

DESENVOLVIMENTO DE UM CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO PARA CONTROLE DIGITAL DE VELOCIDADE DE MÁQUINA DE CORRENTE CONTÍNUA UTILIZANDO ESP32 E CONVERSOR DE QUATRO QUADRANTES

Guilherme Antônio Lopes de Oliveira¹, Cláudio Henrique Gomes dos Santos², Raul Vieira da Silva³

*1, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Divinópolis, Brasil
(guilhermenbr@gmail.com)*

2, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Divinópolis, Brasil

3, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Divinópolis, Brasil

Resumo: Este trabalho investiga o controle de velocidade de uma máquina de indução trifásica por meio do acoplamento com uma máquina de corrente contínua acionada por um conversor de quatro quadrantes. A proposta consiste no desenvolvimento de um circuito que substitui o ajuste manual do conversor, permitindo o controle via saída DAC do ESP32. Espera-se validar a solução como plataforma para pesquisas futuras em acionamentos e controle de máquinas elétricas.

Palavras-chave: Máquina de indução trifásica; máquina de corrente contínua; conversor 4Q; controle de velocidade; ESP32.

INTRODUÇÃO

O avanço dos sistemas de acionamento elétrico tem impulsionado o desenvolvimento de soluções capazes de proporcionar maior precisão, eficiência e flexibilidade no controle de máquinas elétricas. Nesse contexto, os conversores eletrônicos de potência desempenham papel fundamental ao possibilitar o controle da velocidade e do torque em diferentes aplicações industriais, contribuindo para o aumento da eficiência energética, da confiabilidade operacional e da qualidade dos processos produtivos (BOSE, 2002; RASHID, 2014).

Entre as máquinas elétricas utilizadas na indústria, as máquinas de corrente contínua (MCC) continuam sendo empregadas em aplicações que exigem elevado desempenho dinâmico, ampla faixa de variação de velocidade e controle preciso de torque. Embora os motores de corrente alternada tenham se tornado predominantes em diversos setores industriais, os acionamentos em corrente contínua ainda são amplamente utilizados em processos como laminação, pontes rolantes, bobinadeiras e sistemas de ensaio, nos quais a precisão do controle é um requisito essencial (LIPO, 1996; RASHID, 2014).

Para atender a essas aplicações, os conversores de quatro quadrantes (4Q) possibilitam a operação da máquina tanto no modo motor quanto no modo gerador, permitindo aceleração, frenagem regenerativa e inversão do sentido de rotação por

meio do controle da tensão aplicada à armadura. Essa característica amplia a flexibilidade operacional do sistema e favorece sua utilização em aplicações industriais que demandam controle bidirecional de velocidade e torque (RASHID, 2014).

Entre os equipamentos destinados a esse tipo de acionamento, destaca-se o SIMOREG DC-MASTER, amplamente empregado em aplicações industriais devido à sua robustez, confiabilidade e capacidade de operação em quatro quadrantes (SIEMENS, 2007). Entretanto, sua interface de comando foi concebida para operar com sinais analógicos bipolares, normalmente fornecidos por potenciômetros ou sistemas de controle analógicos. Essa característica dificulta sua integração com plataformas embarcadas modernas, que utilizam níveis de tensão distintos para geração dos sinais de referência.

Nos últimos anos, a evolução dos sistemas embarcados de baixo custo ampliou significativamente sua aplicação em automação industrial e sistemas de controle. Microcontroladores como o ESP32 destacam-se por reunir elevada capacidade de processamento, interfaces de comunicação e conversores digital-analógico (DAC), permitindo o desenvolvimento de soluções compactas e de baixo custo para controle e monitoramento de processos (ESPRESSIF SYSTEMS, 2024). Entretanto, a saída analógica disponibilizada pelo ESP32 possui faixa de operação

entre 0 e 3,3 V, incompatível com a entrada analógica bipolar utilizada pelo conversor SIMOREG DC-MASTER, impossibilitando sua conexão direta.

Dessa forma, a integração entre microcontroladores embarcados e conversores industriais requer o desenvolvimento de circuitos de condicionamento de sinais capazes de adaptar os níveis de tensão entre os dispositivos, preservando a linearidade da resposta e a compatibilidade elétrica. Além de permitir a substituição de dispositivos convencionais de ajuste manual, como potenciômetros, essa abordagem amplia as possibilidades de implementação de estratégias digitais de controle, aquisição de dados, monitoramento remoto e integração com sistemas supervisórios, contribuindo para a modernização de sistemas de acionamento elétrico existentes.

Nesse contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um circuito de condicionamento de sinais para integração entre o microcontrolador ESP32 e o conversor SIMOREG DC-MASTER, utilizando um amplificador operacional LM358 para converter a saída analógica unipolar do microcontrolador em um sinal bipolar compatível com a entrada de referência do conversor (TEXAS INSTRUMENTS, 2024). A metodologia proposta foi validada por meio de simulações computacionais realizadas no software PSIM (POWERSIM INC., 2024) e de ensaios experimentais em bancada, avaliando a capacidade do circuito em controlar a velocidade e a inversão do sentido de rotação de uma máquina de corrente contínua.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia empregada neste trabalho compreendeu o desenvolvimento de um circuito de condicionamento de sinais para integração entre o microcontrolador ESP32 e o conversor industrial SIMOREG DC-MASTER, seguido de sua validação por meio de simulações computacionais e ensaios experimentais. As atividades foram organizadas em quatro etapas: estudo do sistema de acionamento, desenvolvimento do circuito de condicionamento, validação em ambiente de simulação e testes experimentais em bancada.

Inicialmente, foi realizado um estudo das características elétricas do conversor SIMOREG DC-MASTER, com o objetivo de identificar os requisitos de operação de sua entrada analógica de referência. Verificou-se que o equipamento utiliza uma entrada de tensão bipolar para o controle da velocidade da máquina de corrente contínua, enquanto o microcontrolador ESP32 disponibiliza saídas analógicas por meio de conversores digital-analógico (DAC) com faixa de operação entre 0 e 3,3 V (SIEMENS, 2007; ESPRESSIF SYSTEMS, 2024).

Essa diferença entre os níveis de tensão evidenciou a necessidade de um circuito de condicionamento capaz de adaptar o sinal gerado pelo microcontrolador aos requisitos do conversor.

A arquitetura da plataforma desenvolvida é apresentada na Figura 1, sendo composta pelo microcontrolador ESP32, pelo circuito de condicionamento de sinais, pelo conversor SIMOREG DC-MASTER e pela máquina de corrente contínua utilizada durante os ensaios experimentais.

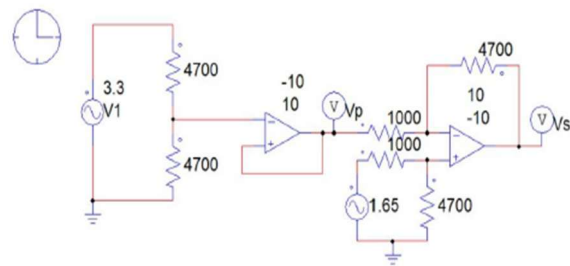


Figura 1. Arquitetura da plataforma experimental utilizada para o controle de velocidade da máquina de corrente contínua. Fonte: Autor, 2026.

Com base nos requisitos identificados, foi desenvolvido um circuito de condicionamento utilizando o amplificador operacional LM358 (TEXAS INSTRUMENTS, 2024). O circuito foi alimentado por fontes simétricas de ± 10 V e projetado para converter a saída analógica unipolar do ESP32 em um sinal bipolar compatível com a entrada analógica do conversor. Para isso, uma das saídas DAC do microcontrolador foi utilizada para gerar uma tensão de referência de aproximadamente 1,65 V, estabelecendo o nível de offset necessário ao circuito, enquanto a segunda saída DAC foi empregada para gerar o sinal de controle da velocidade da máquina. O esquemático do circuito desenvolvido é apresentado na Figura 2.

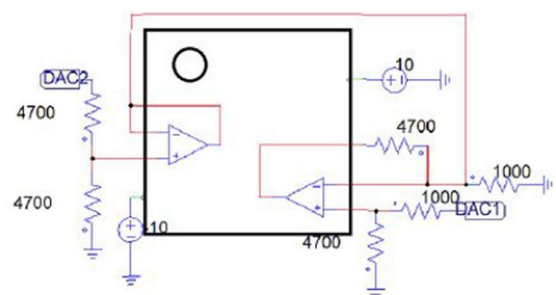


Figura 2. Esquemático do circuito de condicionamento de sinais desenvolvido para adaptação da saída DAC do ESP32 à entrada analógica do conversor SIMOREG DC-MASTER. Fonte: Autor, 2026.

Antes da implementação física, o circuito foi modelado no software PSIM (POWERSIM INC., 2024), permitindo verificar seu funcionamento em diferentes condições de operação. As simulações contemplaram diferentes níveis de tensão aplicados à saída DAC do ESP32, possibilitando avaliar a resposta do circuito, a linearidade da conversão e a adequação da tensão fornecida ao conversor. Essa etapa permitiu identificar previamente o comportamento esperado do sistema e reduzir a necessidade de ajustes durante a implementação experimental.

Após a validação computacional, foi montada a bancada experimental apresentada na Figura 3, composta pelo conversor SIMOREG DC-MASTER, pelo circuito de condicionamento implementado em protoboard, pelo microcontrolador ESP32 e pela máquina de corrente contínua. Essa configuração permitiu avaliar o funcionamento do sistema em condições reais de operação.

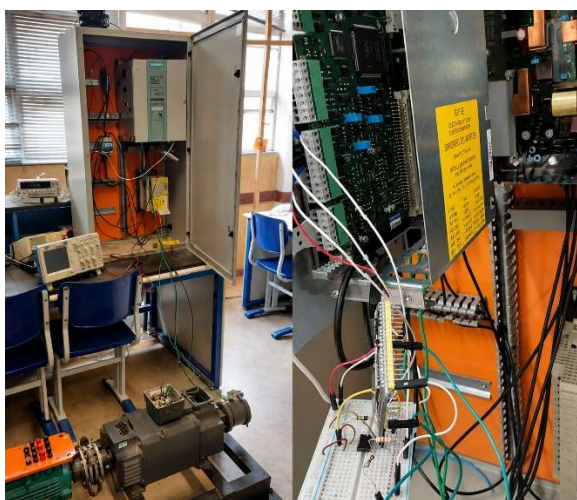


Figura 3. Bancada experimental utilizada para validação do circuito de condicionamento integrado ao conversor SIMOREG DC-MASTER e à máquina de corrente contínua. Fonte: Autor, 2026.

A Figura 4 apresenta o conversor SIMOREG DC-MASTER utilizado nos ensaios experimentais. O equipamento foi configurado para operar em modo de controle de velocidade por referência analógica, recebendo diretamente o sinal proveniente do circuito de condicionamento. Essa configuração permitiu avaliar a compatibilidade elétrica entre a saída DAC do ESP32 e a interface analógica do conversor, verificando sua resposta às variações de tensão geradas pelo microcontrolador.



Figura 4. Conversor SIMOREG DC-MASTER utilizado nos ensaios experimentais, destacando a interface de entrada analógica empregada para o controle da velocidade da máquina de corrente contínua. Fonte: Autor, 2026.

O algoritmo de controle foi desenvolvido na plataforma Arduino IDE e executado no ESP32. A rotina implementada realizou a variação automática da tensão de saída da DAC em incrementos de 10% da faixa de operação, mantendo cada nível durante aproximadamente 1,5 s. Essa estratégia permitiu analisar o comportamento do circuito de condicionamento em diferentes pontos de operação, bem como verificar a resposta do conversor durante aceleração, desaceleração e inversão do sentido de rotação da máquina.

Por fim, os resultados obtidos em simulação e experimentalmente foram comparados quanto à amplitude da tensão de saída, à linearidade da resposta e à capacidade de controle da velocidade da máquina de corrente contínua. A comparação entre os dois ambientes permitiu validar a metodologia proposta e verificar a viabilidade da utilização de plataformas embarcadas de baixo custo em sistemas de acionamento baseados em conversores industriais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o desenvolvimento do circuito de condicionamento de sinais, foram realizadas simulações computacionais e ensaios experimentais para verificar sua capacidade de adaptar a saída analógica do microcontrolador ESP32 aos níveis de tensão exigidos pelo conversor SIMOREG DC-MASTER. A análise contemplou a resposta do circuito em diferentes níveis de tensão, sua linearidade e sua aplicação no controle da velocidade de uma máquina de corrente contínua.

Inicialmente, o circuito foi modelado no software PSIM para avaliar seu comportamento antes da implementação física.

A simulação demonstrou que o circuito realizou corretamente o deslocamento do nível de tensão (offset), convertendo a faixa unipolar de 0 a 3,3 V da saída DAC em um sinal bipolar adequado à entrada analógica do conversor. Para uma tensão de aproximadamente 1,65 V, correspondente ao ponto médio da faixa de operação do ESP32, a tensão de saída permaneceu próxima de 0 V, confirmando o correto funcionamento da etapa de condicionamento. Quando a tensão de entrada foi inferior a esse valor, foram obtidas tensões negativas na saída; por outro lado, valores superiores produziram tensões positivas, comportamento esperado para o acionamento de um conversor de quatro quadrantes.

Além de validar o princípio de funcionamento do circuito, a simulação permitiu verificar previamente o comportamento do sistema antes da implementação experimental, reduzindo o tempo necessário para ajustes em bancada e minimizando possíveis erros de projeto. Essa etapa mostrou-se importante para confirmar a estratégia de adaptação dos níveis de tensão e garantir que o sinal fornecido ao conversor permanecesse compatível com sua faixa de operação.

Após a validação em ambiente computacional, foram realizadas medições experimentais para avaliar quantitativamente o desempenho do circuito de condicionamento. Os valores obtidos para diferentes tensões geradas pela saída DAC do ESP32 são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Relação entre parâmetro, tensão de entrada e tensão de saída.

Parâmetro do controlador (%)	Tensão de entrada (V)	Tensão de saída (V)
0	0,00	-7,5
10	0,33	-6,0
20	0,66	-4,5
30	0,99	-3,0
40	1,32	-1,5
50	1,65	0,0
60	1,98	1,5
70	2,31	3,0
80	2,64	4,5
90	2,97	6,0
100	3,30	7,5

Com base nos dados experimentais da Tabela 1, foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 5, permitindo analisar a relação entre a tensão aplicada pela saída DAC e a tensão disponibilizada na entrada analógica do conversor.

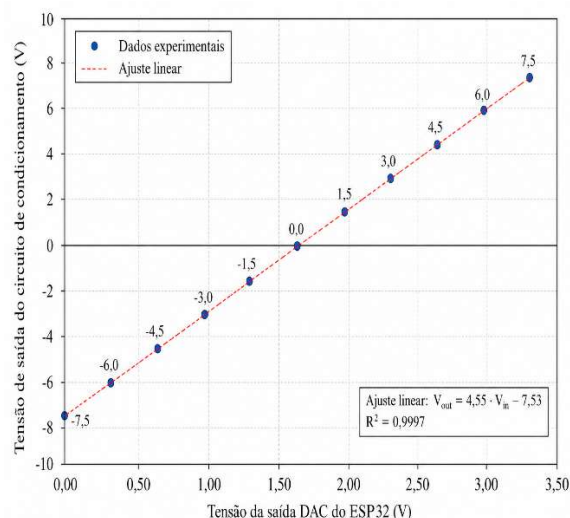
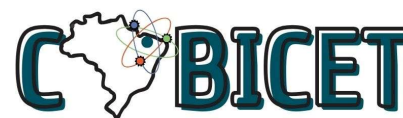


Figura 5. Relação entre a tensão de saída da DAC do ESP32 e a tensão fornecida pelo circuito de condicionamento.

Observa-se que o circuito apresentou comportamento aproximadamente linear ao longo de toda a faixa de operação. O aumento gradual da tensão na saída DAC resultou em variações proporcionais da tensão aplicada ao conversor, evidenciando que o circuito preserva a linearidade necessária para aplicações de controle de velocidade. Essa característica é fundamental em sistemas de acionamento, uma vez que permite estabelecer uma relação previsível entre o sinal de referência gerado pelo controlador e a resposta da máquina elétrica.

Embora a tensão máxima obtida tenha sido de aproximadamente $\pm 7,5$ V, inferior ao valor nominal de ± 10 V previsto no projeto, a resposta manteve boa simetria entre as regiões positiva e negativa. Essa diferença está associada ao dimensionamento do ganho do estágio amplificador e não comprometeu o funcionamento do sistema durante os ensaios realizados. Dessa forma, o circuito demonstrou robustez suficiente para validar o conceito proposto, sendo possível ampliar sua faixa de operação por meio do redimensionamento dos resistores, sem alterações significativas na arquitetura desenvolvida.

A análise da curva experimental também evidencia que pequenas variações na tensão gerada pela saída DAC resultam em alterações proporcionais na tensão aplicada ao conversor, favorecendo a implementação de estratégias de controle mais elaboradas. Essa característica amplia o potencial de utilização do



sistema em aplicações que empregam controladores digitais, como algoritmos PID, controle adaptativo e técnicas de supervisão baseadas em microcontroladores embarcados.

Concluída a validação elétrica do circuito, foram realizados ensaios utilizando a bancada experimental apresentada na Figura 3, composta pelo microcontrolador ESP32, circuito de condicionamento implementado em protoboard, conversor SIMOREG DC-MASTER e máquina de corrente contínua. Durante os testes, o algoritmo desenvolvido realizou a variação automática da tensão de referência em incrementos de 10%, com intervalo de 1,5 s entre cada atualização, permitindo avaliar o comportamento do sistema durante aceleração, desaceleração e inversão do sentido de rotação da máquina.

Os ensaios experimentais demonstraram que o conversor respondeu adequadamente aos sinais fornecidos pelo circuito de condicionamento, possibilitando o controle contínuo da velocidade da máquina e a inversão do sentido de rotação de forma estável. Não foram observadas instabilidades significativas ou interrupções durante a operação, indicando que a adaptação dos níveis de tensão foi suficiente para garantir a compatibilidade entre o microcontrolador e o conversor industrial.

Comparando-se os resultados experimentais com aqueles obtidos em simulação, verifica-se boa concordância quanto ao comportamento geral do circuito. As tendências observadas nas curvas simuladas foram confirmadas pelos ensaios em bancada, demonstrando que o modelo implementado no PSIM representou adequadamente o funcionamento da solução proposta. As pequenas diferenças observadas entre simulação e experimento são compatíveis com as tolerâncias dos componentes eletrônicos, limitações do ganho do circuito e variações inerentes às medições experimentais.

De forma geral, os resultados obtidos comprovam a viabilidade técnica da solução desenvolvida para integração entre plataformas embarcadas e conversores industriais. A utilização do ESP32 associada ao circuito de condicionamento permitiu substituir o acionamento manual por uma interface digital programável, ampliando as possibilidades de implementação de estratégias de controle, aquisição de dados e automação em sistemas de acionamento de máquinas de corrente contínua.

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e a validação de um circuito de condicionamento de sinais para integração entre o microcontrolador ESP32 e o conversor industrial SIMOREG DC-MASTER, possibilitando o controle digital da

velocidade de uma máquina de corrente contínua por meio da saída DAC do microcontrolador. A solução proposta eliminou a necessidade de acionamento manual por potenciômetro, permitindo a geração programável do sinal de referência para o conversor de quatro quadrantes.

Os resultados obtidos por meio de simulações computacionais e ensaios experimentais comprovaram a viabilidade da metodologia proposta. O circuito de condicionamento apresentou comportamento aproximadamente linear, realizando a conversão da faixa de tensão unipolar (0–3,3 V) da saída DAC em um sinal bipolar compatível com a entrada analógica do conversor. Além disso, os testes experimentais demonstraram o controle contínuo da velocidade e a inversão do sentido de rotação da máquina de corrente contínua de forma estável, confirmando a integração adequada entre os dispositivos.

Embora a tensão máxima de saída tenha sido limitada a aproximadamente $\pm 7,5$ V em decorrência do dimensionamento do estágio amplificador, essa limitação não comprometeu a operação do sistema e poderá ser corrigida em trabalhos futuros por meio do redimensionamento dos resistores de ganho, ampliando a faixa de operação para os valores nominais do conversor.

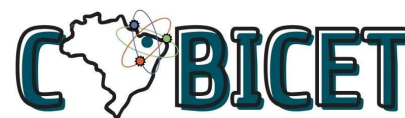
Dessa forma, a solução desenvolvida mostrou-se uma alternativa de baixo custo e fácil implementação para integração entre plataformas embarcadas e conversores industriais, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas de acionamento com controle digital. Como continuidade deste trabalho, pretende-se aperfeiçoar o circuito de condicionamento, implementar estratégias avançadas de controle de velocidade e integrar o sistema a algoritmos de supervisão e aquisição de dados, ampliando sua aplicação em pesquisas e em ambientes industriais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Divinópolis, pela infraestrutura e pelo suporte disponibilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- BOSE, Bimal K. Modern Power Electronics and AC Drives. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.
- ESPRESSIF SYSTEMS. ESP32 Technical Reference Manual. Version 5.5. Shanghai: Espressif Systems, 2024.



LIPO, Thomas A. Introduction to AC Machine Design. Madison: University of Wisconsin, 1996.

POWERSIM INC. PSIM User Manual. Version 2024. Boston: Powersim Inc., 2024.

RASHID, Muhammad H. Eletrônica de Potência: Circuitos, Dispositivos e Aplicações. 4. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.

SIEMENS AG. SIMOREG DC-MASTER Operating Instructions. Erlangen: Siemens AG, 2007.

TEXAS INSTRUMENTS. LM358 Low-Power Dual Operational Amplifiers – Datasheet. Dallas: Texas Instruments, 2024.