



## Modelagem e implementação de um inversor fonte de tensão para acionamento de motores de indução

### RESUMO

**Lucas Niquele Endrice**  
[lucasendrice@alunos.utfpr.edu.br](mailto:lucasendrice@alunos.utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil

**Jakson Paulo Bonaldo**  
[jbonaldo@utfpr.edu.br](mailto:jbonaldo@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil

**OBJETIVO:** Este trabalho apresenta o desenvolvimento e simulação de um sistema de controle escalar de velocidade para motores de indução monofásicos. A técnica utilizada é conhecida como controle V/F. Para um melhor entendimento do projeto foi realizada uma revisão de literatura sobre modulação PWM, conversores CC/CA, e métodos de controle de velocidade e motores de indução. Para alcançar os objetivos do trabalho foi desenvolvido um inversor monofásico, para servir como fonte de tensão e frequência variáveis para o motor, seguido pela aplicação do método de controle de velocidade V/F através de controladores digitais. No trabalho são apresentados os resultados das simulações, para visualização e demonstração de sua validade.

**PALAVRAS-CHAVE:** Controle escalar. Inversor monofásico. Modelagem de conversores.

## INTRODUÇÃO

De acordo com LUO, YE e RASHID (2005) os inversores CC-CA convertem uma tensão de entrada contínua em alternada, e são geralmente utilizados como: Fonte de tensão/frequência variável para controladores de velocidade de motores; Fonte de tensão CA constante; Filtros ativos de potência; Fontes ininterruptas de energia (*no-breaks*), entre outros.

Neste trabalho, o inversor de frequência será utilizado no controle de velocidade de um motor de indução. Motores elétricos pequenos são usados em uma ampla gama de atividades, os quais são largamente utilizados em razão de sua construção simples, baixo custo de manutenção e baixo custo de aquisição se comparados a outros tipos de motores, como os de corrente contínua (IORGULESCU, 2016).

## MÉTODOS

A metodologia de execução do projeto foi baseada na modelagem, análise e simulação dos principais componentes do sistema de controle de velocidade. Os quais são discutidos brevemente a seguir.

O modulador PWM, que controla o funcionamento do inversor, gera um atraso em função da sua dinâmica de funcionamento, visto que a atualização do sinal modulante ocorre apenas no início de cada período de modulação ( $T_s$ ). Todavia, este comportamento pode ser modelado como um efeito de *sample and hold*, que não deve ser desprezado, pois implica na redução da margem de fase do sistema (BUSO e MATTAVELLI, 2006).

Segundo os mesmos autores, em uma aproximação por pequenos sinais é possível encontrar a função de transferência entre o sinal modulante  $m(t)$  e o sinal de controle  $V_{MO}(t)$ . Para fins de simplificação foi aplicada a aproximação de Padé, considerando o atraso igual à metade do período de modulação obtendo a equação (1).

$$PWM(s) = \frac{V_{MO}(s)}{M(s)} = \frac{e^{-sDT_s}}{c_{PK}} = PWM(s) = \frac{1 - s \frac{T_s}{4}}{1 + s \frac{T_s}{4}} \quad (1)$$

Entretanto, o sinal obtido logo após as chaves, isto é, entre cada um dos braços do inversor, é modulado em alta frequência, sendo necessário a inserção de um filtro passa-baixas na saída do conversor para eliminar as harmônicas de alta frequência. Portanto foi projetado um filtro passa-baixas de segunda ordem considerando a carga como uma resistência ( $R$ ) e a ponte inversora como uma fonte de tensão variável ( $V_{INV}$ ). Dado que a frequência de chaveamento do inversor é de  $F_s=13$  kHz, a frequência de corte do filtro passa-baixas foi ajustada aproximadamente uma década abaixo, em 1,2 kHz (SEDRA e SMITH; 2010).

O sistema de controle do inversor é composto por uma malha de controle da corrente do indutor do filtro e uma segunda malha que controla efetivamente a tensão de saída, isto é, a tensão sobre o capacitor do filtro.

Pode-se definir a função de transferência de malha aberta do sistema de controle da corrente usando a equação (2).

$$H_I(s) = \left( K_{PI} + \frac{K_{II}}{s} \right) \left( \frac{1 - s \frac{T_S}{4}}{1 + s \frac{T_S}{4}} \right) V_{CC} \left( \frac{s \frac{1}{L} + \frac{1}{CLR}}{s^2 + s \left( \frac{R_L}{L} + \frac{1}{CR} \right) + \frac{1}{CL} \left( \frac{R_L}{R} + 1 \right)} \right) K_{SI} \quad (2)$$

Os valores de  $K_{PI}$  e  $K_{II}$  do controlador PI são calculados utilizando as condições de ângulo e módulo sobre a função de transferência de malha aberta. Definindo então  $\omega_{CI} = 2\pi F_s/6$  como a largura de banda desejada para o sistema de controle da corrente em malha fechada (Buso e Mattavelli, 2006).

Para deslocar a frequência de corte do sistema para o valor desejado, isto é, para  $\omega_{CI}$ , o valor de  $K_{PI}$  é calculado de acordo com equação (3).

$$K_{PI} = \frac{1}{|H_I(j\omega_{CI})|} \approx 0.787 \quad (3)$$

Já para  $K_{II}$ , utiliza-se a condição de ângulo, impondo que a margem de fase do sistema seja igual a  $60^\circ$ , obtendo a equação (4).

$$K_{II} = \frac{K_{PI} I \omega_{CI}}{\tan((-180^\circ + 60^\circ) + 90^\circ - \phi\{H_I(j\omega_{CI})\})} \approx 402 \frac{rad}{s} \quad (4)$$

Uma vez definidos os ganhos da malha de controle da corrente é iniciado o projeto do controlador de tensão. A função de transferência de malha aberta do sistema de controle da tensão de saída do inversor é descrita por:

$$H_V(s) = \left( K_{PV} + \frac{K_{IV}}{s} \right) (H_{I\_MF}) \left( \frac{R}{sRC + 1} \right) K_{SV}, \quad (5)$$

onde  $H_{I\_MF}$  é a função de transferência em malha fechada do sistema de controle de corrente. Os valores obtidos para os ganhos do controlador PI de tensão são  $K_{PV} 4,28$  e  $K_{IV} = 14498 \text{ rad/s}$ , os quais foram obtidos aplicando a metodologia usada para projeto dos ganhos do controlador de corrente.

Tabela 1 - Parâmetros do Sistema

| Descrição                       | Símbolo  | Valor      |
|---------------------------------|----------|------------|
| Frequência de chaveamento       | $f_s$    | 13 kHz     |
| Tensão de entrada               | $V_{CC}$ | 300 V      |
| Ganho do transdutor de corrente | $K_{SI}$ | 0.05 V/A   |
| Ganho do transdutor de tensão   | $K_{SV}$ | 0.0033 V/V |
| Indutância                      | $L$      | 1 mH       |
| Resistencia interno do indutor  | $R_L$    | 100 mΩ     |
| Capacitância                    | $C$      | 40 μF      |
| Carga                           | $R$      | 16 Ω       |

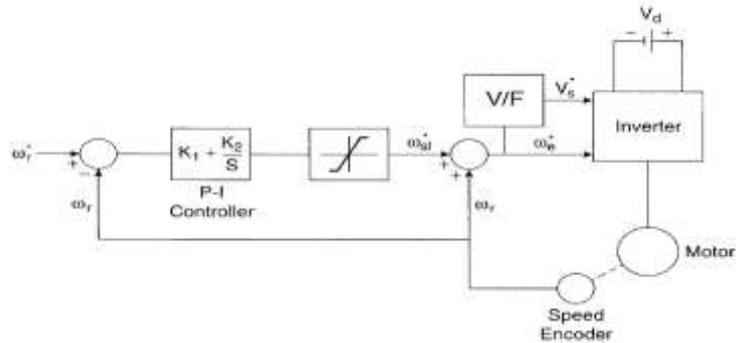
Fonte: Autoria Própria.

Finalizado o projeto dos ganhos dos controladores o inversor pode ser usado para a realização do método de controle de velocidade escalar V/F. O método consiste em ajustar os valores de amplitude e frequência da tensão de alimentação do motor buscando manter o fluxo constante no entreferro do motor, conforme ilustrado no circuito da Figura 1 (BOSE, 2002).

O controle V/F é um dos métodos de controle de velocidade mais utilizados devido a sua simplicidade de implementação, principalmente se comparada a implementações vetoriais. A tensão  $V_s$  é diretamente gerada em função da frequência, pelo fator de ganho  $G$ , assim o fluxo se mantém constante. À medida que a frequência diminui, a reatância de magnetização do motor diminui levando a um aumento da corrente do estator. Nesta condição a queda de tensão sobre a resistência do estator aumenta, aumentando as perdas de potência. Desta forma,

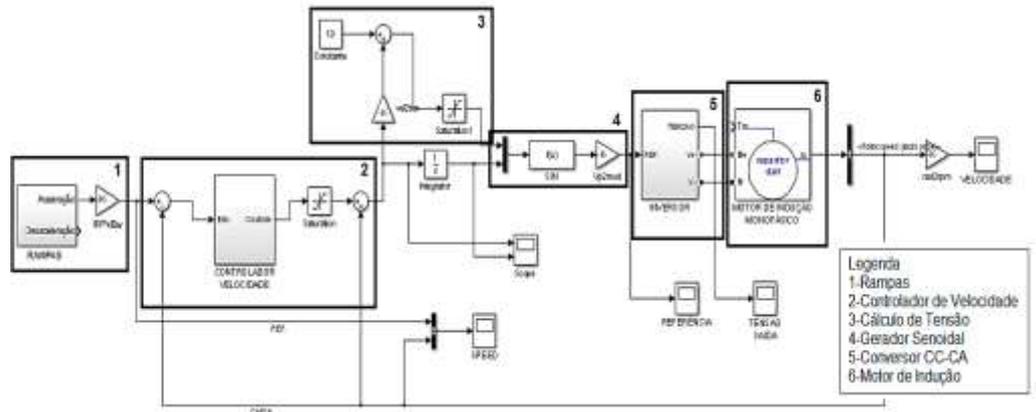
ocorre o enfraquecimento do fluxo pelo entreferro. A tensão  $V_0$  (boost voltage) é adicionada para que o fluxo e o torque estejam disponíveis em velocidade baixa, e seu efeito é desprezível para as altas frequências. O circuito implementado é mostrado na Figura 2 (BOSE, 2002).

Figura 1- Controle V/F em malha fechada.



Fonte: BOSE (2002).

Figura 2 - Circuito de controle de velocidade.

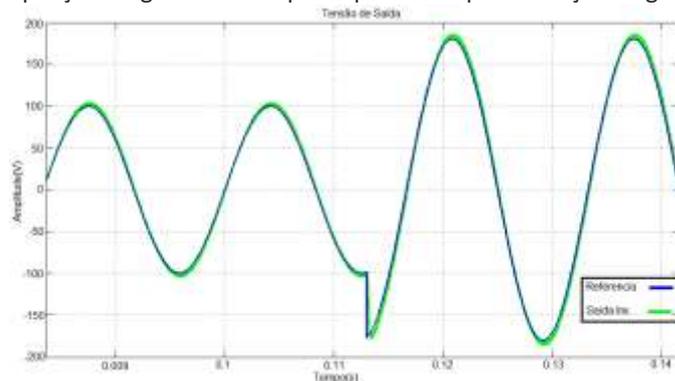


Fonte: Autoria Própria.

## RESULTADOS

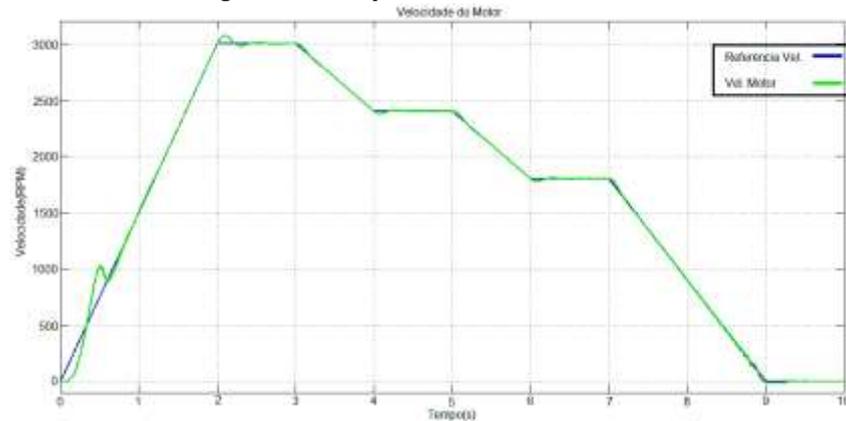
Através da Figura 3 pode ser observado o comportamento do inversor durante um degrau de tensão, apresentando um pequeno atraso em relação à referência. Da mesma forma na Figura 4 é exibida a simulação do circuito de controle de velocidade do motor de indução.

Figura 3 - Ampliação do gráfico de resposta para as implementações digital e analógica.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 4 – Variação da velocidade do motor.



Fonte: Autoria Própria.

## DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Inicialmente foram apresentadas as modelagens das malhas de corrente e tensão, incluindo o projeto dos controladores de cada uma. Através das simulações pode ser concluído que o projeto estava adequado para os parâmetros esperados de resposta.

E em seguida foi desenvolvimento da técnica de controle escalar V/F, baseado na literatura utilizada. Dessa forma, tem-se que o projeto teve o resultado esperado, apresentando um *overshoot* inferior a 10% quando o sistema é submetido a mudanças de referência de velocidade, além de responder de forma rápida e eliminar os erros de regime permanente do sistema, mostrando um funcionamento satisfatório do projeto desenvolvido no trabalho.

---

## Modeling and implementation of power inverter for driving induction motors

### ABSTRACT

**OBJECTIVE:** The current work presents the development and simulation of a scalar speed control system for single-phase induction motor. The used technique is called V/F control. For a better understanding of the project, a literature review was made on PWM modulation, DC/AC converters, speed control methods and induction motors. To achieve the work goals a single-phase inverter was developed and operated as a variable voltage and frequency power supply. The proposed method was applied for speed control of the induction motor based on the scalar V/F method using digital controllers. Simulation results are presented supporting the validity of the proposed work.

**KEYWORDS:** Modeling of power converters. Scalar control. Single-phase inverter.

---

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Fundação Araucária pela bolsa de Iniciação Científica concedida para desenvolvimento deste projeto.

## REFERÊNCIAS

BOSE, B. K. **Modern power electronics an AC drives**. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 2002.

BUSO, S.; MATTAVELLI, P. **Digital Control in Power Eletronics**. Lincoln: Lectures in power electronics, 2006.

IORGULESCU, M. **Study of single phase induction motor with aluminium versus copper stator winding**. 2016 International Conference on Applied and Theoretical Eletrecity. Craiova: [s.n.]. 2016. p. 1-5.

LUO, F. L.; YE, H.; RASHID, M. **Digital Power Eletronics and Applications**. San Diego: Elsevier Academic Press, 2005.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microelectronics circuits**. 6ª. ed. Nova Iorque: Oxford University Press, 2010.

**Recebido:** 31 ago. 2017.

**Aprovado:** 02 out. 2017.

**Como citar:**

ENDRICE, L. N. BONALDO, J. P. Modelagem e implementação de um inversor fonte de tensão para acionamento de motores de indução. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UTFPR, 22., 2017, Londrina. **Anais eletrônicos**. Londrina: UTFPR, 2017. Disponível em: <<https://eventos.utfpr.edu.br/sicite/sicite2017/index>. Acesso em: XXX.

**Correspondência:**

Lucas Niquele Endrice

Rua Manoel Mendes de Camargo, número 1470, Bairro Cento, Campo Mourão, Paraná, Brasil.

**Direito autoral:**

Este resumo expandido está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.

