

# IMPLEMENTAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS CONTROLADORES PI E PI COM MÉTODO ANTI-WINDUP APLICADOS A CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTORES CC SEM ESCOVAS EM SITUAÇÕES CRÍTICAS

**Gaspar Henrique Martins de Oliveira, Ricardo Yudi Takahashi, Stefan Thiago Cury Alves dos Santos**

**Profº Drº José Roberto Boffino de Almeida Monteiro**

Universidade de São Paulo

[gasparhenrique32@usp.br](mailto:gasparhenrique32@usp.br), [ricardotakahashi@usp.br](mailto:ricardotakahashi@usp.br), [stefan.santos@usp.br](mailto:stefan.santos@usp.br)

## Objetivos

Aplicar a teoria de controle PI e PI com método anti-windup em BLDCM (Brushless DC Motors) - que são motores síncronos de imã permanente de força contra-eletromotriz trapezoidal [1] - através do método descrito em [2] e implementar, via simulação e em sistema real, a fim de comparar as respostas de ambos os controladores em situações críticas, tais como elevada aceleração e degrau de torque.

## Métodos e Procedimentos

Com o desenvolvimento de um modelo por fase da máquina síncrona [3], obteve-se o modelo de corrente contínua do mesmo considerando o acionamento trapezoidal (seis pulsos) em 120°. Com as funções de transferência de corrente e velocidade, foram projetados os controladores PI [4] de corrente e velocidade.

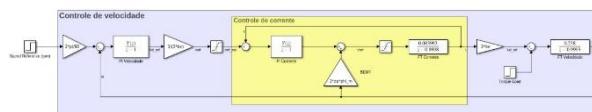


Figura 1: Modelo CC

Em seguida, utilizando a máquina elétrica e o inversor com IGBTs disponibilizados na biblioteca do Simulink, foi implementado em código o algoritmo de controle e acionamento do motor. É importante mencionar que o laço de controle de corrente é mais rápido, com um período de 100µs, enquanto que o de velocidade, 2,5ms.

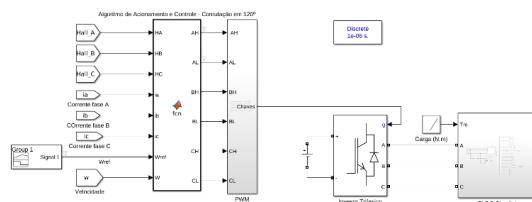


Figura 2: Acionamento da máquina

Equações do controle PI

$$u(k) = u(k-1) + K_p \cdot e(k) + K_i \cdot T_{pwm} \cdot e(k-1) - K_p \cdot e(k-1)$$

Equação do controle PI+AW:

$$u(k) = u_{sat}(k-1) + K_p \cdot e(k) + K_i \cdot T_{pwm} \cdot e(k) - u_{sat}(k-1)$$

Para validação do modelo e controlador desenvolvidos, foi montada uma bancada experimental com um inversor trifásico conforme a Figura 4. Foi utilizada uma máquina síncrona da Siemens acoplada a um motor CC como carga, conforme a Figura 3.



Figura 3: Máquina Siemens (esquerda) acoplada ao motor CC (direita).

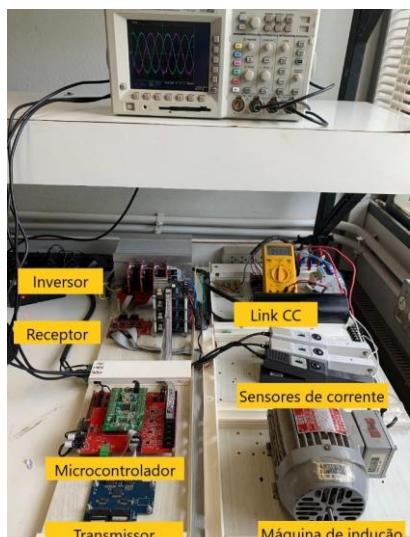


Figura 4: Bancada experimental acionando o motor de indução para testes.

## Resultados

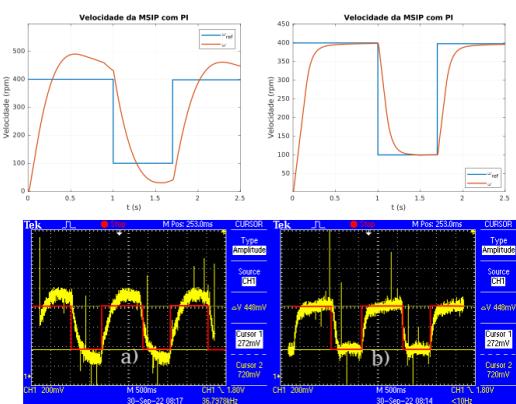


Figura 5: Respostas de velocidade da MSIP frente à variação do degrau de velocidade, entre valores de 100 e 400rpm.

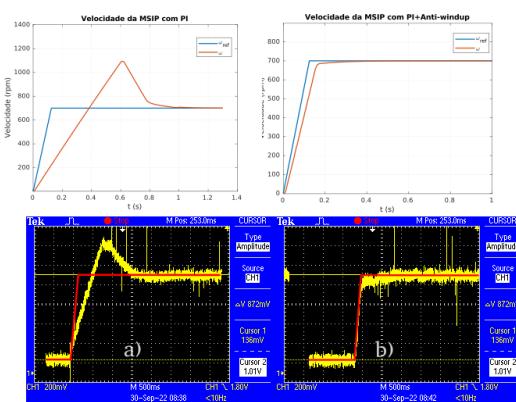


Figura 6: Respostas de velocidade da MSIP frente à entrada de rampa com aceleração de 5600rpm/s<sup>2</sup>

Para as figuras 5 e 6, temos os resultados simulados acima dos resultados testados na bancada experimental, com o controle PI à esquerda e o PI+AW à direita. Além da validação dos resultados simulados, nota-se a eliminação do sobressinal e um menor tempo para atingir o regime em situações críticas de alta aceleração.

## Conclusões

Com o uso do método anti-windup aplicado ao controlador PI, é possível verificar melhorias nas respostas dinâmicas do sistema frente ao controlador PI puro. Tais melhorias encontradas foram:

1. Eliminação do erro em regime ao longo da curva de aceleração.
2. Menor tempo para atingir o regime.

Outros achados foram: redução do pico de corrente e torque eletromagnético para mesmos distúrbios de carga e redução do ruído de chaveamento sobre as correntes de fase. Ao mesmo tempo, com a adição dos saturadores na ação proporcional e integral, o controlador não explode sua saída e evita o sistema a ter grandes oscilações como é visto no controlador PI puro quando a aceleração é muito elevada.

## Referências Bibliográficas

- [1] T. J. E. Miller, “Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives”. Oxford: Clarendon Press, 1993
- [2] J. R. B. A. Monteiro, W. C. A. Pereira, M. P. Santana, T.E.P. Almeida, G. T. Paula, I. Santini, “Anti-windup Method for Fuzzy PD+I, PI and PI Controllers applied in Brushless DC Motor Speed Control” in 2013 Brazilian Power Electronics Conference.
- [3] J. R. B. A. Monteiro, “Estratégias de acionamento e controle em máquinas CA de ímã permanente com fluxo não senoidal”. Escola de Engenharia de São Carlos, 1997.
- [4] K. J. Aström, T. Hägglund, “Advanced PID Control”. ISA, 2005.