

APLICAÇÃO DE UM SISTEMA NEURO NEBULOSO NO CONTROLE DE UM MOTOR DE INDUÇÃO

MÁRIO E. BORDON, MARCELO N. FRANCHIN, JOSÉ E. C. CASTANHO

*Departamento de Engenharia Elétrica
Faculdade de Engenharia - UNESP Campus de Bauru
Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, CEP. 17033-360, Bauru, São Paulo*

E-mails: mebordon@feb.unesp.br, franchin@feb.unesp.br, castanho@feb.unesp.br

Abstract - This paper presents a strategy of induction motor drive using a neuro-fuzzy system for speed and current control. This real time speed control of induction motor assures the current limit and the normal operation of induction motor. The control strategy operates in closed loop and has an automatic gain adjustment that provides the soft start requirements. In this controller there are only one control loop for speed and current of induction motor. The control loop allows adjusting the desired value of the rotation frequency and assures that current doesn't cross the limit stipulated for motor drive. The flexibility of a digital controller based on low cost microcontrollers can be verified from the results presented.

Keywords - Induction Motor, Fuzzy Logic, Neural Nets, Neuro-Fuzzy Systems, Speed Control, Current Restriction.

Resumo - Este artigo apresenta uma estratégia de controle de motores de indução usando um sistema neuro nebuloso para controle simultâneo de velocidade e corrente. O controle de velocidade em tempo real permite a operação normal do motor de indução sujeito a uma limitação de corrente. A estratégia de controle operando em malha fechada efetua o ajuste automático de ganho do controlador durante a partida do motor. Uma única malha de controle permite o ajuste da velocidade desejada e assegura que o limite de corrente estipulado não seja ultrapassado. A eficiência e flexibilidade do controlador digital baseado em microcontroladores de baixo custo podem ser verificadas a partir dos resultados obtidos.

Palavras-chave - Motor de Indução, Lógica Nebulosa, Redes Neurais, Sistemas Neuro Nebulosos, Controle de Velocidade.

1. INTRODUÇÃO

Para o acionamento de motores de indução, operando com velocidade variável, é vital o conhecimento de seus parâmetros para garantir respostas dinâmicas rápidas e precisas com bom desempenho em regime estacionário. O emprego de novas técnicas de acionamento de alto desempenho é um procedimento bastante desejável e sua utilização tem sido viabilizada, em tempo real, devido à constante evolução dos dispositivos eletrônicos e das técnicas e teorias de controle. [3] [7]

Este tipo de acionamento possui características que dificultam sua descrição formal através das teorias de controle clássicas, que utilizam modelos matemáticos complexos, baseados em um sistema de equações diferenciais com coeficientes variantes no tempo. O comportamento dinâmico, não linear e não estacionário do motor de indução, representa uma forte motivação para sistemas de controle baseados em lógica nebulosa e/ou redes neurais artificiais, visando novas estratégias de controle. [1] [2] [4] [8]

Um controlador neuro nebuloso combina a lógica nebulosa, atuando como ferramenta de inferência e as redes neurais artificiais, operando como ferramenta de agregação de dados. A combinação de tais ferramentas resulta em um dispositivo capaz de controlar sistemas com características lineares ou não lineares, propiciando alto grau de desempenho e eficiência. [6] [9]

O sistema de controle proposto neste trabalho permite o ajuste dinâmico de velocidade do motor de indução, através do controle da frequência de rotação do motor, em tempo real e assegura que a corrente de entrada não ultrapasse o limite especificado. A limitação de corrente não implica no desligamento do sistema, pois não se trata de um simples circuito de proteção. Trata-se de um sistema capaz de limitar a corrente de entrada do motor.

A estratégia de controle adotada não utiliza modelos matemáticos para estimar as condições de operação do motor de indução, pois depende apenas de informações que determinam o seu comportamento dinâmico.

Trata-se de um sistema de controle que opera em malha fechada, monitorando em tempo real a frequência de rotação do motor, visando minimizar ou anular as diferenças em relação à frequência desejada. [5]

Assim, o acionamento em malha fechada permite que um novo perfil de frequência seja obtido sempre que um valor de frequência desejada seja estabelecido, pois as condições de operação do motor de indução podem ser estimadas com informações precisas obtidas através de aquisição de dados em tempo real. O ganho de malha fechada é ajustado, automaticamente, a partir do valor da corrente de entrada do motor de indução.

A arquitetura do sistema de controle digital tem elementos de entrada e saída que interagem com uma unidade de controle, conforme indicado na Figura 1.

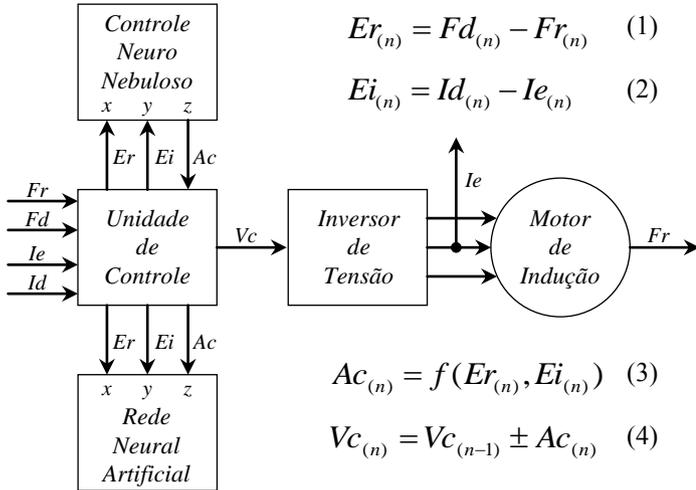


Figura 1. Arquitetura do Sistema de Controle

A unidade de controle executa algoritmos específicos previamente estabelecidos e gerencia todas as tarefas necessárias para o acionamento do motor de indução. Essa unidade efetua o tratamento de sinais analógicos, a aquisição de dados e o processamento de sinais.

Os sinais importantes são: a frequência desejada Fd , a frequência de rotação Fr , a corrente desejada Id , a corrente de entrada Ie , o erro de frequência Er , o erro de corrente Ei , as ações de controle Ac e a variável de controle Vc . A frequência de rotação Fr do motor é obtida, em tempo real, através de um *encoder* digital, enquanto que a corrente de entrada Ie do motor é obtida, em tempo real, utilizando sensores de efeito *Hall*.

O controlador nebuloso executa os procedimentos de *fuzzificação* das variáveis de entrada e *defuzzificação* das ações de controle Ac . Os limites de atuação do controlador são padronizados e as ações de controle são previamente calculadas. O ajuste do controlador é feito a partir de métodos básicos de inferência usados para formulação de regras de controle consistentes e depende do tempo de amostragem.

Trata-se de um controlador de uso geral que utiliza rotinas específicas para aquisição de dados e controle em tempo real. Pode ser construído a partir de um microcomputador equipado com placa de aquisição de dados, ou a partir de um circuito dedicado utilizando microcontroladores e conversores de 8, 12 ou 16 bits.

2. SISTEMA NEURO NEBULOSO

Este trabalho mostra uma metodologia de ajuste dinâmico de velocidade de um motor de indução, acionado através de inversor de tensão, usando controle digital com ajuste automático de ganho.

Este sistema de controle utiliza uma variável auxiliar para determinar as condições de operação do motor de indução e estabelecer o ajuste automático de ganho do controlador operando em malha fechada.

A variável auxiliar utilizada é a corrente de entrada do motor de indução e, para efeito de planejamento de ganho, a corrente de entrada é sempre comparada com um múltiplo da corrente nominal do motor de indução.

Neste caso, é necessária a composição de duas ações de controle, uma referente ao controle de frequência e outra referente ao controle de corrente, a fim de se obter uma única variável de controle Vc .

Uma rede neural artificial do tipo *CMAC* (*Cerebellar Model Articulation Controller*) é utilizada como uma ferramenta de agregação, capaz de mapear em memória as ações de controle necessárias para o acionamento do motor de indução, substituindo duas malhas de controle por apenas uma, gerando as ações de controle Ac em função do erro de frequência Er e do erro de corrente Ei , conforme indicado na Figura 1.

O algoritmo de controle executa os procedimentos de *fuzzificação* das variáveis de entrada e *defuzzificação* das ações de controle Ac . A estratégia de controle neuro nebuloso, utiliza as ações de controle Ac para gerar a variável de controle Vc , responsável pelo ajuste da frequência da tensão sintetizada pelo inversor.

A estrutura básica do controlador neuro nebuloso de arquitetura simplificada foi desenvolvida para que o mesmo fosse construído a partir de circuitos integrados microcontroladores de 8 bits. [5]

A operação do sistema neuro nebuloso baseia-se em procedimentos de treinamento, estimação e controle em malha fechada.

A Figura 2 mostra o procedimento de treinamento que assimila todas as regras de controle.

A Figura 3 mostra o procedimento de estimação que gera todas as ações de controle.

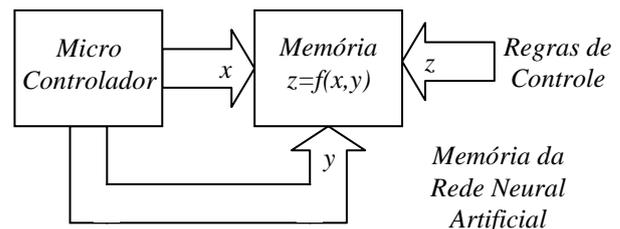


Figura 2. Assimilação das Regras de Controle (treinamento)

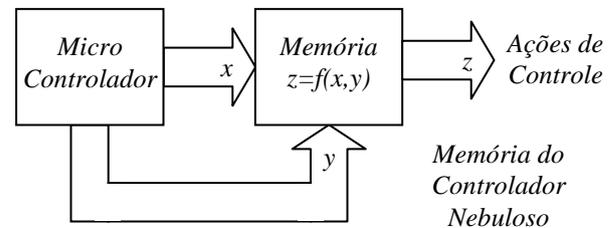


Figura 3. Obtenção das Ações de Controle (estimação)

Em sistema digital baseado em microcontroladores de 8 bits, as variáveis de entrada são representadas através de um único *byte*. Portanto, a estrutura das variáveis de entrada é definida conforme indicado na Tabela 1.

Tabela 1. Definição das Variáveis de Entrada

Entradas		Variável	Termo	Peso
Abs(Er)	Abs(Ei)	Cartesiana	Lingüístico	Associado
[Hz]	[A]	<i>x</i> ou <i>y</i>	Associado	w_x ou w_y
[0:16]	[0:4]	[0:64]	Muito Baixo	0
[0:32]	[0:8]	[0:128]	Baixo	1
[16:48]	[4:12]	[64:192]	Médio	2
[32:64]	[8:16]	[128:256]	Alto	3
[48:64]	[12:16]	[192:256]	Muito Alto	4

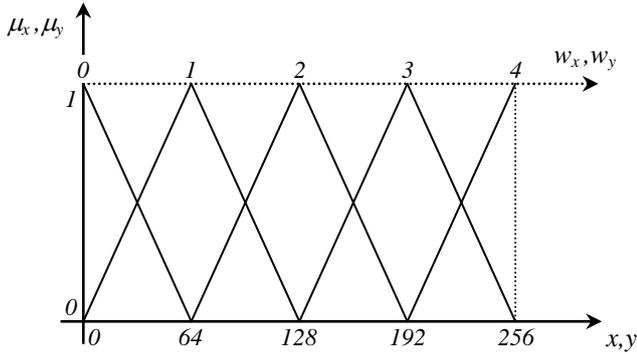


Figura 4. Funções de Pertinência das Entradas

A composição das regras de controle necessárias para o acionamento do motor usando uma única malha de controle é feita conforme indicado na Tabela 2.

Tabela 2. Composição das Regras de Controle

Abs(Ac)		Abs(Ei)					
		<i>y</i>	0	64	128	192	256
Abs(Er)	w_x	0	1	2	3	4	
	w_z	0	1	2	3	4	
	<i>Z</i>	0	0	0	0	0	0
	<i>P1</i>	0	1	2	3	4	
	<i>P2</i>	0	2	4	6	8	
	<i>P3</i>	0	3	6	9	12	
	<i>P4</i>	0	4	8	12	16	

Consideram-se apenas os valores absolutos das regras de controle *Ac* em função dos valores absolutos do erro de frequência *Er* e erro de corrente *Ei*. Os valores dos pesos w_z associados à variável de saída *z* foram obtidos através de operações básicas de inferência baseadas em conhecimento especialista.

A Figura 5 mostra a representação gráfica pontual das regras de controle indicadas na Tabela 2. As regras de controle pontuais não são suficientes para todo escopo das variáveis de entrada, portanto, é preciso definir um operador de agregação capaz de gerar todos os valores possíveis das ações e controle em função das entradas.

Neste trabalho, a rede neural artificial do tipo *CMAC* é usada como operador de agregação [5]. A Figura 6 mostra o mapa das regras de controle assimiladas pela rede neural conforme o procedimento de treinamento indicado na Figura 2. A Figura 7 apresenta o mapa das ações de controle estimadas pela rede neural de acordo com o procedimento indicado na Figura 3.

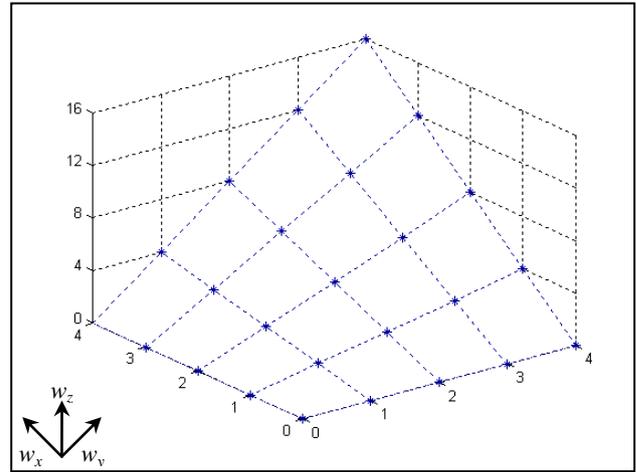


Figura 5. Pesos Associados às Regras de Controle

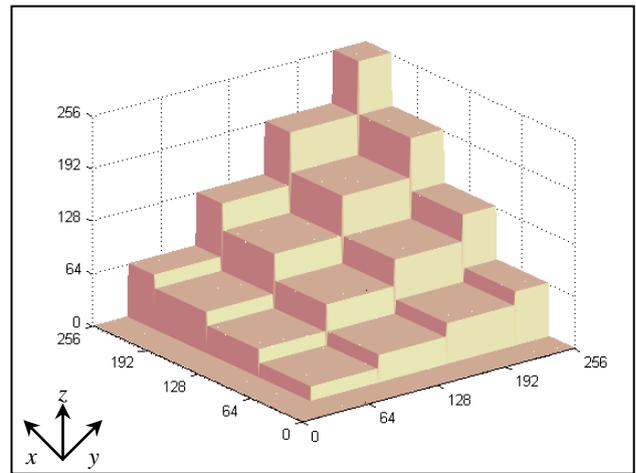


Figura 6. Regras Assimiladas pela Rede Neural

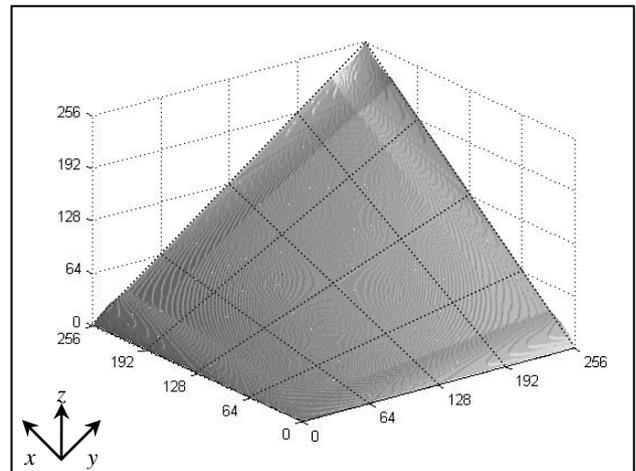


Figura 7. Ações de Controle Estimadas

Durante o treinamento todas as regras de controle são armazenadas em uma estrutura de memória do tipo $z=f(x,y)$ que constitui a rede neural. Com as informações previamente armazenadas a rede neural é capaz de estimar todas as ações de controle que são armazenadas na mesma estrutura de memória $z=f(x,y)$ que constitui o controlador nebuloso.

As variáveis de entrada Er , Ei e a variável de saída Ac , são consideradas em termos absolutos para melhorar a precisão do controlador, pois a arquitetura de 8 bits foi adotada como um fator limite do controlador. Por esse motivo, os sinais das variáveis de entrada Er , Ei e da variável de saída Ac foram tratados separadamente.

O sinal Sc das ações de controle Ac depende do sinal do erro de frequência Sr e do sinal do erro de corrente Si . O sinal Sc depende da combinação lógica dos sinais Sr e Si , determinado através da equação a seguir.

$$Sc_{(n)} = Sr_{(n)} \times Si_{(n)} \quad (5)$$

O valor atualizado da variável de controle Vc é calculado, periodicamente, a partir do valor absoluto das ações de controle Ac , conforme indicado na equação:

$$Vc_{(n)} = Vc_{(n-1)} + (Sc_{(n)} \times Ac_{(n)}) \cdot Kp \quad (6)$$

3. RESULTADOS

A parte prática deste trabalho foi desenvolvida no Laboratório de Automação e Controle de Máquinas do Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia da UNESP Campus de Bauru.

Para obtenção dos resultados foi utilizado um motor de indução trifásico, acoplado a um gerador síncrono trifásico, conectado a uma carga resistiva, composta de lâmpadas incandescentes, capaz de dissipar até $750W$ de potência ativa. Um gerador síncrono com momento de inércia de $0.045Nm$ capaz de gerar um conjugado de carga proporcional à frequência de rotação Fr .

A tensão de saída do gerador, foi ajustada através da corrente de excitação aplicada ao circuito de campo do gerador a fim de proporcionar carga nominal ao motor de indução operando em $60Hz$. A corrente de excitação do circuito de campo podia ser ajustada através de uma fonte de tensão retificada ajustável ou ser interrompida para o motor operar com carga nominal ou em vazio.

No laboratório foi usado um antigo inversor de tensão fabricado pela *Telemecanique*, modelo *Altivar*, com os seguintes dados nominais: tensão de $220V$, potência de $3,0kW$ e frequência de saída de $7Hz$ até $85Hz$, capaz de suportar uma corrente de partida de até $16A$.

O motor de indução usado foi fabricado pela *Weg* modelo *80-1190* com 4 pólos e os seguintes valores nominais: potência de $1.0Cv$, corrente de $3.8A$, tensão de $220V$, conjugado de $4.0Nm$ e frequência de $60Hz$.

As Figuras 8 e 9 mostram o motor de indução ligado direto na rede de alimentação em $60Hz$ indicando os valores, instantâneo e eficaz, da corrente de entrada.

O sensor de corrente foi fabricado pela empresa *Nana Electronics*, modelo *NNC-20CTA*. Um sensor de efeito Hall, capaz de medir uma corrente instantânea de até $100A$ e fornecer um sinal de saída de até $4.0V$, com tempo de resposta de $15\mu s$ e precisão de 1% .

O tacômetro digital usado para medir frequência de rotação, foi fabricado pela *Hohner*, modelo *BC* tipo incremental, capaz de gerar 1000 pulsos por rotação, com sinal de saída do tipo onda quadrada padrão TTL, rotação máx. de $6000rpm$ e frequência máx. de $100kHz$.

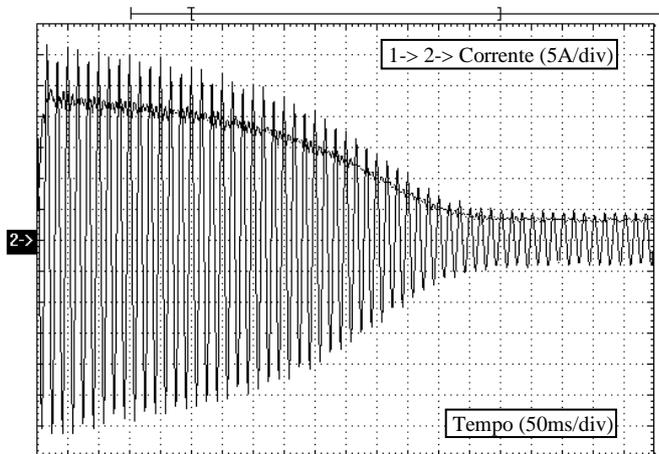


Figura 8. Partida do Motor de Indução Ligado Direto na Rede Acoplado ao Gerador Síncrono sem Corrente de Excitação

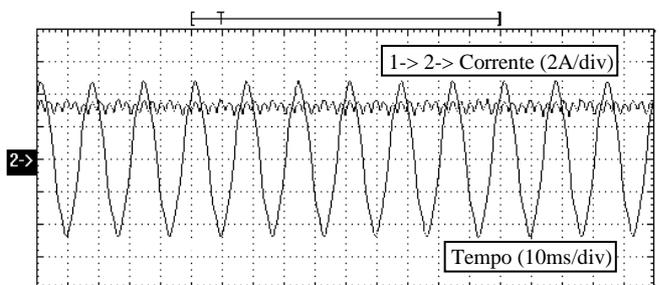


Figura 9. Corrente do Motor de Indução Ligado Direto na Rede Valor Instantâneo e Valor Eficaz com Carga Nominal

Procurando avaliar a estratégia de controle proposta no presente trabalho, foram realizados vários ensaios práticos utilizando diferentes algoritmos de controle, considerando o motor indução sempre acoplado ao um gerador síncrono, com seu circuito de campo operando com corrente de excitação ajustada para proporcionar carga nominal aplicada ao motor de indução.

Considerando que o objetivo principal deste trabalho é avaliar o desempenho do controlador neuro nebuloso, que opera com apenas uma malha de controle, foram realizados ensaios de diferentes situações de operação.

Para efeito de comparação também foram realizados ensaios práticos usando um controlador proporcional integral derivativo e um controlador nebuloso padrão de inferência indireta, ambos combinando duas malhas de controle, uma para frequência e outra para corrente.

O inversor de tensão usado é antigo e o ruído gerado pelo chaveamento dos transistores é significativo, como pode ser observado nos sinais de corrente, no entanto, a estratégia de controle foi capaz de ajustar a frequência de rotação e sustentar a limitação da corrente de entrada do motor de indução.

As Figuras de 10 a 13 mostram a resposta do sistema de controle para um degrau de 7Hz a 60Hz aplicado na entrada de frequência desejada F_d , usando controlador proporcional integral derivativo e controlador nebuloso, com limite de corrente de 12A e 16A.

As Figuras de 14 e 15 mostram a resposta do sistema de controle para um degrau de 7Hz a 60Hz aplicado na entrada de frequência desejada F_d , usando o controlador neuro nebuloso [6], objeto deste trabalho, com limite de corrente de 12A e 16A.

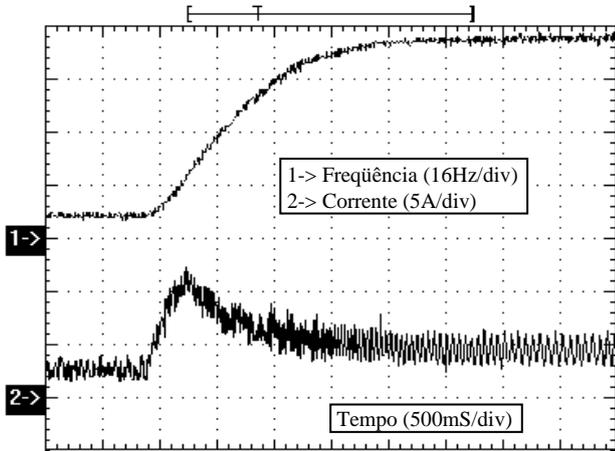


Figura 10. Controle PID com Limite de 12A

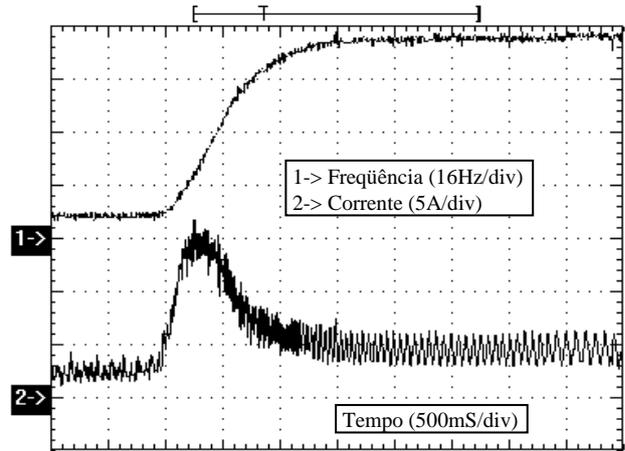


Figura 11. Controle PID com Limite de 16A

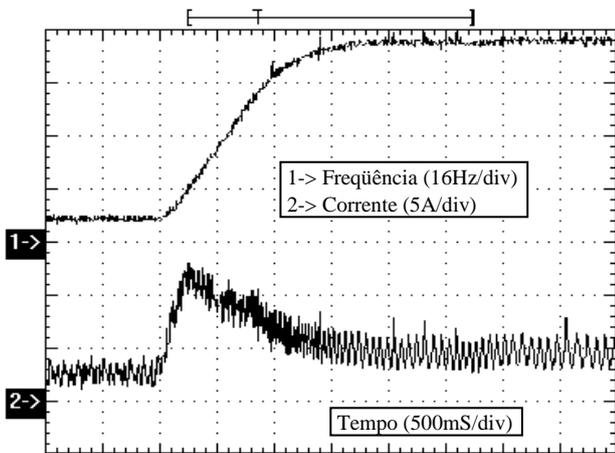


Figura 12. Controle Nebuloso com Limite de 12A

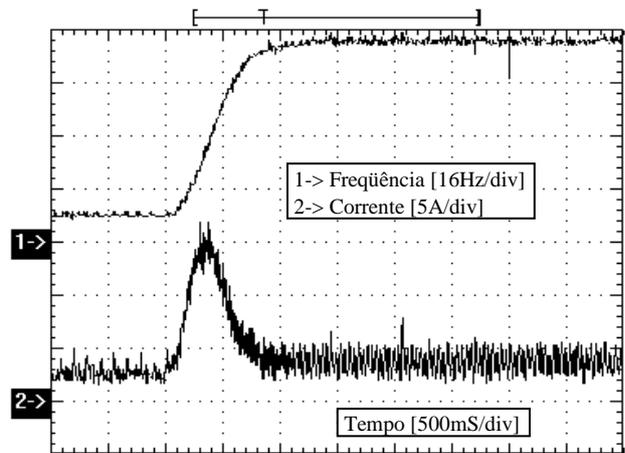


Figura 13. Controle Nebuloso com Limite de 16A

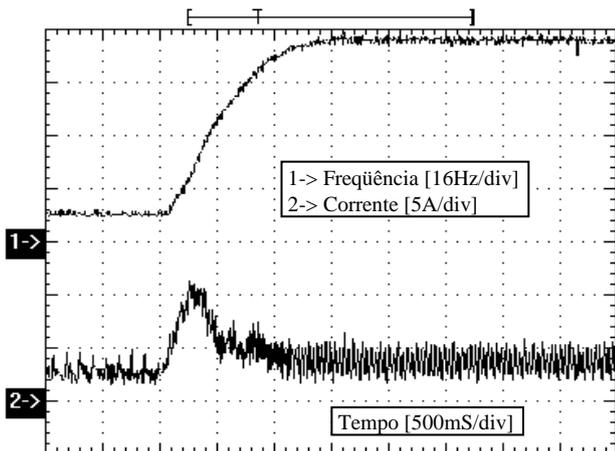


Figura 14. Controle Neuro Nebuloso com Limite de 12A

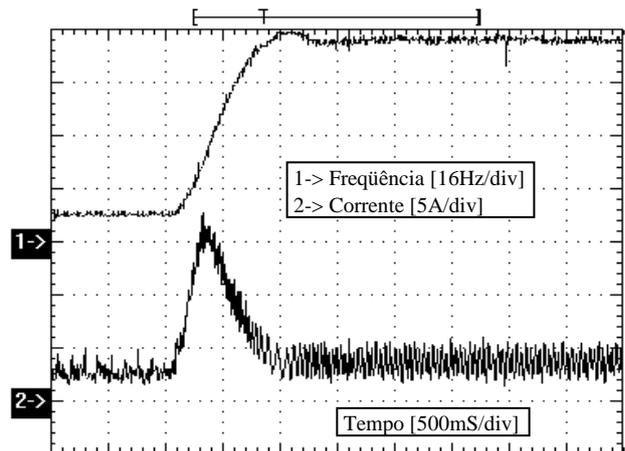


Figura 15. Controle Neuro Nebuloso com Limite de 16A

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

O tempo de resposta do motor de indução depende, principalmente, da corrente de partida que o circuito de acionamento é capaz de suprir, deste modo, quando o motor está ligado direto na rede, o tempo de resposta é o menor possível, no entanto, o acionamento do motor de indução com frequência variável não é possível.

A Figura 16 mostra frequência de rotação e a corrente de partida do motor de indução ligado direto na rede com carga nominal. Neste caso, o tempo de resposta do motor foi de $900ms$, aproximadamente, o mesmo valor obtido com o controlador neuro nebuloso operando com corrente limite de $16A$. Considerando que a corrente de partida do motor ligado direto na rede passa de $20A$, o tempo de resposta do controlador é bastante satisfatório.

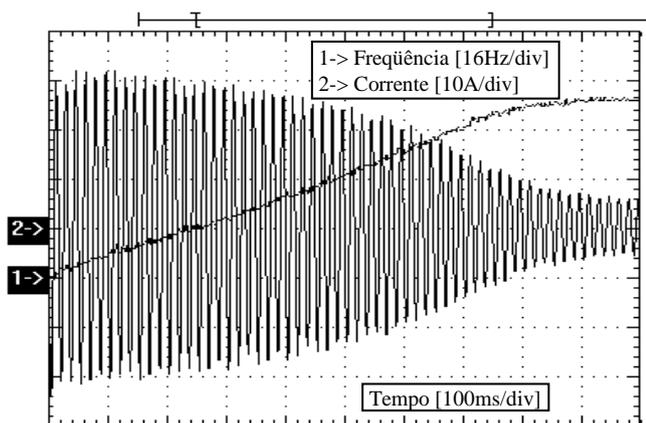


Figura 16. Corrente de Partida e Frequência de Rotação do Motor de Indução Ligado Direto na Rede com Carga Nominal

O desempenho do controlador neuro nebuloso é bem parecido com o do controlador nebuloso de inferência indireta que utiliza duas malhas de controle e leva em conta a derivada dos erros de frequência e de corrente.

O controlador neuro nebuloso usa apenas uma malha de controle, não sendo capaz de considerar a derivada dos erros, portanto, pode-se observar que a curva de resposta da frequência de rotação apresenta um pequeno sobre sinal, característico de sistemas que não levam em conta a derivada do erro.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho abordou, principalmente, o acionamento de um motor de indução, com controle da frequência de rotação e limitação da corrente de entrada e destacou as contribuições que a estratégia de controle digital neuro nebuloso oferece aos usuários de máquinas elétricas.

A estratégia de controle aplicada no trabalho permite o ajuste da frequência de rotação e o limite da corrente de entrada do motor de indução, obtendo em tempo real, um perfil de frequência adequado, sempre que um novo valor para frequência de operação seja estabelecido. A estratégia de controle também satisfaz a condição que limita a corrente de entrada do motor de indução.

No sistema de controle neuro nebuloso proposto neste trabalho o cálculo das ações de controle é feito através de um operador de agregação específico capaz de atuar como mecanismo de interpolação não linear.

Assim, uma rede neural do tipo *CMAC* atuando como operador de agregação permitiu o desenvolvimento de um novo sistema neuro nebuloso, aplicado no controle frequência de rotação e corrente de entrada de um motor de indução, utilizando uma única malha de controle.

A partir dos resultados práticos apresentados pode-se verificar a versatilidade e a confiabilidade do sistema de controle digital, baseado em microcontroladores de oito bits com $64Kbytes$ de memória para armazenar as ações de controle, sem comprometer o tempo de resposta e a precisão do sistema de controle.

6. REFERÊNCIAS

- [1] F. A. C. Gomide e R. R. Gudwin, "Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica Fuzzy", *Revista Controle & Automação*, vol. 4, n° 3, Setembro-Outubro, 1994, pp. 97-115.
- [2] G. Feng, "A Survey on Analysis and Design of Model-Based Fuzzy Control Systems," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 14, no. 5, pp. 676-697, 2006.
- [3] J. Holtz, "Pulse Width Modulation for Electronic Power Conversion", *IEEE Proceedings of Special Issue on Power Electronics and Motion Control*, vol. 82, 1994.
- [4] L. A. Zadeh, "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 3, 1994, pp. 28-44.
- [5] M. E. Bordon, I. N. da Silva and E. Avolio "Design of a Neuro-Fuzzy Controller with Simplified Architecture", *International Journal of Neural Systems*, vol. 11, n° 3, 2001, pp. 229-235.
- [6] M. N. Uddin, Z. R. Huang, and M. M. I. Chy, "A Simplified Self-Tuned Neuro-Fuzzy Controller Based Speed Control of an Induction Motor Drive," in *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2007, 2007, pp. 1-8.
- [7] R. Krishnan, *Electric Motor Drives - Modeling, Analysis and Control*, New Jersey: Prentice-Hall, 2002, 446 p. ISBN 0-13-091014-7.
- [8] W. Pedrycz and F. A. C. Gomide, *An Introduction to Fuzzy Sets Analysis and Design*, MIT Press, Massachusetts Institute of Technology, 1998.
- [9] Z. R. Huang and M. N. Uddin, "Development of a Simplified Neuro-Fuzzy Controller for an IM Drive," in *IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2006. ICIT 2006, 2006, pp. 63-68.