



SISTEMA ESTABILIZADOR DE PLANOS

José Ricardo da Silva Ferreira

Universidade da Amazônia – CCEN/Dpto de Informática

Av. Alcindo Cacela, 287 – 66060-000 – Belém, PA

E-mail: ricardoferreira@ieee.org

Joelson Nogueira de Carvalho

José Homero Feitosa Cavalcanti

Everaldo Fernandes Monteiro

Universidade Federal da Paraíba - CCT/COPIN/NEUROLAB

Rua Aprígio Veloso, 882 - Campus II - 58109-790 - Campina Grande - PB

E-mails: {joelson,homero}@dsc.ufpb.br

***Resumo.** Este artigo apresenta o projeto e a implementação de um sistema robótico, composto por um protótipo de um plano artificial e um sistema inteligente, projetado para controlar e estabilizar o plano sujeito a perturbações em dois de seus eixos. O sistema inteligente é composto por um controlador neural e uma base de regras que garante a estabilização do plano em tempo real.*

***Palavras-chave:** Sistemas inteligentes, Redes neurais artificiais.*

1. INTRODUÇÃO

As limitações dos controladores tradicionais podem ser atribuídas a necessidade de se modelar matematicamente a dinâmica da planta para que o controle alcance o desempenho desejado (Rao et al., 1996). Em muitas situações esse tipo de controle é prejudicado devido a dificuldade de se obter o modelo exato da dinâmica da planta. As Redes Neurais Artificiais (RNAs) representam uma classe das técnicas de Inteligência Artificial que permite o controle da dinâmica de plantas não lineares.

Uma vantagem das RNAs no controle de processos é a sua facilidade de adaptação em tempo real, ou seja, o controle através de uma RNA pode ser modelado e aprendido “on-line” durante o processo de controle. A estabilização do plano proposta neste artigo representa um exemplo deste tipo de problema. A figura do plano está presente em muitos sistemas mecânicos, por exemplo: Robótica, Engenharia Naval, Aeronáutica, Televisão e outros. Nesses sistemas, existem situações onde os planos estão sujeitos a variações que podem ser prejudiciais ao sistema, havendo necessidade de se implementar algum tipo de controle de correção para manter o plano sempre na posição horizontal.

Um exemplo de aplicação que requer tal mecanismo de estabilização de plano é a instalação de antenas parabólicas ou equipamentos de recepção de sinais de satélites em embarcações. Devido a constante instabilidade das embarcações de pequeno porte, não é possível a utilização desses equipamentos nas mesmas. Neste artigo inicialmente será apresentado um estudo sobre o plano, a descrição da montagem experimental do protótipo, a análise geométrica do problema, o controlador neural utilizado no controle da estabilização, os comentários sobre os resultados experimentais obtidos e os detalhes da implementação do software de controle.

2. O PLANO E AS RETAS

Um plano é uma figura geométrica que repousa sobre pelo menos duas retas que se interceptam em um ponto (Vasilyev & Gutnmacher, 1980). A Fig. 1 ilustra o desenho de um plano representado por duas retas, X e Y, perpendiculares entre si e uma terceira reta Z passando pela interseção das retas X e Y. Neste trabalho considera-se que o Plano P está estabilizado sempre que a reta Z estiver com os ângulos θ_x e θ_y igual a 90° em relação às retas X e Y, ou seja, qualquer variação nesses ângulos representa uma perturbação à estabilização.

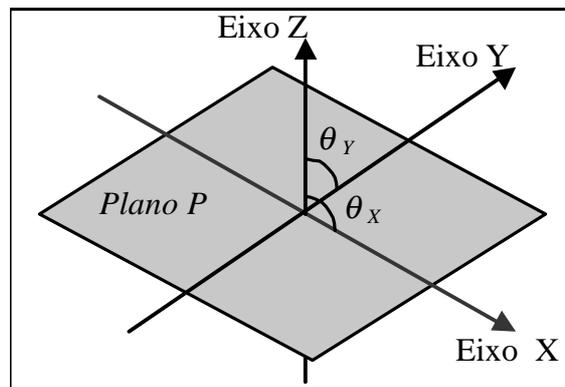


Figura 1 - Representação do plano e das retas.

Considera-se também que, um plano está estabilizado horizontalmente sempre que a reta Z estiver cruzando o centro da terra, conforme ilustrado na Fig. 2. Um pêndulo (em repouso) ligado ao plano, sujeito à ação da gravidade terrestre pode representar esta reta Z. O plano está sujeito às seguintes variações nos seus eixos: a) Rotação em torno do eixo X; b) Rotação em torno do eixo Y; c) Deslizamento do plano sobre a reta Z.

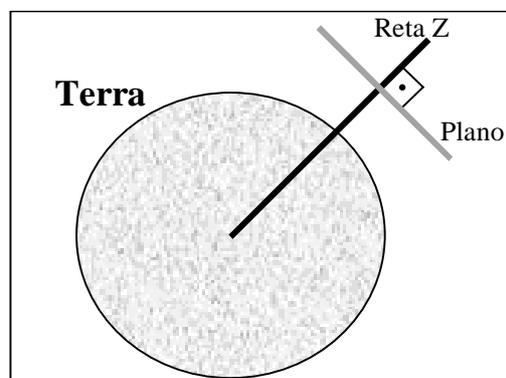


Figura 2 - Plano estabilizado horizontalmente.

3. MONTAGEM EXPERIMENTAL

Inicialmente construiu-se um protótipo experimental conforme ilustrado na Fig. 3. O plano a ser estabilizado foi construído na forma de um triângulo retângulo isósceles, pendurada a uma base de apoio através de três cabos. O cabo ligado ao vértice do ângulo reto é fixo na base de apoio apenas para sustentação do plano. Os outros dois cabos, ligados aos outros dois vértices do plano estão presos, cada um, a um motor elétrico localizado na base de apoio que sustenta o plano de maneira que, a ação dos motores permita alterar a inclinação do plano. A característica física desses dispositivos conduziu a utilização do plano na forma de um triângulo retângulo.

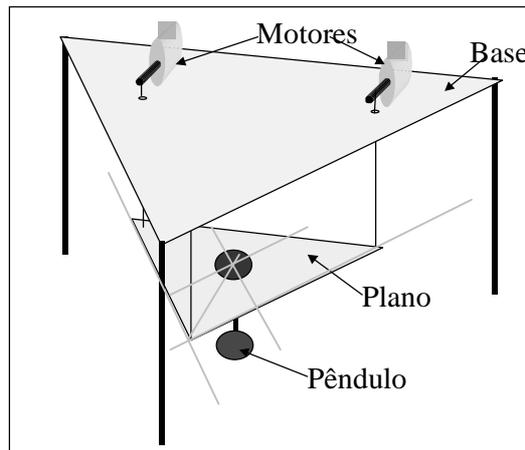


Figura 3 - Montagem do protótipo.

Para emular o sistema de detecção da variação da posição do plano em relação ao eixo Z, utilizou-se um pêndulo acoplado a um sensor para a detecção das variações nos eixos X e Y (registro das coordenadas). O pêndulo pode ser afetado pelos maciços da terra. Entretanto, neste trabalho esse efeito foi desprezado pois a massa do pêndulo utilizado no protótipo é muito pequena para ser afetada pelos maciços da terra. Esses eixos sofreram um deslocamento da origem para ficarem inscritos nos catetos do triângulo retângulo que forma o plano. O pêndulo está localizado no centro de massa do plano, onde passa o eixo imaginário Z, apenas os eixos X e Y podem variar. Havendo uma perturbação na base de apoio, o pêndulo se move para ficar inscrito sobre o eixo Z. Utilizou-se os sensores de um mouse como o registrador das variações nos eixos X e Y do plano. Quando o plano oscila, o dispositivo giratório do mouse registra em tempo real e com boa resolução, a magnitude das variações nos eixos em termos de unidades de coordenadas. A Fig. 4 ilustra a montagem do pêndulo acoplado ao dispositivo giratório do mouse. Os cabos que sustentam o plano, ilustrado na Fig. 5, possuem comprimento L e podem inclinar até 30° relativamente à vertical de tal forma que a variação da altura dos vértices pode ser de até 5cm para baixo e para cima .

As variáveis L_X e L_Y que representam os comprimentos dos cabos que são acoplados aos motores elétricos M_X e M_Y têm comprimentos iniciais iguais a 20cm. A variável L_Z tem comprimento constante de 20cm. Denominou-se θ_X o ângulo entre o pêndulo e o eixo X, θ_Y o ângulo entre o pêndulo e o eixo Y, θ_{Xr} o ângulo referência para o eixo X e θ_{Yr} o ângulo referência para o eixo Y. Os valores de θ_X e θ_Y são obtidos através dos sensores de variações.

Definiu-se os erros em cada eixo como $E_X = \theta_{Xr} - \theta_X$ para o eixo X, $E_Y = \theta_{Yr} - \theta_Y$ para o eixo Y. Procura-se estabelecer $E_X = E_Y = 0$. Assim, o módulo de controle do sistema pode ser uma rede neural, com entradas E_X e E_Y e saídas U_X e U_Y . Os valores dessas saídas são utilizados para controlar os motores elétricos (ver a seção 5).

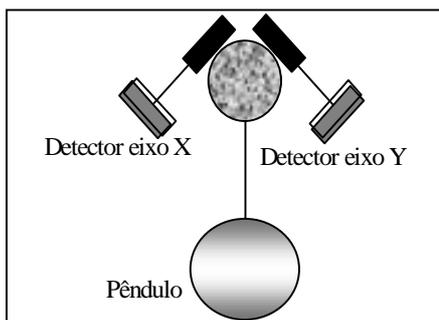


Figura 4 - Pêndulo acoplado a um mouse.

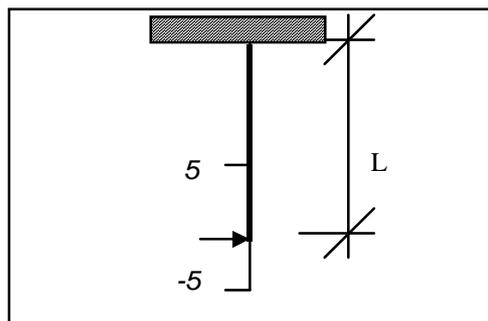


Figura 5 – Um dos cabos de sustentação do plano.

4. ANÁLISE GEOMÉTRICA

A estabilização do plano, que é forçar $E_x=E_y=0$, depende dos valores fornecidos pelos sensores do mouse (θ_x e θ_y) acoplados ao plano. Aplicando-se os valores de E_x e E_y à rede neural obtém-se o número de passos que cada motor deve girar para que a superfície de referência desejada seja alcançada. Os valores de (θ_x e θ_y) dependem da posição do plano, do comprimento dos cabos, e dos diâmetros das polias conforme ilustrado na Fig. 6. O giro do motor provoca uma variação linear no cabo que, por sua vez, efetua uma variação angular no plano.

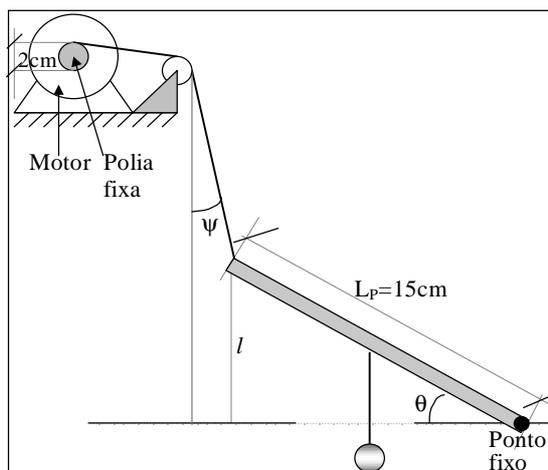


Figura 6 - O ângulo θ e a componente ψ .

Considerando-se que a variação linear do cabo depende do perímetro da polia fixa ao motor, ilustrada na Fig. 6, definida pela Eq. (1) e que esta polia fixa tem raio $r=1\text{cm}$, tem-se a variação linear (l) do cabo dada pela Eq. (2), onde α representa o ângulo rotacionado pelo motor. A Eq. (3) representa essa mesma relação, mas em função do número de passos (p) rotacionados pelo motor (Os motores elétricos de passo utilizados no protótipo rotacionam $1,8^\circ$ a cada passo).

$$C = 2\pi r \tag{1}$$

$$l = 0,017\alpha \tag{2}$$

$$l = 0,0306p \tag{3}$$

As transmissões das variações lineares dos cabos poderiam ser transferidas diretamente para os ângulos θ_x e θ_y através da função seno dada na Eq. (4), pois é conhecido o comprimento dos catetos do plano P ($L_p=15\text{cm}$). Porém, como esse comprimento L_p é fixo, para cada variação linear do cabo existe uma componente angular ψ , ilustrada na Fig. 6, no sentido vertical, que compensa a variação do ângulo θ devido L_p ser constante e um dos vértices do plano estar fixo. Para o valor de θ pequeno, pode-se aproximar $\text{Sen}(\theta) = \theta$. Obtém-se a Eq. (5). A variação de θ em função de l pode ser aproximada pela Eq. (6).

$$\text{Sen}(\theta) = \frac{l}{L_p} \quad (4)$$

$$\theta = \frac{l}{L_p} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial l} = \frac{1}{L_p} \quad (6)$$

5. O CONTROLADOR NEURO-FUZZY

O projeto do controlador baseou-se nas experiências anteriores realizadas em (Ferreira et al., 1998), (Cavalcanti & Ferneda, 1995) e (Alsina & Cavalcanti, 1997). Decidiu-se utilizar uma Rede Neural Artificial Multicamadas (RNMC) como controlador neural, com dois neurônios na camada de entrada, quatro neurônios na camada oculta e dois neurônios na camada de saída, conforme ilustrado na Fig. 7. Nesta figura, as entradas da rede neural (E_x e E_y) são os valores dos erros nos eixos X e Y. W_{in} representa os pesos entre as camadas de entrada e oculta, e W_{out} representa os pesos entre as camadas oculta e de saída. U_x e U_y são os sinais de controle dos motores de passo referentes aos eixos X e Y. Utilizou-se o algoritmo da propagação retroativa do erro (Hummelhart *et al.*, 1986) para o treinamento da rede neural controladora.

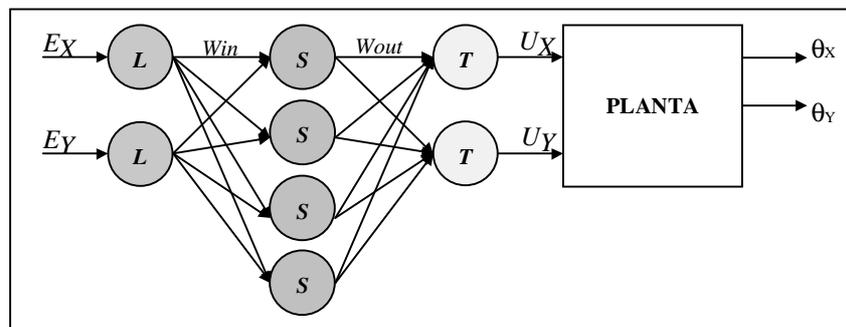


Figura 7 - RNMC do controlador e a planta.

Aplicando-se a regra delta generalizada descrita na Eq. (8) com o índice de desempenho, descrito na Eq. (7), obtém-se a Eq. (9). A variável E na Eq. (7) representa o erro. Observando-se a Eq. (6), sabendo-se que vê-se que o jacobiano da planta pode ser uma constante. O deslocamento do eixo do motor de passo é proporcional a l (Eq.2 e Eq.6) e a variável U , que é a entrada da planta normalizada entre -1 e 1 com um peso de 2π rd. Nas Eq.11 e Eq.12 são apresentados as equações de treinamento da RNMC, com $\chi = \eta\beta$ representando o fator de treinamento da RNMC.

$$I(U) = \frac{1}{2} E^2 \quad (7)$$

$$U_{K+1} = U_K + \beta(-\Delta_I) \quad (8)$$

$$U_{K+1} = U_K + \beta E \frac{\partial \theta}{\partial U} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial U} \cong \frac{\partial \theta}{\partial l} = \frac{1}{L_p} = \eta \quad (10)$$

$$U_{X_{K+1}} = U_{X_K} + \chi E_X \quad (11)$$

$$U_{Y_{K+1}} = U_{Y_K} + \chi E_Y \quad (12)$$

6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados experimentais obtidos a partir de uma perturbação no eixo X durante o processo de estabilização do plano são ilustrados na Fig. 8. O plano é desestabilizado sempre que θ_x assume um valor diferente de θ_{rx} com variação máxima de 30° a -30° . Após 4s de execução do sistema, provocando-se perturbações no eixo X, foi obtido o gráfico de desempenho ilustrado na Fig. 8. Observe-se que o controlador acompanha a dinâmica da planta razoavelmente. Na Fig.8 a variável θ_{rx} é a linha de referência no valor de 0° (ângulo de estabilização desejado). Na mesma figura, θ_x é o gráfico dos valores da posição do plano em relação ao eixo X. As oscilações observadas em θ_x são decorrentes das perturbações sofridas pela planta.

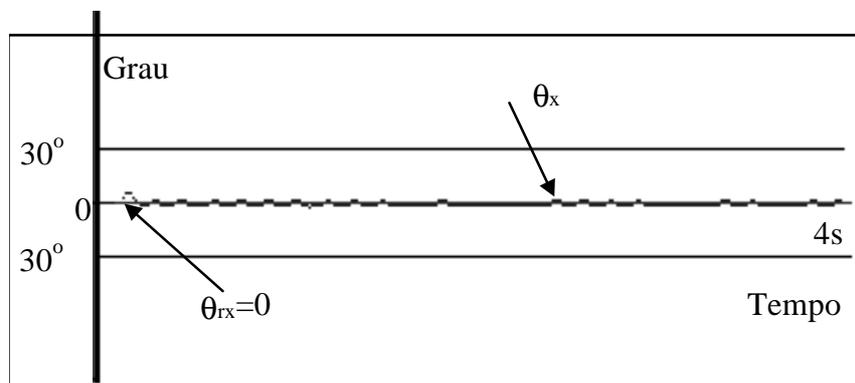


Figura 8 - Gráfico da estabilização do eixo X.

7. O PROGRAMA DO SESPLA

O SESPLA foi implementado, utilizando Microsoft Builder C++, num microcomputador PENTIUM com o sistema operacional WINDOWS'95. A interface gráfica do SESPLA é composta de três janelas. A primeira janela, ilustrada na Fig. 9, apresenta o desenho da rede neural artificial (canto direito inferior), o gráfico de um sistema de coordenadas cartesianas que indicam a posição do pêndulo sob o plano a cada instante (canto esquerdo inferior), as informações sobre a posição do plano e as informações das ações do controlador neural sobre os

motores (canto superior esquerdo), e o conjunto de opções de comando para algumas funções básicas dos motores.

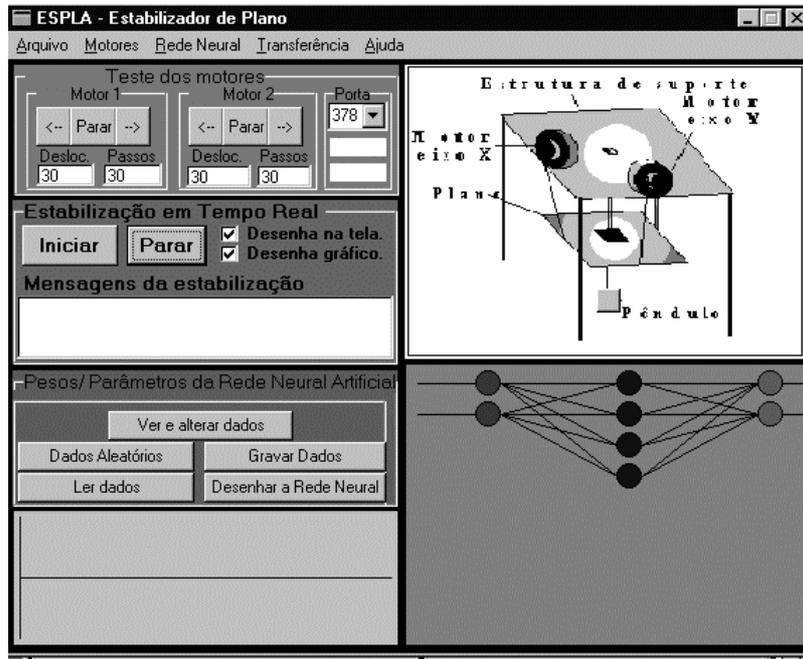


Figura 9 - O SESPLA.

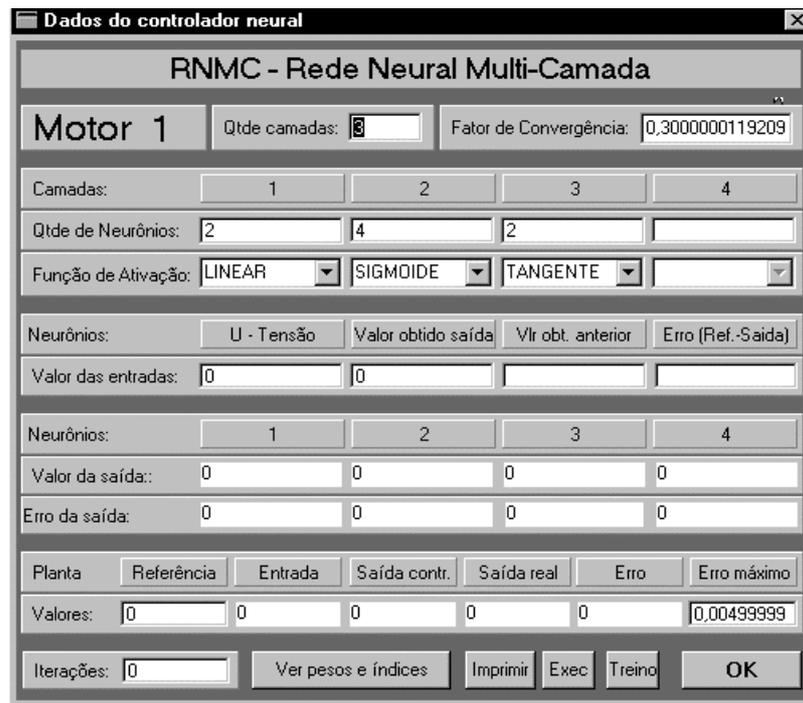


Figura 10 - As características da RNMC.

A segunda janela, ilustrada na Fig. 10, apresenta detalhes da arquitetura da RNMC. Observe que a RNMC possui três camadas de neurônios que são do tipo linear na camada de entrada, sigmóide na camada oculta e tangente hiperbólico na camada de saída (Cavalcanti & Fereda, 1995). A terceira janela, ilustrada na Fig. 11, apresenta os valores iniciais dos pesos e parâmetros dos neurônios da RNMC.

Pesos e Parâmetros do controlador Neural 1			
Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4
Neurônio 1 >beta = 1.000000 >teta = 1.000000 >t = 0.000000 >erro = 0.000000 +>pesos > 1 = 1.000000 ----- Neurônio 2 >beta = 1.000000 >teta = 1.000000 >t = 0.000000 >erro = 0.000000 +>pesos > 1 = 1.000000 ----- Neurônio 3 >beta = 1.000433 >teta = 1.000648 >t = 0.040270 >erro = 0.000000 +>pesos > 1 = -0.022290 > 2 = -0.156409 ----- Neurônio 4	Neurônio 1 >beta = 1.000102 >teta = 1.000668 >t = 0.014426 >erro = 0.000000 +>pesos > 1 = -0.199413 > 2 = -0.065942 ----- Neurônio 2 >beta = 1.000446 >teta = 1.000769 >t = 0.036964 >erro = 0.000000 +>pesos > 1 = 0.014783 > 2 = -0.121692 ----- Neurônio 3 >beta = 1.000433 >teta = 1.000648 >t = 0.040270 >erro = 0.000000 +>pesos > 1 = -0.022290 > 2 = -0.156409 ----- Neurônio 4	Neurônio 1 >beta = 1.000000 >teta = 1.000000 >t = 0.000000 >erro = 0.000000 +>pesos > 1 = -0.354322 > 2 = -0.390061 > 3 = -0.345756 > 4 = -0.199264 ----- Neurônio 2 >beta = 1.000000 >teta = 1.000000 >t = 0.000000 >erro = 0.000000 +>pesos > 1 = -0.067288 > 2 = -0.042534 > 3 = -0.022327 > 4 = -0.090632 ----- Neurônio 3 >beta = 1.000000 >teta = 1.000000 >t = 0.000000 >erro = 0.000000 +>pesos > 1 = -0.067288 > 2 = -0.042534 > 3 = -0.022327 > 4 = -0.090632 ----- Neurônio 4	

Figura 11 - Pesos e Parâmetros da RNMC.

8. CONCLUSÃO

Neste trabalho apresentou-se o projeto, implementação e alguns resultados experimentais obtidos do funcionamento de um novo sistema estabilizador de planos utilizando redes neurais artificiais. A partir da análise geométrica do comprimento dos cabos que sustentam o plano foram propostas duas equações para o treinamento da RNMC utilizada para a estabilização do plano em uma posição especificada. Por último, apresentou-se a interface visual gráfica que permite o acompanhamento de todo o processo de estabilização do plano.

REFERÊNCIAS

- Rao, D. H., Gupta, M. M. and Wood, H. C., 1996, Neural networks in control systems, Neural networks theory technology, and applications, pp. 173-204.
- Vasilyev, N. and Gutenmacher, V., 1980, Straight lines and curve, Mir Publishers, Moscow.
- Ferreira, J. R. S., Alsina, P. J. e Cavalcanti, J. H. F., 1998, Escalonador inteligente de tarefas aplicada à robótica, III IEEE INDUSCON – Conferência de aplicações industriais, São Paulo, pp. 117-120.
- Cavalcanti, J. H. F. and Ferneda, E., 1995, Intelligent control of an inverted pendulum - training and evolution, SEMISH'95, Canelas, RS, pp 627-637.
- Alsina, P. J. and Cavalcanti, J. H. F., 1997, Real-time intelligent control system for load exchange between two robots, Workshop on Intelligent Robotics, Brasília.
- Hummelhart, D. E., Hinton, G. E. and Williams, R. J., 1986, Learning internal representations by error propagation, parallel distributed processing: explorations in the microstructures of cognition, MIT Press, pp 318-362.

Title: PLANE STABILIZATION SYSTEM

Abstract. This paper presents the robotic system project and implementation, composed by a plane artificial prototype and an intelligent system. The plane can have disturbances in two of its axes. The intelligent system is composed by a neurocontroller and based-rules that it guarantees the real-time plane stabilization.

Keywords: Intelligent systems, Artificial neural networks.