

SISTEMA PARA CONTROLE DE MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

João Marcos S. Torres¹ (IC), Robson B. Gonzatti (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: Controle vetorial. Motor de indução. SVPWM. Transformada de Clarke e Park.

Introdução

Os motores de indução, desenvolvidos no final do século XIX por Nikola Tesla, consolidaram-se como elementos essenciais na indústria devido à sua robustez, confiabilidade e eficiência. A evolução tecnológica e a crescente demanda por precisão em processos industriais levaram ao desenvolvimento de técnicas avançadas de controle, especialmente para aplicações que exigem ajuste preciso de velocidade e torque.

Entre os métodos mais utilizados destacam-se o controle escalar, baseado na relação tensão/frequência (V/f), e o controle vetorial orientado a campo (Field Oriented Control – FOC), que permite o controle independente do fluxo magnético e do torque, garantindo desempenho superior, principalmente em baixas velocidades e em variações dinâmicas de carga.

Neste trabalho, foi desenvolvido e avaliado, em ambiente de simulação, um sistema de controle vetorial aplicado a um motor de indução trifásico, contemplando as transformadas de Clarke e Park, controladores proporcional-integral e modulação por largura de pulso do vetor espacial (SVPWM). Experimentalmente, foi implementado apenas o controle escalar como etapa inicial para verificação do chaveamento e acionamento do motor, uma vez que a aplicação prática do FOC foi inviabilizada devido à presença de ruído no sistema de controle.

Revisão Bibliográfica

Ao longo dos anos, as máquinas de indução foram aprimoradas e passaram a ocupar um papel cada vez mais importante na indústria, devido à sua robustez, confiabilidade e eficiência. Essas características possibilitaram seu uso em aplicações que exigem alta precisão, como no controle da velocidade de funcionamento (MELO, 2015).

Para explorar de forma mais precisa a rotação dessas máquinas, dois métodos de controle são amplamente utilizados no ambiente industrial: o controle escalar V/f,

no qual a tensão e a frequência do motor são variadas proporcionalmente para alterar sua velocidade, e o controle vetorial orientado a campo (Field Oriented Control – FOC), que controla separadamente o fluxo magnético e o torque do motor.

No controle vetorial, é necessário obter as componentes no referencial direto e em quadratura (d e q) (RUSLI, NUGROHO, *et al.*, 2021). Para isso, primeiramente converte-se o sinal trifásico para um referencial bifásico por meio da transformada de Clarke, conforme a Equação 1:

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} * \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Em seguida, aplica-se a transformada de Park ao sinal bifásico, convertendo as ondas alternadas em dois sinais contínuos (d e q), conforme a Equação 2:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

As componentes V_d e V_q são responsáveis pelo controle do fluxo e do torque, respectivamente.

Para atingir a velocidade desejada, o fluxo e o torque são ajustados de acordo com a carga do motor, utilizando controladores do tipo proporcional-integral (PI). Após o processamento pelos controladores, os sinais contínuos precisam ser reconvertidos para sua forma original trifásica senoidal. Para isso, aplica-se a transformada inversa de Park (Equação 3) e, em seguida, a transformada inversa de Clarke (Equação 4):

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (3)$$

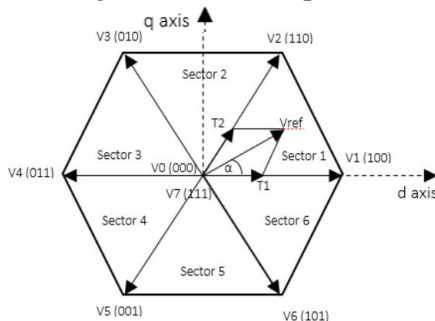
“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

O sinal trifásico obtido é então modulado para acionar os transistores do inversor de frequência por meio da modulação por largura de pulso do vetor espacial (Space Vector PWM – SVPWM). Essa técnica define uma sequência de comutação a partir de seis vetores ativos e dois vetores passivos nas coordenadas do meio. As amplitudes e ângulos de tensão e corrente determinam o setor em que o vetor de referência se encontra, e, conseqüentemente, a comutação dos IGBTs.

A Figura 1 apresenta a divisão dos setores e os vetores do SVPWM.

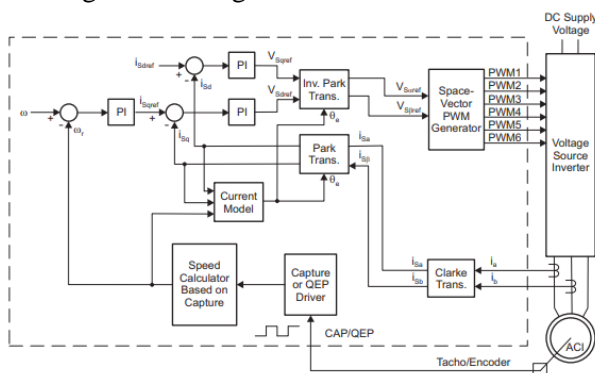
Figura 1 – Vetor espacial.



Fonte: (RUSLI, NUGROHO, *et al.*, 2021)

A figura 2 mostra o diagrama de blocos do sistema completo do controle vetorial.

Figura 2 – Diagrama em blocos do FOC.



Fonte: (Texas Instruments)

Metodologia

As etapas iniciais desta pesquisa consistiram em uma revisão bibliográfica sobre o funcionamento do controle

vetorial aplicado a motores de indução, abordando a técnica de modulação por largura de pulso (SVPWM) e as transformações matemáticas de Park e Clarke.

Em seguida, foram implementadas, em linguagem C no software PSIM, as estruturas necessárias ao desenvolvimento do projeto, conforme descrito na literatura.

Após a validação individual de cada elemento, realizou-se a simulação do circuito de controle em malha fechada, aplicando-se a sintonia empírica dos controladores PI.

Com a simulação apresentando resultados satisfatórios, os códigos desenvolvidos foram adaptados e transferidos para o DSP, dando início à montagem da circuitaria em bancada. Nessa etapa, cada componente foi testado individualmente para assegurar seu correto funcionamento.

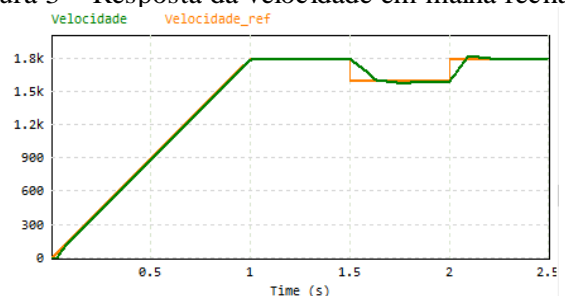
Posteriormente, iniciaram-se os testes do sistema em malha aberta e com tensão reduzida, visando a realização de ajustes, correções e validação final do sistema.

Resultados e discussão

Após diversos ajustes no circuito de simulação, foi possível validar o correto funcionamento dos blocos matemáticos implementados em linguagem de programação responsáveis pelas transformadas de Park e Clarke, pelos controladores proporcional-integral e pela modulação por vetor espacial (SVPWM). Essa validação foi feita comparando os resultados obtidos com os blocos equivalentes do software PSIM, observando-se respostas muito parecidas em todos os casos.

Como não havia informações internas do motor utilizado no experimento, não foi realizada a modelagem matemática da máquina. A solução adotada foi operar o motor em condição nominal e, a partir dessa situação, aplicar as transformadas de Clarke e Park para obter referências de torque e fluxo para o sistema de controle. A Figura 3 apresenta o resultado da simulação para uma velocidade de 1800 rpm em malha fechada.

Figura 3 – Resposta da velocidade em malha fechada.



Fonte: Autoria própria

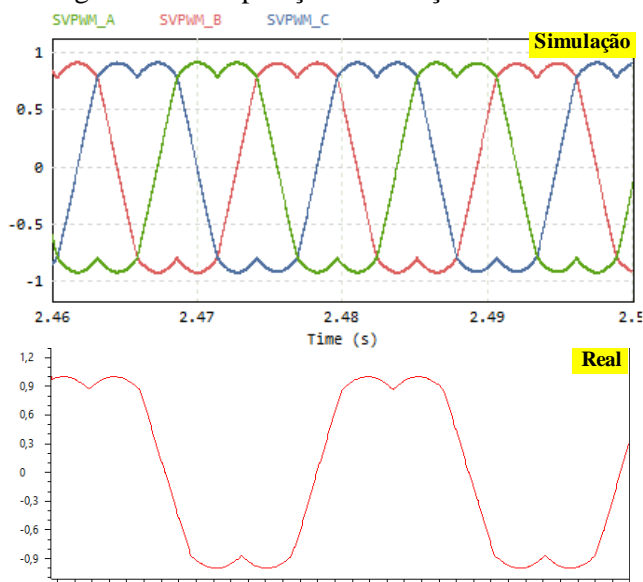
“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Para melhorar a visualização no ambiente de simulação, o tempo da dinâmica foi reduzido, já que, no sistema real, seriam necessários intervalos maiores para vencer a inércia. Observa-se que a partida do motor apresenta o formato de uma rampa crescente, medida tomada para minimizar picos de corrente na inicialização.

Após atingir a rotação desejada (1800 rpm), o controle foi submetido a variações na referência para verificar sua estabilidade. Foram aplicados um degrau negativo de 200 rpm e, em seguida, um degrau positivo de 200 rpm. O resultado foi satisfatório: o motor acompanhou a referência e apresentou erro nulo em regime permanente. Com o sucesso da simulação, os mesmos procedimentos foram realizados na bancada de testes para validar individualmente cada elemento, obtendo-se resultados positivos com a fonte de potência trifásica desligada.

A Figura 4 mostra a comparação entre a modulação SVPWM simulada e a obtida no experimento, evidenciando que ambas possuem o mesmo formato.

Figura 4 – Comparação modulação SVPWM.



Fonte: Autoria própria

No experimento, foi exibida apenas uma forma de onda real, pois o software Code Composer Studio não permite a visualização simultânea de múltiplas formas no mesmo gráfico. As demais formas, no entanto, apresentaram o mesmo padrão, apenas defasadas entre si.

Com todos os componentes de controle e aquisição de dados funcionando, utilizou-se inicialmente o controle escalar (V/f) para validar o chaveamento dos transistores e realizar os primeiros acionamentos do motor. Esse método foi escolhido pela sua simplicidade: para

controlar a velocidade em malha aberta, basta manter constante a relação tensão/frequência.

A tabela 1 mostra os dados do motor e os demais parâmetros utilizados nos testes práticos do sistema.

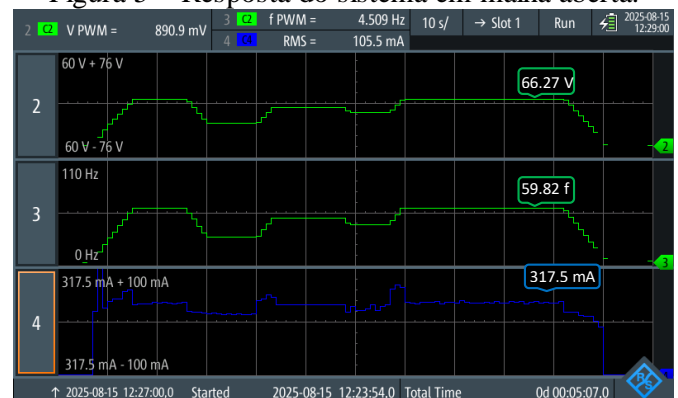
Tabela 1 – Parâmetros adotados nos testes.

Parâmetro	Magnitude
Potência do motor	0,18 kW
Tensão nominal do motor	220 V
Corrente nominal do motor	1,27 A
Velocidade nominal do motor	1800 rpm
Frequência nominal do motor	60 Hz
Tensão DC utilizada	65 V
Frequência de chaveamento PWM	10 kHz
Frequência de amostragem dados	20 kHz

Fonte: Autoria própria

A Figura 5 apresenta o resultado do experimento, onde o canal 2 exibe a tensão, o canal 3 a frequência e o canal 4 a corrente.

Figura 5 – Resposta do sistema em malha aberta.



Fonte: Autoria própria

Pode-se verificar que tensão e frequência variaram proporcionalmente às alterações de referência de velocidade, que iniciaram em 0 rpm e passaram por 1800, 900, 1500, 1300, 1800 e retornou para 0 rpm. As mudanças ocorreram de forma suave, confirmando o funcionamento adequado dos elementos responsáveis por essa dinâmica. O gráfico de corrente apresentou o comportamento esperado, com baixa corrente na partida e variações decorrentes das mudanças de velocidade.

Para validar a velocidade real do motor ao ser submetido à referência de 1800 rpm, utilizou-se um tacômetro digital, que forneceu uma leitura muito próxima do valor esperado, conforme ilustrado na Figura 6.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Figura 6 – Leitura da velocidade do motor.



Fonte: Autoria própria

Com o sistema de potência em operação, foi identificado um ruído de alta frequência no sinal de controle. A Figura 7 compara o sinal do encoder de velocidade com a fonte de potência desligada (à esquerda, sem ruído) e ligada (à direita, com ruído).

Figura 7 – Comparação do sinal com e sem ruído.

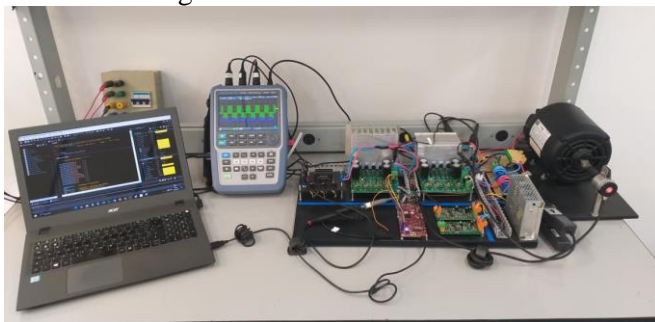


Fonte: Autoria própria

Diversas tentativas foram realizadas para eliminar o ruído, incluindo: filtro passa-baixas nos sinais dos sensores, filtro LC na saída da fonte de controle, aumento do dead time dos transistores, uso de buffer de alta impedância, separação física dos cabos de sinal e potência, e utilização de cabos de sinal blindados. No entanto, nenhuma dessas tentativas foi eficaz. Devido a essa limitação e ao término do prazo para conclusão do trabalho, não foi possível fechar a malha de controle, impossibilitando a aplicação do controle vetorial no motor de indução.

A Figura 8 apresenta a bancada de testes com todos os equipamentos montados para a realização desta pesquisa.

Figura 8 – Bancada de testes.



Fonte: Autoria própria

Conclusões

O desenvolvimento do sistema de controle vetorial para motores de indução permitiu validar, por meio de simulação, o funcionamento das transformadas de Clarke e Park, dos controladores proporcional-integral e da modulação SVPWM, apresentando desempenho satisfatório na resposta de velocidade e estabilidade em regime permanente. No ambiente experimental, a implementação inicial do controle escalar demonstrou funcionamento adequado, com variações de tensão e frequência proporcionais à referência de velocidade e comportamento de corrente condizente com a operação do motor.

Entretanto, a presença de ruído de alta frequência no sistema de controle impossibilitou o fechamento da malha e, conseqüentemente, a aplicação prática do FOC. Apesar dessa limitação, os resultados obtidos fornecem uma base sólida para a continuidade do trabalho, direcionando futuras intervenções no projeto para mitigação de ruídos e implementação completa do controle vetorial.

Agradecimentos

Agradeço à Universidade Federal de Itajubá pelo laboratório e pelos materiais utilizados durante a realização desta pesquisa. Ao meu orientador, Robson Bauwelz Gonzatti, agradeço pelas orientações, confiança e companheirismo ao longo do trabalho. Também sou grato ao CNPq pela concessão da bolsa de iniciação científica, essencial para a execução deste projeto.

Referências

MELO, Pedro. Controle vetorial de um motor de indução aplicado a um veículo elétrico. **Neutro a Terra**, Porto, 2015.

RUSLI, Muhammad R. et al. Digital Implementation of Space Vector PWM for Three Phase Inverter with Simplified C-Block PSIM Utilization. **International Electronics Symposium**, 2021.

Texas Instruments. **Sensored Field Oriented Control of 3-Phase Induction**. [S.l.]. 2013.