

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-9037-PRP/233

**REDES NEURAIIS NO MODELAMENTO E CONTROLE DE
TOKAMAKS – APLICAÇÃO AO ETE
(EXPERIMENTO TOKAMAK ESFÉRICO)**

QUINTO RELATÓRIO

Luis Filipe de Faria Pereira Wiltgen Barbosa
Gerson Otto Ludwig

**FAPESP – PROCESSO 98/06050-8
DOUTORADO DR-II
Área de Engenharia Nuclear / Fusão Controlada
PERÍODO: março de 2002 a julho de 2002**

INPE
São José dos Campos
2002

**REDES NEURAIS NO MODELAMENTO E CONTROLE
DE TOKAMAKS – APLICAÇÃO AO ETE
(EXPERIMENTO TOKAMAK ESFÉRICO)**

QUINTO RELATÓRIO

Luis Filipe de F .P.W.Barbosa

Gerson Otto Ludwig

**FAPESP - PROCESSO 98/06050-8
DOUTORADO DR-II
Área de Engenharia Nuclear / Fusão Controlada
PERÍODO: março de 2002 a julho de 2002**

INPE
São José dos Campos
2002

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**REDES NEURAIIS NO MODELAMENTO E CONTROLE
DE TOKAMAKS – APLICAÇÃO AO ETE
(EXPERIMENTO TOKAMAK ESFÉRICO)**

QUINTO RELATÓRIO

Luis Filipe de F .P.W.Barbosa
Gerson Otto Ludwig

**FAPESP - PROCESSO 98/06050-8
DOUTORADO DR-II
Área de Engenharia Nuclear / Fusão Controlada
PERÍODO: março de 2002 a julho de 2002**

INPE

São José dos Campos

2002

Proposta e Relatório de Projeto (PRP)

**REDES NEURAIIS NO MODELAMENTO E CONTROLE DE
TOKAMAKS – APLICAÇÃO AO ETE
(EXPERIMENTO TOKAMAK ESFÉRICO)**

QUINTO RELATÓRIO

**Luis Filipe de F.P.W. Barbosa¹
Gerson Otto Ludwig²**

1 Bolsista da FAPESP e estudante de doutorado do Departamento de Engenharia Eletrônica do Instituto Tecnológico da Aeronáutica - ITA - Engenheiro Eletricista do Projeto Tokamak ETE no Laboratório Associado de Plasma - Centro de Tecnologias Associadas - LAP / CTE / INPE

2 Pesquisador do Laboratório Associado de Plasma - Centro de Tecnologias Associadas - LAP / CTE / INPE e orientador de tese

**Relatório apresentado a FAPESP, referente a bolsa de Doutorado DR-II
Área de Engenharia Nuclear / Fusão Controlada
março 2002 a julho de 2002**

RESUMO

Este projeto de pesquisa compreende a utilização e a aplicação de Redes Neurais Artificiais (RNA) no controle de sistemas não-lineares, visando a aplicação desta técnica em sistemas de controle por reconstrução magnética do equilíbrio do plasma de tokamaks. Como forma de estudar e testar os conceitos envolvidos na aplicação de RNA no controle da posição do plasma em tokamaks, foi projetado e construído um sistema de Levitação Magnética (MagLev). O MagLev permite estudar o comportamento não-linear deste problema que, em muitos aspectos, é similar ao que ocorre em tokamaks. Aplicando um controlador neural e utilizando técnicas de inteligência artificial, é possível montar um paralelo entre a técnica de controle clássico (PI, PD e PID) e a de controle inteligente (RNA).

Com base nos resultados obtidos com o controle do MagLev, por meio de neuroprocessadores, será possível aplicar o mesmo princípio para projetar e encontrar a melhor topologia de RNA para o sistema de controle neuroprocessado de tokamaks, mais especificamente para o caso do Experimento Tokamak Esférico (ETE), em operação desde novembro de 2000 no Laboratório Associado de Plasma (LAP) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em São José dos Campos, São Paulo.

Este trabalho de doutorado em engenharia compreendeu, no seu primeiro e segundo ano, o estudo da necessidade de se controlar o campo magnético vertical em tokamaks, para obter o equilíbrio da posição da coluna de plasma. Foi idealizada uma proposta para utilizar RNA no controle do equilíbrio do plasma em tokamaks. Através de simulação computacional foi possível a formação de uma base de dados para treinamento, validação e teste de RNA para casos de disparos do tokamak ETE, além das simulações estimarem as melhores posições para as bobinas sensoras de campo magnético vertical. Foram utilizados os diagnósticos de medidas de campo magnético vertical e de imagem CCD no tokamak ETE, para verificar o comportamento do plasma no início de sua operação, com a finalidade de tornar as simulações computacionais mais realistas. Foi realizado também um levantamento detalhado dos hardwares neurais existentes, a fim de especificar o mais adequado para este estudo. No terceiro e quarto anos, foi realizado o estudo detalhado do comportamento do sistema de levitação magnética (MagLev), o qual possibilitou projetar e construir um MagLev para servir como experimento para testes comparativos de controles clássico e inteligente. Foram realizadas várias simulações computacionais de RNA utilizando algumas das variantes do algoritmo de treinamento do tipo *Back-Propagation*, a fim de escolher qual seria a mais adequada para o controle em tokamaks. No final do trabalho, pretende-se mostrado um paralelo entre controle clássico e inteligente, operando com controladores dedicados ao processo. Serão mostrados os resultados de equilíbrio para modo estacionário, para perturbações propositais inseridas no sistema e também o comportamento do sistema para diferentes pontos de equilíbrio. Isto possibilitará adquirir experiência suficiente para projetar o sistema de controle neural do ETE e outras máquinas similares. Esta experiência também possibilitará a aplicação de controladores neurais em outros sistemas que possuam comportamento não-linear, tais como, sistemas robóticos e processos industriais.

SUMÁRIO

1 - Introdução	1
2 - Controle do Levitador Magnético (MagLev)	2
2.1 - Projeto do Compensador (Atraso de Fase) e os Problemas Relacionados com o Eletroímã Original do MagLev	2
2.2 - Nova Função de Transferência e Análise do LGR para o Novo Compensador	4
2.3 - Projeto do Circuito Compensador (Avanço de Fase)	6
2.4 - Construção do Novo Eletroímã e a Análise de Controle Clássico	9
2.4.1 - Projeto do Circuito Compensador para o Novo Eletroímã	12
2.5 - Resultados Experimentais do MagLev com o Novo Eletroímã	16
3 - Hardware Neural NeuroMatrix	19
3.1 - Características da Placa Neural e dos Neuroprocessadores	19
3.2 - Proposta para a Aplicação do Hardware Neural	22
4 - Conclusões e Perspectivas	24
Referências Bibliográficas	25
Apêndice A - Justificativa para a Compra do Hardware Neural	27
Apêndice B - Artigo Publicado na Fusion Engineering and Design	28
Apêndice C - Documentos de Referência do Hardware Neural NeuroMatrix	29
Apêndice D - Tabelas Comparativas de Hardwares Neurais	30

1. Introdução

Este relatório é referente aos últimos cinco meses do quarto período da bolsa de doutorado da FAPESP (março de 2002 a agosto de 2002).

No último relatório, foi apresentada uma análise detalhada do controle da estabilidade do Levitador Magnético (MagLev) utilizando técnicas de controle clássico. Faltava ainda a construção do circuito do compensador de atraso de fase proposto para o controle do MagLev utilizando o controle clássico. Neste relatório será apresentado o projeto deste compensador, seus resultados e as medidas que foram tomadas para que o circuito de controle clássico funcionasse como esperado. Os resultados e os projetos dos novos circuitos serão apresentados no decorrer do Capítulo 2.

Durante este período foi também realizada a compra do hardware neural do tipo NeuroMatrix da empresa russa Module. Conforme vem sendo relatado, desde o primeiro período da bolsa de doutorado, existia uma grande dificuldade em encontrar fornecedores para este tipo de equipamento. Finalmente, no mês de junho foi adquirida, com recursos da reserva técnica, uma placa neural que possibilitará a conclusão deste trabalho de doutorado. Pretende-se mostrar que a utilização desta técnica, baseada em controladores neuroprocessados, é uma solução para problemas não-lineares em que as teorias de controle tradicionais não se aplicam, quer seja por se tornarem extremamente complexas ou simplesmente por não apresentarem uma solução adequada.

No Capítulo 3 será mostrado em detalhes o hardware neural adquirido para a conclusão deste trabalho. No Apêndice A é apresentada uma justificativa para a aquisição deste equipamento, ainda que no final do período de concessão da bolsa de doutorado.

Neste período, houve oportunidade para escrever um artigo publicado na revista Fusion Engineering and Design (60 - 2002, 403-407), o qual está transcrito no Apêndice B. Este artigo está relacionado ao trabalho realizado durante o mestrado no sistema de controle do tokamak ETE, e que ainda conta com a minha discreta participação.

No decorrer deste relatório, tem-se:

No capítulo 2 é apresentado o projeto do compensador para o controle do sistema de Levitação Magnética sob o ponto de vista de controle clássico. São apresentados resultados de simulação e experimentais dos antigos e dos novos compensadores, circuitos e eletroímãs.

No capítulo 3 são apresentadas as características técnicas da placa neural adquirida e proposta para a aplicação no controle do MagLev.

No apêndice A tem-se a justificativa para a compra do hardware neural.

No apêndice B tem-se a transcrição do artigo publicado na revista Fusion Engineering and Design.

No apêndice C tem-se alguns dos documentos de referência do hardware neural NeuroMatrix da Module.

No apêndice D tem-se as tabelas comparativas de hardwares neurais existentes.

2. Controle do Levitador Magnético (MagLev)

2.1. Projeto do Compensador (Atraso de Fase) e os Problemas

Relacionados com o Eletroímã Original do MagLev^[01-08]

No início do funcionamento do Levitador Magnético^[01-04] foi utilizado um sistema de controle bastante simples, baseado na realimentação dos sensores de posição, como já era esperado, o sistema apresentava um comportamento instável. A instabilidade do sistema foi estudada com o auxílio da teoria clássica^[04-11] de controle. A fim de tornar o sistema estável foi projetado um compensador do tipo atraso de fase (filtro passa baixa), conhecido também como controlador do tipo *Proporcional-Integral* (PI).

O compensador foi construído baseado nas equações de controle clássico^[04] para controladores do tipo Atraso de Fase. Estas equações são:

$$\frac{E_2(s)}{E_1(s)} = \frac{1 + R_2Cs}{1 + (R_1 + R_2)Cs} \quad (01)$$

utilizando:

$$aT = R_2C \quad (02)$$

e

$$a = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad a < 1 \quad (03)$$

$$G_c(s) = \frac{E_2(s)}{E_1(s)} = \frac{1 + aTs}{1 + Ts} \quad a < 1 \quad (04)$$

Para uma $G_c(s)$ igual a:

$$G_c(s) = k \frac{s + 200}{s + 20} \quad (05)$$

Tem-se:

$$\begin{aligned} aT &= 200 \\ C &= 100\mu F \\ R_2 &= 2M\Omega \end{aligned}$$

Como a é dado por:

$$a = \frac{K_{\text{para amortecimento desejado}}}{K'_{\text{para o desempenho estacionário}}} \quad a < 1 \quad (06)$$

sendo $K = 0,707$ e $K' = 1$:

$$\begin{aligned} a &= \frac{1}{8} = 0,125 \\ R_1 &= 14M\Omega \end{aligned}$$

Este compensador é implementado conforme a Figura 1.

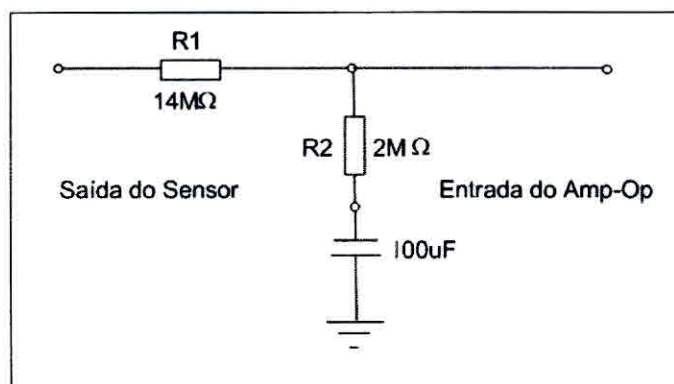


Fig.1 – Rede de compensação do tipo Atraso de Fase

Logo que o circuito da Figura 2 foi testado, observou-se que o compensador parecia não ser eficaz, quer fosse pelo ajuste fino de controle, dado que para este sistema a região de controle é bastante limitada, ou por quê o modelo do sistema não previa outros efeitos físicos como o da histerese no núcleo do eletroímã. O modelo utilizado nas simulações do MatLab não levaram em conta a inércia do eletroímã, causada pelo núcleo de ferro 1020.

Devido à histerese magnética do eletroímã não ser desprezível, o efeito de retardo dinâmico causado pelo magnetismo residual no núcleo, fez com que o controlador não realimentasse corretamente o circuito de compensação causando um erro de controle. Durante os testes experimentais observava-se que mesmo quando a corrente no eletroímã era desligada, ou seja, não havia mais campo magnético devido à corrente elétrica, a esfera assim mesmo vinha a colidir ou “colar” na cabeça do eletroímã que devido a histerese ficava por alguns instantes magnetizado. A fim de sanar este problema, foram realizadas outras simulações no MatLab as quais mostraram melhores resultados no controle, mesmo assim a opção de substituir o eletroímã era considerada.

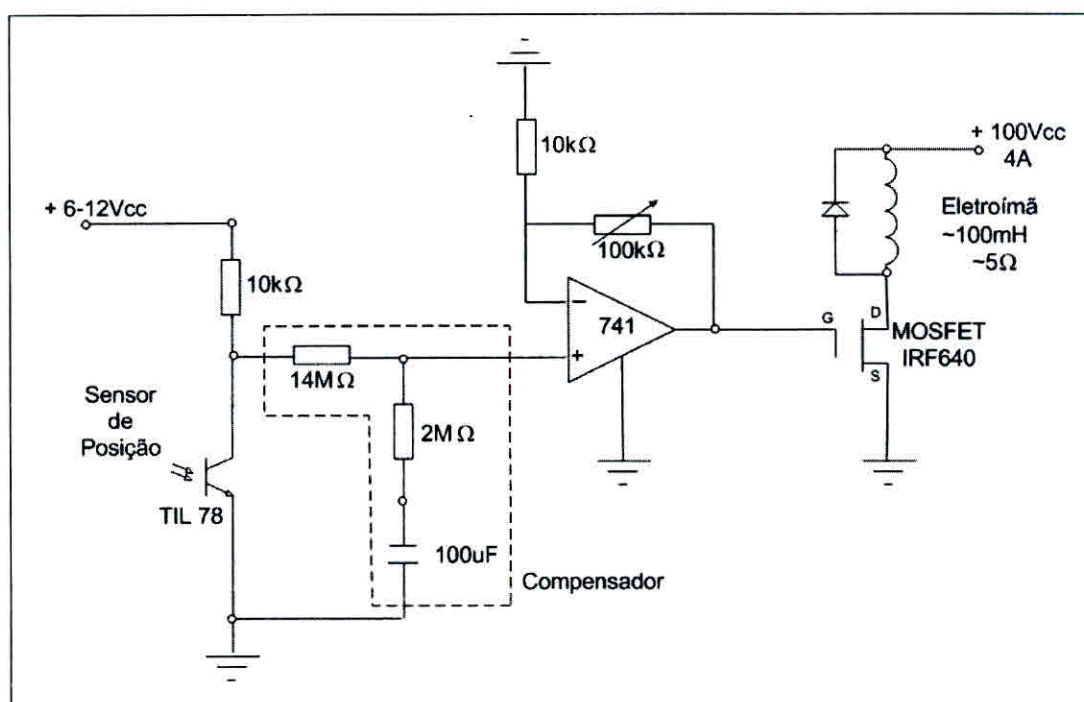


Fig.2 – Circuito de controle e rede de compensação do tipo Atraso de Fase para o eletroímã original do MagLev

2.2. Nova Função de Transferência e Análise do LGR para o Novo Compensador^[04-13]

Reorganizando a Função de Transferência (FT) do MagLev, conforme visto no relatório anterior^[04], para tentar compensar o efeito do magnetismo residual do eletroímã original tem-se:

$$G(s) = 1 + \frac{G_c(s)kB/mL}{\left(s + \sqrt{\frac{ki_0}{mx_0}}\right)\left(s - \sqrt{\frac{ki_0}{mx_0}}\right)\left(s + \frac{R}{L}\right)} \quad (07)$$

Na Tabela 1, observa-se as características construtivas do sistema original transcritas do último relatório^[04].

Tabela 1 - Parâmetros do MagLev

x_0	0,05 m
i_0	4 A
m	0,001 kg
R	5,2 Ω
L	93 mH
C	25 μ N.m ² /A ²
k	0,08 N/A
B	1200 V/m

Substituindo os valores do sistema, listados na Tabela 1, a FT fica:

$$G(s) = 1 + \frac{1032258G_c(s)}{(s + 80)(s - 80)(s + 56)} \quad (08)$$

Esta nova FT possui um Lugar Geométrico das Raízes (LGR) conforme pode ser observado na Figura 3. Este sistema possui dois pólos no semiplano direito em 56 e 80 e um pólo no semiplano esquerdo em -80.

A técnica de compensação de controle adotada para esta nova FT foi à utilização de um compensador do tipo Avanço de Fase, ou controlador do tipo *Proporcional Derivativo* (PD). Através de simulação computacional com o MatLab^[05,06,11] foi possível escolher o melhor compensador de Avanço de Fase para o sistema, que foi:

$$G_c(s) = k \frac{s + 40}{s + 400} \quad (09)$$

A equação característica do sistema, com o compensador permite, gerar outro LGR para o sistema com compensação, conforme mostra a Figura 4.

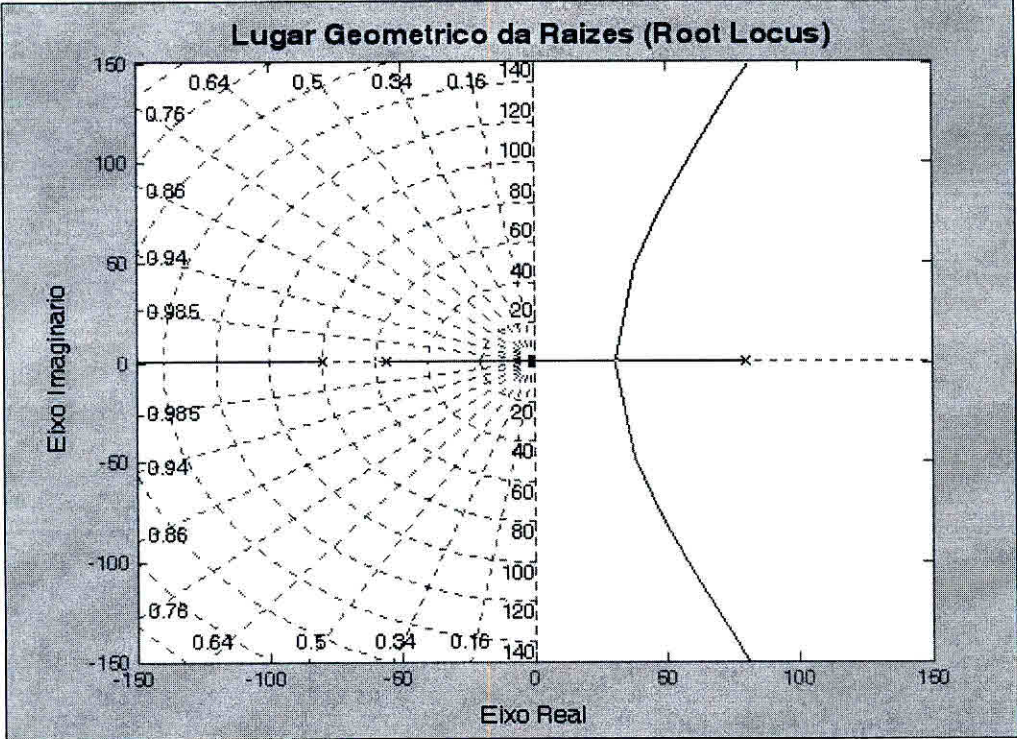


Fig.3 - Lugar Geométrico das Raízes para o MagLev sem compensação

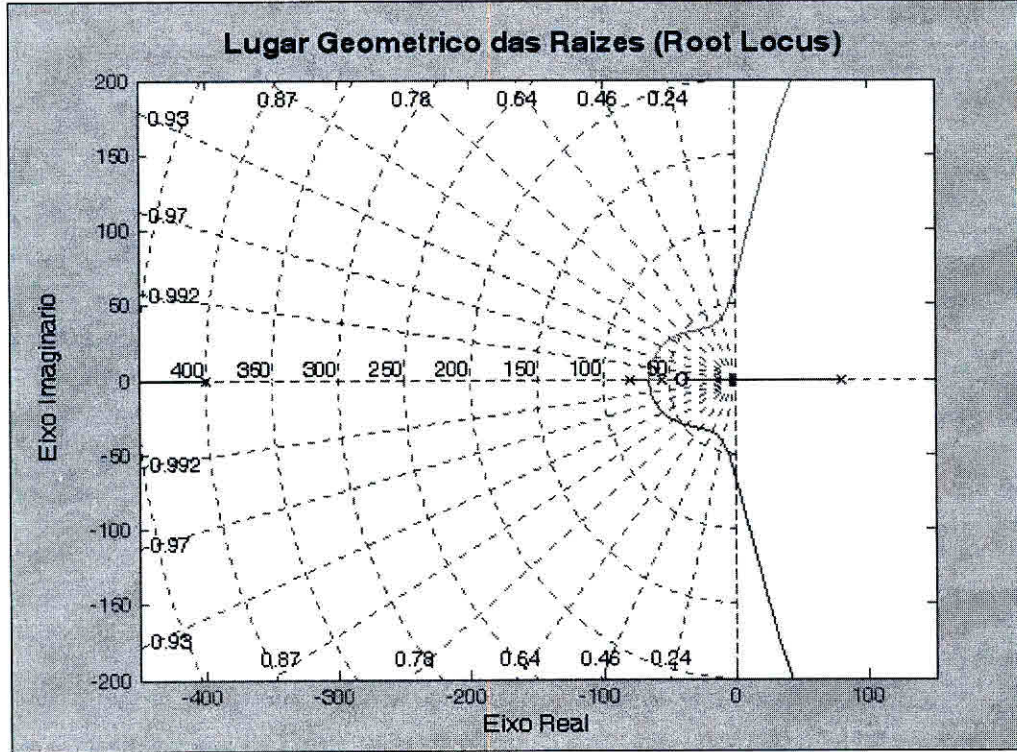


Fig.4 - Lugar Geométrico das Raízes para o MagLev com compensação

Observando o LGR modificado pelo compensador, pode-se notar que a principal diferença está no fato que a curva foi atraída para o semiplano esquerdo permitindo encontrar uma região que satisfaça o critério de estabilidade para este sistema. Entretanto nota-se também que a região de estabilidade continua pequena.

2.3. Projeto do Circuito Compensador (Avanço de Fase)^[04-07,12-14]

O compensador foi construído baseado nas equações de controle clássico^[04] para controladores do tipo Avanço de Fase (filtro passa alta). Estas equações são:

$$\frac{E_2(s)}{E_1(s)} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \frac{\frac{R_3}{CR_4 \cdot R_3}}{\frac{R_4 + R_3}{CR_4 + R_3}} \quad (10)$$

utilizando:

$$\frac{1}{aTs} = \frac{R_3}{CR_4 \cdot R_3} \quad a > 1 \quad (11)$$

e

$$\frac{1}{Ts} = \frac{R_4 + R_3}{CR_4 \cdot R_3} \quad (12)$$

$$G_c(s) = \frac{E_2(s)}{E_1(s)} = k_c \frac{s + 1/aTs}{s + 1/Ts} \quad a > 1 \quad (13)$$

Para uma $G_c(s)$ igual a:

$$G_c(s) = k_c \frac{s + 40}{s + 400} \quad (14)$$

tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{1}{aT} &= 40 \\ C &= 100\mu F \\ R_4 &= 250\Omega \end{aligned}$$

e a é:

$$\begin{aligned} Ts &= \frac{1}{400} = 2,5 \cdot 10^{-3} \\ a &= \frac{1}{100 \cdot 10^{-3}} = 10 \end{aligned}$$

e desta forma tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} &= 400 \\ R_3 &\cong 30\Omega \end{aligned}$$

Falta ainda calcular a rede para o ganho do compensador (k_c), que para este caso é diferente e menor que 1, na simulação utilizando o aplicativo *SISO Design Tool* do MatLab, o valor de k_c é 0,00305. Sendo $k_c = (1 + R_1 / R_2)$, substituindo o valor de R_2 e k_c tem-se:

$$R_2 = 10k\Omega$$

$$R_1 = -9,96k\Omega \text{ resistência negativa!}$$

O fato aparecer uma resistência de valor negativo no calculo da rede para o ganho do compensador, indica que o sistema deve ser atenuado^[06,07,10] e não amplificado. Este fato mostra que o controle do MagLev nas condições originalmente projetadas será de difícil implementação, visto que o sinal que vem do sensor possui um valor baixo o qual geralmente é ampliado. Com a atenuação, a diferença gerada pelo deslocamento da esfera (para cima ou para baixo) certamente não será suficiente para sensibilizar o circuito controlador. Mesmo assim, a idéia foi testada, e como já era esperado não apresentou resultado satisfatório. Na Figura 5 pode ser observado o circuito atenuador que foi testado.

Na Figura 6, observa-se os sinais de saída do *SISO Design Tool* do MatLab para esta simulação do MagLev. A faixa de controle com *loop* estável é muito pequena, como pode ser observado na Figura 7.

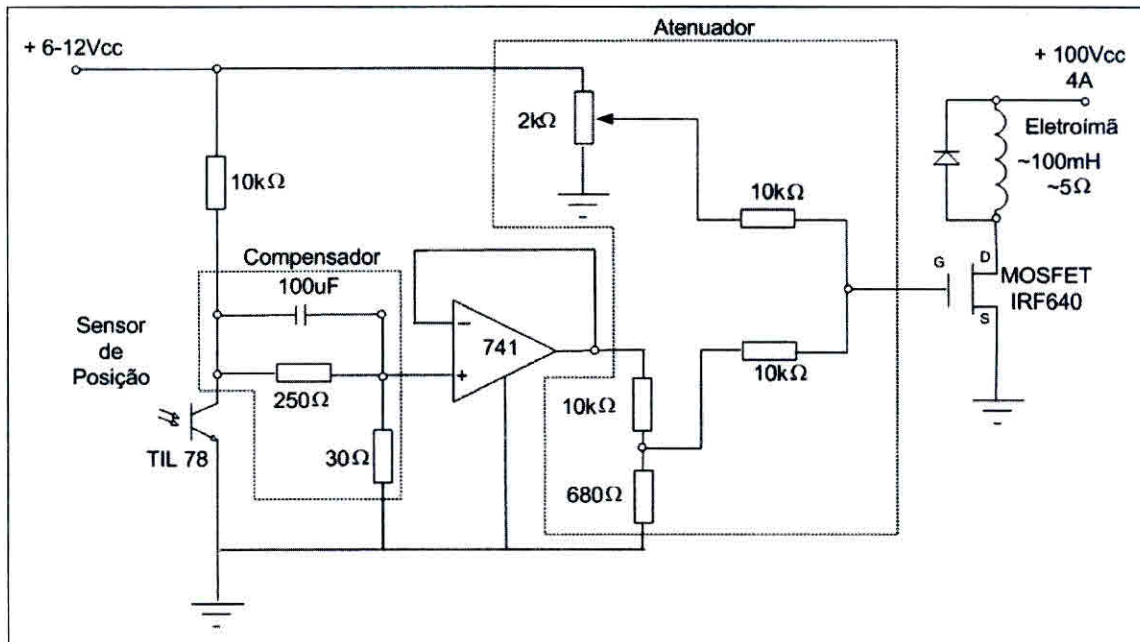


Fig.5 – Circuito de controle e rede de compensação do tipo Atraso de Fase com atenuador com o eletroímã original do MagLev

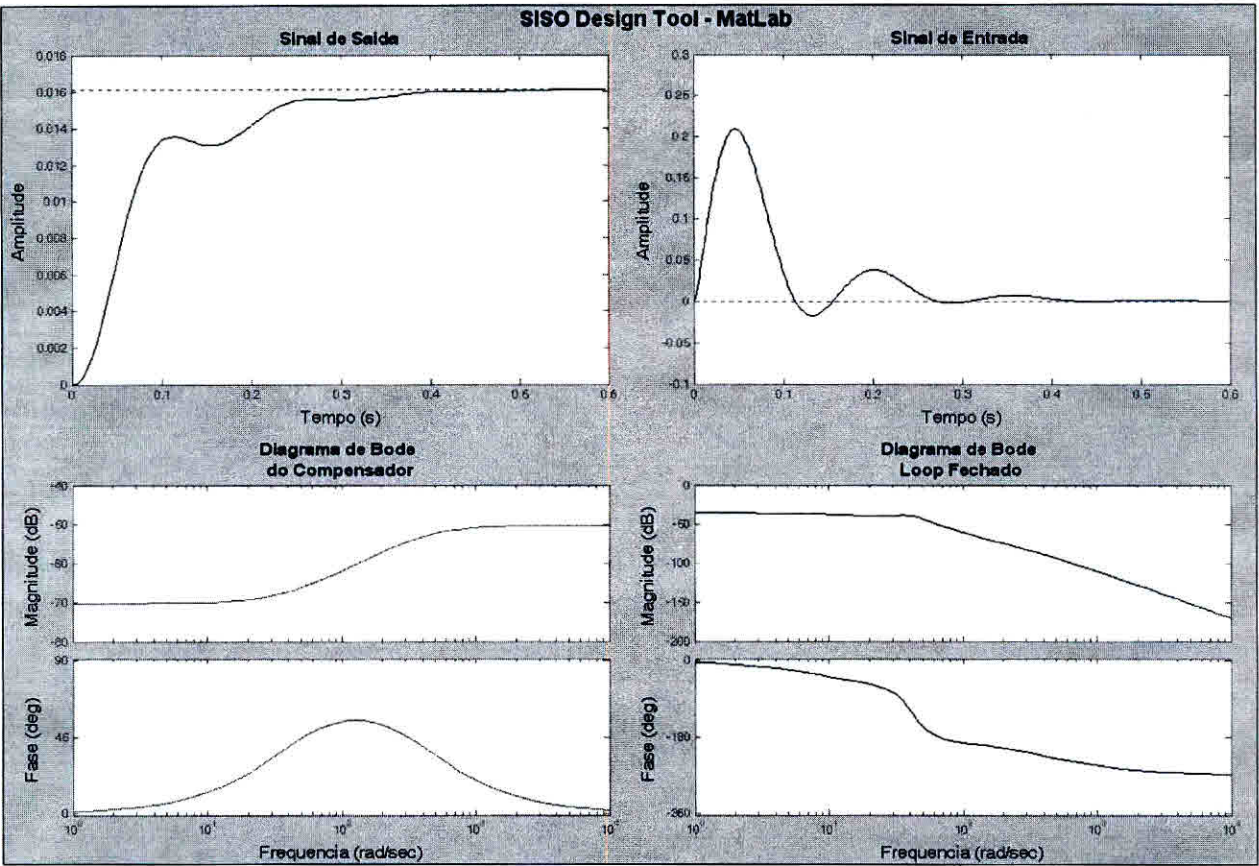


Fig.6 – Sinais de controle para o MagLev com o eletroímã original

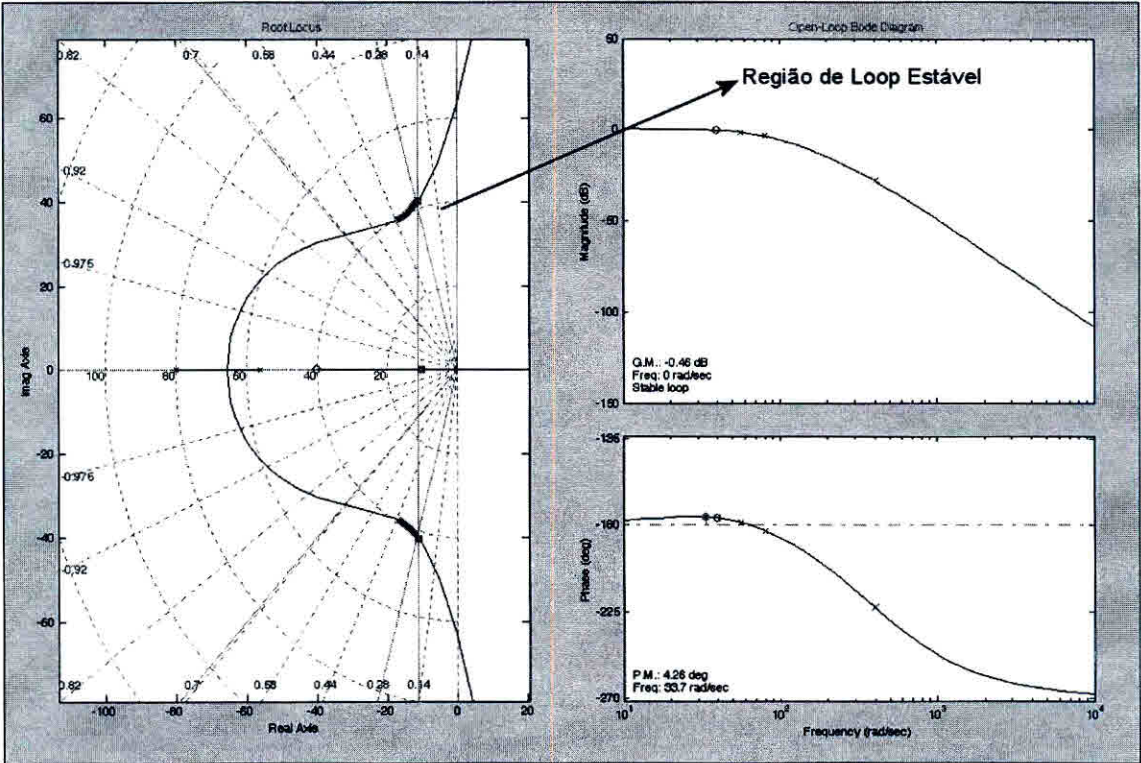


Fig.7 – Lugar Geométrico das Raízes e a região de loop estável para o MagLev com o controlador Avanço de Fase Atenuador

Os resultados obtidos nas simulações se mostraram suficientes para controlar o MagLev (Figuras 6 e 7), mas nos testes experimentais, devido a condição desfavorável da relação de ganho (luz/tensão) do sensor, não foi possível obter o controle do sistema. Desta forma optou-se por construir um novo eletroímã para o MagLev. Este novo eletroímã possui núcleo de Ferrite, que devido a suas características de histerese, permite amenizar o efeito do magnetismo residual.

2.4. Construção do Novo Eletroímã e a Análise de Controle Clássico^[04,12-15]

O novo eletroímã possui características construtivas diferentes do que havia sido projetado originalmente. Na Tabela 2, observa-se as características técnicas do novo eletroímã e as do sistema MagLev.

Tabela 2 - Parâmetros do Novo Eletroímã do MagLev

Parâmetro	Valor Calculado
<i>R</i>	~9,16 Ω
<i>R_{aj}</i>	~30 Ω
<i>L</i>	~112,4 mH
<i>Fio</i>	24 AWG
<i>Espiras</i>	~1800
<i>L/R</i>	~2,9 ms
<i>Ferrite</i>	100 mm x 10 mm
<i>Solenóide</i>	80 mm x 25 mm
<i>Distância X₀</i>	~0,05 m
<i>Corrente i₀</i>	~1,5A
<i>Massa da esfera m</i>	0,001 kg
<i>C (constante de força)</i>	2.10 ⁻⁶ N.m ² /A ²
<i>k (constante)</i>	400.10 ⁻⁶ N/A
<i>B (ganho do sensor)</i>	~1000 V/m

Na Tabela 2 o único parâmetro novo incluído foi o *R_{aj}* (resistência de ajuste), que na verdade é um artifício utilizado para melhorar o tempo de resposta do sistema. As distâncias de controle da esfera não foram melhores devido a falta do circuito magnético de concatenador do fluxo magnético.

O sistema durante estes testes foi operado sem o circuito magnético. Outros testes realizados depois, mas não documentados neste relatório, mostraram que o circuito magnético é promissor. Mesmo com o efeito da histerese, causado pelo uso do ferro 1020 no circuito magnético, foi possível controlar a esfera a distâncias maiores do que 15 mm. Isto motivou a construção de um novo circuito magnético com o concatenador de fluxo, ambos feitos em Ferrite, para diminuir o efeito da histerese. Com este novo circuito magnético e o novo eletroímã será possível atuar na esfera em distâncias maiores, similares as projetadas originalmente que são de aproximadamente 50 mm.

A Figura 8 mostra o efeito da indutância no novo eletroímã para a presença da esfera.

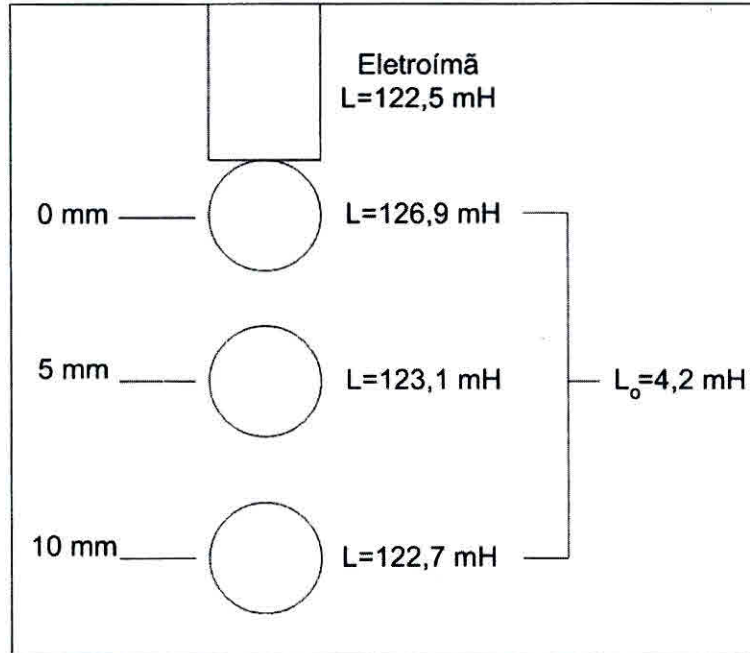


Fig.8 – Efeito da indutância no eletroímã novo na presença da esfera

A fim de investigar e solucionar o problema de controle clássico para o MagLev, foram realizadas novas simulações e cálculos para o projeto completo do controlador para este novo eletroímã, conforme pode ser observado adiante.

A Função de Transferência nova é obtida pela eq. 07:

$$G(s) = 1 + \frac{3560G_c(s)}{(s+2)(s-2)(s+340)} \quad (15)$$

Esta nova FT possui um LGR conforme pode ser observado na Figura 9. Este sistema possui dois pólos no semiplano direito em 2 e 340 e um pólo no semiplano esquerdo em -2.

A técnica de compensação de controle adotada para esta nova FT, foi novamente, à utilização de um compensador do tipo Avanço de Fase ou controlador do tipo *Proporcional Derivativo* (PD). O compensador de Avanço de Fase para o sistema é:

$$G_c(s) = k \frac{s+40}{s+400} \quad (16)$$

A equação característica do sistema, com o compensador permite, gerar outro LGR para o sistema com compensação, conforme mostra a Figura 10.

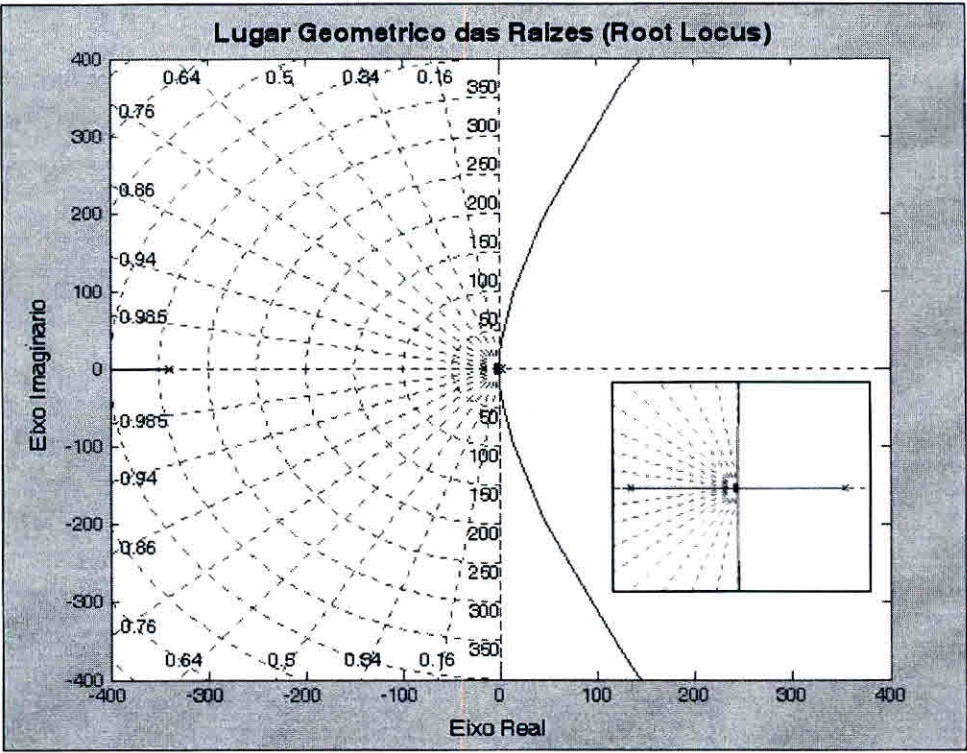


Fig.9 - Lugar Geométrico das Raízes para o novo Eletroímã sem compensação

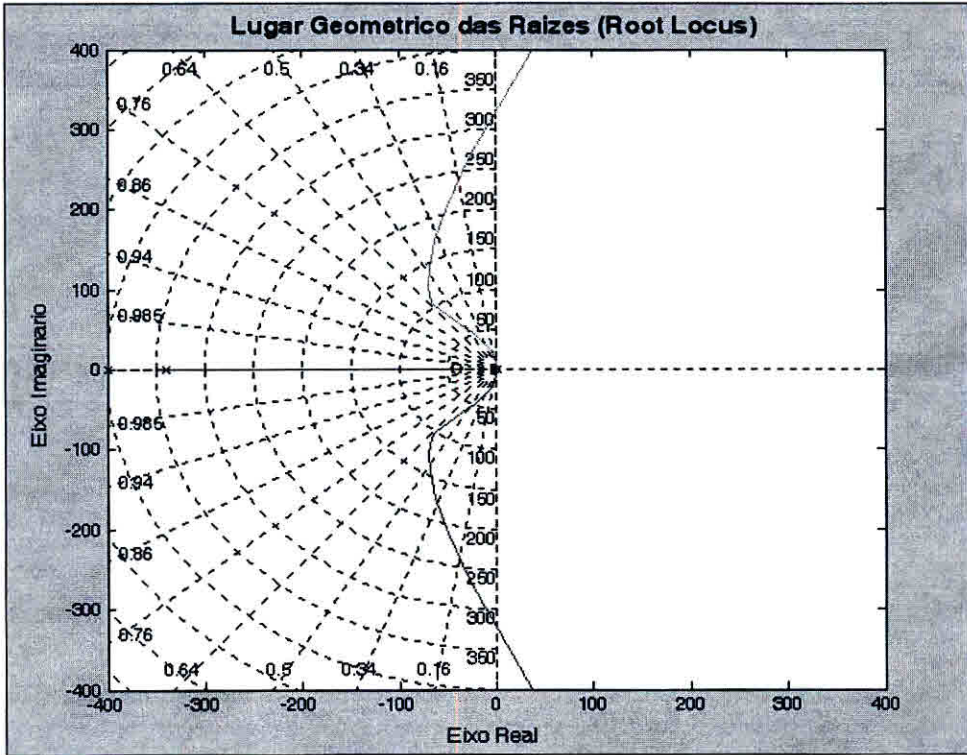


Fig.10 - Lugar Geométrico das Raízes para o novo Eletroímã com compensação

Observa-se que a curva foi atraída para o semiplano esquerdo permitindo encontrar uma grande região de estabilidade para este sistema, o que não ocorria para o outro sistema com o eletroímã original.

2.4.1. Projeto do Circuito Compensador para o Novo Eletroímã^[04-07]

O compensador foi construído baseado nas equações de controle clássico^[04] para controladores do tipo Avanço de Fase (filtro passa alta). Estas equações estão no item 2.3 deste relatório.

Para uma $G_c(s)$ igual a:

$$G_c(s) = k_c \frac{s + 40}{s + 400} \quad (17)$$

tem-se:

$$\begin{aligned} C &= 100nF \\ R_4 &= 250k\Omega \\ R_3 &\cong 30k\Omega \end{aligned}$$

Neste caso observa-se que o ganho do compensador (k_c), é igual ou maior que 1, na simulação utilizando o aplicativo *SISO Design Tool* do MatLab, o valor do k_c pode variar de 1 a 15. Adotando o ganho inicial 1, as resistências de ganho no amplificador operacional (amp-op), são:

$$\begin{aligned} R_1 &= 10k\Omega \\ R_2 &= 10k\Omega \end{aligned}$$

Nas Figuras 11, 12 e 13, observa-se o circuito construído para os testes do novo eletroímã, os sinais de saída, e a faixa de controle com *loop* estável.

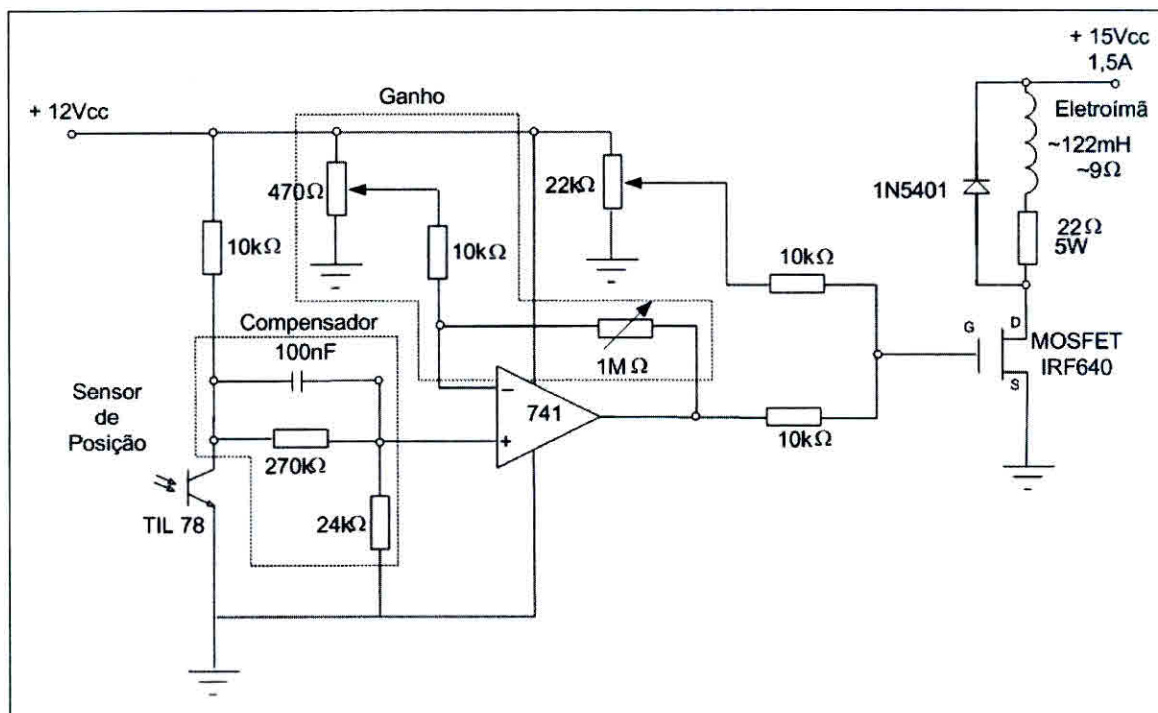


Fig.11 – Circuito de controle e rede de compensação do tipo Atraso de Fase com o eletroímã novo do MagLev

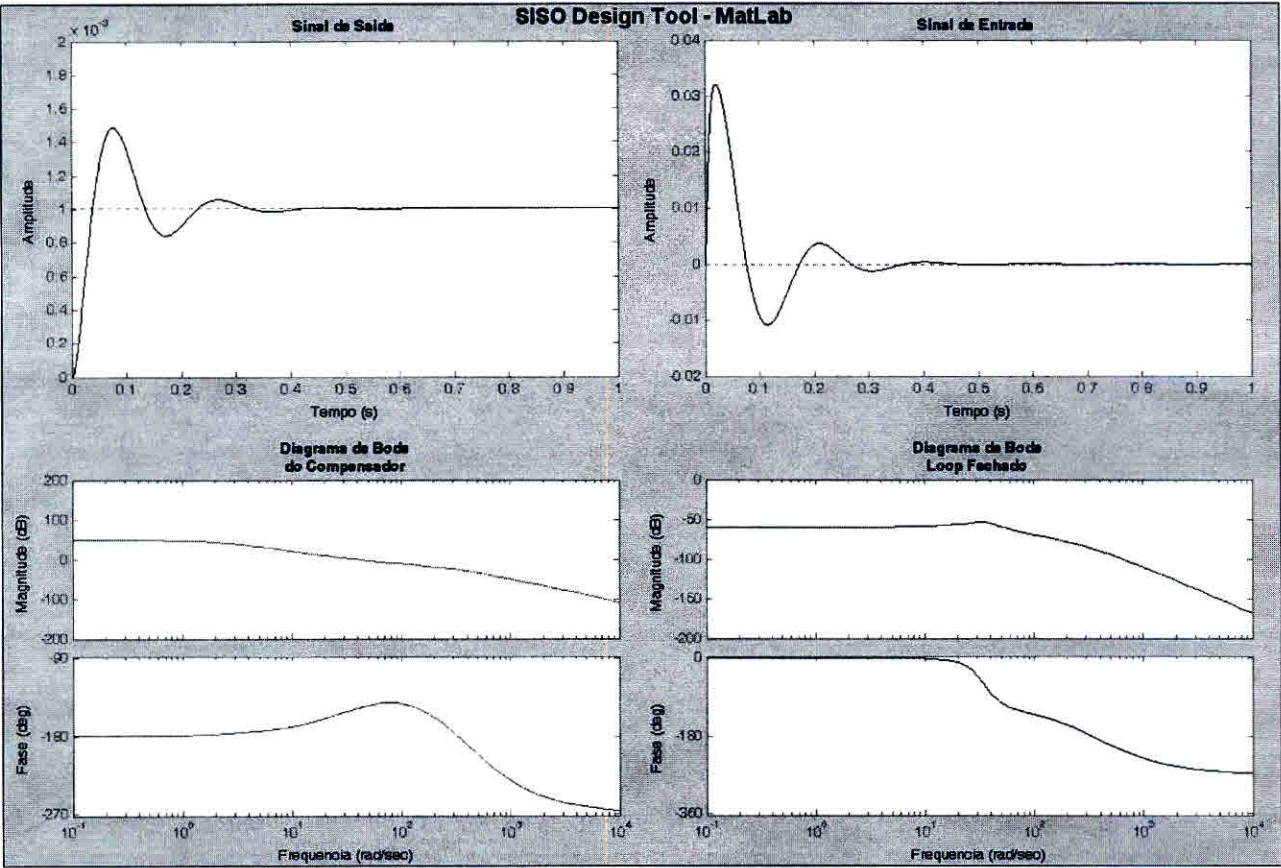


Fig.12 – Sinais de controle para o MagLev com o eletroímã novo

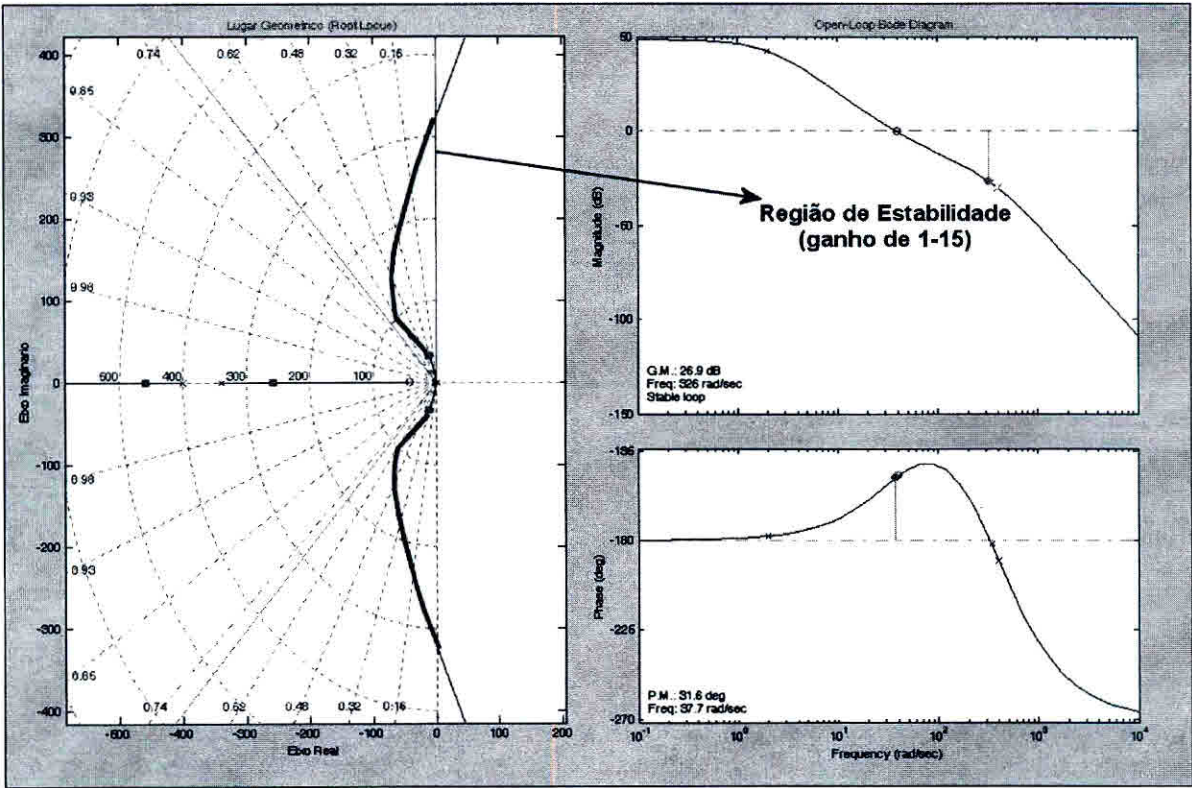


Fig.13 – Lugar Geométrico das Raízes e a região de *loop* estável para o MagLev com o novo eletroímã e controlador do tipo Avanço de Fase

Para construir o novo circuito de controle (Figura 11) alguns parâmetros foram adaptados e desta forma, a FT se modificou. Na Tabela 3 observam-se os valores utilizados no circuito.

Tabela 3 - Parâmetros do Novo Circuito de Controle do MagLev

Parâmetro	Valor
R	9,1 Ω
R_{aj}	22 Ω
L	122,5 mH
L/R	3,95 ms
Distância X_0	0,05 m
Corrente i_0	~300 mA
Massa da esfera m	0,001 kg
C (constante de força)	$25,2.10^{-3}$ N.m ² /A ²
k (constante)	105.10^{-6} N/A
B (ganho do sensor)	~700 V/m

A Função de Transferência modificada é obtida pela eq. 07 :

$$G(s) = 1 + \frac{146263G_c(s)}{(s + 12,3)(s - 12,3)(s + 256,06)} \tag{18}$$

Este sistema possui dois pólos no semiplano direito em 12,3 e 256,06 e um pólo no semiplano esquerdo em -12,3. Para obter uma região de equilíbrio para a levitação da esfera é necessário um compensador, assim como nos casos anteriores o compensador é do tipo Avanço de Fase. Entretanto os valores sofreram pequenas modificações em relação ao compensador da eq.16.

O controlador do tipo *Proporcional Derivativo* (PD) utilizado no circuito novo é:

$$G_c(s) = k \frac{s + 37}{s + 454} \tag{19}$$

Nas Figuras 14 e 15, observam-se os sinais de saída, entrada, diagramas de Bode e a faixa de controle com *loop* estável.

Na Figura15 é possível encontrar uma grande região de estabilidade, similar a que ocorria na FT da Figura 13. Entretanto os valores de ganho do amplificador operacional ficaram um pouco reduzidos devido a inclinação da curva ser mais acentuada neste caso do que no anterior, este efeito é causado pela presença dos pólos 12,3 e -12,3, que estão ~6 vezes mais distantes da origem dos eixos imaginário e real, quanto mais perto do eixo, menor a inclinação da curva e melhor o ganho do compensador.

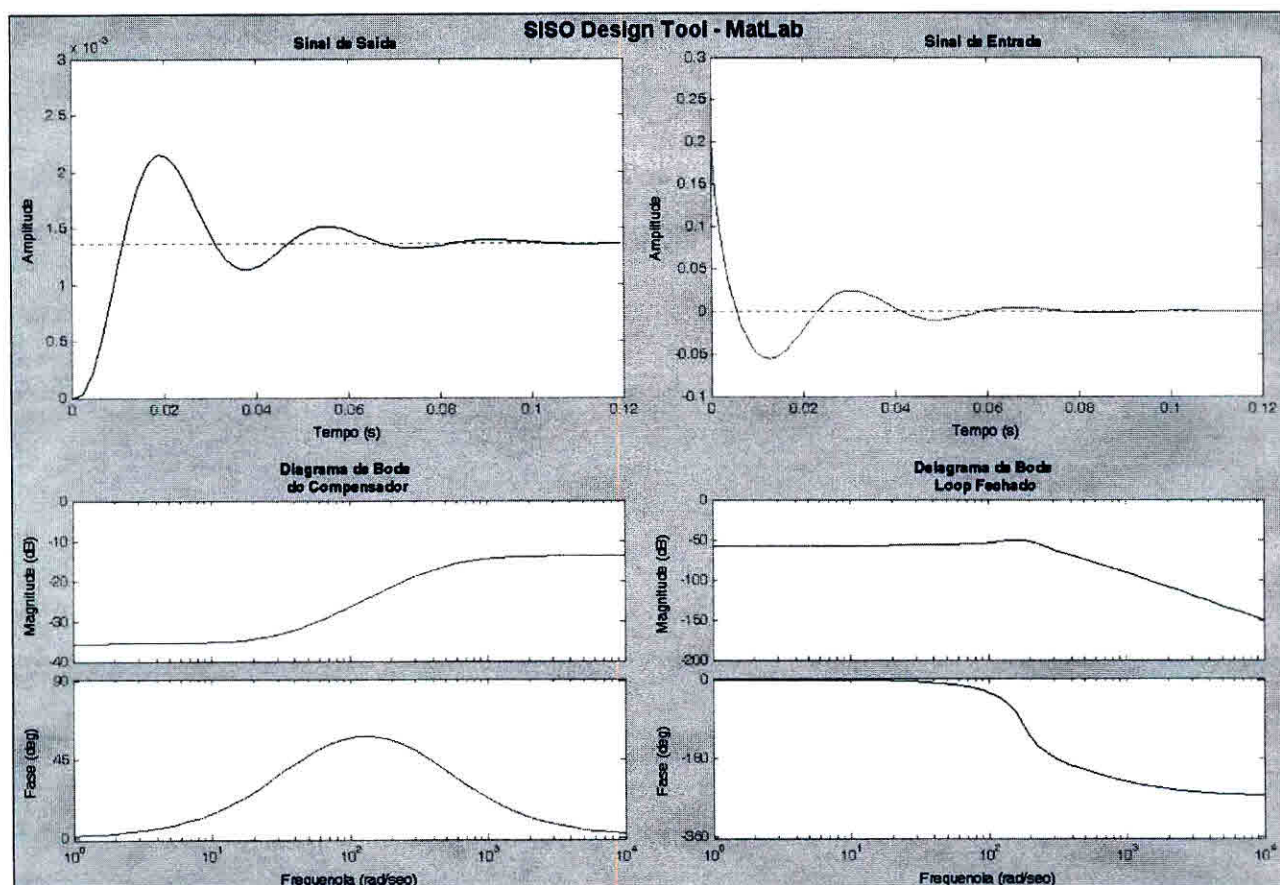


Fig.14 – Sinais de controle para o MagLev com o circuito novo

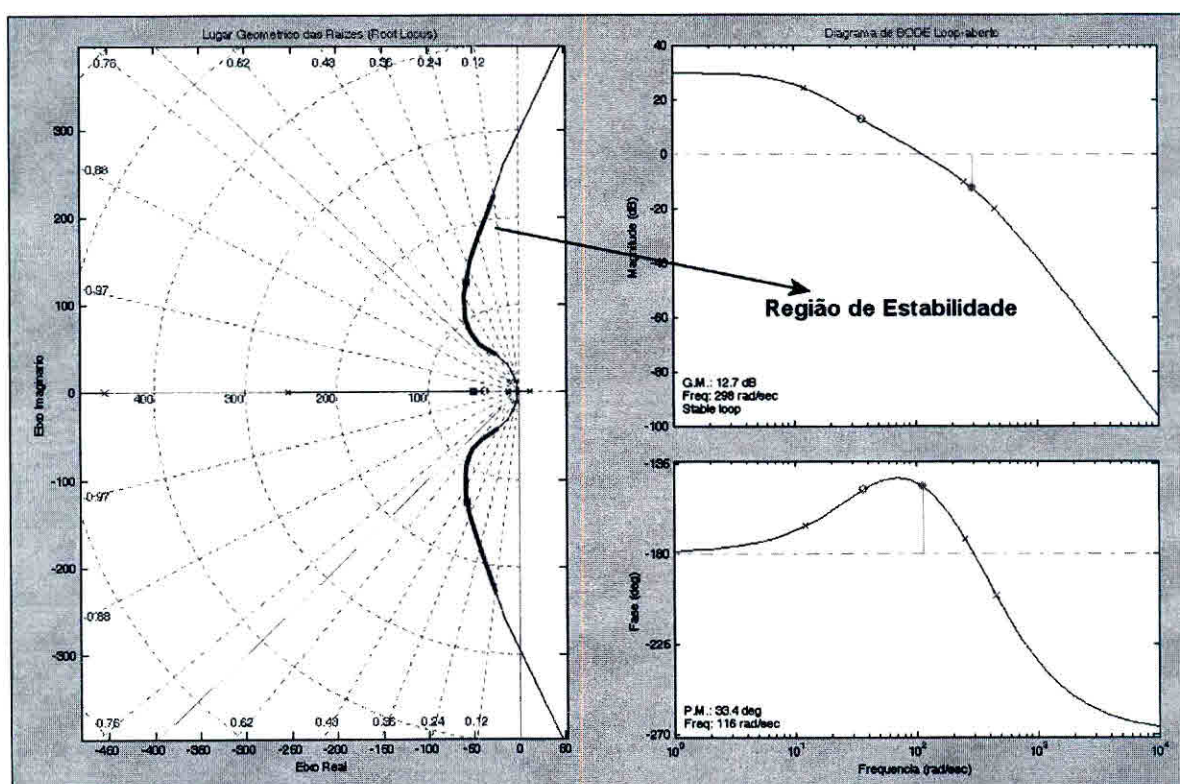


Fig.15 – Lugar Geométrico das Raízes e a região de loop estável para o MagLev com o novo circuito controlador do tipo Avanço de Fase

2.5. Resultados Experimentais do MagLev com o Novo Eletroímã

Conforme o esperado, a região de controle deste novo eletroímã é grande, o suficiente para proporcionar um controle mais flexível, que inclusive possibilitou operar o MagLev com pequena corrente elétrica durante estes testes. Na Figura 16 observa-se uma fotografia do MagLev com a esfera levitando a uma distância de ~6,5 mm.



Fig.16 – MagLev (novo eletroímã) com controle estático esfera levitando a ~6,5 mm de distância do eletroímã

Durante estes testes, inicialmente o MagLev operou com controle dinâmico, ou seja com o chaveamento de corrente no eletroímã. Logo após, os ajustes nos ganhos do amp-op e transistor MOSFET, possibilitaram operar o MagLev com controle estático, assim como era esperado. Na Figura 17 observa-se a curva de corrente elétrica sobre o eletroímã durante o seu funcionamento com a esfera flutuando a uma distância de 6,5 mm, o que corresponde a uma corrente elétrica de 396 mA.

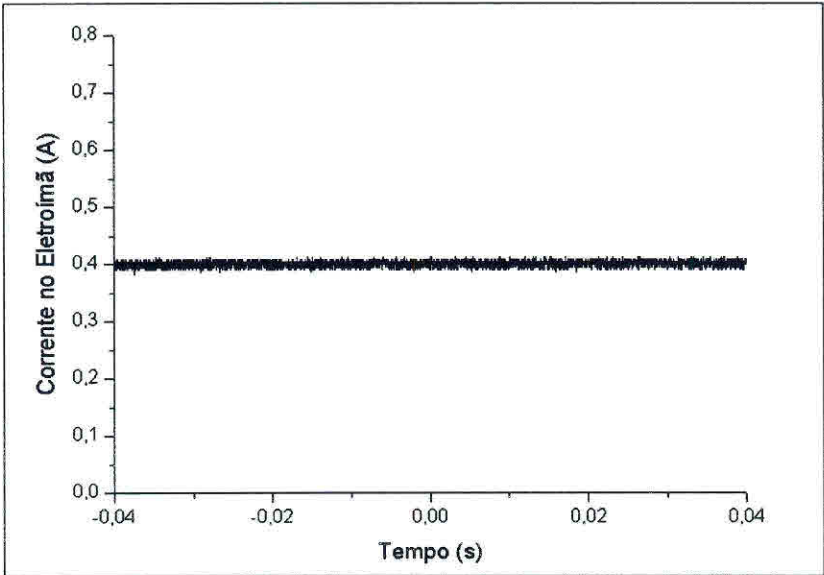


Fig.17 – Corrente elétrica no eletroímã, controle estático

Nas Figuras 18 e 19 observa-se a posição da esfera flutuando a uma distância de 8 mm da cabeça do eletroímã. Na Figura 19 pode-se observar que o desvio máximo da posição de equilíbrio foi de 0,6 mm e o desvio médio foi de 0,3 mm (300µm).

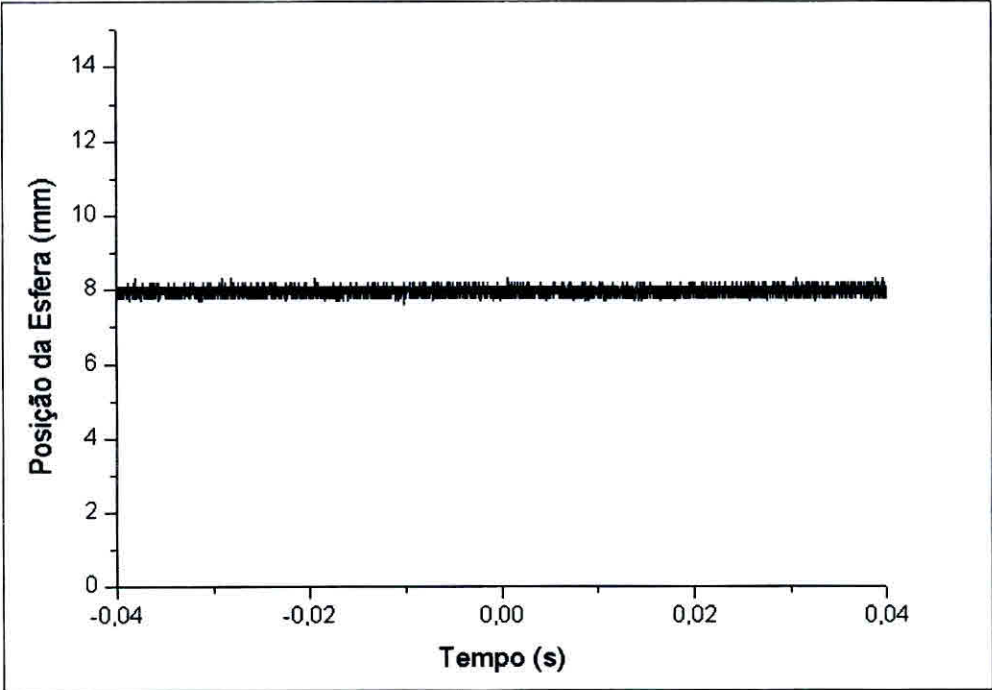


Fig.18 – Controle estático do MagLev, posição da esfera no tempo

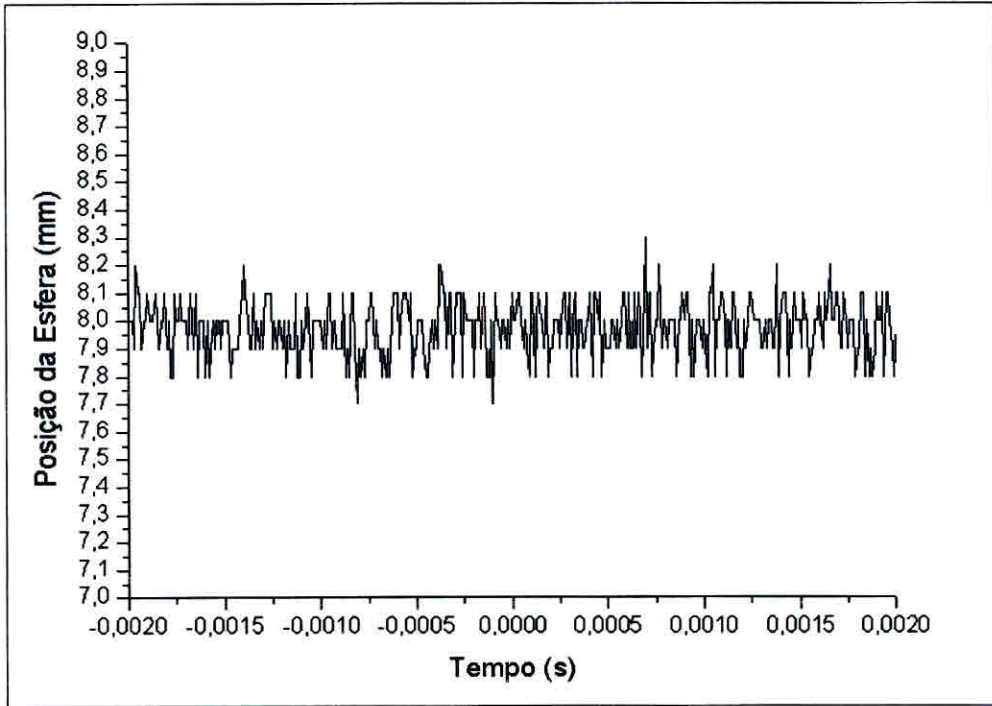


Fig.19 – Controle estático do MagLev, oscilação da posição da esfera no tempo

Após vários testes de equilíbrio da esfera no MagLev, foram realizados alguns testes de resposta a uma perturbação. A perturbação no sistema foi introduzida com a obstrução instantânea luz no sensor de posição, o que indica para o controle que a esfera estaria caindo. Os testes com esta perturbação tornando possível medir o tempo de amortecimento acomodação (*settling time*) e sobressinal máximo (*overshoot*) do sistema experimentalmente, e comparar com os mesmos parâmetros obtidos na simulação (Fig.14). Na Tabela 4 observa-se os valores para a simulação e os obtidos experimentalmente.

Tabela 4 – Tempo de Acomodação e *Overshoot* do sistema

Tempo de acomodação (<i>settling time</i>)	
Simulação MatLab	Experimental
0,1 s	0,1 s
Sobressinal máximo (<i>overshoot</i>)	
Simulação MatLab	Experimental
47,3%	46%

Nas Figuras 20 e 21 observa-se o efeito da perturbação na posição da esfera e a resposta do sistema de controle clássico do tipo PD. Na Figura 21 observa-se ainda o comportamento da corrente elétrica no eletroímã para re-estabelecer o equilíbrio da esfera para a posição de operação.

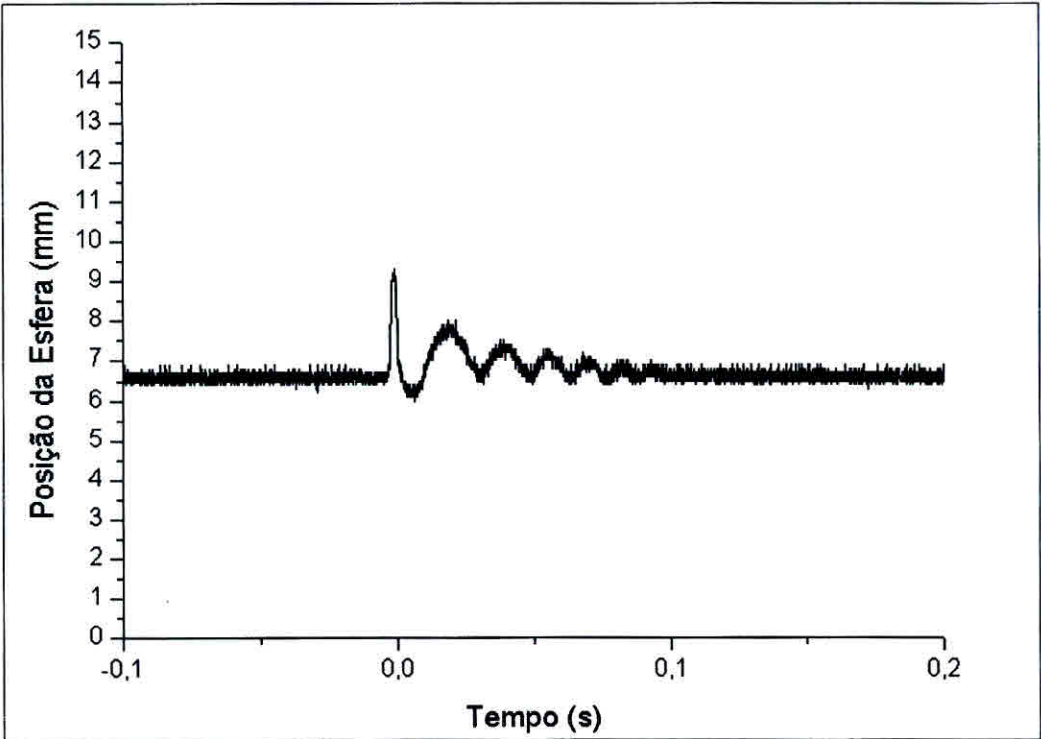


Fig.20 – Controle estático do MagLev, perturbação na posição da esfera e resposta do sistema de controle estático

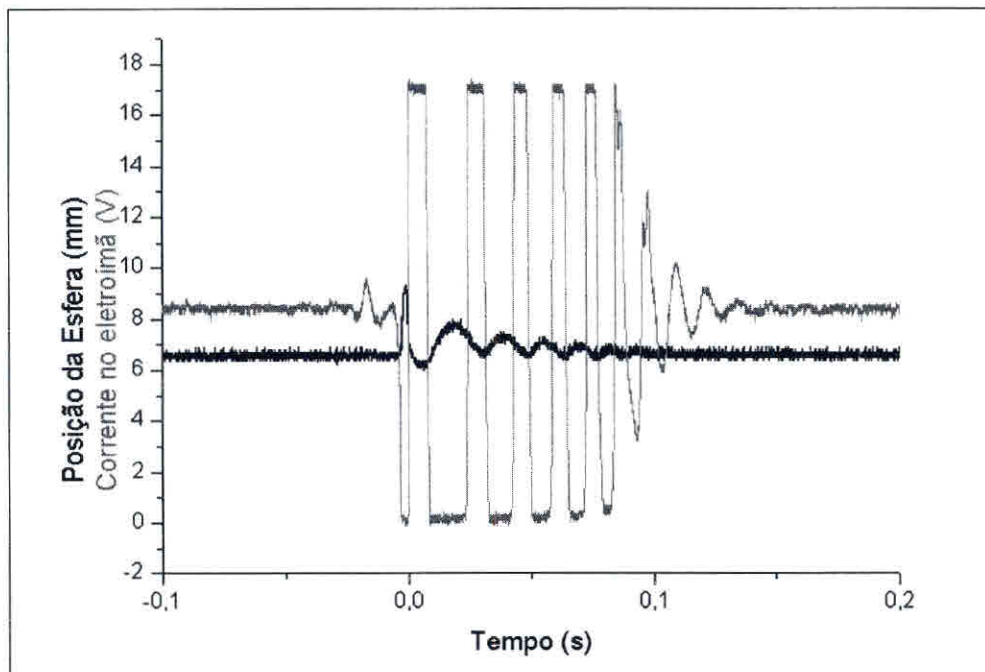


Fig.21 – Controle estático do MagLev, perturbação na posição da esfera e o sinal de corrente no eletroímã para a perturbação

3. Hardware Neural NeuroMatrix

3.1. Características da Placa Neural e dos Neuroprocessadores ^[04, 16-18]

O Hardware Neural que esta sendo adquirido, para testar os conceitos envolvidos neste projeto de pesquisa, é o NeuroMatrix 4 (NM4 – PCI card) com quatro processadores do tipo DSP NM6403 com 64-bits e 40MHz.

Na Figura 22 observa-se uma fotografia da placa NM4 PCI para PC que esta sendo adquirida.

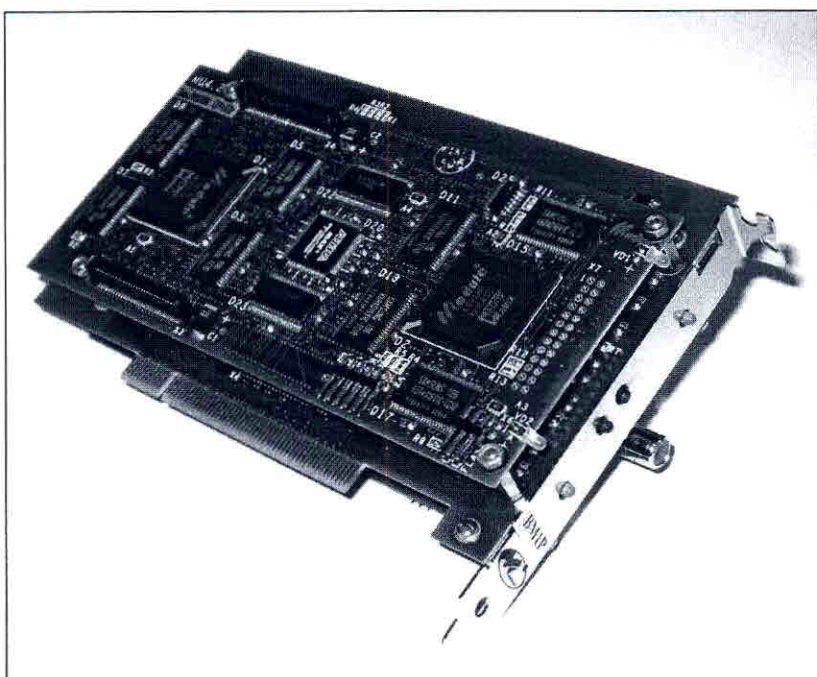


Fig.22 – Placa de Hardware Neural NeuroMatrix (NM4-PCI)

Este equipamento é indicado para processamentos paralelos, análises de imagens em tempo real, grandes redes neurais artificiais, etc.

No Apêndice C pode-se observar parte da documentação fornecida pelo fabricante do NeuroMatrix, a empresa russa MODULE.

O equipamento possui duas portas de comunicação (I/O) com velocidade de 20 MB/s, possui 3 tipos de memória “on-board”, 4 memórias de 256k x 64-bits (2MB) assíncrono SRAM, 4 memórias de 512k x 64-bits (4MB) assíncrono SRAM e 2 memórias 8M x 64-bits (64MB) SDRAM. A performance do equipamento é medida em operações escalares e/ou vetoriais, para operações escalares com dados de 32-bits obtem-se picos de 480MOPS (operações por segundo) e para operações vetoriais com dados de 8-bits obtem-se 3840MMAC (multiplicações acumuladas por segundo). Para o caso específico de RNA, existem outros parâmetros mais relevantes (tabelas transcritas no Apêndice D), como o número de conexões por segundo (CPS). Neste parâmetro em particular, este equipamento possui larga vantagem sobre seus concorrentes, vindo a ser no mínimo 3 vezes mais rápido (1200MCPS), que o segundo equipamento mais rápido.

Na Figura 23 observa-se o diagrama esquemático da placa NM4 PCI. Nota-se a disposição das memórias e os respectivos gerenciadores de memória para os quatro neuroprocessadores NM6403.

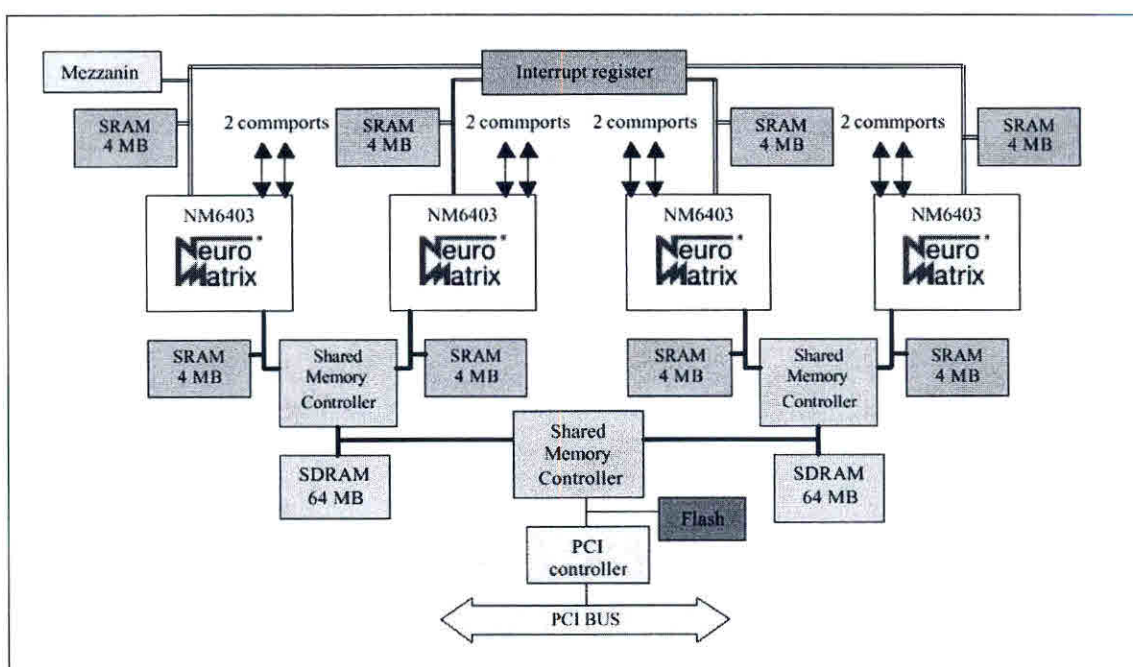


Fig.23 – Esquema da placa de Hardware Neural do tipo NeuroMatrix (NM4-PCI)

A programação do equipamento é realizada com o auxílio de um programa chamado SDK (*Software Development Kit*) o qual fornece as ferramentas necessárias para o desenvolvimento de projetos em redes neurais artificiais, tais como o compilador C++, bibliotecas, eliminador de erros, simulador de ciclos, entre outras.

No esquema apresentado na Figura 24 é ilustrada a estrutura de um programa desenvolvido no SDK, e sua interação com o neuroprocessador NM6403 e as ferramentas do SDK.

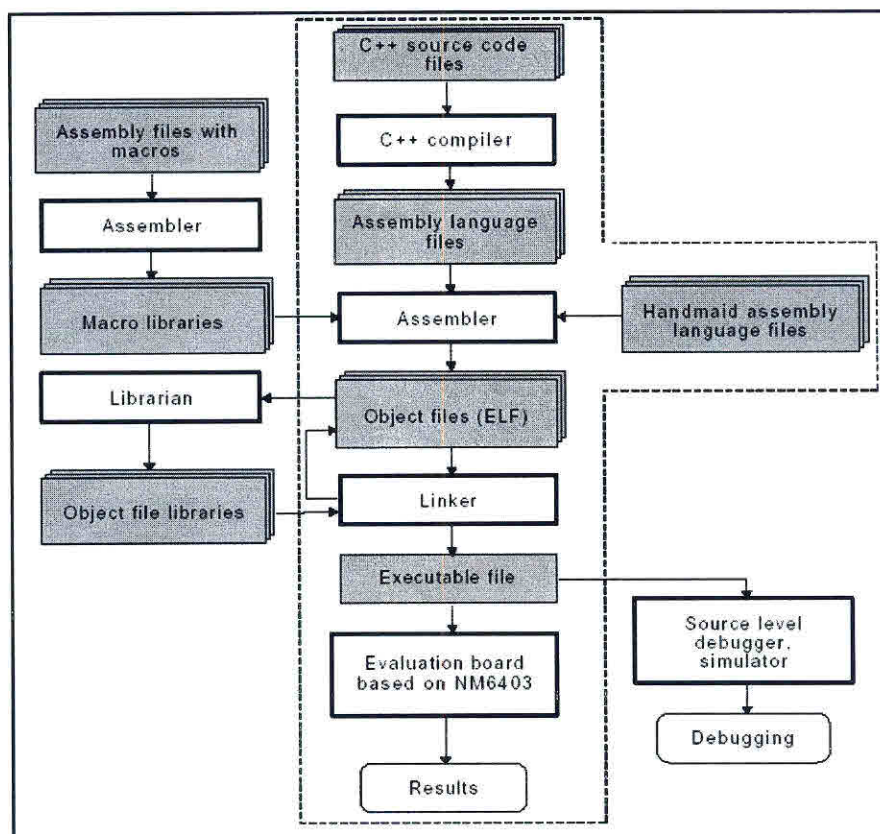


Fig.24 – Estrutura do programa rodando no neuroprocessador NM6403 com a utilização das ferramentas do SDK

O neuroprocessador NM6403 possui duas portas de comunicação de entrada/saída de 20MB/s, destinadas a interligar vários neuroprocessadores em paralelo formando uma árvore de multiprocessadores, esta árvore pode ser configurada para operar na forma matricial ou linear, dependendo da necessidade do sistema e número de neuroprocessadores. A unidade de processamento vetorial do NM6403 é a responsável por executar a multiplicação dos pesos com as entradas e realizar as somas parciais a serem armazenadas na memória. A soma do processamento de todos os neurônios em uma determinada operação, é adicionada ao resultado da iteração seguinte, assim como pode ser observado na Figura 25.

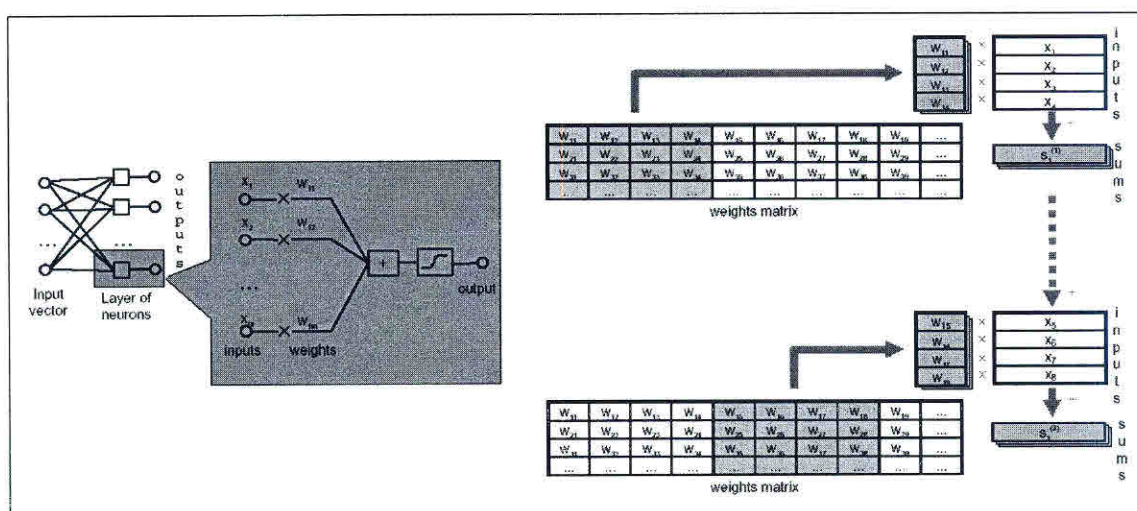


Fig.25 – Manipulação dos pesos dentro do neuroprocessador NM6403

3.2. Proposta para a Aplicação do Hardware Neural^[01-04]

As aplicações do Hardware Neural NM4 neste projeto de pesquisa estão relacionadas diretamente com o estudo do comportamento em “tempo real” (dezenas de microssegundos) dos processos de controle de sistemas não-lineares, tais como o controle da coluna de plasma em tokamaks e o controle da posição de uma esfera de metal em um sistema de levitação magnética.

A fim de comparar e testar os conceitos envolvidos no controle utilizando inteligência artificial, mais precisamente a técnica conhecida como Redes Neurais Artificiais, foi projetado e construído um sistema de levitação magnética (MagLev). Obviamente para controlar o MagLev, não seria necessário adotar um sistema de controle tão “inteligente” e de custo tão elevado, quanto o proposto com a placa neural. Entretanto, sabe-se também que o MagLev na verdade pode ser interpretado como um protótipo ou um análogo do sistema de controle da posição da coluna de plasma em tokamaks. Este sim, um sistema de difícil modelamento sob o ponto de vista de controle, e que dificulta bastante a aplicação das teorias usuais de controle.

O sistema MagLev está funcionando atualmente com um circuito de controle estático, projetado com base na teoria de controle clássica, utilizando basicamente a realimentação de posição da esfera que serve como a entrada para o sistema de compensação, que ajusta a curva de controle para uma região de operação estável.

Atualmente o sistema de controle do MagLev não tem capacidade para se adaptar a mudanças rápidas no comportamento de equilíbrio da esfera, devido a linearização em um ponto de operação, que faz com que o controle funcione perfeitamente para aquela região e uma pequena vizinhança, mas não consiga generalizar ou extrapolar este equilíbrio para regiões fora do trecho linearizado. Desta forma, a idéia de utilizar a placa neural para substituir o circuito de controle clássico (controlador PD, amplificador operacional e rede de ganho), deverá permitir que a RNA instalada na placa neural generalize as condições de equilíbrio para casos mais extremos ou para outras posições de equilíbrio, as quais seriam bastante trabalhosas para serem implementadas utilizando a teoria de controle clássica, visto que, para equilibrar a esfera no MagLev em outro ponto de operação, seria necessário linearizar este novo ponto de operação e assim construir outro circuito de controle para esta nova região de operação, lembrando ainda, que se fosse necessário alterar novamente o ponto de operação, todo o procedimento deveria ser executado outra vez.

A implementação da RNA em neuroprocessadores ou neurochips, permitirá medir o desempenho da RNA quando for treinada, validada e testada. Isso também permitirá a comparação destes resultados, com as simulações computacionais, as quais poderão ser testadas para vários tipos de algoritmos de treinamento e principalmente as variantes do algoritmo *Back-Propagation*, mostrando quando é vantajoso utilizar a RNA em neuroprocessadores.

Depois que o paralelo entre os controles, clássico e “inteligente”, estiver concluído, será possível verificar que a utilização deste tipo de controle inteligente baseado em RNA, pode ser aplicado em vários sistemas de controle não-lineares, os quais o modelamento do comportamento físico não é trivial.

Com a placa neural será possível também, testar os modelos de RNA projetadas para o caso do equilíbrio do plasma no Tokamak ETE^[04] e comparar com os tempos e as precisões obtidas com a RNA quando simulada no programa MatLab. Isto poderá ajudar tanto no projeto de novas topologias de RNA, quanto na escolha do tipo de algoritmo de

treinamento mais adequado. Se o tempo de treinamento for reduzido significativamente como é esperado, para uma RNA implementada em neuroprocessadores, talvez seja possível considerar a utilização de algoritmos de treinamento que utilizem maior carga computacional e que possuam melhor precisão de saída (menor erro médio quadrático).

Outra vantagem da utilização de RNA implementadas em placas neurais, esta no fato de que o sistema de controle fica dedicado, como o que ocorre com os controladores atuais. Desta forma, o sistema de controle poderia ficar próximo a planta a ser controlada, sem sofrer intervenção de qualquer espécie. Para o caso do controle em RNA, que o sistema é capaz de generalizar o aprendizado, extrapolando os sinais de entrada para encontrar uma saída correspondente a seu aprendizado, a intervenção humana será praticamente desnecessária.

No caso da placa NM4 PCI que esta sendo adquirida, a mesma será instalada dentro de um computador (hospedeiro) do tipo PC. Entretanto como a placa possuir neuroprocessadores, as operações de processamento da RNA ficam confinadas nos 4 neuroprocessadores, e o tempo de resposta passa a depender somente da arquitetura e da configuração adotada nos neuroprocessadores, e não mais pelo processador do próprio computador, que não foi projetado para realizar este tipo de processamento de maneira eficaz. Observa-se que mesmo estando a placa neural instalada em um PC, a mesma possa vir a ser interpretada como se estivesse imune as interferências computacionais vindas do computador hospedeiro. No caso de sua utilização em um sistema de controle dedicado, o PC hospedeiro da placa, seria utilizado como se fosse um bastidor ou *crate* para a placa neural, não necessitando de monitor e nem teclado.

Logo que o equipamento estiver instalado, será possível interligar rapidamente a placa neural ao MagLev, para que o controle inteligente seja testado. Isto acrescentará a este trabalho de doutorado um contexto significativo, sob o ponto de vista das pesquisas em RNA realizadas no país.

4. Conclusão e Perspectivas

Este quinto relatório, referente à bolsa de doutorado “Redes Neurais no Modelamento e Controle de Tokamaks – Aplicação ao ETE”, descreve os problemas relacionados com o eletroímã original do levitador magnético (MagLev) e as soluções implementadas para sua solução. Também foi apresentado o Hardware Neural NeuroMatrix que esta sendo adquirido e a proposta para sua utilização neste trabalho.

Durante este período:

- Foram realizadas simulações de campo magnético no MagLev;
- Foi projetado e construído um novo eletroímã e circuito de controle para o MagLev;
- Foi realizado o processo de importação do Hardware Neural, com o auxílio do setor de importação do INPE, segundo orientação da própria FAPESP;
- Vem sendo redigido o texto da Tese.

Por ocasião do próximo relatório, concedida a prorrogação desta bolsa de pesquisas por mais 6 meses, espera-se:

- Enviar a cópia final da Tese de Doutorado.

Referências Bibliográficas

- [01] Barbosa, L.F.W.; Ludwig, G.O., *Redes neurais no modelamento e controle de tokamaks – aplicação ao ETE (Experimento Tokamak Esférico)* Primeiro Relatório, São José dos Campos, INPE, 1999. (INPE-7252-PRP/220)
- [02] Barbosa, L.F.W.; Ludwig, G.O., *Redes neurais no modelamento e controle de tokamaks – aplicação ao ETE (Experimento Tokamak Esférico)* Segundo Relatório, São José dos Campos, INPE, 2000. (INPE-7995-PRP/223)
- [03] Barbosa, L.F.W.; Ludwig, G.O., *Redes neurais no modelamento e controle de tokamaks – aplicação ao ETE (Experimento Tokamak Esférico)* Terceiro Relatório, São José dos Campos, INPE, 2001. (INPE-8477-PRP/226)
- [04] Barbosa, L.F.W.; Ludwig, G.O., *Redes neurais no modelamento e controle de tokamaks – aplicação ao ETE (Experimento Tokamak Esférico)* Quarto Relatório, São José dos Campos, INPE, 2002. (INPE-8756-PRP/228)
- [05] Shahian, B.; Hassul, M., *Control System Design using MatLab*, Prentice Hall, New Jersey, 1993.
- [06] Leonard, N.E.; Levine, W.S., *Using MatLab to Analyze and Design Control Systems 2th Edition*, Addison-Wesley, California, 1995.
- [07] Kuo, B.C., *Sistemas de Controle Automático*, Prentice Hall do Brasil, Rio de Janeiro, 1985.
- [08] Gille, J.C.; Pelegrin, M.J.; Decaulne, P., *Feedback Control Systems*, McGraw Hill, New York, 1959.
- [09] Stefani, R.T.; Savant, C.J.Jr.; Shahian, B.; Hostetter, G.H., *Design of Feedback Control Systems*, Saunders College, New York, 1994.
- [10] Ogata, K., *Engenharia de Controle Moderno*, Prentice Hall do Brasil, Rio de Janeiro, 1982.
- [11] Ogata, K., *Soluções de Problemas de Engenharia de Controle com o MATLAB*, Prentice Hall do Brasil, Rio de Janeiro, 1994.
- [12] Wong, T.H., *Design of a magnetic levitation control systems – an undergraduate project*, IEEE Transactions of Education, E-29(4), 196-200, November, 1986.
- [13] Oguchi, K.; Tomigashi, Y., *Digital control for a magnetic suspension system as an undergraduate project*, Int. J. Elect. Eng. Educ. 27, 226-236, 1990.

- [14] Lari, M.; Bloch, G., *A neural network whit minimal structure for MagLev systems modeling and control*, Proc. of IEEE, International Symposium on Intelligent control / Intelligent Systems and Semiutics, Cambridge, MA., 15-17 September, 1999.
- [15] Demuth, H.; Beale, M., *Neural Network Toolbox For Use with MATLAB*, MathWorks Inc., USA, 2000.
- [16] Fomine, D.V.; Tchernikov, V.M.; Vixne, P.E; Chevtchenko, P.A., *NeuroMatrix NM6403DSP with Vector/Matrix Engine*, Report RC Module, Russia, 1995.
- [17] Vixne, P.E.; Fomine, D.V.; Tchernikov, V.M., *A VLSI Digital Neural Processor with Variable Word Length of Operands*, Priborostroenie Hard-Software systems for neural calculation support, thematic issue 39/7, 13-21, 1996.
- [18] Chevtchenko, P.A.; Fomine, D.V.; Tchernikov, V.M.; Vixne, P.E., *Using of microprocessor NM6403 for neural net emulation*, Report RC Module, Russia, 1997.

APÊNDICE A

Justificativa para a compra do Hardware Neural NM4 NeuroMatrix da Module

Luis Filipe de F.P.W.Barbosa e Gerson Otto Ludwig
Março de 2002

No início da bolsa de doutorado em outubro de 1998 foi realizado um estudo de hardwares neurais para aplicação em controle. Houve grande dificuldade de encontrar fabricantes para estes equipamentos por serem da alta tecnologia.

No relatório enviado no dia 12 de setembro de 2000 foi apresentada uma tabela com os principais hardwares neurais existentes no mundo. Entretanto o contato com os fabricantes não foi muito proveitoso, ou porque os hardwares neurais já haviam sido descontinuados, ou porque não havia interesse de vender tal tecnologia para o Brasil. A busca por um fornecedor interessado em vender este equipamento para o Brasil, foi extremamente difícil. Dentre os possíveis fornecedores apresentados no relatório enviado no dia 13 de setembro de 2001, apenas dois mantiveram contato regular para formulação do pedido de *Proforma INVOICE*. Entretanto apenas um confirmou o interesse em vender para o Brasil. Este fornecedor se propõe a vender uma placa de Hardware Neural com quatro processadores DSP (NeuroMatrix NM6403 RISC/DSP)^[1] de alta velocidade para implementação de redes neurais artificiais (RNA).

A empresa Russa Join Stock Company Research Center "MODULE", fabrica uma família de hardwares do tipo neural para muitos tipos de aplicações, tais como: monitoramento de tráfego, controle de distância entre automóveis, entre outros. Seu produto a placa PCI NM4 NeuroMatrix, se aplica perfeitamente ao uso no controle neural do sistema de levitação magnética^[2-4] e também para o futuro sistema de controle da coluna de plasma do Experimento Tokamak Esférico (ETE)^[2-5] do Laboratório Associado de Plasma do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

Adiante serão apresentados os principais motivos que levaram a solicitação de compra deste equipamento.

• *A necessidade de um hardware neural para controle*

A aplicação de hardware neural^[1-6] em plantas de controle complexas e/ou não-lineares facilita o processo de modelamento de controle. Este pode ser armazenado em uma rede neural artificial (RNA) através de exemplos de entrada e saída desejada (conjunto entrada-alvo). Durante o processo de treinamento da RNA é possível atribuir pesos as conexões sinápticas que se mostram mais aptas ao controle, fazendo com que o processo de controle seja assimilado pela RNA. Dentre as vantagens de se utilizar uma RNA em controle tem-se:

- *Aprendizado* - As RNA aprendem por experiência, não havendo desta maneira necessidade de explicitar os algoritmos para executar uma determinada tarefa;

- *Associação* - As RNA são capazes de fazer associações entre padrões diferentes devido a utilização de memória distribuída;
- *Generalização* - As RNA são capazes de generalizar seu conhecimento a partir de exemplos anteriores;
- *Abstração* - As RNA são capazes de abstrair a essência de um determinado conjunto de entrada (treinamento), isto é, a partir de padrões ruidosos, extrair a informação do padrão sem ruído;
- *Robustez e Degradação Gradual* - As RNA não sofrem danos abruptos quando por algum motivo há a perda de um conjunto de elementos processadores;
- *Velocidade de Processamento* - As RNA são capazes de responder mais rapidamente devido ao processamento paralelo de informações.

Destas vantagens as mais importantes para o controle neste projeto de pesquisa são: o processo de generalização^[7-11] da resposta de controle, que mostra que um RNA é capaz de extrapolar os conhecimentos do processos físicos que foram modelados na RNA implementada em circuito (chip neural) e a velocidade de processamento^[8-13] que para uma RNA implantada em circuito é da ordem de $\sim 5 \times 10^{-6}$ segundos. Este tempo de resposta permite controlar eventos muito rápidos, como os que ocorrem na formação do plasma em tokamaks^[2-4]. Conforme foi apresentado no relatório enviado no dia 19 de março deste ano, simulações de RNA em processadores convencionais da família Pentium mostram que o tempo de resposta da rede treinada ficou em torno de $\sim 10\text{-}100 \times 10^{-3}$ segundos. O tempo total da formação até o fim da coluna de plasma no tokamak ETE é de $\sim 10 \times 10^{-3}$ segundos, o que torna inviável o controle via processador convencional.

• Possibilidade de testar *in loco* o comportamento de uma rede neural artificial, sem interferência computacional

A oportunidade de testar uma RNA *in loco* permite o estudo das variações nas saídas do sistema de controle para outros tipos de algoritmos de treinamento e outras arquiteturas de redes, e assim comparar o desempenho destes parâmetros com os obtidos em simulações computacionais.

Isto também possibilitará controlar o sistema de Levitação Magnética (MagLev)^[3-4] com maior precisão, além de testar os efeitos do controle para perturbações limites. Estes testes possibilitarão a comparação de desempenho das diversas implementações do sistema de controle (controle clássico, controle neural em computador e controle neural em circuito). Realizando assim um trabalho de pesquisa mais abrangente dos sistemas de controle utilizando RNA.

Pequenos ajustes nos modelos das RNA no treinamento e teste poderão mostrar melhoras no controle, as quais seriam difíceis de serem extraídas utilizando simulação computacional.

•A interação de resultados de pesquisas com outros laboratórios que utilizam hardwares neurais

A pesquisa em RNA em circuitos mostram que é possível controlar processos não-lineares^[8-11] com certa facilidade. Isto pode favorecer o estudo de causa e efeito em sistemas os quais o modelamento é tão complexo que a simples identificação do agente causador do efeito é inviável. O estudo do comportamento da RNA em circuito poderá também, favorecer determinados tipos de algoritmos de treinamento e/ou arquiteturas.

As pesquisas poderiam ser compartilhadas com outros laboratórios tais como, na Suécia (Institute of Technology Stockholm)^[8-9], na Itália (Politecnico di Torino)^[10-11] e na Inglaterra (UKAEA)^[14-17], a fim de tornar as pesquisas nesta área em nosso país mais competitivas. Fazendo com que esta experiência possa ser aproveitada em aplicações de ciência e tecnologia que atualmente não estão sendo focadas com esta técnica.

Referências Bibliográficas

- [01] NeuroMatrix, RC "Module" - Products - NeuroMatrix. [on-line] www.module.vympel.msk.ru/products/neuromatrix.html
- [02] Barbosa, L.F.W.; Ludwig, G.O., *Redes neurais no modelamento e controle de tokamaks - aplicação ao ETE (Experimento Tokamak Esférico)* Primeiro Relatório, São José dos Campos, INPE, 1999. (INPE-7252-PRP/220)
- [03] Barbosa, L.F.W.; Ludwig, G.O., *Redes neurais no modelamento e controle de tokamaks - aplicação ao ETE (Experimento Tokamak Esférico)* Segundo Relatório, São José dos Campos, INPE, 2000. (INPE-7995-PRP/223)
- [04] Barbosa, L.F.W.; Ludwig, G.O., *Redes neurais no modelamento e controle de tokamaks - aplicação ao ETE (Experimento Tokamak Esférico)* Terceiro Relatório, São José dos Campos, INPE, 2001. (INPE-8477-PRP/226)
- [05] Barbosa, L.F.W.; Ludwig, G.O., *The use of artificial neural networks in control plasma column position in ETE (Experiment Spherical Tokamak)*, EANN 2000 - International Conference on Engineering Applications of Neural Networks, Kingston University, UK, 17-19, July, 2000.
- [06] Narendra, K.S. and Parthasarthy, K., *Identification and control of dynamical systems using neural networks*, IEEE trans., 1:1-27, 1990.
- [07] Daponte, P.; Grimaldi, D., *Artificial neural network in measurements*, Measurement 23: 93-115, 1998.
- [08] Lindsey, C.S.; Lindblad, T., *Neural Networks in Hardware*, Frescati, Relatório Interno, TRIFA FYS 9012 - KTH Frescati.
- [09] Lindsey, C.S., *Neural networks in hardware: Technology, design, and products*, Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden, 1996.
- [10] Chiaberge, M.; Merelo, J.J.; Reyneri, L.M.; Prieto, A.; Zocca, L., *A Comparison of Neural Networks, Linear Controllers, Genetic Algorithms and Simulated Annealing for Real Time Control*, Proc. of ESANN 94, European Symposium on Artificial Neural Networks, Brussels, Belgic, April, 1994.

- [11] Reyneri, L.M.; Chiaberge, M.; Zocca, L., *CINTIA: A Neuro-Fuzzy Real Time Controller for Low Power Embedded Systems*, MICRONEURO 94, Int'l Conf. on Microelectronics for Neural Networks and Fuzzy Systems, Torino, Italy, September, 1994.
- [12] Sridhar, R.; Shin, Y.C., *VLSI neural network architectures*, IEEE technology UPDATE SERIES Neural Network Theory, Technology and Applications, New York, 864-873, 1996.
- [13] Hammerstrom, D., *A VLSI architecture for high-performance, low-cost, on-chip learning*, Proc. Int. Joint Conf. on Neural Networks, June, 537-544, San Diego, Ca., 1990.
- [14] Windsor, C.G.; et al., *On-Line Control of the COMPASS-D Tokamak using a Neural Network*, Nuclear Energy, 34(2), 85-91, 1995.
- [15] Windsor, C. G.; Todd, T. N.; Trotman, D. L. and Smith, M. E. U., *Real Time Electronic Neural Nets for ITER-like Multiparameter Equilibrium Control in Compass-D*, UKAEA Fusion, Report UKAEA FUS 307, 1995.
- [16] Lister, J.B. and Schnurrenberger, H., *Fast Non-Linear Extraction of Plasma Equilibrium Parameters Using a Neural Network Mapping*, Nucl. Fusion 31: 1291, 1991.
- [17] Bishop, C. M.; Cox, P. M.; Haynes, P. S.; Roach, C. M.; Smith, M. E. U.; Todd, T. N. and Trotman, D. L., *A Neural Network Approach to Tokamak Equilibrium Control*, NCM 91: Applications of Neural Networks, Springer-Verlag, 1991

APÊNDICE B

Conceptual project and present status of the ETE control and data acquisition systems

R.M. Oliveira *, L.F.W. Barbosa, J.G. Ferreira, C.S. Shibata

*INPE—Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Laboratório Associado de Plasmas,
Av. dos Astronautas 1758, Jardim da Granja, 12227-010 São José dos Campos, SP, Brazil*

Abstract

The control and data acquisition systems of the recently built Experimento Tokamak Esférico (ETE) (Spherical Tokamak Experiment) were conceived in a distributed, integrated and user-friendly approach (Fus. Eng. Design. 36 (1997) 167). The computerized control of the tokamak operation is based on CAMAC standard electronics to interface the tokamak subsystems and the control software, written in C language, to run under Windows NT. A requirement put on the system was to provide complete electrical isolation between the control and the machine rooms. Therefore, a shot is remotely started from the control room in which terminals are connected to the control computer through a fiber optics LAN and employing web-style or Windows network software, providing a total-isolation solution. Human and equipment safety is guaranteed by a safety pneumatic system, basically composed of a set of interlocks, made with pneumatic and electro-pneumatic elements. Data acquisition of plasma diagnostics is being implemented with co-operation of the ISTTOK group and it will be based on VME bus and OS-9 operating system. In our system, control and data signals will have separate buses and the acquisition of experimental data will begin with a trigger pulse coming from a CAMAC timing module. The Interactive Data Language commercial software will be used to run programs that will display the stored experimental data. © 2002 Elsevier Science B.V. All rights reserved.

Keywords: Tokamak; Computer control system; Data acquisition; Safety pneumatic system

1. Introduction

The ‘Experimento Tokamak Esférico’ (ETE), a spherical tokamak that produced its first plasma in November 2000, has the following main characteristics: major radius $R = 0.3$ m, aspect ratio $A = 1.5$, toroidal magnetic field $B_\phi = 0.4\text{--}0.8$ T

and projected plasma current $I_p = 220\text{--}440$ kA. One of the main advantages of a spherical torus is that it can operate with a high ratio of plasma pressure to magnetic field pressure, due to the increase in plasma stability, with high shear of the magnetic field lines in the central region [1]. These advantages only become apparent for small aspect ratios, as in the case of the ETE device. However the success of the research programme in such a device is closely related to the completeness of its diagnostic system and to the quality of the control and data acquisition system employed.

* Corresponding author. Tel.: +55-12-345-6692; fax: +55-12-345-6710.

E-mail address: rogerio@plasma.inpe.br (R.M. Oliveira).

The edge plasma of ETE will be probed by a Fast Neutral Lithium Beam Device [2], while the bulk of its discharge will be diagnosed by a 10 J ruby laser Thomson Scattering diagnostic [3] and by a CO₂ Multipass Configuration Interferometer [3]. Visible spectrometer, fast CCD camera, special magnetic and electrostatic probes and the well-known devices that perform measurement of engineering signals will also be used.

The control and data acquisition system was conceived in a way to assure safe machine operation, with a complete galvanic insulation between the control room and the machine area [4]. The system was also designed to provide a distributed, integrated and user-friendly approach [5], assuring upgrading capacity, according to experimental requirements that will arise during the life of the experiment.

This paper reports the three relatively independent main subsystems, based on essentially distinct technologies, used in the control and data acquisition system of ETE: the safety pneumatic system (SPS) described in Section 2, the computer control system (CCS) described in Section 3, and the data acquisition system, described in Section 4. Section 5 presents the conclusions and future developments.

2. Safety pneumatic system—SPS

A pneumatic system was chosen to be responsible for operational safety in ETE. It is easy to implement, given the availability of a range of pneumatic actuators, sensors and other components widely used in industrial automation and control, and it is robust and reliable, since it does not depend on electronic circuitry, as it would if it was based exclusively on optical isolation to transfer information between the control room and the hazardous areas. For instance, if electric power is lost during tokamak operation, the compressed-air reservoir keeps the SPS logic working so as to assure personnel safety and equipment integrity.

The pneumatic circuit logic of this system is based on the use of electro-pneumatic valves to drive interlock cylinders installed in all access

doors to the hazardous areas, pneumatically actuated damping switches, pneumatic coupling switches to connect the chargers to the capacitor banks, besides a number of pneumatic sensors providing information on the status of the whole system which passes through the safety barrier with total galvanic isolation. Although electro-pneumatic components are used throughout the whole system, the pneumatic logic guarantees that a safe condition is attained in the absence of electricity, and galvanic isolation is fully preserved since only pneumatic lines cross the safety barrier between the system front panel in the control room and the main part of the system in the machine area, as can be seen in Fig. 1. When fully implemented, the system will include an access control system interlocked to all relevant doors, as well as strategically located emergency buttons in the risk areas.

Therefore, only after checking the access control system, the door locking and the capacitor bank status, will the pneumatic circuit logic of SPS send an air-pressure signal that will act on the interlocks of the main power supplies, responsible for charging the capacitor banks, enabling them to be remotely operated by the CCS.

When ETE is in operation the high voltage system is monitored all the time and any failure detected in the safety system takes the entire control system to a safe state, aborting the charging sequence of the capacitor banks, dumping their energy and grounding all circuits, prior to opening the machine area.

3. Computer control system—CCS

The second subsystem to consider is a PC-based CCS, which uses CAMAC technology to interact with ETE subsystems. It provides all the main tasks involved in the tokamak operation: synchronizing pulses for triggering data acquisition, gas puffing, capacitor bank electronic switching; remote programming and control of capacitor bank power supplies; control of pre-ionization system; acquisition of basic engineering signals used for feedback control and for taking decisions to prevent damage to the equipment; etc. The control

software, which runs under Windows NT, was developed in C language and is linked with ESONE standard software drivers provided with the CAMAC modules (ADCs, DACs, relay and timing units, waveform generators). Relevant information concerning the continuous monitoring of the status of capacitor bank charging and interlock system is available for the operator, making it possible to abort the program at any moment.

In this system, the requirement of galvanic isolation is provided by an optical break introduced in the cable connecting the control computer to the CAMAC crate. At present, the isolation provided by such a break is limited to 2 kV, which does not meet the 15 kV isolation level specified for ETE (about twice the maximum capacitor voltage). Replacement of the optical break with a higher isolation unit is planned, but optional remote control solutions are also included. Presently a shot is remotely started from the control room using a telnet link between the control computer and a

remote terminal that is connected to the Unix network server. By planning a user-friendly approach, the control program will use a graphical interface written in JavaScript platform, where a web-compatible browser will be available for the operator. The other possibility of remote control of the machine is by the use of a PC computer, connected through LAN with the control computer, running Windows NT Server, making use of graphical interfaces written in Visual Basic, where Dynamic Link Libraries (DLLs) are linked to the control program written in C. Since fiber optics is used for the branch of the local area network between the control room and the hazardous areas, these solutions provide a virtually infinite insulation, with slightly degraded system performance and reliability, caused by the necessity of the introduction of extra hardware and software, that are susceptible to suffer interference and that inevitably add their intrinsic delays to the system response time.

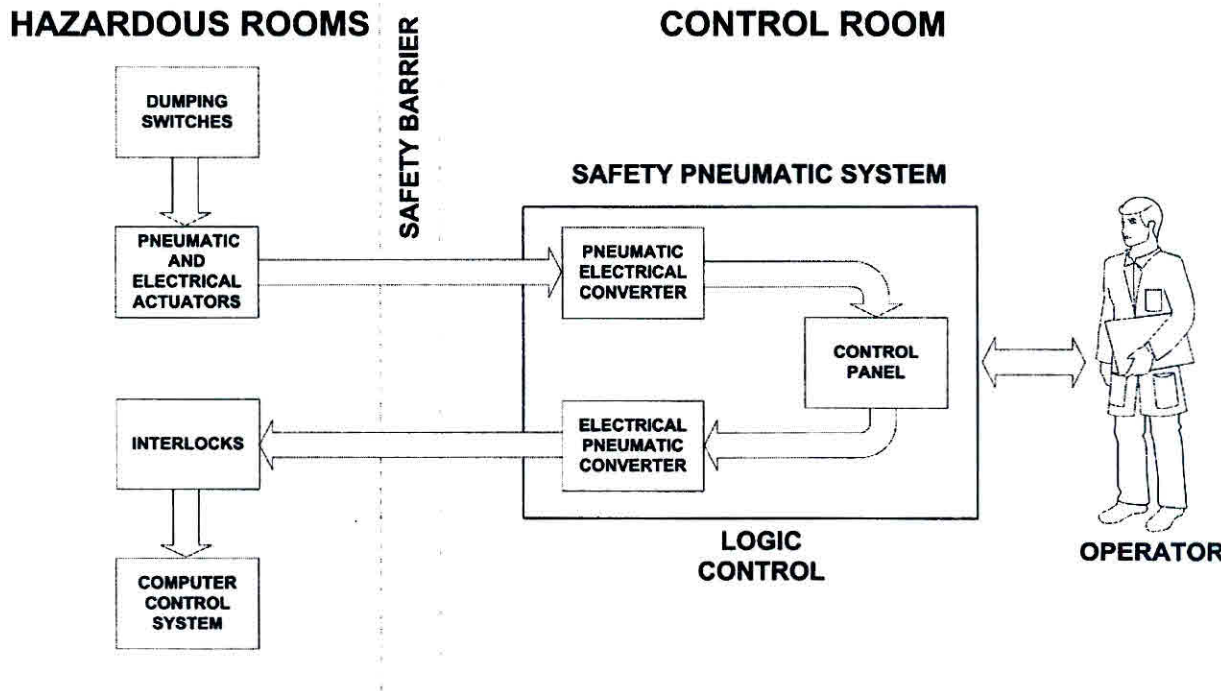


Fig. 1. Schematic drawing of the SPS.

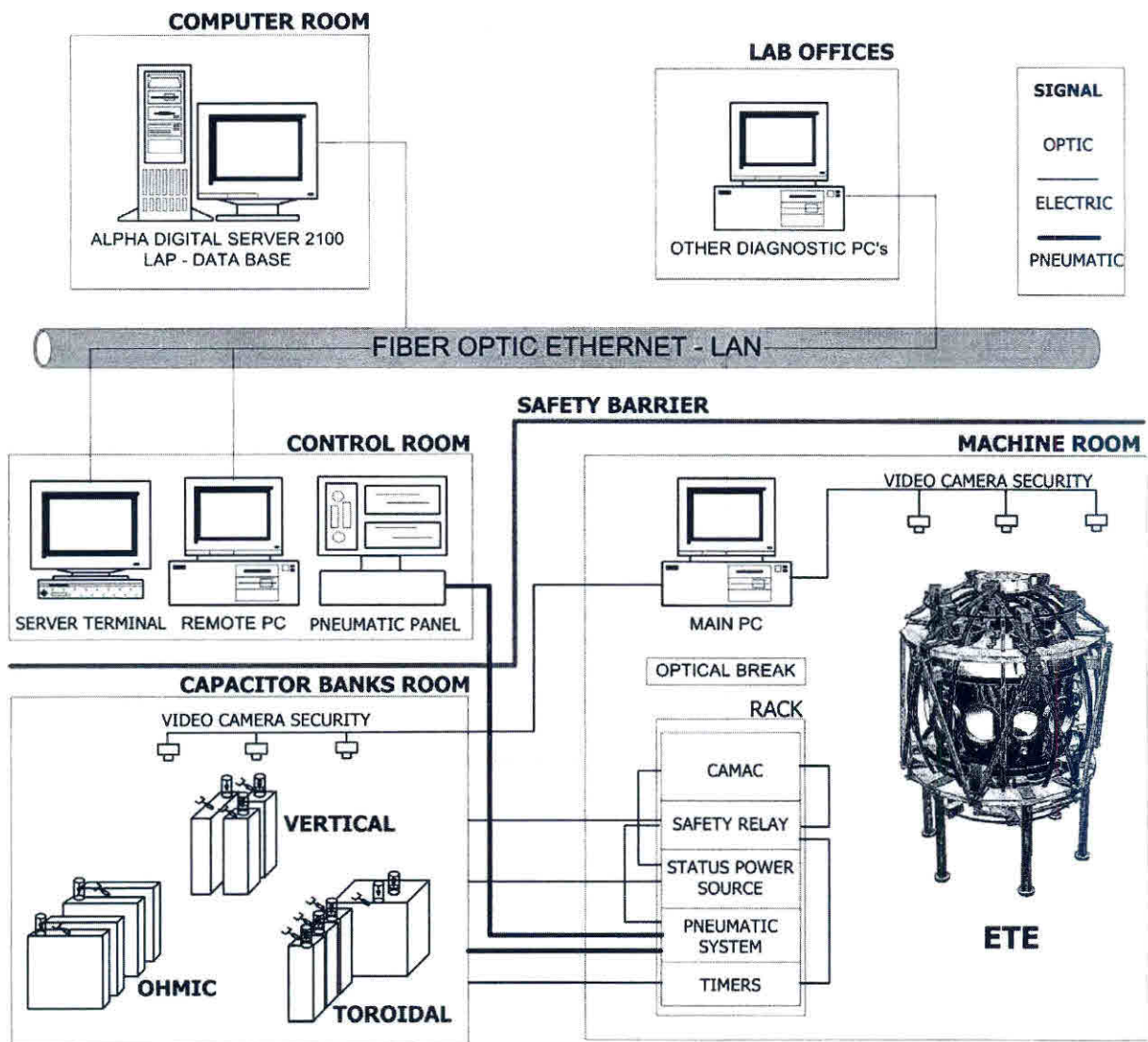


Fig. 2. System configuration of CCS.

Fig. 2 shows the complete system configuration of CCS, including: the solutions for remote access from the control room, the safety barrier that isolates the control room from the machine and the capacitor banks room, the Alpha Digital Server computer that will be used as a database station, the optical, the electrical and the pneumatic connections.

4. Data acquisition system

At the moment, data acquisition in ETE is provisionally performed using CAMAC modules. However, in the near future a VME bus system running OS-9 will be used for the acquisition of physics diagnostic data. Of the specified VME system however, only two VME ADC modules

are actually available (bought from the ISTTOK group in Portugal) and the main part of the VME system is currently at purchasing stage from Hytec in UK. The experimental data stored after each shot into the local memory of the VME digitizer module will be transferred using Ethernet network to an Alpha Digital Server computer, running Unix, where the data is stored in the IDA-3 data file structure. This data format, developed at UKAEA, was chosen to be the data format of ETE because there is an agreement with UKAEA that will allow the exchange of data between MAST [6] and ETE experiments. We believe that exchanging experimental data with other machines, especially one like MAST, which is a leading device in the field of spherical tokamak research, will be of great importance for the development of the ETE research programme.

In parallel, some work has been done in designing example windows written in IDL for the visualization of data, by taking samples and simulation of data as expected from ETE. This should be the main interface between the physicists and the diagnostic plasma data of ETE, stored in the central mass-data storage workstation.

5. Summary

One of the main engineering features imposed for the design of the control and the data acquisition system of ETE was the requirement of a fully remote control operation with complete galvanic isolation between the control room and the machine area, assuring safe machine operation. This requirement is implemented with the joint operation of the SPS and the Computer Control System described in this paper. This requirement was also intended to stimulate local development of expertise in a topic of vital importance for operation of larger experiments and future fusion reactors. The requirements of control and data acquisition of ETE at its present status have been reasonably attended so far, since ETE's plasma operation started in November 2000 and the main diagnostic systems are not yet implemented.

New physical properties will be investigated with the enhancement of ETE, demanding flexibility to

accommodate several complex control and diagnostic devices. In fact, it is planned to install a Neutral Lithium Beam Probe to measure the edge plasma density and its fluctuations, a Thomson Scattering and a Interferometer device, a fast CCD camera to view the plasma shape and investigate its formation, as well as sophisticated control systems using artificial neural networks [7] for plasma column position control and magnetic plasma equilibrium reconstruction in ETE. However, we strongly believe that no severe constraint will be imposed by such new implementations, mainly due to the modular philosophy in which the system was conceived and due to the multi-vendor characteristic of the software and the hardware configuration of the control and data acquisition system of ETE.

Acknowledgements

Financial support: FAPESP (The State of São Paulo Research Foundation).

References

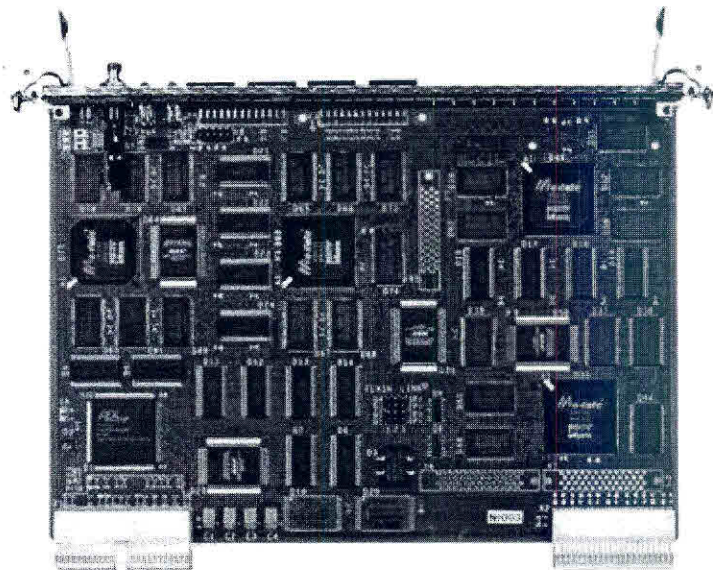
- [1] Y.-K.M. Peng, D.J. Strickler, Features of spherical torus plasmas, *Nuclear Fusion* 26 (1986) 769–777.
- [2] R.M. Oliveira, W.A. Vilela, M. Ueda, Fast neutral lithium beam for density and its fluctuation measurements at the boundary regions of ETE tokamak, in: *Proceedings of the 14th IAEA-TCM on Research Using Small Fusion Devices*, June 25–27 (2001) 11, São Paulo, Brazil.
- [3] L.A. Berni, M. Machida, M.J.R. Monteiro, R.M. Oliveira, et al., Present Status of ETE Diagnostics, *Proceedings of the 2nd IAEA TCM on Spherical Tori*, August 1–3 (2001) São José dos Campos, Brazil.
- [4] L.F.W. Barbosa, Pulsed Electric System with Digital Control of the Tokamak ETE (Spherical Tokamak Experiment), Master Degree Thesis, ITA, São José dos Campos, Brazil, 1998.
- [5] C.A.F. Varandas, et al., On-site developed components for control and data acquisition on next generation fusion devices, *Fusion Engineering and Design* 36 (1997) 167–176.
- [6] S.J. Manhood, I. Jenkins, J. Waterhouse, The Mast data acquisition system—distributed implementation, *Fusion Engineering and Design* 48 (2000) 219–223.
- [7] L.F.W. Barbosa, G.O. Ludwig, The use of artificial neural networks in control plasma column position in ETE (Spherical Experiment Tokamak), EANN 2000, *Proceedings of the International Conference on Engineering Applications of Neural Networks*, Kingston University, July 17–19 (2001), U.K.

APÊNDICE C

NeuroMatrix® NM4 CompactPCI Board

Features:

- ✓ Four 64-bit NeuroMatrix® NM6403 RISC/DSP processors;
- ✓ Scalable performance from 160 up to 46.000 MMAC;
- ✓ Vector matrix calculations with elements of variable bit length (Pat. 2131145 RU);
- ✓ Optional IndustryPack® (IP) mezzanine modules expansion;
- ✓ 24 Mbyte of static memory (SRAM);
- ✓ 128 Mbyte of synchronous dynamic memory (SDRAM);
- ✓ 1 Mbyte of Flash memory;
- ✓ Eight external communication ports with speed up to 20 Mbyte/sec each;
- ✓ CompactPCI bus with speed up to 30 Mbyte/sec.



NM4 is an advanced ultra-high performance multi-DSP CompactPCI board designed for hard real-time video and image processing, signal processing and artificial neural networks.

NM4 enables software engineers to use vector-matrix calculations in their own applications most efficiently than ever. NM4 is supplied with strong software development tools including C++ compiler, assembler, debugger, low-level vector matrix libraries and high-level Image Processing Blocks.

NM4 contains four high-performance 64-bit NeuroMatrix® NM6403 RISC/DSP processors. The processors are supported by 4 MB of SRAM on a local 64-bit bus, and 2 MB of SRAM on a global 64-bit bus. 1 MB of Flash memory and 128 MB of shared SDRAM memory permit a read/write access both from processors and from CPCI controller. The NM4 has eight external communication ports hardware compatible with TI TMS320C4x DSP and site for optional IndustryPack® (IP) mezzanine modules expansion. A broad selection of Video/AD/DA/DIO mezzanine modules for Industrial Control, Data Acquisition, Digital, Analog, Serial, Motion Control, Data Storage and Networking is available at RTSoft company.

Software Support:

The NeuroMatrix® NM6403 SDK provides you with complete cycle of software design and debugging tools. This includes:

- C++ compiler;
- Assembler;
- Linker;
- Librarian;
- C-source Debugger;
- Cycle accurate simulator;
- Drivers for Win95/NT;
- C run-time library with source code;
- Load and exchange library;
- Example of using the Load and Exchange library.

Module® and NeuroMatrix® are registered trademarks of Research Center MODULE. All other trademarks are the exclusive property of their respective owners.

RC MODULE, 3 Eight March 4th Street, Box#166, Moscow, 125190, Russia

Tel.: +7 095 152-9698, Fax: +7 095 152-3168, +7 095 152-4661, <http://www.module.ru>, E-mail: info@module.ru

Applications:

- Real-time image and video processing;
- Video surveillance;
- Real-time radar/sonar data pre- and post-processing;
- Multi-channel Fast Fourier Transform;
- Multi-channel Hadamard-Walsh Transform;
- Multi-channel Fast Direct Cosine Transform;
- Real-time Encryption;
- Research, development and production of parallel DSP systems;
- Large Neural Networks.

Specifications:

Processor

Four 40 MHz NeuroMatrix® NM6403

On-board Memory

Four 256 K × 64-bits (2 MB) async. SRAM

Four 512 K × 64-bits (4 MB) async. SRAM

Two 8 M × 64-bits (64 MB) SDRAM

I/O

Two communication ports with speed up to 20 MB/s

CompactPCI bus with speed up to 30 Mbyte/sec

CompactPCI Interface

32-bit CompactPCI (master/slave) system bus

Shared memory SRAM access

Performance

Scalar operations for 32-bit data up to 480 MOPS (peak)

Vector operations with 8-bit data up to 3840 MMAC (peak)

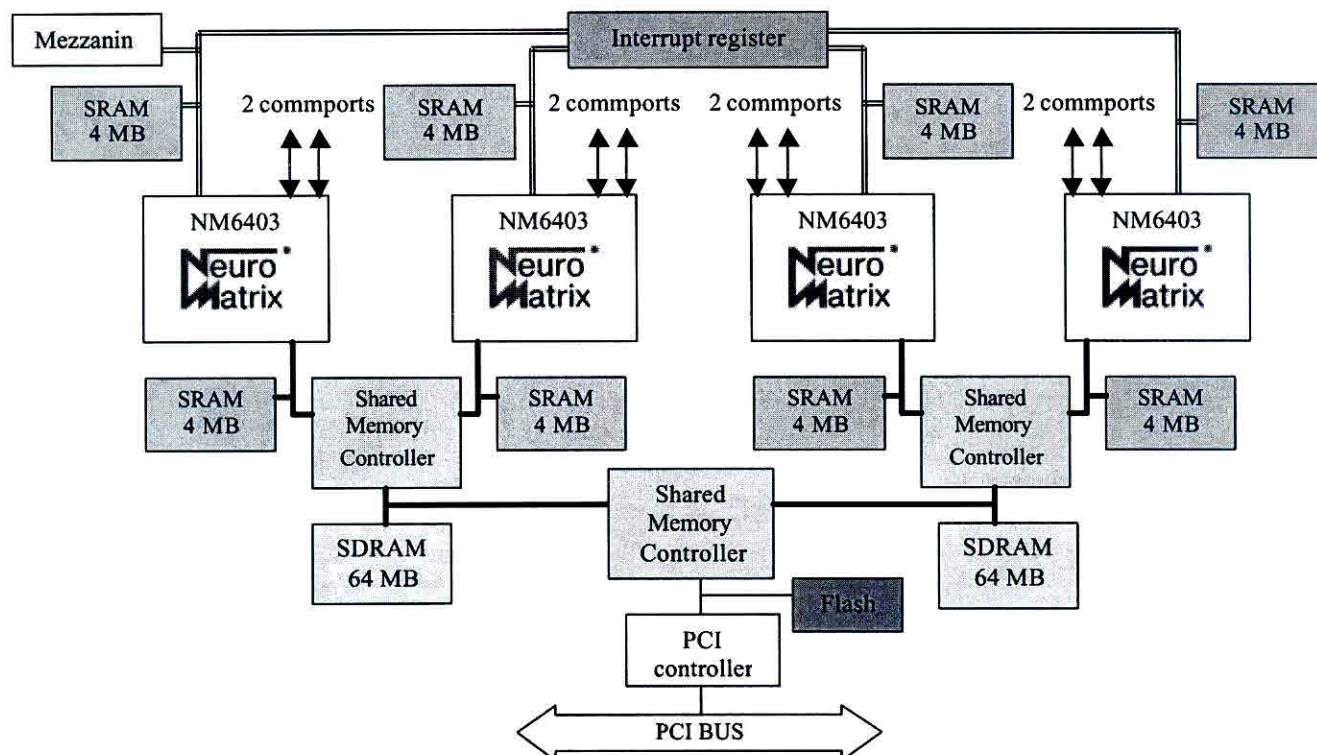
Power

Supply 5.0 / 3.3 V

Consumption less than 20 W

Size

160 mm × 233 mm



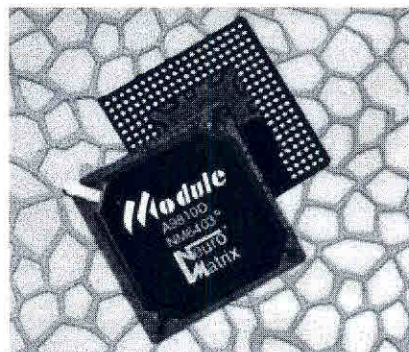
NM4 is ideal selection for high-end DSP add-on to CPCI-bus Crate for real-time DSP applications with optimal price/performance ratio.

Module® and NeuroMatrix® are registered trademarks of Research Center MODULE. All other trademarks are the exclusive property of their respective owners.

RC MODULE, 3 Eight March 4th Street, Box#166, Moscow, 125190, Russia

Tel.: +7 095 152-9698, Fax: +7 095 152-3168, +7 095 152-4661, <http://www.module.ru>, E-mail: info@module.ru

NeuroMatrix® NM6403 is a high performance dual-core microprocessor with combination of VLIW/SIMD architectures. The architecture includes two main units: 32-bit RISC Core and 64-bit VECTOR co-processor to support vector operations with elements of variable bit length (Patent No.2131145 RF). There are two identical programmable interfaces to work with any memory types as well as two communication ports hardware compatible with TI DSP TMS320C4x which permit to build multi-processor systems.



Features:

- Clock frequency - 40 MHz (25ns instruction cycle time)
- Technology used CMOS 0.5 μ m.
- BGA256 package
- Low voltage operation, from 2.7 V to 3.6 V
- Power consumption @50MHz about 1.3W
- Temperature range: -60 +85 C

RISC Core

- 5-stage pipelined 32-bit RISC
- Processor instructions are 32 and 64 bit wide (usually two operations are executed by each instruction)
- Two address generation units, address space - 16 GB
- Two 64 bit programmable interfaces with SRAM/DRAM shared memory
- Data format: 32-bit digit integers
- Registers:
 - ⇒ 8 of 32 bit general purpose registers
 - ⇒ 8 of 32 bit address registers
 - ⇒ special control and state registers
- Two high speed I/O communication ports of a byte width hardware compatible with those of TMS320C4x

VECTOR co-processor

- 1-64 bit word length of vector operands and the products
- Data format: integer data packed into 64-bit blocks in the form of variable length words from 1 to 64 bits each

- Hardware support of vector-matrix or matrix-matrix multiplication
- On-chip saturation functions
- On-chip three 32*64 bit RAM blocks

Applications:

- Accelerators for PCs and workstations for:
 - ⇒ neural net emulation
 - ⇒ signal processing
 - ⇒ image processing
 - ⇒ acceleration of vector and matrix calculations
- Telecommunications
- Embedded systems
- Basic block for building large super parallel computing systems

Performance:

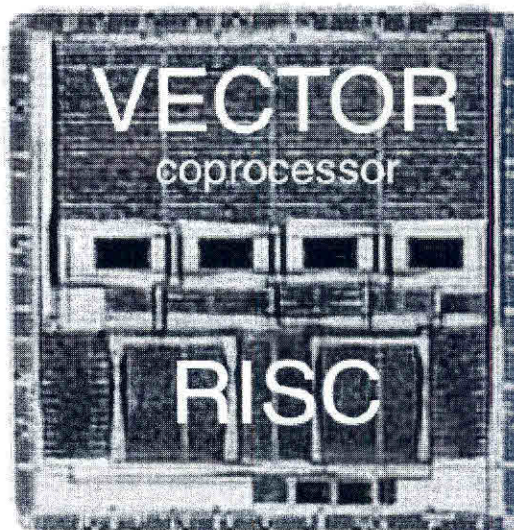
- Scalar operations:
 - 50 MIPS
 - 150 MOPS for 32 bit data
- Vector operations:
 - from 50 to 14.400+ MMAC (million multiplication and accumulation per second)
- I/O and interfaces:
 - ⇒ two programmable external memory 64 bit interfaces have up to 800 MB/sec. throughput
 - ⇒ I/O communication ports up to 20MB/sec. throughput each

NeuroMatrix® Core (NMC)

NMC is a synthesizable Verilog RTL model of a high performance DSP core with VLIW/SIMD architecture. The core includes two main units: 32-bit RISC processor and 64-bit VECTOR coprocessor to support vector operations with elements of variable bit length (Pat. 2131145 RU).

Features:

- Silicon proven (NM6403 DSP)
- Scalable DSP performance
- Original instruction set
- Small number of eq. gates (~80.000)
- Clock frequency - 123 MHz (8ns instruction cycle time) at 0,25 um CMOS technology
- Strong Software Development Kit
- PCI Evaluation Board



NM6403 DSP Layout

RISC Processor

- 5-stage pipelined 32-bit RISC
- Processor instructions are 32 and 64-bit wide (usually two operations are executed by each instruction)
- Two address generation units, address space - 16 GB
- Two wide 64-bit data buses
- Data format: 32-bit digit integers
- Registers:
 - ⇒ 8 of 32-bit general purpose registers
 - ⇒ 8 of 32-bit address registers
 - ⇒ special control and state registers

VECTOR co-processor

- 1-64 bit word length of vector operands and the products
- Data format: integer data packed into 64-bit blocks in the form of variable length words from 1 to 64-bits each
- Hardware support of vector-matrix or matrix-matrix multiplication
- On-chip saturation functions
- On-chip three 32*64-bit RAM blocks

Applications:

- Core for traditional DSPs:
 - ⇒ image processing
 - ⇒ signal processing
 - ⇒ neural net emulation
 - ⇒ acceleration of vector and matrix calculations
- Telecommunication chips
- 3G Wireless Digital Baseband Processors
- Crypto-processors
- Embedded processors
- Basic block for building System-On-A-Chip

Performance:

- Scalar operations:
 - 1*F MIPS, where F is a clock rate in MHz
 - 3*F MOPS for 32-bit data, where F is a clock rate in MHz
- Vector operations:
 - from 1*F up to 288*F MMAC (million multiplication and accumulation per second), where F is a clock rate in MHz

APÊNDICE D

Digital Neural Networks in VLSI

Table I.a.

<i>Name</i>	<i>Architecture</i>	<i>Precision</i>	<i>Neurons</i>	<i>Synapses</i>	<i>Learn</i>	<i>Avail.</i>
Nuralogix NLX-420	Multi-layer	1-16b x 1-16b	16	16 offchip	off-chip	commercial
Hecht-Nielson 100 NAP	GP ¹ , SIMD processors	32b x 32b, FP	100 PE ²	64	prog.	system
Hitachi WSI	Wafer Scale Net Hopfield	9b x 8b	576	32k	off-chip	research
Inova N64000	GP, SIMD processors	1-16b x 1-16b	64 PE	128k-2M	prog.	system
IBM ZISC036	Radial Basis Functions	8b elements	36 prototypes	64 element prototypes	RCE-like	commercial
MCE MT19003	Multi-layer feedforward	13b x 13b	1 PE	off-chip wts	off-chip	commercial
Micro Devices MD-1220	Multi-layer feedforward	1b x 16b	8	8	off-chip	commercial
Nestor/Intel Ni1000	Radial Basis Functions	5b elements	1024 prototypes	256element prototypes	RCE, PNN	commercial
Philips Lneuro-1	Multi-layer feedforward	1-16b x 1- 16b	16 PE offchip TF	16x16	prog.	research
Siemens MA-16	Systolic array for matrix x matrix	16b x 16b	16 PE offchip TF	64	off-chip	research
RC Module NM6403	Multi-layer feedforward	1-64b x 1-64b	1-64	1-64	prog.	prototypes

¹ GP - General purpose architecture
² PE indicates a processing unit

Table I.b.

<i>Name</i>	<i>Configuration</i>	<i>CPS</i> ³	<i>CPSPW</i> ⁴	<i>CPPS</i> ⁵	<i>CUPS</i> ⁶	<i>Patterns/s</i>
Nuralogix NLX-420	32-16, 8-bit mode	10M	20k	640M	na	20k
Hecht-Nielson 100 NAP	4-chips, 2M wts, 16bit Mantissa	250M	125	256G	64M	na
Hitachi WSI	576 neuron Hopfield	138M	3,7	9,9G	na	na
Inova N64000	64-64-1, 8bit mode	871M	3.4k, 128k wts	55.7G	220M	100k
IBM ZISC036	64 8bit element input vectors	na	na	na	na	250k
MCE MT19003	4-4-1 at 32MHz clk rate	32M	32M	6.8G	na	140k
Micro Devices MD-1220	8-8	8.9M	1.1M	142M	na	139k
Nestor/Intel Ni1000	256 5bit element input vectors	na	na	na	na	40k
Philips Lneuro-1	1-chip, 8bit mode	26M	26k	1.6G	32M	na
Siemens MA-16	1-chip, 25MHz	400M	15M	103G	na	40k
RC Module NM6403	8bit mode at 50MHz clock rate	1200M	150M	76.8G	na	na

Reference.

C. S. Lindsey, Th. Lindblad, "Survey of Neural Network Hardware", Proc. SPIE Vol. 2492, p. 1194-1205, Applications and Science of Artificial Neural Networks, Steven K. Rogers; Dennis W. Ruck; Eds. , March 1995.

³ CPS - Connection-Per-Second

⁴ CPSPW = CPS/Nw, where Nw - number of sinapses per neuron.

⁵ CPPS - Connection Primitives per Sec, CPPS = CPS*Bw * Bs, were Bw, Bs - word length of weight and sinaps.

⁶ CUPS - Connection-Update-Per-Second.

<http://www.module.ru>

Device	Target-application examples	Instruction/data width	Accumulator width	Barrel shifter/no. of bits	No. of address generators/data buses	Multiprocessor support	External address range (Kbytes)	Looping hardware	256-point FFT (cycles)	Special features
Analog Devices ADSP-2100	Modem, cellular base station/hand-set, etc.	24/16	40	32	2/2	No	4 Mbytes	Yes	11920	Up to 32K words SRAM, 6 DMA channels
ADSP-21esp01	Cellular base station, DSVD modem, etc.	24/16	40	32	2/2	Yes	48 Mbytes	Yes	7500	5 DMA channels, serial ports
AT&T DSP16xx	Mobile communication, modems	16/16	36	36	2/2	No	64K words	No	21193	Low-power (0.7 mA/MIPS)
Motorola DSP561xx	Digital cellular, voice communications	16/16	40	None	2/2	No	128 (progr.); 128 (data)	Yes	12162	Timer, codec
DSP5600x	Audio, control, modem	24/24	56	None	2/3	No	128 (progr.); 256 (data)	Yes	8336	On-chip emulation, PLL, timer
Texas Instruments TMS320C2x	Hard disc drivers	16/16	32	16	1/1	Yes	256	Yes	25038	Repeat instructions, expanded RAM/ROM
TMS 320C2xx	Telecomm, consumer electronics, security systems	16/16	32	16	1/2	Yes	384	No	25000	On-chip flash
TMS 320C5x	Multimedia, cellular, cordless, modems	16/16	32	16	1/2	Yes	384	Yes	13251	Parallel logic unit, wide range of RAM and ROM options
TMS 320C54x	Wireless telecomm, networking, multimedia	16/16	40	32	2/3	Yes	384	Yes	9684	Large memory mixes, Viterbi accelerator
TMS 320C62x	Cellular base station, security systems, modems, etc.	32/8,16,32	40	32	2/2	No	4 Gbytes	No	4225 for 16-bit data	Advanced VLIW architecture, 1Mbit on-chip SRAM, DMA co-processor
TMS 320C8x	Videoconferencing, image processing, digital switching	64/16	32	32	2 per DSP/2 per processor	Yes	4 Gbytes	Yes	4881	4 DSPs and one RISC μ P, 50 Kbytes SRAM, DMA co-processor
RC Module NM6403	Cellular base station, telecomm., image processing, security systems, multimedia, neural networks	32/8,16,32, 64	64	32	2/3	Yes	16 Gbytes	Yes	10000 for 32-bit data	32 bit RISC μ P and 1-64 bit VECTOR co-processor, timers, communication ports, DMA co-processor, On-chip saturation functions

Source: 03.01.96 EDN's 1996 DSP-Chip Directory. (<http://www.ednmag.com/reg/1996/030196/03DFCOV.cfm>)