# Análise e Implementação do Tripolo de Hopfield

Alexsandro José Virgínio dos Santos<sup>1</sup>, José Homero Feitosa Cavalcanti<sup>1</sup> <sup>1</sup> DTM-CT/UFPB, Bairro Universitário, S/N. CEP58059-000 João Pessoa, PB E-mails: ajvs@bol.com.br, zevhom@uol.com.br

#### Abstract

This paper presents design details, algorithms, simulation and experimental results obtained from a new circuit that uses three Hopfield neurons coupled like a tripole. The tripole is used as analog to digital signal converter circuit and like an inverse and direct neural controller.

# 1. Introdução

Catunda & Cavalcanti [1] propuseram um controlador, baseado na Rede Neural de Hopfield -RNH [2,3], utilizando dois neurônios conectados entre si na forma de um dipolo. O controlador foi denominado Controlador Neural de Hopfield e a arquitetura dos dois neurônios foi chamada de dipolo de Hopfield. Baseando-se neste trabalho [4,6] Cavalcanti et ali apresentaram um novo conversor A/D denominado Dipolo de Hopfield usado como conversor Analógico Digital e como um controlador inverso [5].

Neste trabalho apresenta-se um tripolo de Hopfield utilizado como conversor A/D e como controlador inverso. Serão apresentados o modelo dos neurônios e os resultados obtidos de simulações e experimentais de um novo circuito baseado no tripolo utilizadeo na linearização da resposta de um conversor A/D. Além disso, serão apresentados resultados experimentais obtidos com um controlador diereto e inverso [7,8] usando o tripolo de Hopfield. Por último serão comparados os desempenhos obtidos experimentalmente dos controles de uma planta não linear utilizando o dipolo e o tripolo de Hopfield.

### 2. Os Neurônios de Hopfield

O neurônio de Hopfield, ilustrado na Figura 1, utiliza um circuito elétrico do tipo RC como armazenador de carga. Os  $X_{i1}$ ,  $X_{i2}$ ,... $X_{in}$  representam as entradas do neurônio, os  $W_{i1}$ ,  $W_{i2}$ , ...  $W_{in}$  representam os pesos. Obtém-se  $Y_i$  através da Eq. (1). Emprega-se a chave S1, indicada na Figura 1, para conduzir a zero a saída Oi do neurônio. Obtém-se a saída  $Z_i$ , na forma contínua, através da Eq. (2), com t representando o tempo.

$$Y_{i} = X_{i1}^{*}W_{i1} + X_{i2}^{*}W_{i2} + \dots + X_{im}^{*}W_{im}.$$
 (1)

$$\frac{dZ_i}{dt} = (Y_i - Z_i)/RC$$
(2)



Figura 1. O neurônio de Hopfield

A saída  $O_i$  do neurônio pode ser uma função sigmóide ou uma função tangente hiperbólica.

#### **3.** Os Dipolos de Hopfield

Uma RNH com dois neurônios, conforme ilustrado na Figura 2, representa os dipolos de Hopfield. Cada um dos dois neurônios possui uma entrada externa e uma entrada recorrente. As entradas externas do dipolo são denominadas I<sub>1</sub> e I<sub>2</sub>. A entrada X<sub>11</sub> do neurônio N<sub>1</sub> é conectada ao valor I<sub>1</sub>. A entrada X<sub>21</sub> do neurônio N<sub>2</sub> é conectada ao valor I<sub>2</sub>. Assim obtêm-se as entradas de N<sub>1</sub>: X<sub>11</sub>=W<sub>11</sub>\*I<sub>1</sub> e X<sub>12</sub>=W<sub>12</sub>\*O<sub>2</sub>, com W<sub>11</sub>>0 e W<sub>12</sub><0. As entradas de N<sub>2</sub> são: X<sub>21</sub>=W<sub>21</sub>\*I<sub>2</sub> e X<sub>22</sub>=W<sub>22</sub>\*O<sub>1</sub>, com W<sub>21</sub>>0 e W<sub>22</sub><0. Na Figura 2 os valores dos pesos são os seguintes: W<sub>11</sub>=W<sub>21</sub>=-1 (elipse) e W<sub>12</sub>=W<sub>22</sub>=1(losango).



Figura 2. Representação da RNH

Para ilustrar as características do dipolo ele é emulado num microcomputador padrão tipo IBM-PC. O número de iterações utilizado para calcular o valor de saída dos neurônios desde a fase transitória até o regime é denominado de ITER. Durante a emulação da RNH no microcomputador foram atribuídos os seguintes valores às variáveis: ITER=100,  $\beta$ =0.02 (ver [4 ou 6]), para I<sub>1</sub>=1.0 fixo e para diferentes valores de I<sub>2</sub> (0.1;0.5;0.9). Apresentam-se, na Figura 3, as curvas dos resultados obtidos durante a fase transitória da saída dos neurônios N<sub>1</sub> e N<sub>2</sub>. Antes de cada simulação O<sub>1</sub> e O<sub>2</sub> são forçados a zero utilizando a chave S1 apresentada na Figura 1. Os valores analógicos das saídas são representados por O<sub>1</sub> (linha contínua) e O<sub>2</sub> (linha tracejada). Na Figura 3 o ponto em que a curva O<sub>2</sub> cruza a abscissa (obtida com I<sub>1</sub>=1.0 e I<sub>2</sub>=0.5) está indicado pelo símbolo t<sub>1</sub>.



### 4. O Tripolo de Hopfield

A partir da análise dos resultados experimentais obtidos com o dipolo de Hopfield (apresentados na Figura 3), decidiu-se experimentar uma rede de Hopfield com três neurônios, e denomina-la de tripolo de Hopfield.

Na Figura 4 apresenta-se o esquema do tripolo de Hopfiled com as entradas "ref" e "atual". Os círculos escuros representam pesos com valor 1, os círculos brancos representam pesos com valor -1. Além disso,  $W_{11}=W_{22}=W_{33}=W_{21}=W_{12}=W_{13}=W_{23}=1$  e  $W_{31}=W_{32}=W_{31}/10$ . Basicamente, o novo neurônio tende a aumentar a importância da entrada atual na competição.

No desenvolvimento do tripolo utilizou-se uma variante do neurônio de Hopfield desenvolvida por Cavalcanti & Albuquerque (2000) pois  $W_{31} \neq W_{13}$  e  $W_{32} \neq W_{23}$ .



Figura 4. Arquitetura do tripolo

Na Figura 5 apresentam-se as curvas obtidas do tripolo para  $I_1=1$  e  $I_2=0;0.1;...;1$ . As saídas dos neurônios estão indicadas na cor azul para a saída  $O_1$ , vermelho para a saída  $O_2$  e verde para a saída  $O_3$ .



Na Figura 6 apresenta-se a forma normalizada do sinal de saída de  $O_2$  obtido com o tripolo. A curva na cor vermelha foi obtida com  $W_{33}$ =0.5, a curva na cor verde foi obtida com  $W_{33}$ =0.2, e a curva na cor a foi obtida com  $W_{33}$ =0.1. A forma da curva de  $O_2$  e a variação da curva de  $O_2$  em função do peso  $W_{33}$  (as três curvas) sugere a aplicação do tripolo em controladores do tipo inverso.



Na Figura 7 apresentam-se três curvas do sinal de saída de  $O_3$  do neurônio auxiliar obtido com o tripolo para diferentes valores de  $W_{33}$ , observe-se a semelhança entre as três curvas que apresentam uma quase linearidade mesmo com a variação de  $W_{33}$ , o que possibilita o uso do tripolo como circuito conversor A/D.



Figura 7. O<sub>3</sub> em função de I<sub>2</sub> e W<sub>33</sub>

### 5. O Dipolo como Controlador

As características observadas durante as simulações com o dipolo evidenciaram a possibilidade da sua aplicação em controladores (seção 4). Na Figura 8 apresenta-se a curva característica obtida com o dipolo utilizando os resultados de simulação apresentados na Figura 5. A abscissa dessa curva corresponde ao valor de I<sub>1</sub> (I<sub>1</sub>=0., 0.05, ..., 0.95,1.) a ordenada corresponde ao valor t<sub>1</sub> normalizado (todos os valores de t<sub>1</sub> divididos pelo valor máximo de t<sub>1</sub>).

Na Figura 9 apresenta-se esquematicamente um pêndulo simples. O comportamento dinâmico do mesmo é descrito matematicamente pela eq.3. Onde, t é o tempo na forma contínua,  $T_I(t)$  é o Torque de carga, P é o peso do pêndulo, M é a massa do pêndulo, L é o comprimento do pêndulo,  $\theta(t)$  é o ângulo entre o pêndulo e a vertical, e g é a aceleração da gravidade. O protótipo experimental utilizado neste trabalho consiste de um pêndulo com comprimento L = 0.01 m e massa M = 0.05 Kg que, para determinados valores do ângulo θ, apresenta torque T<sub>1</sub> maior que o atrito viscoso do eixo do motor. Considerando-se a aceleração do eixo do motor igual a zero, conseguida movimentando-se lentamente o pêndulo, vê-se que o T<sub>l</sub>(t) é proporcional ao seno( $\theta(t)$ ). Isto é, a função que representa o deslocamento do pêndulo pode ser aproximada por uma senóide.

$$T_{l}(t) = \frac{1}{2}(P/g)L^{2} + PLsen(\theta(t))$$
(3)

Observando-se a Figura 8 vê-se que, grosseiramente, a função da saída do dipolo assemelha-se a função inversa da senóide (para  $0 \le \theta \le \pi/2$ ), e que o dipolo possui características semelhantes às necessárias ao controlador neural inverso.



Figura 9 O Pêndulo simples

Na Figura 10 apresentam-se os resultados experimentais obtidos com o dipolo trabalhando como controlador inverso no posicionamento de um pêndulo simples. Utilizou-se, para se obter as curvas apresentadas na Figura 10,  $I_2=1.0$  e  $I_1=$ vref (vref representa a posição de referência do pêndulo). Os valores de  $t_1$  obtidos após a competição entre os neurônios  $N_1 \in N_2$  foram utilizados como valores em malha aberta de acionamento do motor de corrente contínua cujo pêndulo está acoplado ao seu eixo.

A seguir foi construído um sistema para controlar a posição do pêndulo. O sistema foi desenvolvido num microcomputador IBM PC usando a saída da impressora para comunicação entre o microcomputador e o pêndulo.

Na Figura 10 apresentam-se três curvas constituídas de 800 pontos. As abscissas das curvas representam o tempo variando entre 0 e 16s. A cada 1ms foi lida a posição do pêndulo e a cada 20ms foi calculado um novo valor de controle. A curva superior representa a tensão na armadura do motor de corrente contínua fornecida pelo dipolo (tempo t<sub>1</sub> normalizado). Na parte inferior da área das curvas apresentam-se duas curvas, a curva da posição referência (vref, curva superior) e a curva do deslocamento do pêndulo (atual, curva inferior). Observe-se que o dipolo não conseguiu posicionar corretamente o pêndulo, e que o menor erro ocorreu na região central das curvas.

CONTROLE INVERSO USAD	O TRIPOLOS DE	HOPFIELD			_ 🗆 ×		
<u>Arquivo Motores Estabilização</u>	Ajuda	_					
Teste experimental off line							
RN Aleatória Grava RN	Branco	Início	Espera	378 💌	3BC		
Amostra 800 Desloc 14 I	Refer <mark>10</mark> uc =	38	100				
DIP-HOP	TRIP-HOP						
				enha na tela.			
			🗹 Des	enha gráfico.			
				L			
-							
			"				
			£	~~~			
- Relation 6 🖉 🗑 🖄 🥞 🕲	77 🖪 🖄 🛛 👪				1354		

Figura 10. Controle inverso usando dipolo

## 6. O Tripolo como Controlador

Observou-se a partir da Figura 6 que, modificandose  $W_{33}$  em função do erro observado entre a saída da planta e a referência, se pode controlar diretamente a planta descrita na seção anterior. Na Figura 11 apresenta-se a arquitetura do controlador neural direto inverso proposto neste trabalho. No tripolo de Hopfield coloca-se uma nova entrada proporcional ao erro no neurônio N<sub>3</sub>, o valor do controle direto será dado por  $W_{33}$ \*atual + k\*( $\Sigma$ erro). Onde o erro é definido como a diferença entre o valor de referência e o valor de saída da planta, k é uma constante de proporcionalidade, e  $\Sigma$  é a somatória do erro.



Figura 11. Controle inverso direto usando tripolo.

Na Figura 12, semelhante à Figura 10, apresentam-se três curvas obtidas com o tripolo de Hopfield controlando a planta descrita na seção anterior. Observe-se que em alguns instantes o tripolo conseguiu posicionar corretamente o pêndulo.

SONTROLE INVERSO USA	DO TRIPOLOS DE H	IOPFIELD			_ 🗆 X
<u>Arquivo Motores Estabilização</u>	o <u>Aj</u> uda				
		l este exp	perimental off li	ne Motor CC	-Motor Pas
RN Aleatória Grava R	N Branco	Início	Espera	378 💌	3BC
Amostra 800 Desloc 13	Refer 10 uc =	<mark>38</mark>	100		
DIP-HOP	TRIP-HOP				
			🖂 🖂 De	senha na tela.	
			🗹 De	senha gráfico.	
	~				
				<u></u>	
~ ~					
	<u></u>		r		
1980 Inician 🛛 🖉 🕅 🕅 🕅 🕸 🕅	n 🕶 🗖 😜 🛛 🚟 ი.	. Ruildor A Stat	control i hon	Crofice	12.57

Figura 12. Controle inverso usando tripolos

Nas Figuras 13 e 14 apresentam-se as curvas obtidas no posicionamento do pêndulo usando o dipolo e o tripolo de Hopfiled. Observe-se que a tensão gerada pelo tripolo (valor na saída de  $O_2$ ) aumenta no intuito de tornar zero o erro entre a referência e a saída da planta.



Figura 14. Comparação entre os controladores: Posicionamento

### 7. Conclusão

Apresentou-se uma RNH com três neurônios denominada tripolo de Hopfield. A partir das curvas das saídas do dipolo, obtidas por simulações, foram definidas as características de funcionamento do tripolo de Hopfield.

Baseado nessas definições, e observando-se que a saída do terceiro neurônio fornece valores de conversão A/D numa forma quase linear, foi proposto um tripolo de Hopfield que lineariza a conversão A/D pelo tripolo.

Baseado no dipolo de Hopfield, em que a saída do segundo neurônio pode ser utilizado num controlador inverso, e que o valor da saída  $O_3$  é proporcional ao peso  $W_{33}$ , propôs-se utilizar o tripolo de Hopfield como controlador inverso direto. A seguir foram apresentados resultados experimentais do tripolo de Hopfield controlando plantas não lineares. Foram comparados os

resultados obtidos pelo dipolo e o tripolo no controle de plantas não lineares mostrando que o tripolo de Hopfield consegue sintonizar a saída da planta sobre a referência. O sistema de controle do pêndulo foi escrito na linguagem C do Builder C++ da Borland.

Futuramente serão apresentados resultados experimentais de um circuito analógico/digital implementado a partir com os três neurônios de Hopfield que funcionou como controlador inverso direto e conversor A/D. Também serão analisados alguns tipos de estratégias desenvolvidas para a adaptação do peso W<sub>33</sub> ao erro na saída da planta.

# 8. Referências Bibliográficas

 [1]Catunda, S. Y. C. and Cavalcanti, J.H.F. (1997).
 Adaptative Hopfield Neural Controllers , IEEE International Symposium on Industrial Electronics -ISIE'97, Guimarães, Portugal, Pp.1206-1211.

- [2]Hopfield, j. J. (1982). Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities. Republicado por E. Sanchez-Sinencio & C. Lau, Artificial Neural Networks, IEEE Press, New York, pp. 25-29.
- [3]Hopfield, J.J. (1988). Neurons with graded response have collective computational properties like those of two-state neurons. Proc. Nac. Acad. Sci. U.S.A., vol.81, pp. 3088-3092. Republicado por J. A. Anderson & E. Rosenfeld. Neurocomputing Foundations of Researchs. MIT Press, Cambridge, Massachusets, USA, 1988. Pp. 579-583.
- [4]Cavalcanti, J.H.F e Santos, A.J.V. dos, Treinamento do Dipolo de Hopfield usado como conversor A/D, Congresso Brasileiro de Redes Neurais, CBRN'2001, Rio de Janeiro RJ, 2001, pp.2016-2020.
- [5]Cavalcanti, J.H.F e Albuquerque, A.C. e Ferreira, J.R.S. "Uma Nova Abordagem para os Pesos da Rede Neural Artificial de Hopfield", Congresso Brasileiro de Automática, CBA'2000, Florianópolis SC, 2000, pp.2021-2023
- [6]Cavalcanti, J.H.F e Santos, A.J.V. dos, "Controlador Inverso Utilizando Dipolos de Hopfield", INDUSCON, Bahia, julho de 2002.
- [7]Äström, K.J. & Wittenmark, B. Adaptive Control, Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1989.
- [8]Narenda, K. S. & Parthasarathy, K., Identification and Control of Dynamical Systems Using Neural Networks, IEEE Transactions On Neural Networks, Vol.1 No.1, march 1990, pp.4-27.