é inserida na Equação (4). Em uma implementação prática, a temperatura pode ser obtida por sensor instalado próximo ao enrolamento ou por um estimador térmico. O algoritmo proposto consiste em: adquirir V_a , I_a e T ; filtrar as leituras; atualizar $R_a(T)$; estimar dI_a/dt por diferença finita filtrada; calcular E ; e, por fim, calcular $n_{est,d}$.

A extensão térmica e o termo indutivo são apresentados como possibilidades de aprimoramento metodológico, mas não foram validados experimentalmente no protótipo desenvolvido. Métodos de estimação conjunta de velocidade, temperatura e resistência são discutidos na literatura e podem orientar versões futuras (Krause et al., 2013; Mellah et al., 2018).

2.3. Medição e estimação de velocidade

O tacômetro fornece medição direta da velocidade do eixo e, por isso, foi utilizado como referência principal para cálculo dos erros. O tacogerador, por sua vez, fornece uma tensão proporcional à velocidade de rotação, sendo uma alternativa clássica em sistemas de medição e controle de velocidade. Apesar de sua utilidade, o tacogerador requer acoplamento mecânico e aumenta a quantidade de componentes instalados no eixo da máquina.

A estimação por variáveis elétricas busca reduzir essa dependência de sensores mecânicos. No protótipo desenvolvido, a tensão e a corrente de armadura foram condicionadas para a faixa de entrada do Arduino Nano. Em seguida, as leituras analógicas

Tabela 1. Nomenclatura das principais variáveis utilizadas no estimador.

Variável	Descrição	Unidade	Variável	Descrição	Unidade
E	Força contraeletromotriz	V	T_e	Conjugado eletromagnético	N·m
V_a	Tensão de armadura	V	L_a	Indutância de armadura	H
R_a	Resistência de armadura	Ω	T	Temperatura da armadura	°C
I_a	Corrente de armadura	A	K_n	Coefficiente de calibração	rpm/V
ϕ	Fluxo magnético	Wb	n_{est}	Velocidade estimada	rpm

Fonte: Elaborado a partir das variáveis do modelo do MCC.

Tabela 2. Principais componentes utilizados no desenvolvimento do protótipo.

Qtd.	Componente	Especificação principal
1	Arduino Nano	Placa de desenvolvimento com entradas analógicas de 10 bits
1	Display LCD	16 colunas x 2 linhas, com comunicação por módulo I2C
2	Sensor de corrente	ACS712, saída analógica por efeito Hall
2	Resistor	4,7 k Ω
2	Resistor	470 k Ω
1	Fonte chaveada	12 V
1	Caixa plástica	200 x 200 x 100 mm
8	Bornes fêmea	Conexão de 4 mm para acesso aos sinais
1	Placa de circuito impresso	Montagem do circuito de condicionamento e aquisição

Fonte: Elaborado a partir dos componentes utilizados na montagem experimental.

foram convertidas em grandezas reais e aplicadas à Equação (5). A expressão “em tempo real”, neste contexto, significa atualização automática durante a operação da bancada, e não acompanhamento de transientes rápidos, pois a rotina realiza média de 2049 amostras e alterna as telas do display com atrasos programados.

A Tabela 1 resume as principais variáveis utilizadas na formulação matemática e na implementação experimental.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Componentes do protótipo

O protótipo foi concebido para medir grandezas elétricas do MCC, processar os dados em microcontrolador e apresentar a velocidade estimada em display LCD. A Tabela 2 apresenta os principais componentes utilizados. A escolha considerou baixo custo, facilidade de aquisição e compatibilidade com a faixa de sinais dos ensaios.

O Arduino Nano foi adotado por apresentar dimensões reduzidas, baixo custo e entradas analógicas compatíveis com a aplicação. De acordo com

a documentação do fabricante, a placa possui conversor analógico-digital de 10 bits e faixa padrão de entrada associada à alimentação do microcontrolador (Arduino, 2026). Os sensores ACS712 foram empregados para medição de corrente, pois fornecem saída analógica proporcional à corrente medida e isolamento por efeito Hall (Allegro MicroSystems, 2026).

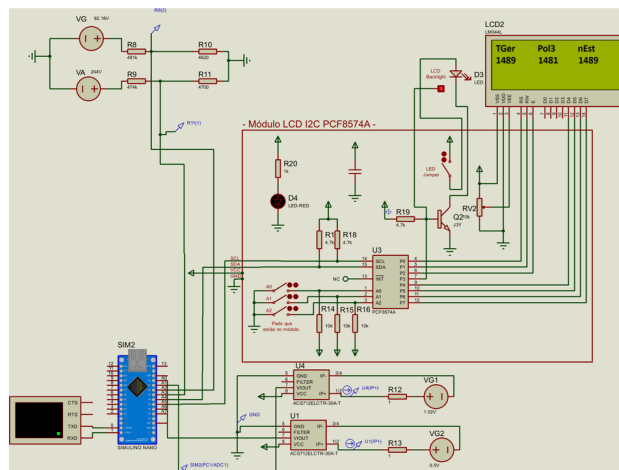
A adequação das tensões medidas à faixa de entrada do Arduino foi realizada por divisores resistivos. Os valores de resistência utilizados foram 4,7 k Ω e 470 k Ω , de modo a reduzir a tensão da armadura e a tensão do tacogerador para níveis compatíveis com o conversor analógico-digital. Para os sensores de corrente, adotou-se sensibilidade de 66 mV/A, correspondente à versão empregada no protótipo.

3.2. Simulação e projeto eletrônico

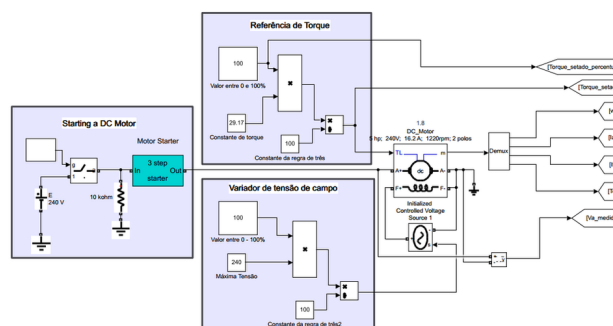
Antes da implementação física, foram realizadas simulações para verificar o comportamento dos circuitos e a consistência da lógica de aquisição. O software Proteus foi utilizado para testar o circuito eletrônico, a comunicação com o display e a integração

Figura 2. Simulações utilizadas durante o desenvolvimento: (a) circuito eletrônico no Proteus; (b) modelo do MCC no Simulink; (c) detalhamento da simulação do MCC.

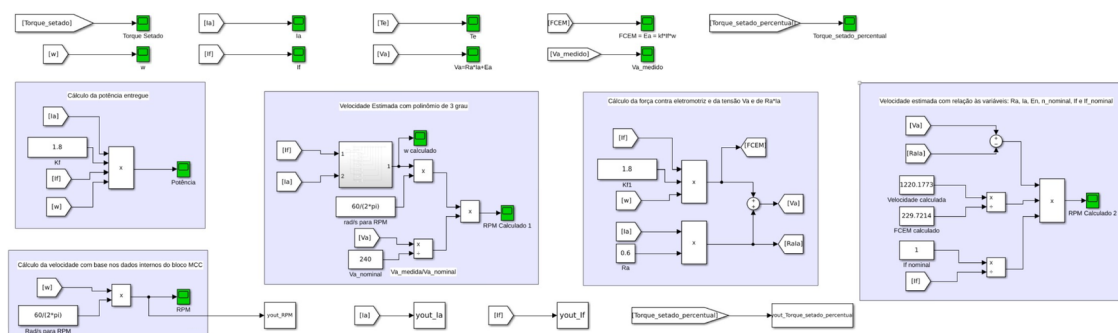
a) Simulação eletrônica no Proteus



b) Modelo do motor CC no Simulink



c) Detalhamento da simulação no Simulink



Fonte: Elaborado a partir das simulações desenvolvidas no estudo.

dos periféricos ao Arduino. Em paralelo, utilizou-se o Simulink para representar a dinâmica do MCC e verificar o comportamento esperado do sistema de acionamento. A documentação do Simscape Electrical descreve o bloco de motor CC por parâmetros elétricos, mecânicos e de conjugado, permitindo representar resistência, indutância e força contraeletromotriz (MathWorks, 2026).

O projeto do esquemático eletrônico e da placa de circuito impresso foi realizado no EAGLE. Essa

ferramenta permite integrar esquemático, posicionamento de componentes e roteamento de trilhas para elaboração de placas de circuito impresso (Autodesk, 2026). A Figura 3 apresenta o esquemático do circuito e o desenho da placa desenvolvida.


```

12  lcd.setBacklight(HIGH);
13  lcd.clear();
14  lcd.setCursor (0, 0);
15  lcd.print ("Est. de vel. MCC");
16  pinMode(A0, INPUT);
17  pinMode(A1, INPUT);
18  pinMode(A2, INPUT);
19  pinMode(A3, INPUT);
20  Fc_Va = 0.492918201*1.0084010084;
21  Fc_Vg = 0.5246296675*0.9833;
22  Fc_Ia = 0.066*1.23198836;
23  Vg_nom = 110.6;
24  Va_nom = 220;
25  Vel_nom = 1800;
26  FCEM_nom = 290.6;
27  Ra = 1.298;
28  Vel_ger_2 = 0;
29  Vel_estimada_2 = 0;
30  Imed=0;
31  i = 0;
32  Vamed=0;
33  Serial.begin(9600);
34  delay(500);
35  }
36  void loop() {
37    Vel_ger_2 = 0;
38    Vel_estimada_2 = 0;
39    i = 0;
40    Imed=0;
41    Vamed=0;
42    for (i = 0; i <= 2048; i++) {
43      Va = analogRead(A3);
44      Ia = analogRead(A1);
45      Vg = analogRead(A2);
46      Va = Fc_Va * Va;
47      Vg = Fc_Vg * Vg;
48      Ia = (Ia - 510) * Fc_Ia;
49      Vel_ger = (Vg * Vel_nom) /
50      Vg_nom;
51      Vel_ger_2 = Vel_ger_2 + Vel_ger
52      ;
53      Imed=Imed+Ia;
54      Vamed=Vamed+Va;
55    }
56    Vel_ger = Vel_ger_2 / i;
57    Imed=Imed/i;
58    Vamed=Vamed/i;
59    Vel_estimada = (Vamed - Ra * Imed
60    ) * (Vel_nom / FCEM_nom);
61    lcd.clear();
62    lcd.setCursor (0, 0);
63    lcd.print ("TGer");
64    lcd.setCursor (8, 0);
65    lcd.print ("nEst");
66    lcd.setCursor (0, 1);

```

```

64  lcd.print (Vel_ger, 0);
65  lcd.setCursor (8, 1);
66  lcd.print (Vel_estimada, 0);
67  delay(1500);
68  lcd.clear();
69  lcd.setCursor (0, 0);
70  lcd.print ("Va");
71  lcd.setCursor (8, 0);
72  lcd.print ("Ia");
73  lcd.setCursor (0, 1);
74  lcd.print (Va, 0);
75  lcd.setCursor (8, 1);
76  lcd.print (Imed*100, 0);
77  delay(1500);
78  }

```

A rotina embarcada foi estruturada de forma sequencial, buscando manter simplicidade e facilidade de manutenção. A Tabela 4 resume as principais etapas executadas pelo microcontrolador durante a operação do estimador.

Tabela 4. Etapas principais do algoritmo implementado no Arduino.

Etapas	Procedimento
1	Inicialização do display e das variáveis
2	Leitura analógica de tensão e corrente
3	Aplicação dos fatores de escala
4	Cálculo da força contraeletromotriz
5	Cálculo da velocidade estimada
6	Atualização das informações no display

Fonte: Elaborado a partir da lógica de programação do protótipo.

3.4. Análise teórica de resolução e faixa de validade

A resolução do conversor analógico-digital e os fatores de escala do firmware permitem avaliar, de forma analítica, a sensibilidade mínima do estimador. Uma variação de uma contagem no canal de tensão corresponde a $q_V = 0,4971$ V, enquanto uma contagem no canal de corrente corresponde a $q_I = 0,0813$ A. Considerando simultaneamente uma contagem em cada canal, um limite conservador de quantização é

$$\delta n_q = K_n (q_V + R_{a,ref} q_I) \approx 3,73 \text{ rpm.} \quad (7)$$

Esse valor não representa o erro total do equipamento, pois não inclui ruído, tolerâncias, deriva

Tabela 5. Extensão algorítmica proposta para compensação térmica e operação dinâmica.

Etapa	Procedimento proposto
1	Adquirir V_a , I_a e a temperatura T da armadura
2	Aplicar média móvel ou filtro digital às leituras
3	Calcular $R_a(T)$ pela Equação (6)
4	Estimar dI_a/dt por diferença finita e filtragem
5	Calcular $E = V_a - R_a(T)I_a - L_a(dI_a/dt)$
6	Calcular $n_{est,d} = K_n E$ e atualizar a indicação
7	Sinalizar operação fora da faixa calibrada ou temperatura inválida

Fonte: Proposta dos autores a partir do modelo dinâmico. Não validada experimentalmente neste estudo.

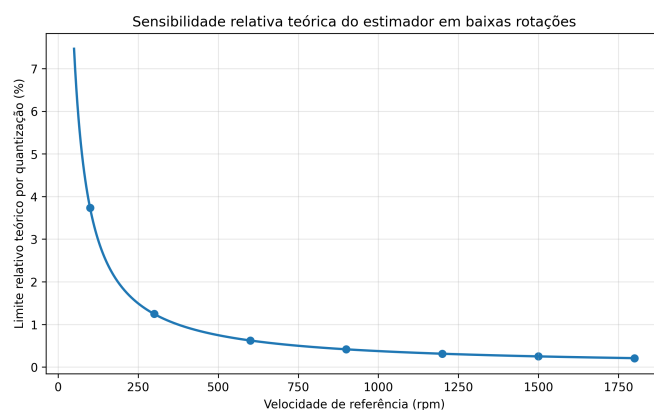
térmica, calibração ou variação do fluxo. Ele indica apenas a ordem de grandeza da resolução imposta pela digitalização. Como o erro relativo associado a uma incerteza absoluta aproximadamente constante é proporcional a $\delta n_q/n$, sua importância aumenta em baixas rotações. A Tabela 6 e a Figura 4 apresentam essa relação.

Tabela 6. Limite relativo teórico associado à quantização.

Velocidade (rpm)	$\delta n_q/n$ (%)
100	3,73
300	1,24
600	0,62
900	0,41
1200	0,31
1500	0,25
1800	0,21

Fonte: Cálculo analítico a partir dos fatores de conversão do firmware.

A análise confirma a observação de que métodos baseados em força contraeletromotriz perdem resolução relativa em baixas velocidades. Além disso, a rotina implementada calcula médias de 2049 amostras e possui dois atrasos de 1,5 s para alternância do display, o que a caracteriza como instrumento de leitura de pontos estabilizados, não como estimador de resposta rápida. Plataformas como ESP32 ou microcontroladores baseados em RP2040 podem

Figura 4. Sensibilidade relativa teórica do estimador em função da velocidade. A curva começa em 50 rpm, pois o erro relativo não é definido em rotação nula.

Fonte: Elaborado a partir da Equação (7). Análise teórica, não varredura experimental.

oferecer maior margem de processamento para filtragem, cálculo de derivada e aquisição mais rápida; contudo, uma comparação experimental exigiria reconstrução do protótipo e repetição dos ensaios. Por essa razão, tal comparação é indicada como trabalho futuro e não é apresentada como resultado deste estudo.

3.5. Montagem do protótipo e ensaio experimental

Após a validação preliminar por simulação, o circuito foi montado em placa de circuito impresso e acondicionado em uma caixa plástica com bornes de acesso aos sinais de entrada. A Figura 5 apresenta etapas da montagem, incluindo a placa de aquisição, a disposição interna, a visão frontal com display e a versão final do protótipo.

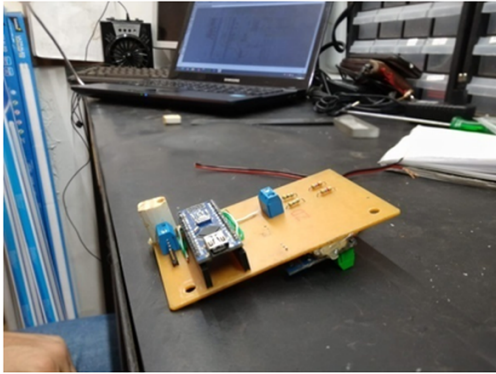
A avaliação experimental foi realizada em bancada de máquinas elétricas, utilizando alimentação ajustável, retificadores, instrumentos de medição, tacômetro, tacogerador e carga resistiva. A Figura 6 apresenta a montagem experimental e o conjunto de cargas utilizado.

Os principais equipamentos utilizados na bancada estão sintetizados na Tabela 7. Além desses instrumentos, foram empregados cabos de conexão banana-banana e acessórios de laboratório necessários à interligação segura entre alimentação, máquina, cargas e instrumentos de medição.

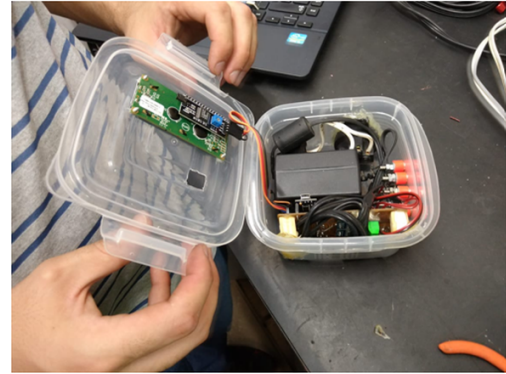
O erro absoluto e o erro relativo foram calculados

Figura 5. Protótipo desenvolvido: (a) placa de aquisição com Arduino; (b) visão interna; (c) visão frontal com display; (d) versão final do equipamento.

a) Placa de aquisição



b) Visão interna



c) Visão frontal



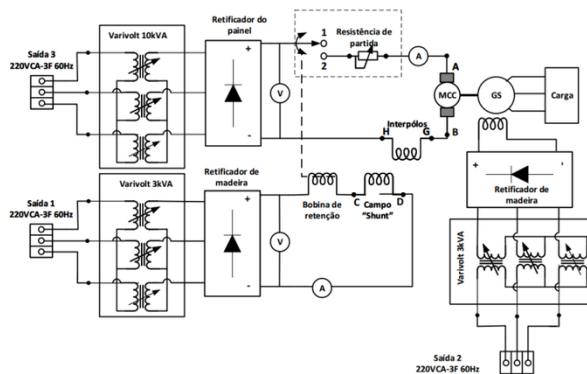
d) Versão final



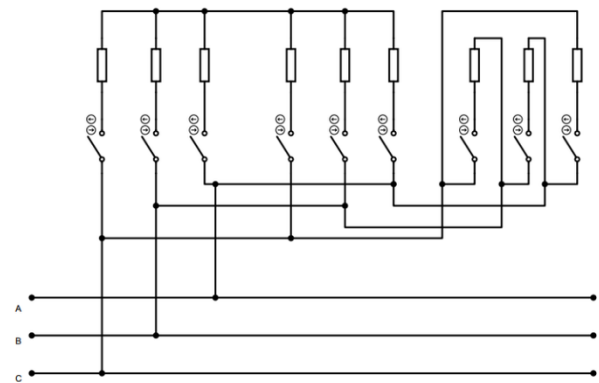
Fonte: Elaborado a partir da montagem experimental realizada.

Figura 6. Ensaio experimental: (a) montagem da bancada; (b) conjunto de cargas resistivas.

a) Montagem experimental



b) Cargas resistivas



Fonte: Elaborado a partir da montagem experimental realizada.

considerando o tacômetro como referência. Para uma medição genérica n_m , o erro absoluto foi definido por

$$\varepsilon_{abs} = |n_m - n_{tac}|, \quad (8)$$

enquanto o erro relativo percentual foi calculado

por

$$\varepsilon_{rel} = \frac{|n_m - n_{tac}|}{n_{tac}} \cdot 100. \quad (9)$$

O erro absoluto expressa, em rpm, quanto a leitura se afastou do tacômetro. O erro relativo nor-

Tabela 7. Equipamentos utilizados na montagem experimental.

Qtd.	Equipamento	Especificação principal
2	Varivolt	Trifásico, entrada 220 V, saída 0–220 V, 3 kVA
1	Varivolt	Trifásico, entrada 220 V, saída 0–220 V, 10 kVA
2	Multímetro	Instrumentos digitais para medição de tensão
3	Alicate amperímetro	Instrumentos para medição de corrente
1	Motor de corrente contínua	Máquina de 2 kW utilizada na bancada
2	Retificador	Pontes retificadoras trifásicas
9	Resistências	Cargas de 350 W/220 V cada
5	Tacômetro digital	Medição direta da velocidade do eixo
1	Reostato	Reostato de partida do MCC

Fonte: Elaborado a partir da montagem experimental do estudo.

maliza essa diferença pelo valor de referência e a apresenta em porcentagem, permitindo comparar medições realizadas em diferentes rotações. Essas grandezas foram calculadas separadamente para o estimador e para o tacogerador.

Durante o ensaio, os limites nominais da máquina foram monitorados para evitar operação inadequada. A partida foi realizada em etapas: primeiro energizou-se o circuito de campo e ajustou-se a tensão correspondente; em seguida, energizou-se o circuito de armadura; por fim, o reostato de partida foi ajustado gradualmente até que o motor atingisse operação estável. As medições disponíveis foram consolidadas em duas condições: motor sem carga e motor acoplado a carga resistiva. Em cada condição, o artigo registra um valor estabilizado por medidor; por isso, a análise é descritiva e não permite calcular repetibilidade, desvio-padrão ou intervalo de confiança.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na primeira condição de ensaio, o motor foi operado sem carga e com velocidade próxima à nominal. A Tabela 8 apresenta os valores de velocidade medidos por tacômetro, tacogerador e estimador. O tacômetro foi adotado como referência direta para o cálculo dos erros.

Observa-se que o estimador apresentou velocidade de 1813 rpm, enquanto o tacômetro indicou 1805 rpm. O erro absoluto foi, portanto, de 8 rpm, equivalente a 0,44% em relação ao valor de referência. O tacogerador apresentou erro de 5 rpm, correspondente a 0,28%. Ainda que o tacogerador tenha apresentado menor erro nessa condição, o estimador

Tabela 8. Velocidades do MCC na condição sem carga.

Medidor	Velocidade (rpm)
Tacômetro	1805
Tacogerador	1810
Estimador	1813

Fonte: Elaborado a partir das medições experimentais.

mantve desempenho satisfatório para uma solução de baixo custo baseada em medições elétricas.

Na segunda condição, a máquina foi acoplada a um conjunto de cargas resistivas. A Tabela 9 apresenta os valores obtidos. Nessa situação, a velocidade de referência medida pelo tacômetro foi de 1721 rpm, enquanto o estimador indicou 1726 rpm.

Tabela 9. Velocidades do MCC na condição com carga.

Medidor	Velocidade (rpm)
Tacômetro	1721
Tacogerador	1720
Estimador	1726

Fonte: Elaborado a partir das medições experimentais.

A Tabela 10 sintetiza os erros absolutos e relativos do tacogerador e do estimador em relação ao tacômetro. Verifica-se que o estimador apresentou erro inferior a 10 rpm nas duas condições avaliadas, com erro relativo inferior a 0,5%.

Nos dois pontos de operação analisados, o método baseado na força contraeletromotriz apresentou leituras próximas às do tacômetro. A diferença obser-

Tabela 10. Erro absoluto e relativo em relação ao tacômetro.

Condição	Medidor	Erro (rpm)	Erro (%)
Sem carga	Tacogerador	5	0,28
Sem carga	Estimador	8	0,44
Com carga	Tacogerador	1	0,06
Com carga	Estimador	5	0,29

Fonte: Elaborado a partir dos dados das Tabelas 8 e 9.

vada em relação ao tacômetro pode ser atribuída a diferentes fatores, como resolução do conversor analógico-digital, tolerância dos resistores, calibração dos divisores de tensão, sensibilidade do sensor de corrente, estabilidade da corrente de campo e variação térmica da resistência de armadura.

Durante a operação do sistema, foi necessário realizar calibração das medições de tensão e corrente de armadura em pontos específicos. Esse procedimento buscou aproximar os valores adquiridos pelo Arduino dos valores reais medidos por multímetro e alicate amperímetro. Após a calibração, o estimador apresentou resposta coerente nos dois pontos estabilizados registrados. Como não há série de repetições nem dados brutos de varredura, não se pode estimar a dispersão estatística ou extrapolar o erro para outras velocidades.

A comparação com o tacogerador também é relevante. Embora o tacogerador tenha apresentado erro menor nos ensaios, ele requer acoplamento mecânico e instrumentação adicional no eixo. O estimador proposto, por outro lado, utiliza variáveis elétricas disponíveis no circuito de armadura e pode ser integrado a bancadas didáticas ou sistemas de apoio à manutenção sem necessidade de sensor mecânico dedicado. Essa característica favorece aplicações em que simplicidade, custo e segurança operacional são critérios importantes.

Do ponto de vista prático, a principal limitação do método está na dependência dos parâmetros da máquina. Se o fluxo de campo variar significativamente ou se a resistência de armadura se alterar por aquecimento, a estimativa poderá ser afetada. A Equação (6) mostra como a compensação térmica pode ser incorporada, mas sua eficácia depende da medição ou estimação confiável da temperatura. Em regimes transitórios, o termo $L_a(dI_a/dt)$ também pode deixar de ser desprezível, e a rotina implementada não possui taxa de atualização compatível com rastrea-

mento rápido.

A análise teórica de quantização indica limite aproximado de 3,73 rpm por incremento simultâneo de uma contagem nos dois canais. Em 1800 rpm, isso corresponde a cerca de 0,21%; em 100 rpm, a cerca de 3,73%, antes de considerar as demais fontes de incerteza. Esse comportamento sustenta, por análise, a preocupação com a perda de resolução em baixas rotações, mas não substitui uma varredura experimental.

Assim, o desempenho observado é compatível com a finalidade de prova de conceito didática nos dois pontos avaliados. O trabalho não demonstra desempenho industrial, repetibilidade estatística, operação em baixas rotações ou comportamento transitório. O protótipo pode servir como base para versões futuras com sensor térmico, filtragem digital, aquisição de maior resolução, microcontrolador com maior capacidade de processamento e ensaios em múltiplos pontos de velocidade e carga.

5. CONCLUSÕES

Como contribuição principal, o trabalho disponibiliza uma plataforma didática de baixo custo que integra máquinas elétricas, instrumentação, aquisição de sinais e programação embarcada. Ao permitir a visualização conjunta da tensão de armadura, da corrente, da força contraeletromotriz e da velocidade estimada, o protótipo favorece a aprendizagem experimental e a comparação direta entre o modelo matemático e as medições de bancada.

Nos dois pontos estabilizados disponíveis, a avaliação metrológica em relação ao tacômetro resultou em erros absolutos de 8 rpm sem carga e 5 rpm com carga resistiva, equivalentes a erros relativos de 0,44% e 0,29%, respectivamente. Esses valores mostram funcionamento coerente como prova de conceito nas condições ensaiadas, sem permitir inferência sobre toda a faixa de velocidade.

A formulação dinâmica considerada inclui a componente indutiva $L_a(dI_a/dt)$ e a dependência térmica de $R_a(T)$, possibilitando propor uma extensão algorítmica para compensação térmica e operação dinâmica. A análise de quantização estimou um limite conservador de aproximadamente 3,73 rpm por incremento simultâneo de uma contagem nos canais de tensão e corrente, cujo impacto relativo aumenta em baixas rotações. Essas contribuições são teóricas e orientam aprimoramentos, mas não

substituem ensaios adicionais.

O alcance dos resultados permanece restrito a aplicações didáticas e experimentais em pontos próximos ao regime permanente, com calibração prévia. Não foram avaliados transientes, baixas rotações, deriva térmica de longa duração, repetibilidade estatística ou operação industrial contínua. Como continuidade, recomenda-se reconstruir a bancada, realizar uma varredura de 0 a 1800 rpm com repetições, instrumentar a temperatura da armadura, implementar o modelo dinâmico e comparar o Arduino Nano com plataformas de maior capacidade de processamento, como ESP32 ou RP2040.

■ REFERÊNCIAS

- Allegro Microsystems. (2026). *ACS712: Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor*. Allegro Microsystems. Obtido junho 24, 2026, de <https://www.allegromicro.com/-/media/files/datasheets/acs712-datasheet.ashx>
- Arduino. (2026). *Arduino Nano*. Arduino. Obtido junho 24, 2026, de <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>
- Autodesk. (2026). *EAGLE: PCB Design and Electrical Schematic Software*. Autodesk. Obtido junho 24, 2026, de <https://www.autodesk.com/products/eagle/overview>
- Chapman, S. J. (2012). *Electric Machinery Fundamentals* (5ª ed.). McGraw-Hill.
- Gamazo-Real, J.-C., Vázquez-Sánchez, E., & Gómez-Gil, J. (2010). Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques and Application Trends. *Sensors*, 10(7), 6901–6947. <https://doi.org/10.3390/s100706901>
- Kosow, I. I. (2005). *Máquinas elétricas e transformadores* (15ª ed.). Globo.
- Krause, P. C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S. D., & Pekarek, S. D. (2013). *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems* (3ª ed.). Wiley-IEEE Press.
- Leonhard, W. (2001). *Control of Electrical Drives* (3ª ed.). Springer.
- MathWorks. (2026). *DC Motor: DC Motor Model with Electrical and Torque Characteristics*. MathWorks. Obtido junho 24, 2026, de <https://www.mathworks.com/help/sps/ref/dcmotor.html>
- Mellah, H., Hemsas, K. E., Taleb, R., & Cecati, C. (2018). Estimation of Speed, Armature Temperature, and Resistance in Brushed DC Machines Using a CFNN Based on BFGS BP. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 26(6), 3181–3191. <https://doi.org/10.3906/elk-1711-330>
- Radcliffe, P., & Kumar, D. (2015). Sensorless Speed Measurement for Brushed DC Motors. *IET Power Electronics*, 8(11), 2223–2228.
- Umans, S. D. (2014). *Fitzgerald and Kingsley's Electric Machinery* (7ª ed.). McGraw-Hill.
- Vázquez-Sánchez, E., Gómez-Gil, J., Gamazo-Real, J.-C., & Díez-Higuera, J. F. (2012). A New Method for Sensorless Estimation of the Speed and Position in Brushed DC Motors Using Support Vector Machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(3), 1397–1408.
- Vázquez-Sánchez, E., Sottile, J., & Gómez-Gil, J. (2017). A Novel Method for Sensorless Speed Detection of Brushed DC Motors. *Applied Sciences*, 7(1), 14. <https://doi.org/10.3390/app7010014>