

**Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**  
**Departamento de Engenharia Eletrônica**

ISSN 1413-2206

**BT/PEE/9911**

---

**Projeto de um Sistema de Propulsão  
e Levitação Magnética com Dois  
Graus de Liberdade**

---

**Alexandre Brincalepe Campo**

**Felipe Miguel Pait**

**São Paulo – 1999**

O presente trabalho é um resumo da dissertação de mestrado apresentada por Alexandre Brincalepe Campo sob orientação do Prof. Dr. Felipe Miguel Pait: "Projeto de um Sistema de Propulsão e Levitação Magnética com Dois Graus de Liberdade", defendida em setembro de 1995, na Escola Politécnica.

A íntegra da dissertação encontra-se à disposição com o autor e na Biblioteca de Engenharia de Eletricidade da Escola Politécnica/USP.

#### FICHA CATALOGRÁFICA

Campo, Alexandre Brincalepe

Projeto de um sistema de propulsão e levitação magnética com dois graus de liberdade / A.B. Campo, F.M. Pait. -- São Paulo : EPUSP, 1999.

20 p. -- (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Eletrônica, BT/PEE/9911)

1. Levitação magnética 2. Propulsão magnética 3. Controle eletrônico-I. Pait, Felipe Miguel II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Eletrônica III. Título IV. Série  
ISSN 1413-2206

CDD 538.3

538.44

629.89

**ALEXANDRE BRINCALEPE CAMPO**

**PROJETO DE UM SISTEMA DE PROPULSÃO E  
LEVITAÇÃO MAGNÉTICA  
COM DOIS GRAUS DE LIBERDADE**

**Orientador :  
Prof. Dr. Felipe Miguel Pait**

**São Paulo**

**1995**

## Resumo

O escopo principal deste trabalho é o projeto de um sistema de levitação magnética com dois graus de liberdade e dois modos de funcionamento. O sistema possui múltiplas variáveis de controle e parâmetros variáveis.

São apresentados inicialmente aspectos relevantes dos sistemas de levitação magnética pesquisados na bibliografia utilizada, sendo descritos a seguir os estudos realizados no levantamento do modelo matemático do sistema idealizado. Esta descrição é feita seguindo dois procedimentos diferentes: através de cálculos utilizando equações de densidade de fluxo magnético e através da análise das derivadas das mútuas indutâncias do circuito.

A seguir são apresentados os sistemas eletrônicos de medição das variáveis de controle desenvolvidos, sendo compostos por um circuito que gera uma tensão proporcional a altura de levitação, correspondente a uma capacitância e o circuito sensor de posição angular da bobina-veículo sobre as bobinas do trilho. Também são apresentados o sistema de interfaceamento do computador com o projeto de controle eletrônico das variáveis do

es da dinâmica do sistema principal, através das quais são apresentadas e discutidas tendo em vista a estratégia de controle mais adequada venha

Falhar Saneer e

## **“Abstract”**

The purpose of this work is to present the study of a magnetic levitation system with two degrees of freedom. The system have parameters variable and it has multiple inputs and outputs.

Initially, researched aspects relevant to the magnetic levitation system are presented. Later, the studies performed on the compilation of the mathematical model idealized are described. This description is done following two different procedures: analysis of the Maxwell equations of flux density applied in the structure and analysis of the derivatives of the mutual inductances of the circuit.

Next, the development of the control variables measurement system of the air gap and the angular position, as well as the computer interface systems to the control variables are introduced.

The final part of this work presents the equations of the main system, through wich control will be developed. Having in mind a structure directed in such a way that the adequate control strategy will be implemented. Results obtained to this moment in simulations performed with Matlab software are presented, and possible methods that eventually be adopted during the development of the project are discussed.



# 1 INTRODUÇÃO

A partir do final do século passado começaram a surgir propostas de sistemas de transporte que pudessem reduzir o desgaste mecânico devido ao contato de rodas com o solo, viabilizando grandes velocidades. O meio de se conseguir tal objetivo passava pela utilização de colchões de ar ou de forças de atração ou repulsão eletromagnéticas. O desenvolvimento tecnológico viabilizou os sistemas eletromagnéticos graças à obtenção de materiais supercondutores a altas temperaturas, que podem gerar grandes campos magnéticos com eficiência; dispositivos semicondutores de potência, que são responsáveis pelo controle da energia elétrica necessária para a propulsão, condução (guia) e levitação; e circuitos digitais, que viabilizam a implantação dos sistemas de controle necessários para o sistema.

## 1.1 Aplicações

Os sistemas de propulsão, levitação e condução magnética podem ser utilizados em uma gama muito grande de aplicações. Na bibliografia pesquisada foram encontradas aplicações em mancais especiais, de alta velocidade de rotação, alta eficiência e pequeno desgaste mecânico; na suspensão, propulsão e condução (guia) de veículos de transporte em alta velocidade, e na construção de lançadores ou catapultas, tais como aquelas utilizadas em porta-aviões para auxílio na decolagem de aviões, por exemplo. Esses sistemas podem ter diversas configurações dependendo do tipo de aplicação para que foram projetados. Apesar das diferenças existentes, a análise realizada possui aspectos genéricos comuns, que são de grande importância em qualquer uma das aplicações citadas e são objeto deste estudo.

## 1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver um protótipo de um sistema de levitação magnética linear com dois graus de liberdade, onde diversos aspectos relativos às aplicações acima enumeradas possam ser estudados. Para isso foi idealizado um sistema que pode ser configurado de modo a ressaltar as características de um motor linear e de uma suspensão baseada na atração e na repulsão. Do ponto de vista de controle, diversos fatores tornam o sistema de interesse para análise: sua característica multivariável, a existência de parâmetros variáveis nas equações que descrevem o sistema, a sua não-linearidade e ainda a existência de modos instáveis, segundo a configuração de montagem adotada.

## 1.3 Descrição do Sistema

O sistema consiste de bobinas com núcleo de ar, chamadas de trilho, dispostas de modo a formar um círculo sobre o qual uma bobina com núcleo de ar, chamada veículo, poderá se locomover com dois graus de liberdade (Figuras 1.1 e 1.2). Esta bobina está ligada a uma haste cujo ponto de apoio se encontra no centro do círculo. Do lado oposto da haste é colocado um contrapeso, tal que, em função da posição em que este é colocado, o sistema se comporte baseado na repulsão, caracterizado pela tendência da bobina levitada se aproximar das bobinas do trilho ou ainda que o sistema se comporte

baseado na atração, caracterizado pela tendência da bobina levitada se afastar das bobinas dispostas no círculo.

O funcionamento do sistema é o seguinte: se o contrapeso é colocado numa posição próxima ao vínculo, então a bobina-veículo tenderá a se apoiar sobre as bobinas do trilho. Para que se possa levitá-la, é aplicada uma corrente em seus terminais. Também são aplicadas correntes nas bobinas do trilho onde a bobina-veículo se encontra, de modo a surgir uma força de repulsão. A altura da levitação é medida pelo sensor que está vinculado à haste e a determinação de quais bobinas do trilho deverão ser ligadas é feita a partir do sinal enviado pelo sensor de posição angular, que está ligado ao vínculo central. Para que a bobina-veículo inicie seu movimento de translação, uma combinação de correntes é aplicada nas bobinas do trilho. O sistema é realimentado pelos dois sensores de posição angular, possibilitando o controle das correntes aplicadas. Um dos sensores mede o ângulo  $\gamma$ , que está relacionado com o conjunto de bobinas-trilho sobre as quais a bobina-veículo se encontra.

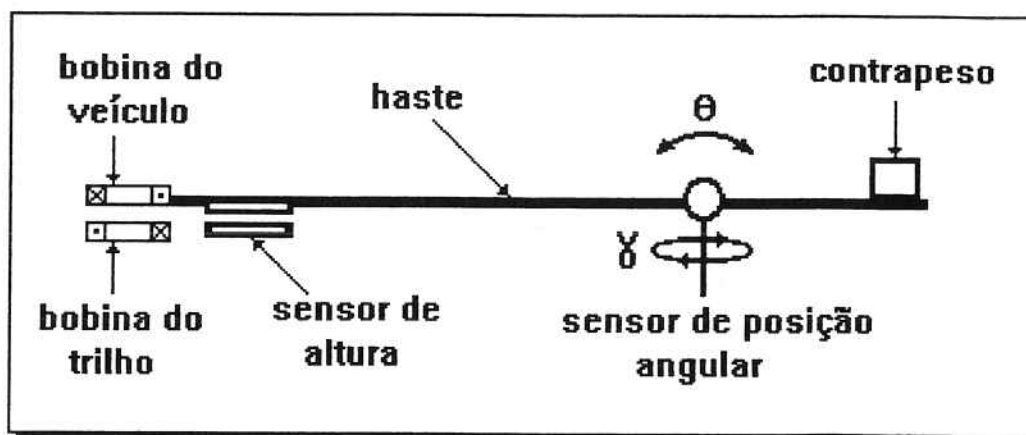


Fig. 1.1: Vista lateral do sistema

O outro sensor mede a altura de levitação relacionada com o ângulo de inclinação  $\Theta$  em que a barra se encontra. A altura é obtida através da medição da capacitância entre uma placa presa à haste onde está a bobina-veículo e uma placa metálica que se encontra sobre a mesa em que estão dispostas as bobinas-trilho.

A alteração da posição do contrapeso, colocando-o numa posição mais afastada do vínculo central, possibilita a simulação de um sistema baseado na atração, em que a bobina-veículo, sem corrente aplicada, tende a se afastar das bobinas-trilho.

As partes principais do sistema são:

a - Montagem mecânica

- a.1 - conjunto haste-contrapeso
- a.2 - sensor de altura de levitação
- a.3 - vínculos centrais da haste
- a.4 - bobina-veículo
- a.5 - bobinas-trilho

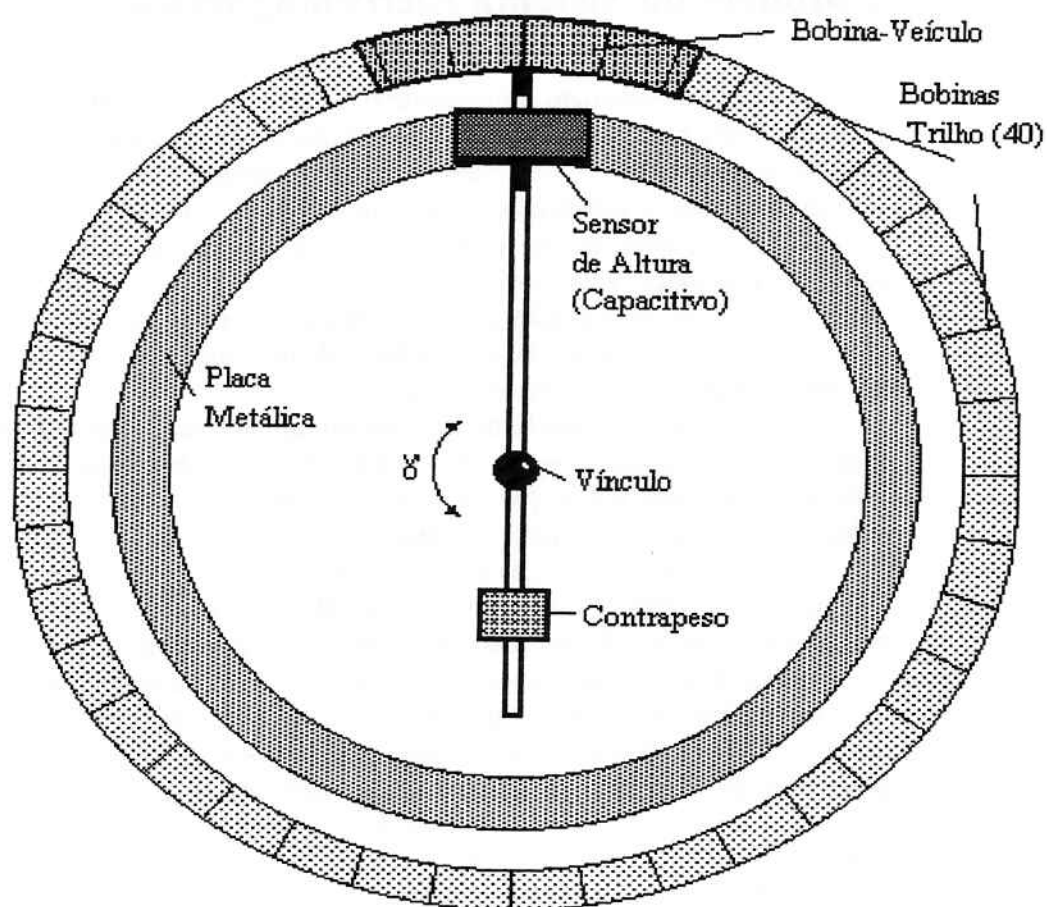


Fig. 1.2 - Vista superior do sistema.

b - Circuitos eletrônicos:

- b.1 - computador
- b.2 - placa de interface de entrada/saída
- b.3 - multiplexador e condicionador de sinal para as bobinas do trilho
- b.4 - sensor de altura de levitação
- b.5 - sensor de posição angular
- b.6 - fonte de alimentação

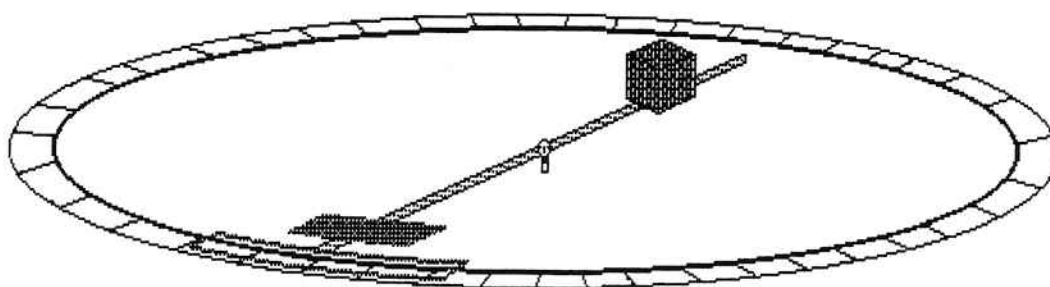


Fig. 1.3 - Vista tridimensional do sistema completo

## 2 Modelo do Sistema Eletromagnético

O objetivo deste item é apresentar o ferramental matemático utilizado no estudo da interação entre as correntes nas diversas bobinas que compõe o sistema e as forças que surgem na bobina móvel. Inicialmente os dois métodos de cálculo da força de propulsão são apresentados e comparados. Posteriormente os métodos estudados são utilizados para o dimensionamento do sistema e para avaliação de diversas particularidades da topologia escolhida para a sua construção.

A obtenção da equação que relaciona as correntes de entrada nas bobinas-trilho com a força normal (de levitação) e a força de propulsão para o sistema idealizado pode ser obtida através de dois métodos distintos:

1 - Utilizando a equação de Biot-Savart, que fornece o vetor de densidade de fluxo magnético em qualquer região do espaço sobre as bobinas do trilho e a partir deste resultado aplicando a equação da força de Lorentz para se obter a resultante sobre a bobina-veículo que está imersa no campo calculado.

2 - Utilizando a equação que relaciona as correntes em cada uma das bobinas do sistema e a variação da indutância mútua entre as bobinas do trilho e a bobina-veículo em relação ao tempo, fornecendo então uma força resultante.

Nas duas próximas seções são apresentados os resultados obtidos com a utilização dos dois métodos, sendo feita então uma comparação entre eles. Nos programas implementados utilizando esses métodos procurou-se calcular a força responsável pela propulsão do veículo. Um aspecto interessante da montagem é a existência de um acoplamento entre o sistema de propulsão e levitação, já que o campo gerado para produzir a força que fará a bobina-veículo transladar também atuará no eixo z, interferindo na sua altura de levitação.

### 2.1 - Análise através das equações de densidade de fluxo magnético.

Tomando-se uma bobina retangular de comprimento igual a  $2l$  e com largura igual a  $2b$ , com secção transversal de fios desprezível e através da qual passa uma corrente de valor  $I_0$ , pode-se calcular o vetor de densidade de fluxo magnético em qualquer ponto P através da soma das componentes devidas a cada um dos filamentos da bobina. Calcula-se o vetor  $B_1$  para o elemento de corrente localizado em  $x_1$  utilizando-se a equação de Biot-Savart. Assim:

$$B_1 = \frac{I_0 \mu_0}{4\pi} \int_{-l}^l \frac{dx_1 \wedge dr}{r^2} \quad 2.0$$

onde as distâncias são calculadas através de

$$r_1 = \sqrt{(y+b)^2 + z^2} \quad 2.1$$

e de

$$r = \sqrt{(x-x_1)^2 + r_1^2} \quad 2.2$$

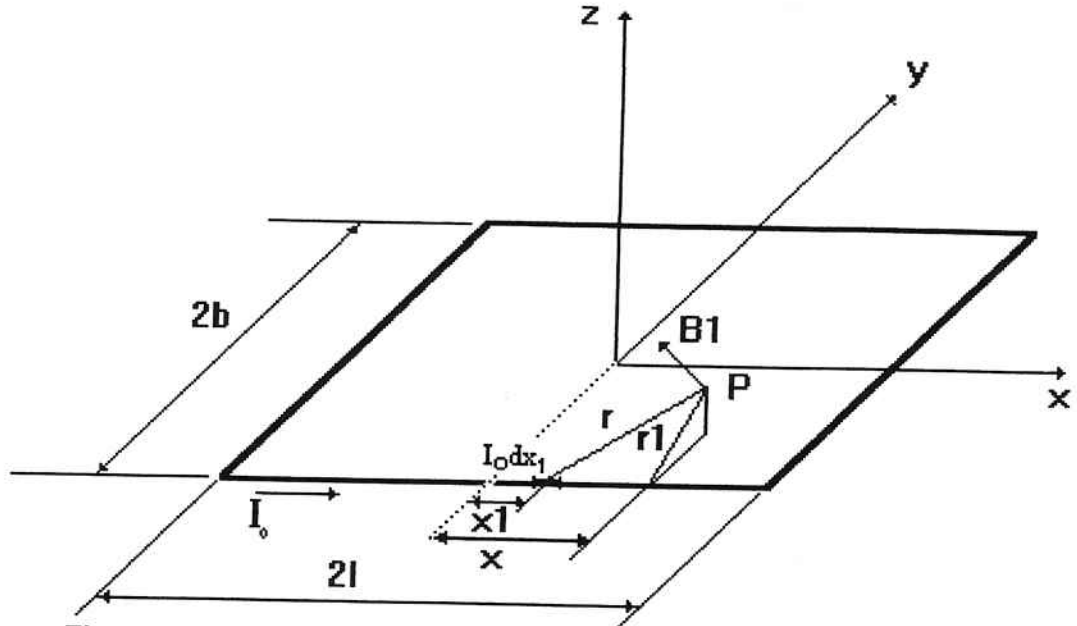


Fig.2.1 - Vista da bobina-trilho e do vetor B1

O resultado do produto vetorial será na direção  $a_1$ , que coincide com a direção de  $B_1$ , conforme se vê na Figura 2.1.

$$dx_1 \wedge dr = \frac{r_1(dx_1)a_1}{r}$$

Observando a Figura 2.1 vemos que o vetor resultante  $B_1$  fornece duas componentes nos eixos y e z, que correspondem à projeção de  $a_1$  em suas componentes  $a_y$  e  $a_z$ . Conforme apresentado na equação abaixo:

$$a_1 = \frac{z}{\sqrt{(y+b)^2 + z^2}} a_y + \frac{b+y}{\sqrt{(y+b)^2 + z^2}} a_z \quad 2.3$$

Portanto teremos :

$$B_{y1} = \left( \frac{I_0 \mu_0}{4\pi} \frac{z}{\sqrt{(y+b)^2 + z^2}} \right) \int_{-l}^l \frac{\sqrt{(y+b)^2 + z^2}}{\left( (x-x_1)^2 + (y+b)^2 + z^2 \right)^{3/2}} dx_1 \quad 2.4$$

$$B_{z1} = \left( \frac{I_0 \mu_0}{4\pi} \frac{b+y}{\sqrt{(y+b)^2 + z^2}} \right) \int_{-l}^l \frac{\sqrt{(y+b)^2 + z^2}}{\left( (x-x_1)^2 + (y+b)^2 + z^2 \right)^{3/2}} dx_1 \quad 2.5$$

Repetindo os cálculos efetuados acima para cada um dos lados do retângulo que formam a bobina, teremos o seguinte resultado para os vetores densidade de fluxo em cada um dos eixos:

$$\begin{aligned}
 \text{Eixo } z: \\
 B_z = 10^{-7} I_0 \cdot \left( \frac{y+b}{\sqrt{(y+b)^2 + z^2}} \cdot \left( \frac{x+l}{\sqrt{(x+l)^2 + (y+b)^2 + z^2}} - \frac{x-l}{\sqrt{(x-l)^2 + (y+b)^2 + z^2}} \right) + \right. \\
 \left. - \frac{y-b}{\sqrt{(y-b)^2 + z^2}} \cdot \left( \frac{x+l}{\sqrt{(x+l)^2 + (y+b)^2 + z^2}} - \frac{x-l}{\sqrt{(x-l)^2 + (y+b)^2 + z^2}} \right) + \right. \\
 \left. \frac{x+l}{\sqrt{(x+l)^2 + z^2}} \cdot \left( \frac{y+b}{\sqrt{(x+l)^2 + (y+b)^2 + z^2}} - \frac{y-b}{\sqrt{(x-l)^2 + (y-b)^2 + z^2}} \right) + \right. \\
 \left. - \frac{x-l}{\sqrt{(x-l)^2 + z^2}} \cdot \left( \frac{y+b}{\sqrt{(x+l)^2 + (y+b)^2 + z^2}} - \frac{y-b}{\sqrt{(x-l)^2 + (y-b)^2 + z^2}} \right) \right)
 \end{aligned} \quad 2.6$$

Eixo x:

$$\begin{aligned}
 B_x = 10^{-7} \cdot I_0 \cdot z \cdot \left( \frac{1}{(x-l)^2 + z^2} \cdot \left( \frac{y+b}{\sqrt{(x-l)^2 + (y+b)^2 + z^2}} - \frac{y-b}{\sqrt{(x-l)^2 + (y-b)^2 + z^2}} \right) \right. \\
 \left. - \frac{1}{(x+l)^2 + z^2} \cdot \left( \frac{y+b}{\sqrt{(x+l)^2 + (y+b)^2 + z^2}} - \frac{y-b}{\sqrt{(x+l)^2 + (y-b)^2 + z^2}} \right) \right)
 \end{aligned} \quad 2.7$$

Eixo y:

$$\begin{aligned}
 B_y = 10^{-7} \cdot I_0 \cdot z \cdot \left( \frac{1}{(y-b)^2 + z^2} \cdot \left( \frac{x+l}{\sqrt{(x+l)^2 + (y-b)^2 + z^2}} - \frac{x-l}{\sqrt{(x-l)^2 + (y-b)^2 + z^2}} \right) \right. \\
 \left. - \frac{1}{(y+b)^2 + z^2} \cdot \left( \frac{x+l}{\sqrt{(x+l)^2 + (y+b)^2 + z^2}} - \frac{x-l}{\sqrt{(x+l)^2 + (y-b)^2 + z^2}} \right) \right)
 \end{aligned} \quad 2.8$$

Na figura 2.2 pode-se ver representada a magnitude do vetor  $B_z$ , gerado por uma corrente constante numa bobina-trilho, num plano localizado na mesma altura em que a bobina-veículo deverá transladar (5 mm).

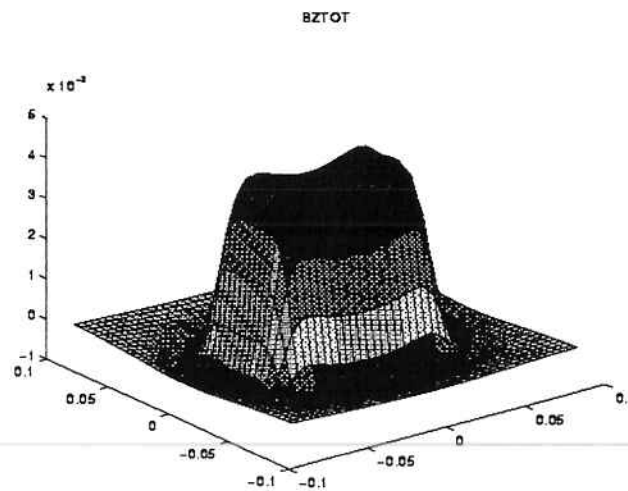


Fig.2.2 - Magnitude do vetor densidade de fluxo sobre a bobina-trilho

Através dos cálculos realizados para obtenção das componentes do vetor  $B$  em qualquer região do espaço sobre a bobina-trilho, pode-se estimar a força que age sobre a bobina-veículo, quando nesta é aplicada uma corrente  $I$ . Este cálculo foi feito decompondo o vetor  $B$  em três componentes:  $B_x$ , componente que está na direção do movimento da bobina-veículo,  $B_y$ , componente perpendicular a  $B_x$  e que está no plano formado pela bobina-veículo e  $B_z$ , componente perpendicular a este plano.

Foi elaborado um programa que executa estes cálculos levando em conta apenas a componente  $B_z$ , que é a única responsável pela força de propulsão. O cálculo foi feito dividindo-se em pequenos pedaços o lado da bobina sobre o qual se deseja estimar a força e para cada um deles foi aplicada a equação da força de Lorentz. A força resultante foi obtida através da somatória de todas essas componentes.

A Figura 2.3 mostra cada componente do vetor densidade de fluxo na região onde se encontra a bobina-veículo. Pode-se notar que para cada lado da bobina-veículo apenas algumas componentes do vetor densidade de fluxo são importantes. A componente  $B_z$  que atua sobre os lados paralelos ao eixo  $y$  será a responsável para propulsão no sentido indicado por  $V$ . Nestes mesmos lados as componentes  $B_x$  serão responsáveis pela força de levitação. Nos lados da bobina-veículo paralelos ao eixo  $x$  apenas a componente  $B_y$  atua, sendo responsável apenas pela força de levitação.

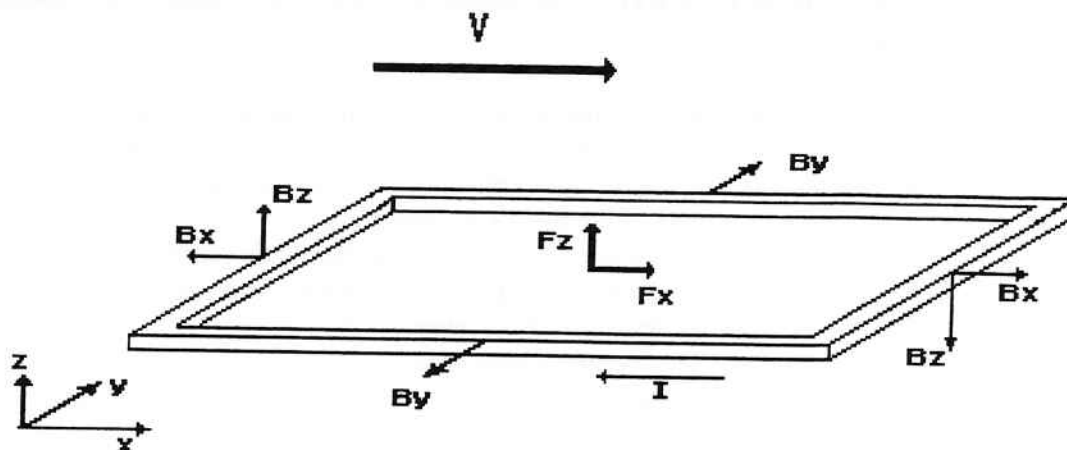


Figura 2.3 - Componentes do vetor  $B$  nos quatro lados da bobina-veículo

Na Figura 2.4 é apresentado o gráfico gerado por um programa escrito em linguagem Matlab. O cálculo foi feito de modo a se obter a força de propulsão que surgiria num fio com corrente constante ( $I=0.5A$ ) colocado nas posições indicadas pelo eixo horizontal do gráfico sobre uma bobina-trilho, numa dada altura de levitação fixada ( $z=14mm$ ), com uma corrente constante aplicada na bobina-trilho ( $I=0.5A$ ). Estes valores foram escolhidos tendo em vista o processo iterativo que foi utilizado no dimensionamento dos parâmetros do sistema. Os traços existentes entre os pontos  $-0,03$  e  $0,03$  correspondem às posições que indicam o começo e o fim da bobina-trilho (o comprimento desta é de  $6\text{ cm}$ ). Percebe-se que enquanto o fio se encontra na região compreendida sobre a bobina-trilho, a força de levitação é positiva. Nas regiões anterior e posterior à bobina-trilho o sentido da força se inverte, porém é menor em magnitude que a força de propulsão positiva.

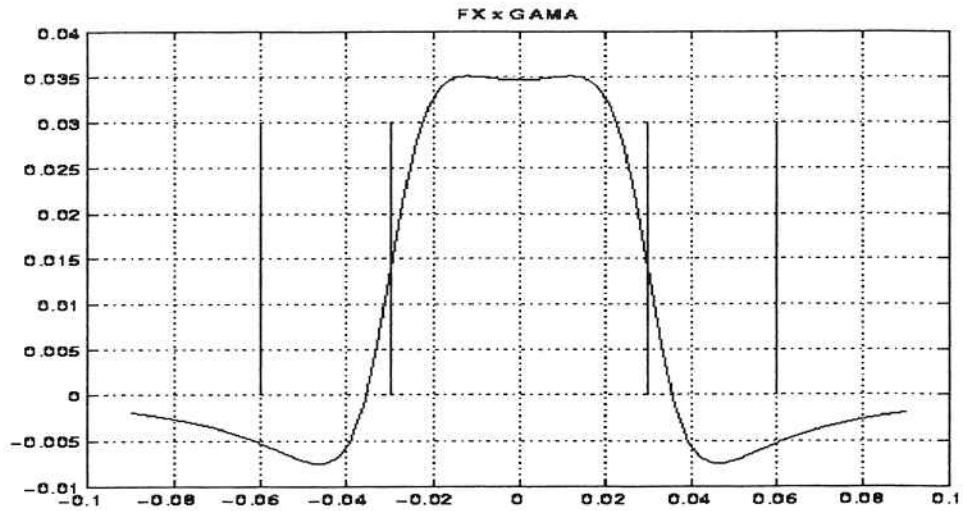


Fig. 2.4 - Força de propulsão calculada pelo método da densidade de fluxo.

## 2.2 - Análise através das equações das derivadas das mútuas indutâncias.

Uma outra possibilidade de obtenção das forças que atuam na bobina-veículo é através do cálculo da variação das indutâncias mútuas entre a bobina-veículo e as bobinas-trilho. Este método foi aplicado utilizando-se os mesmos parâmetros do método anterior e os resultados obtidos foram idênticos.

Como a indutância mútua entre fios perpendiculares é nula (vide GROVER<sup>6</sup>), então, para que se possa calcular a mútua entre a bobina-veículo e as bobinas-trilho foram consideradas apenas as duas relações abaixo:

a) Cálculo da indutância mútua entre dois fios de comprimentos distintos, m e n, colocados sobre eixos paralelos onde os parâmetros d e  $\delta$  definem a distância (vide Figura 2.5).

$$M_1 = 0001 \cdot \left[ \alpha \cdot \operatorname{asinh} \frac{\alpha}{d} - \beta \cdot \operatorname{asinh} \frac{\beta}{d} - \Gamma \cdot \operatorname{asinh} \frac{\Gamma}{d} + \delta \cdot \operatorname{asinh} \frac{\delta}{d} \right] \quad 2.9$$

$$M_2 = \sqrt{\alpha^2 + d^2} + \sqrt{\beta^2 + d^2} - \sqrt{\Gamma^2 + d^2} - \sqrt{\delta^2 + d^2} \quad 2.10$$

$$M_{tot} = M_1 + M_2 \quad 2.11$$

Sendo:

$$\alpha = n + m + \delta \quad 2.12$$

$$\beta = m + \delta \quad 2.13$$

$$\Gamma = n + \delta \quad 2.14$$

b) Cálculo da indutância mútua entre dois fios paralelos de mesmo tamanho l colocados a uma distância d. Este é um caso particular do anterior.

$$M_3 = 0,002 \cdot l \cdot \left[ \ln \left( \frac{l}{d} + \sqrt{1 + \frac{l^2}{d^2}} \right) - \sqrt{1 + \frac{d^2}{l^2}} + \frac{d}{l} \right] \quad 2.15$$

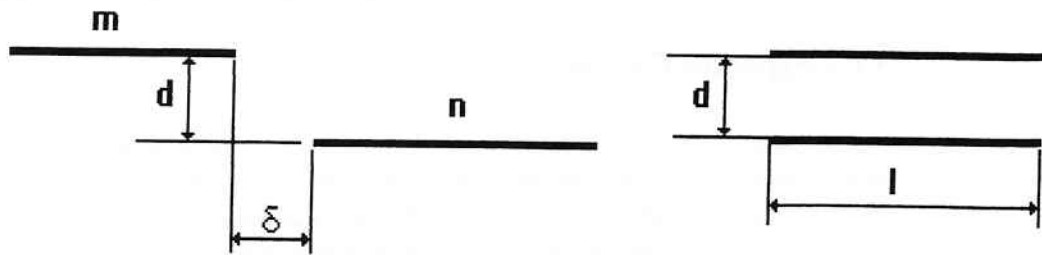


Figura 2.5 - Tipos de configurações em que se deve calcular mútuas indutâncias.

Os cálculos acima foram efetuados levando-se em conta apenas uma bobina-trilho e a bobina-veículo para que o resultado obtido pudesse ser comparado com o método anterior.

O cálculo foi realizado supondo-se uma bobina-veículo se deslocando ao longo do eixo  $x$  sobre a bobina-trilho numa altura de levitação fixada. A força de propulsão foi estimada a partir da variação da mútua indutância entre as bobinas para cada intervalo do movimento. O gráfico obtido encontra-se na Figura 2.6.

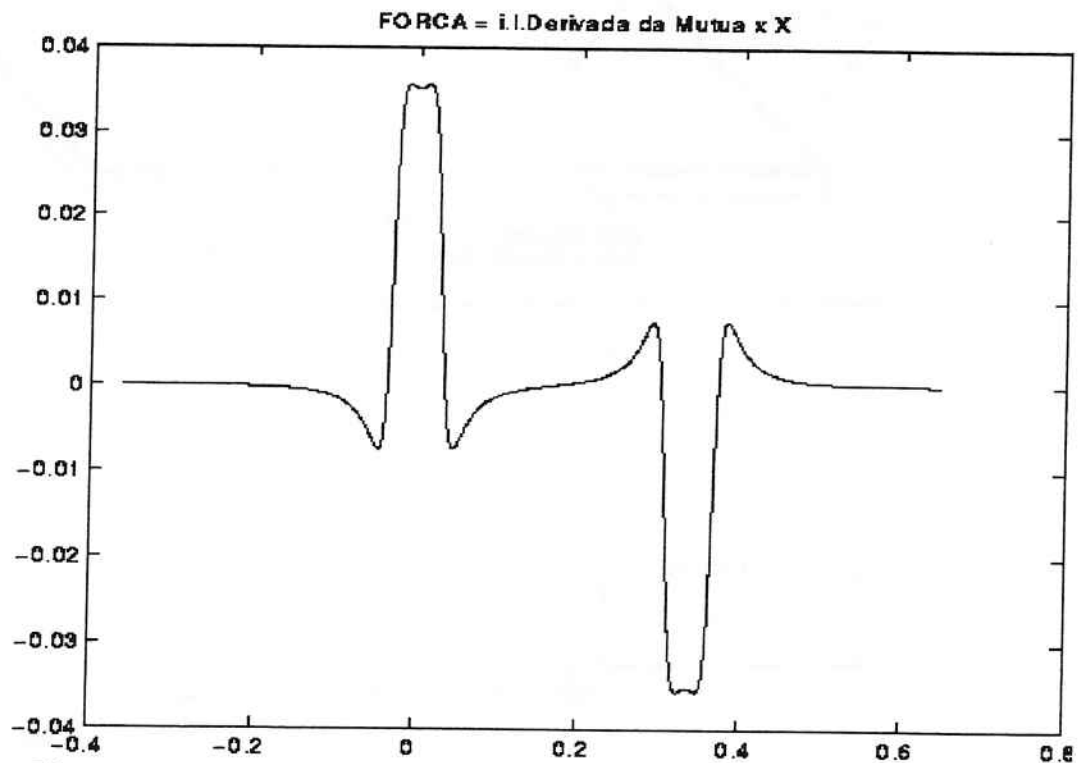


Fig 2.6 - Força de propulsão calculada pelo método das mútuas indutâncias

Para comparar os resultados dos dois métodos, deve-se considerar apenas a região próxima da origem do eixo  $x$ , pois corresponde à força de propulsão que surge quando a parte da frente da bobina-veículo começa a passar sobre a bobina-trilho. Neste caso o sentido da corrente corresponde àquele adotado no método anterior e assim a força tem módulo igual ao anteriormente obtido. Assim pode-se observar que a força de propulsão máxima terá um valor igual a 0,035 Newtons, sendo um resultado igual ao obtido no método anterior.

### 3 Sensores de Altura de Levitação e de Posição

#### 3.1 - Aspectos Gerais

A configuração do projeto idealizado exige um sensoreamento da altura de levitação que atenda uma série de requisitos específicos. Após a realização das simulações descritas no item anterior foram fixados alguns parâmetros do sistema que interferem diretamente no projeto deste sensor, sendo estes: altura de levitação igual a 5 mm e peso do sensor vinculado à haste desprezível.

Tendo em vista os pré-requisitos acima relacionados, foi idealizado um sensor baseado na variação da capacitância entre uma placa de metal presa à haste móvel e a superfície onde está montado o conjunto de bobinas-trilho.

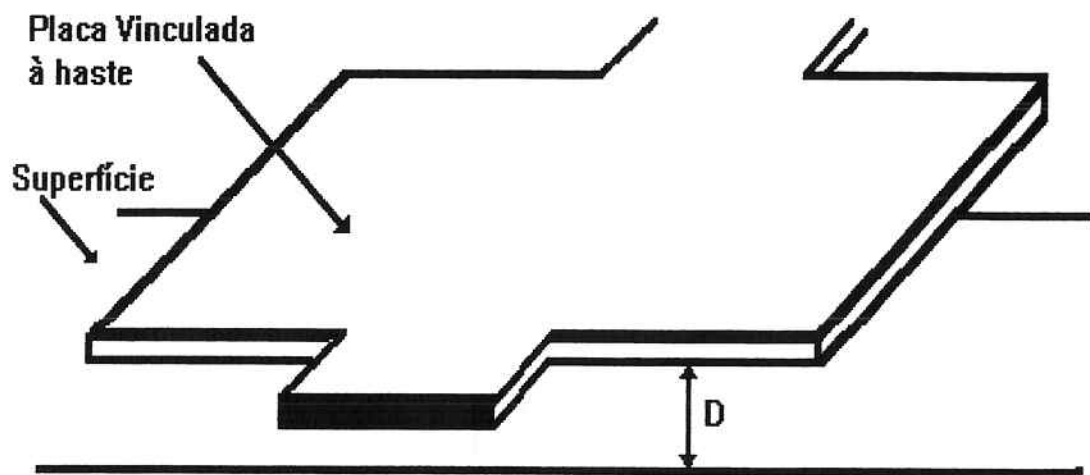


Fig. 3.1 - Sensor de altura de levitação

O sensor capacitivo está ligado a um circuito que traduz a altura de levitação, e conseqüentemente a capacitância, numa tensão. O diagrama de blocos do sistema está representado na Figura 3.2.

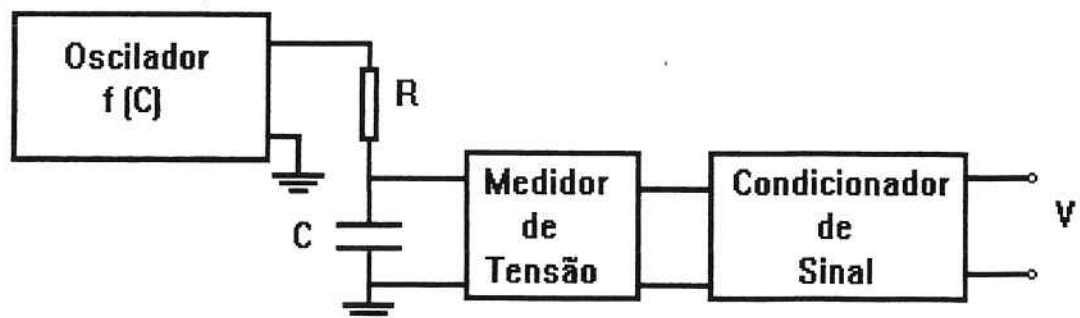


Fig. 3.2 - Representação esquemática do circuito sensor de altura

#### 3.2 - Divisor de tensão e filtro

A tensão gerada pelo oscilador é aplicada a um circuito divisor de carga para que indiretamente possa ser medida a distância entre as placas do sensor de altura de levitação. A equação que relaciona os termos que dependem da altura de levitação dada

por  $d$ , a área das placas  $A$ , a constante dielétrica  $K$  e os termos  $R$  (resistência série) e  $2\pi f$  é:

$$\frac{V_s}{V_i} = \frac{\sqrt{\left(\frac{d}{KA}\right)^4 + \left(\frac{2\pi f R d}{KA}\right)^2}}{\left(\frac{d}{KA}\right)^2 + (2\pi f R)^2} \quad 3.1$$

Analisando a equação acima pode-se perceber que se o produto da frequência do sinal aplicado pelo valor do resistor  $R$  for muito maior que a razão entre a altura da levitação e o produto da área do capacitor pela constante  $K$ , então tanto o primeiro termo do polinômio do denominador como o primeiro termo do polinômio do numerador podem ser desprezados. Assim a equação se reduz a:

$$\frac{V_s}{V_i} = \frac{d}{2\pi f R K A} \quad 3.2$$

Como todos os termos que se encontram no denominador da equação acima são constantes verifica-se que a tensão no capacitor formado pelas placas paralelas será proporcional à distância, caracterizando-se assim a linearidade do circuito. Na Figura 3.3 é mostrada a relação entre o ganho do divisor de carga e a altura de levitação. No gráfico gerado a partir do programa escrito em Matlab não foram feitas as aproximações discutidas.

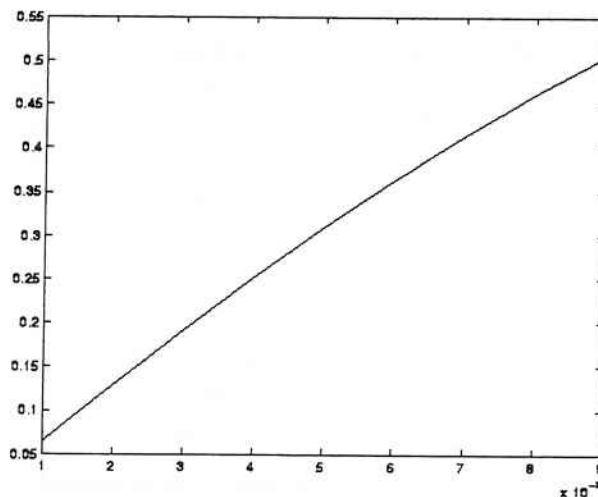


Fig. 3.3 - Ganho do divisor de carga em função da altura de levitação

No gráfico abaixo é mostrada a variação da tensão disponível no capacitor do filtro (C2), supondo uma tensão inicial nula, quando o capacitor-sensor estiver a uma altura de levitação igual a 5 mm ( $C = 35,4$  pF). Pode-se notar que a tensão oscila em torno de 2,25V.

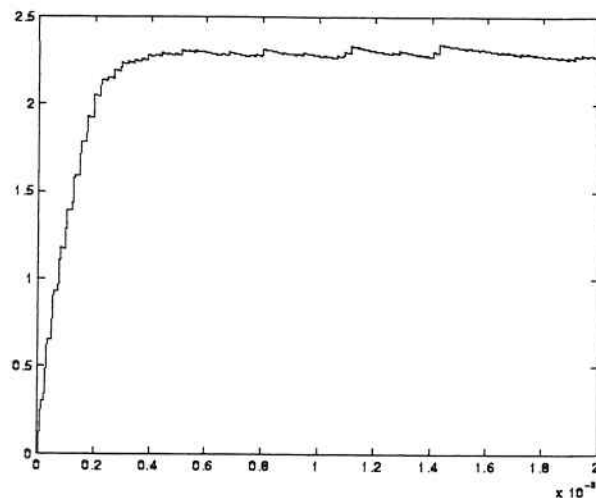


Fig. 3.4 - Tensão no capacitor do filtro

### 3.3 - Sensor de posição angular

A medição da posição em que se encontra a bobina-veículo sobre as bobinas-trilho determinará qual conjunto destas últimas estará recebendo um sinal de excitação para controle da propulsão e da levitação. Em função do tipo de placa de interfaceamento do microcomputador com o sistema e dos resultados apresentados no item 2, foi escolhido um conjunto de apenas 8 bobinas de cada vez para serem excitadas durante a movimentação do veículo. Quando a distância entre uma bobina-trilho e a bobina-veículo se torna grande, deixa de haver influência na dinâmica do movimento para qualquer valor de corrente que for aplicado na bobina do trilho.

A determinação da posição angular pode ser feita diretamente através do uso de um potenciômetro de precisão acoplado à haste onde está a bobina-veículo. O sinal de tensão gerado pelo potenciômetro pode ser diretamente lido pela placa de aquisição do sistema.

Através do vínculo central da haste deverá passar apenas o fio que liga a placa do capacitor sensor de altura ao circuito medidor. A alimentação da bobina-veículo será fornecida por um conjunto de pilhas que também farão o papel de contrapeso do sistema.

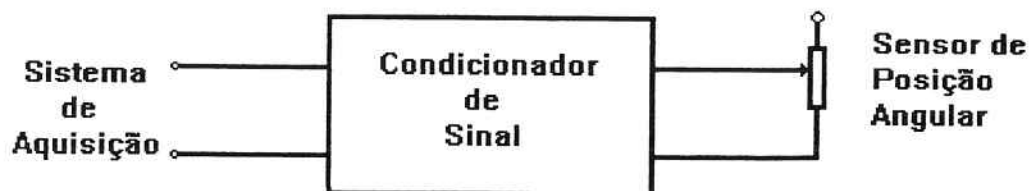


Fig.3.5 - Sensor de posição angular

## 4 Sistema Eletrônico de Controle

### 4.1 - Aspectos Gerais

O sistema de levitação foi dimensionado para ser controlado por um microcomputador onde está ligada uma placa de entrada e saída que faz o condicionamento dos sinais que são aplicados nas bobinas-trilho e dos que são lidos dos sensores de altura de levitação e de posição angular. A placa que será conectada no computador tem as seguintes características:

- Dez saídas digitais TTL
- Quatro saídas analógicas com 12 bits de resolução (-5V a 5V)
- Duas entradas analógicas

### 4.2 - Descrição do sistema

Como o sistema possui quarenta bobinas-trilho onde são aplicadas as correntes de controle de altura de levitação e de força de propulsão, o sistema eletrônico deverá ter uma capacidade de multiplexação de correntes, de modo a utilizar as quatro saídas analógicas. A multiplexação é feita através das saídas digitais que ativam um circuito amostrador retentor que registra as tensões disponíveis. De acordo com as características acima descritas, cada sinal digital será responsável por quatro bobinas-trilho, quando for necessário atualizar as correntes num determinado conjunto de quatro bobinas o correspondente sinal digital é ativado. Como apenas um conjunto de oito bobinas-trilho terá suas correntes controladas durante a movimentação da bobina-veículo, a velocidade de conversão não é um fator crítico do sistema.

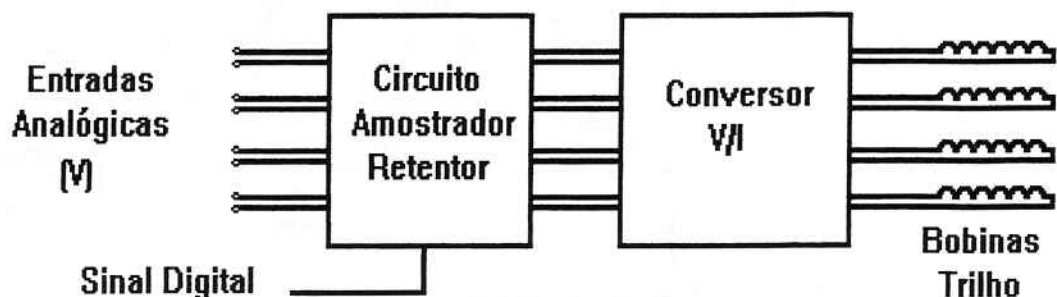


Fig. 4.1 - Condicionamento de sinal de saída de um módulo de quatro bobinas

Os sinais gerados pelas saídas analógicas da placa são tensões dentro de uma faixa de -5 V a 5 V. Após terem sido registradas pelo circuito amostrador retentor passam por um circuito codificador V/I, que gera uma corrente proporcional à tensão registrada. Esta conversão é necessária pois o valor da corrente é que determina diretamente o valor do vetor densidade de fluxo que se encontra na região onde está a bobina-veículo (Figura 4.1).

As duas entradas analógicas da placa de entrada e saída são utilizadas para a leitura dos sinais gerados pelos sensores de altura de levitação e de posição angular. O sistema eletrônico completo se encontra na Figura 4.2.

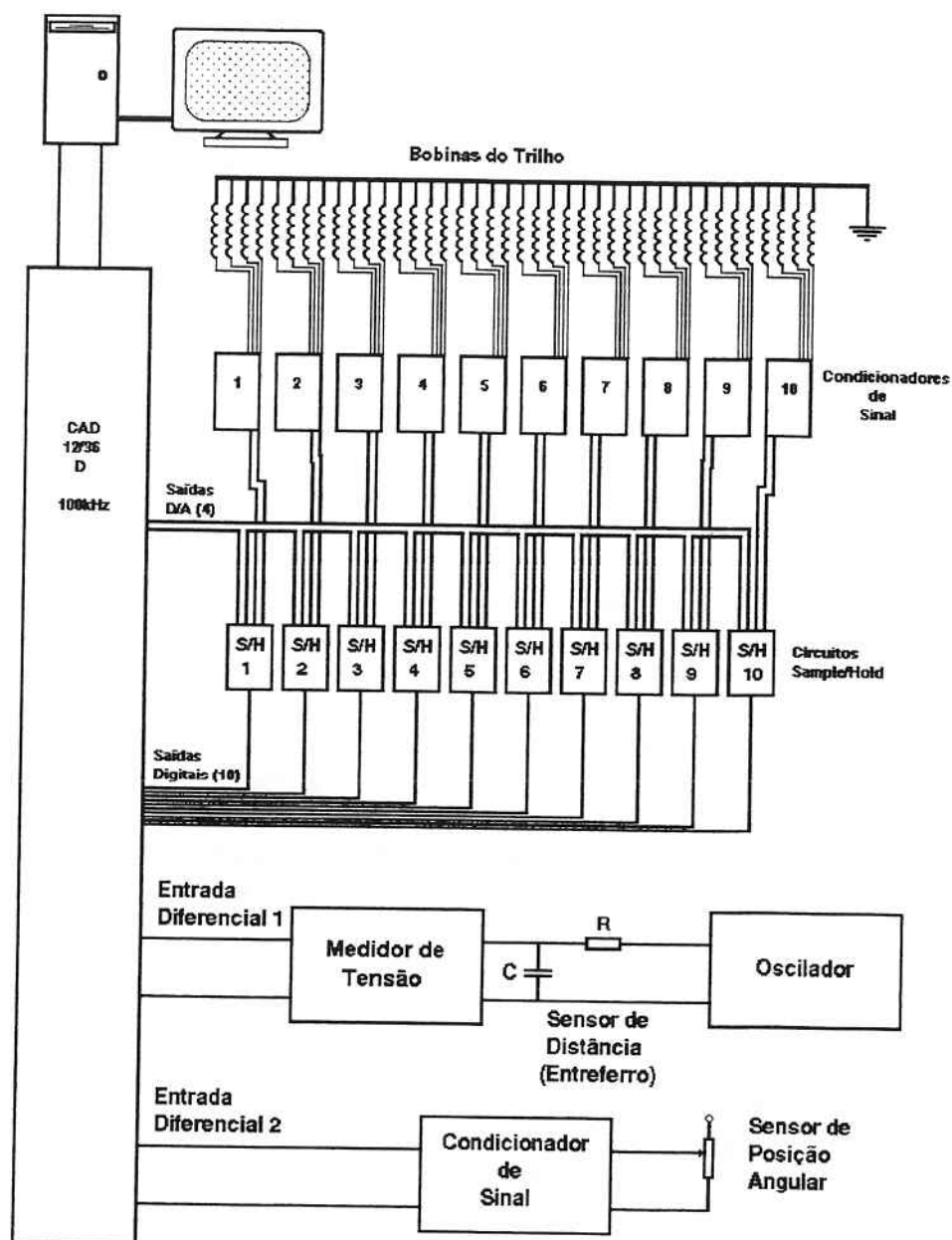


Fig. 4.2 - Sistema eletrônico completo

## 5 Equações da Dinâmica da Planta

### 5.1 - Equacionamento

Após a obtenção das forças de propulsão e levitação, procurou-se encontrar as equações que relacionam as correntes de entrada nas bobinas do trilho com a posição angular da bobina-veículo e sua altura de levitação. Sabendo que as forças envolvidas estão diretamente relacionadas com a derivada da indutância mútua existente entre a bobina-veículo e as bobinas-trilho com relação à posição entre elas, e que estes valores foram calculados no método das mútuas indutâncias apresentado no segundo item, foram

obtidas as duas equações que relacionam as correntes em oito bobinas-trilho com as forças de levitação ( $F_z$ ) e de aceleração de translação. As equações da dinâmica do sistema físico foram montadas através da aplicação da equação de Lagrange. Os seguintes símbolos são usados para descrever os componentes do sistema:

$2L$  = comprimento da haste onde estão apoiados a bobina-veículo e o contrapeso, sendo que a distância entre o vínculo central e a bobina-veículo é igual a  $L$  (o valor de  $L$  é 0,47 m).

$m_1$  = massa da bobina-veículo

$m_2$  = massa do contrapeso

$m_3$  = massa da haste onde estão apoiados a bobina-veículo e o contrapeso.

**pos** = coeficiente que multiplica  $L$  e determina a posição onde está localizado o contrapeso. Este coeficiente tem um valor aproximadamente igual a 1. Se **pos** for igual a 0,9 o sistema de levitação se comporta como do tipo baseado na repulsão e se **pos** for igual a 1,1 o sistema de levitação se comporta como do tipo baseado na atração.

$K_1$  = coeficiente de atrito viscoso existente no mancal que permite o movimento segundo o ângulo  $\Theta$ . O rolamento gera um momento de valor proporcional à velocidade angular  $\dot{\Theta}$ . O valor desta constante obtido junto ao seu fabricante é igual a 0,013.

$K_2$  = coeficiente de atrito viscoso existente no mancal que permite o movimento segundo o ângulo  $\gamma$ . O rolamento gera um momento de valor proporcional à velocidade angular  $\dot{\gamma}$ .

$\Theta$  = ângulo que define a altura de levitação ( $\Theta \cong 0$ )

$\gamma$  = ângulo que indica sobre quais bobinas-trilho se encontra a bobina-veículo.

Aplicando a equação de Lagrange para a coordenada  $\Theta$ , temos:

$$\begin{aligned} m_1 L^2 \ddot{\Theta} + m_2 (\text{pos} L)^2 \ddot{\Theta} + \frac{2L^2 m_3}{3} \ddot{\Theta} + \\ \left( \frac{m_1}{2} (\dot{\gamma}^2 L^2 \sin 2\Theta) + \frac{m_2}{2} (\dot{\gamma}^2 (\text{pos} L)^2 \sin 2\Theta) \right) - \\ - g m_1 L \cos \Theta + g m_2 (\text{pos} L) \cos \Theta + K_1 \dot{\Theta} = -F_z L \end{aligned} \quad 5.1$$

Aplicando a equação de Lagrange para a coordenada generalizada  $\gamma$  obtem-se outra equação diferencial do sistema.

$$\begin{aligned} (m_1 L^2 \cos^2 \Theta + m_2 (\text{pos} L)^2 \cos^2 \Theta) \ddot{\gamma} - \\ - (m_1 L^2 \sin 2\Theta + m_2 (\text{pos} L)^2 \sin 2\Theta) \dot{\Theta} \dot{\gamma} + \\ + K_2 \dot{\gamma} + \frac{2L^2 m_3}{3} \ddot{\gamma} = F_x L \end{aligned} \quad 5.2$$

Através das duas equações diferenciais de segunda ordem obtidas podemos escrever quatro equações utilizando as seguintes variáveis de estado:

$$x_1 = \gamma \quad 5.3$$

$$x_2 = \dot{\gamma} \quad 5.4$$

$$x_3 = \Theta \quad 5.5$$

$$x_4 = \dot{\Theta} \quad 5.6$$

O conjunto de equações obtido foi:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad 5.7$$

$$\left( m_1 L^2 \cos^2 x_3 + m_2 (\text{pos}L)^2 \cos^2 x_3 + \frac{2L^2 m_3}{3} \right) \dot{x}_2 = \quad 5.8$$

$$(m_1 L^2 \sin 2x_3 + m_2 (\text{pos}L)^2 \sin 2x_3) x_2 x_4 + F_x L - K_2 x_2$$

$$\dot{x}_3 = x_4 \quad 5.9$$

$$\begin{aligned} & \left( m_1 L^2 + m_2 (\text{pos}L)^2 + \frac{2L^2}{3} m_3 \right) \dot{x}_4 = \\ & -F_z x_4 - K_1 x_4 + g m_1 L \cos x_3 - g m_2 \text{pos}L \cos x_3 - \\ & - \left( \frac{(m_1 x_2^2 L^2 \sin 2x_3 + m_2 x_2^2 (\text{pos}L)^2 \sin 2x_3)}{2} \right) \end{aligned} \quad 5.10$$

## 5.2 - Simulação do Sistema Completo

As equações obtidas foram introduzidas em um programa escrito em linguagem Matlab para que simulações do sistema pudessem ser feitas, estudando o seu comportamento para diversas condições iniciais. O método numérico para solução das equações diferenciais obtidas foi Runge-Kutta, considerando termos de quarta e quinta ordem.

Uma simulação efetuada impõe como condições iniciais a posição do contrapeso igual a 0,98L, indicando que o sistema funcionará baseado na repulsão, e fixa as forças externas  $F_x$  e  $F_z$  iguais a 0,03 N e 0,076 N, respectivamente.

A bobina-veículo parte do repouso sendo que as condições iniciais foram:

$$x_1 = 0, x_2 = 0, x_3 = 0 \text{ e } x_4 = 0.$$

Os valores fixados para as forças de levitação e de translação são da ordem daqueles calculados através dos métodos apresentados no item 2.

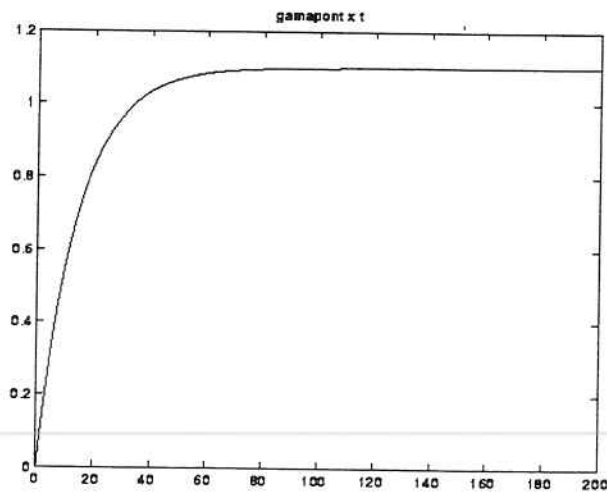


Fig. 5.1 - Velocidade angular na coordenada  $\gamma$

No gráfico acima pode-se verificar que a bobina-veículo entra em movimento uniforme com velocidade angular constante e aproximadamente igual a 1,1 rad/s, que corresponde a um deslocamento de aproximadamente 50 cm/s.

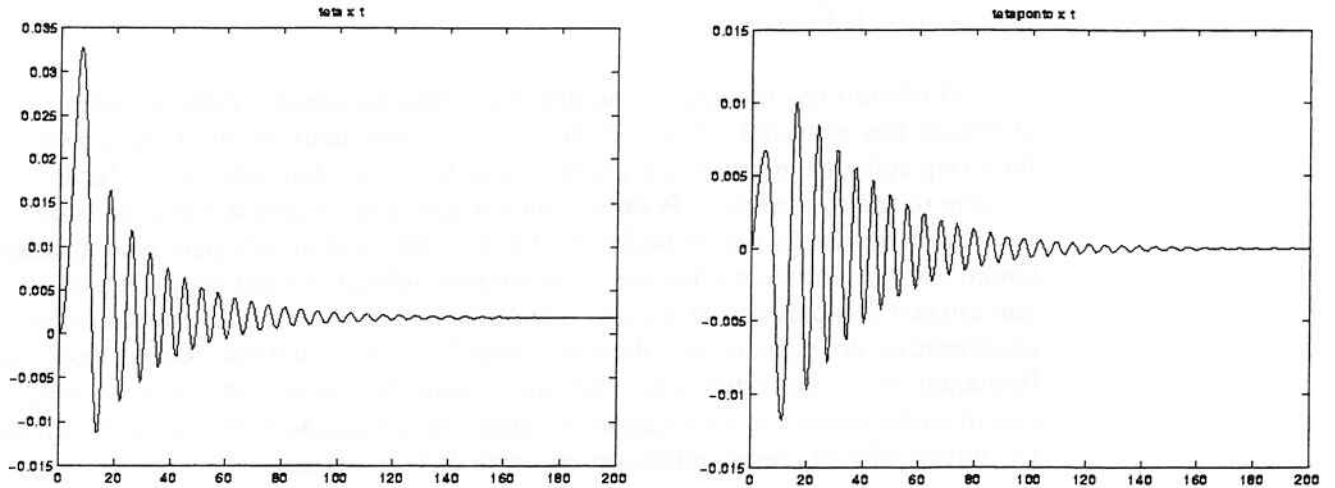


Fig. 5.2 - Posição e velocidade angular na coordenada  $\Theta$  com relação ao tempo

No gráfico a esquerda da Figura 5.2 verifica-se que o ângulo  $\Theta$  tem uma grande variação nos instantes iniciais, logo após a bobina-veículo ser colocada em movimento. A medida que a força  $F_x$  acelera o corpo na coordenada  $\gamma$ , a amplitude de variação da coordenada  $\Theta$  diminui. Após 200 segundos a amplitude da oscilação de  $\Theta$  se reduziu a um valor desprezível e  $\Theta$  tende a zero. O valor de regime do ângulo  $\Theta$  corresponde a 0,0019 radianos ou 0,9 mm. Assim pode-se ver que para os valores fixados de  $F_x$  e de  $F_z$  a bobina móvel atinge uma altura de levitação compatível com aquela fixada no item 2.

### 5.3 - Equações das Forças Eletromagnéticas

Na simulação descrita no item anterior as forças  $F_x$  e  $F_z$  foram fixadas diretamente, sem que fosse especificada a combinação de correntes que devem ser aplicadas nas bobinas-trilho para obtê-las. Em He et al.<sup>8</sup> foi utilizada a Teoria de Circuitos Dinâmicos para mostrar essa relação para uma topologia similar à estudada neste trabalho. Conforme verificado no item 2 as forças dependem diretamente das correntes aplicadas em todas as bobinas do sistema e da variação das indutâncias mútuas existentes entre as bobinas-trilho e a bobina-veículo. As equações que descrevem essa dinâmica são descritas abaixo:

$$F_x = i_1 \cdot G_{x1} \cdot I + i_2 \cdot G_{x2} \cdot I + i_3 \cdot G_{x3} \cdot I + i_4 \cdot G_{x4} \cdot I + i_5 \cdot G_{x5} \cdot I + i_6 \cdot G_{x6} \cdot I + i_7 \cdot G_{x7} \cdot I + i_8 \cdot G_{x8} \cdot I \quad 5.11$$

$$F_z = i_1 \cdot G_{z1} \cdot I + i_2 \cdot G_{z2} \cdot I + i_3 \cdot G_{z3} \cdot I + i_4 \cdot G_{z4} \cdot I + i_5 \cdot G_{z5} \cdot I + i_6 \cdot G_{z6} \cdot I + i_7 \cdot G_{z7} \cdot I + i_8 \cdot G_{z8} \cdot I \quad 5.12$$

Na equação 5.11 os valores de  $G_{x1}$  à  $G_{x8}$  correspondem à derivada da indutância mútua existente entre a bobina-veículo e as bobinas-trilho com relação a posição  $\gamma$  (relacionada com o movimento de translação da bobina-veículo) para cada uma das oito bobinas-trilho utilizadas na propulsão, e na equação 5.12 os valores de  $G_{z1}$  à  $G_{z8}$

correspondem à derivada da indutância mútua existente entre a bobina-veículo e as bobinas-trilho com relação a posição  $\Theta$  (relacionada com a altura de levitação da bobina-veículo) para cada uma das oito bobinas-trilho utilizadas na levitação. Em termos de matrizes, temos:

$$F_{2 \times 1} = I \cdot G_{2 \times 8} \cdot \dot{i}_{8 \times 1}. \quad 5.13$$

O cálculo das indutâncias mútuas existentes no sistema pode ser feito através da utilização das equações 2.9 a 2.15 do item 2. O resultado obtido através deste cálculo leva a equações de grande complexidade, que devem ser derivadas com relação à posição  $x$  e com relação à posição  $z$ . Pode-se concluir que se faz necessária alguma simplificação para que a utilização das equações 5.11 e 5.12 seja viabilizada para uma aplicação em tempo real no controle do sistema. Uma possível solução é a utilização de uma tabela em que estejam disponíveis todas as derivadas das indutâncias mútuas com relação às duas coordenadas do sistema em diversas posições que a bobina-veículo pode ocupar, formando assim um reticulado. Obtidas as equações acima, iniciou-se o processo de descrição do sistema de levitação no programa de simulação SIMULINK. O modelo que foi introduzido está representado no esquema da figura abaixo.

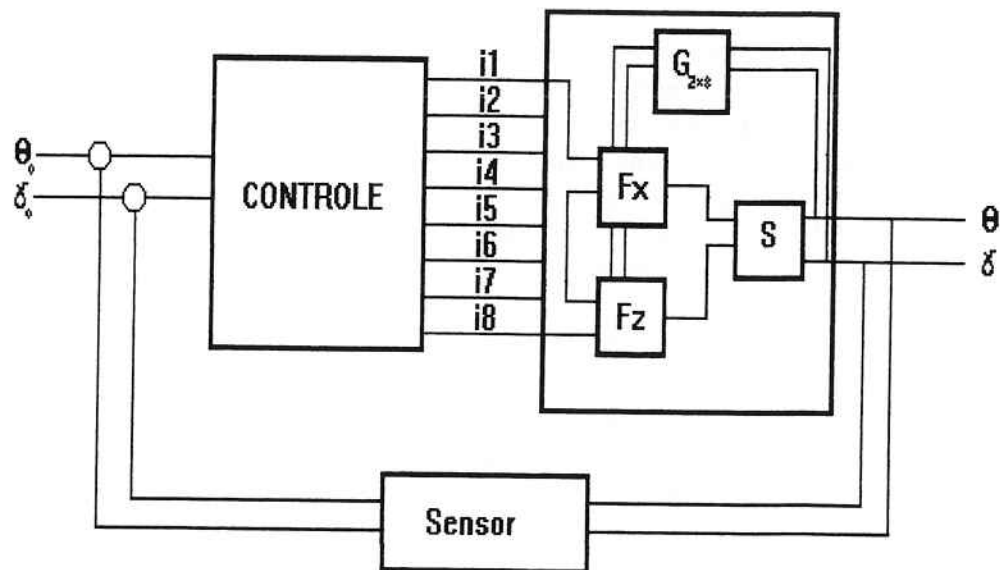


Fig 5.3 - Sistema de Controle

## 6 Considerações Finais

### 6.1 - Avaliação do Projeto

O projeto concebido é resultado da tentativa de obtenção de um sistema físico em que as variáveis de entrada fossem correntes elétricas responsáveis pela geração de forças eletromagnéticas que atuariam num corpo de maneira a permitir a execução de movimentos com mais do que um grau de liberdade.

Entre as características interessantes acrescentadas ao sistema final estão: a possibilidade de estudar o controle da suspensão linear baseada na repulsão ou na

atração, o acoplamento existente entre o sistema de propulsão e o sistema de levitação e a existência de múltiplas entradas e saídas no sistema.

Durante o projeto da estrutura física do sistema, uma série de variáveis tiveram que ser ponderadas a fim de que pudessem ser obtidas forças de propulsão e de levitação suficientes para a movimentação e controle do sistema. Nesta fase foram importantes os dois métodos utilizados e implementados em programas escritos em linguagem Matlab. Através de cada um deles foi possível uma visualização melhor do funcionamento do sistema e conseqüentemente de seu dimensionamento.

O sensor de altura de levitação foi projetado procurando atender às exigências do sistema. Era necessário que fosse leve o suficiente para não interferir na dinâmica, suficientemente preciso dentro da faixa de medidas onde atuaria e, se possível, linear. Muitas técnicas de medida passaram por análise, mas, ao final, o sensor capacitivo foi o escolhido. Inicialmente o projeto foi feito utilizando o sensor capacitivo para a geração de um sinal senoidal de frequência dependente da altura de levitação, posteriormente este sinal seria aplicado a um filtro de segunda ordem para garantir uma relação linear entre a amplitude do sinal de tensão na saída e a altura de levitação. Este processo chegou a ser simulado e implementado, mas acabou sendo abandonado devido a dificuldade na separação do ruído do sistema e do sinal gerado pelo sensor. Uma nova tentativa foi feita procurando utilizar o sensor capacitivo como um divisor de carga, trabalhando em apenas uma frequência. Este circuito acabou sendo adotado para o projeto final, conforme encontra-se descrito no item 3.

Os circuitos responsáveis pela geração das correntes nas bobinas-trilho a partir do sinal gerado pela placa de interfaceamento existente no computador foram projetados de modo a permitir a geração de correntes que estivessem de acordo com o projeto realizado no item 2. Levando-se em conta que existem quarenta bobinas-trilho e que a corrente em cada uma delas deve ser controlada individualmente, foi feito o projeto de um circuito multiplexador baseado nas saídas digitais disponíveis. Conforme descrito no item 4, foi projetado um circuito que dispõe de um módulo de amostragem e retenção, e de um módulo de condicionamento das correntes de controle. O circuito foi simulado e montado, apresentando os resultados que foram exigidos pela especificação do projeto feita no item 2.

Quanto ao condicionador de sinal das bobinas, o projeto atende os requisitos impostos na sua especificação, ainda que, melhoramentos possam ser implementados através da adoção de um circuito que mantenha uma relação mais linear entre a tensão de controle aplicada e a corrente obtida nas bobinas-trilho.

O equacionamento da dinâmica do sistema foi feito procurando avaliar a performance que seria obtida para as condições impostas no dimensionamento do projeto. Após a obtenção das equações foram simuladas diversas condições de funcionamento. Os resultados obtidos foram utilizados como base para constatar que as forças eletromagnéticas geradas pela interação das bobinas-trilho com a bobina-veículo são de dimensão suficiente para possibilitar o controle da levitação e da propulsão.

No trabalho apresentado neste artigo foram analisados aspectos relacionados com o dimensionamento físico da estrutura proposta, a elaboração e o estudo das equações que descrevem a dinâmica do sistema físico e os projetos eletrônicos necessários para o controle dos sistemas de translação e levitação. A continuação deste trabalho, que deverá ter prosseguimento no doutoramento, consiste na montagem dos circuitos projetados e na elaboração e implementação das técnicas de controle do sistema.

## Bibliografia

- [1] BITTAR, A. **Levitação magnética de uma barra flexível**. Dissertação (Mestrado), EPUSP, São Paulo, 1993.
- [2] BRADY, M. et al. **Robot motion**. 2.ed. Cambridge, MIT Press, 1983.
- [3] FUJITA, M.; HATAKE, K.; MATSUMURA, F. Loop shaping based control of a magnetic bearing. **IEEE Control Systems**, p.57-65, Aug. 1993.
- [4] FUJITA, M.; MAEDA, S.; FUKUZONO, H.; MATSUMURA, F. Completely contactless linear DC motor using magnetic suspension. **Electrical Engineering in Japan**, v. 107, n.1, p. 95-103, 1987.
- [5] GIACAGLIA, G.E.O. **Mecânica geral**. 10.ed. , Rio de Janeiro, Campus, 1982.
- [6] GROVER, F.W. **Inductance calculations working formulas and tables**. New York, D. Van Nostrand, 1946.
- [7] HAYT, W.H. **Eletromagnetismo**. Trad. de P. C. P. Ferreira. 3.ed. , Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1983.
- [8] HE, J.L.; ROTE, D.M.; COFFEY, H.T. Applications of the dynamic circuit theory to maglev suspension systems. **IEEE Transactions on Magnetics**, v.29, n. 6, p. 4153-64, Nov. 1993.
- [9] HE, J.L.; ROTE, D.M.; COFFEY, H.T. Analysis of the combined Maglev levitation, propulsion, and guidance system. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 31, n. 2, p. 981-87, Mar. 1995.
- [10] MILLMAN, J.; HALKIAS, C.C. **Eletrônica : dispositivos e circuitos**. Trad. de E. J. Robalinho. 2.ed. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1981.
- [11] NASAR, S.A.; BOLDEA, I. **Linear motion electric machines**. 1.ed. New York, John Wiley , 1972.
- [12] OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. Trad. de A. F. Kohn e J. C. T. B. Moraes. Rio de Janeiro, Prentice Hall do Brasil, 1982.
- [13] ORSINI, L.Q. **Introdução aos sistemas dinâmicos**. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1985.
- [14] REUSCH, M.F. A problem related to Earnshaw's Theorem. **IEEE Transactions on Magnetics**, v.30, n. 3, p. 1324-26, May, 1994.
- [15] SINHA, P.K. **Electromagnetic suspension dynamics & control**. London, Peter Peregrinus, 1987.
- [16] WANG, I.Y.A.; BUSCH-VISHNIAC, I. A New repulsive magnetic levitation approach using permanent magnets and air-core electromagnets. **IEEE Transactions on Magnetics**, v.30, n. 4, p. 1422-32, July, 1994.

## BOLETINS TÉCNICOS - TEXTOS PUBLICADOS

- BT/PEE/9301 - Oscilador a HEMT - 10 GHz - FÁTIMA S. CORRERA, EDMAR CAMARGO
- T/PEE/9302 - Representação Senoidal da Voz através dos Polos do Filtro Preditor - MARCELO B. JOAQUIM, NORMONDS ALENS
- BT/PEE/9303 - Blindagens por Grades Conductoras: Cálculo do Campo Próximo - LUIZ CEZAR TRINTINALIA, ANTONIO ROBERTO PANICALI
- BT/PEE/9304 - Sistema de Otimização e Controle de Produção em Minas de Pequeno e Médio Porte - TSEN CHUNG KANG, VITOR MARQUES PINTO LEITE
- BT/PEE/9401 - Determinação das Frases de Aplicação Forense para o projeto NESPER e Tese de Mestrado IME/94, com Base em Estudos Fonéticos - MARCONI DOS REIS BEZERRA, EUVALDO F. CABRAL JÚNIOR
- BT/PEE/9402 - Implementação e Teste de uma Rede Neural Artificial do Tipo KSON (Kohonen Self-Organizing Network) com Entradas Bidimensionais - MARCELO YASSUNORI MATUDA, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9403 - Transformada de Walsh e Haar Aplicadas no Processamento de Voz - ALEXANDRE AUGUSTO OTTATI NOGUEIRA, THIAGO ANTONIO GRANDI DE TOLOSA, EUVALDO F. CABRAL JÚNIOR
- BT/PEE/9404 - Aplicação de Redes Neurais ao Problema de Reconhecimento de Padrões por um Sonar Ativo - ALEXANDRE RIBEIRO MORRONE, CRISTINA COELHO DE ABREU, EDUARDO KOITI KIUKAWA, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9405 - Tudo que se Precisa Saber sobre a Prática da FFT - Transformada Rápida de Fourier (Inclui Software) - ROGÉRIO CASAGRANDE, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9406 - A Survey on Speech Enhancement Techniques of Interest to Speaker Recognition - CELSO S. KURASHIMA, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9407 - Identificação de Pulsos Decádicos em Linhas Telefônicas - ANTONIO P. TIMOSZCZUK, MÁRCIO A. MATHIAS, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9408 - Implementação e Teste de Filtros do Tipo Adaptativo e ©Notch<sup>a</sup> para a Remoção de Interferência de 60 Hz em Sinais de Eletrocardiograma - FLÁVIO ANTÔNIO MENEGOLA, JOSÉ AUGUSTO DE MATTOS, JOSÉ GOMES G. FILHO, SIDNEY SILVA VIANA, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9409 - Compressão de Sinais de Voz utilizando Transformadas de Karhunen-Loève, Fourier e Hadamard - IVAN LUIS VIEIRA, LUIZ FERNANDO STEIN WETZEL, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9410 - ©Ray Tracing<sup>a</sup> Paralelo - EDUARDO TOLEDO SANTOS, JOÃO ANTONIO ZUFFO
- BT/PEE/9411 - Implementação de uma Ferramenta Posicionador para ©Gate-Arrays<sup>a</sup> Tipo Mar de Portas - JORGE W. PERLAZA PRADO, WILHELMUS A. M. VAN NOIJE
- BT/PEE/9412 - Tudo que se Precisa Saber Sobre a Teoria da FFT - Transformada Rápida de Fourier - FÁBIO LUÍS ROMÃO, REINALDO SILVEIRA, ROGÉRIO CASAGRANDE, EUVALDO CABRAL JR.
- BT/PEE/9413 - Análise do Ruído Sonoro em uma Sala de Aquisição de Amostras de Som com Microcomputador - FÁBIO LUÍS ROMÃO, REINALDO SILVEIRA, EUVALDO CABRAL JR.
- BT/PEE/9414 - Cor: Aspectos Relevantes para Visualização de Dados - SÍLVIA DELGADO OLABARRIAGA
- BT/PEE/9415 - Projeto de Filtros Digitais IIR com Fase Aproximadamente Linear Utilizando Redução de Ordem - IVAN F. J. RODRIGUES, MAX GERKEN
- BT/PEE/9416 - GERAFILTRO: Sistema para Projeto Automático de Filtros Digitais ©IIR<sup>a</sup> (da especificação em alto nível ao leiaute do ©ASIC<sup>a</sup>) - RICARDO PIRES, JOSÉ VIEIRA DO VALE NETO
- BT/PEE/9417 - Redes Neurais Artificiais Aplicadas à Identificação de Pulsos Decádicos em Linhas Telefônicas - ANTONIO P. TIMOSZCZUK, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9501 - Estudo Comparativo de Métodos de Cálculo da Frequência Fundamental - MARCOS COSTA HUNOLD, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9502 - Combinando Técnicas de Redes Neurais Artificiais e Informações de Excitação no Reconhecimento Automático do Locutor - ANDRÉ BORDIN MAGNI, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9503 - Utilização de Redes Neurais Artificiais para Detecção e Identificação de Falhas em Circuitos - MÁRCIO YUKIO TERUYA, ROBERTO AMILTON BERNARDES SÓRIA, EUVALDO CABRAL JR.
- BT/PEE/9504 - Uso de Redes Neurais Artificiais no Reconhecimento de Locutores no Domínio Temporal - BENEDITO JOSÉ BARRETO FONSECA JÚNIOR, EUVALDO CABRAL JÚNIOR
- BT/PEE/9505 - Projeto de Filtros Passivos e Ativos em Técnicas de Circuitos Integrados de Microondas - DAVID VIVEIROS JÚNIOR, DENISE CONSONNI
- BT/PEE/9506 - Uma Análise de Clustering para as Frases de Projeto NESPER - RONALDO OLIVEIRA MESSINA, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9507 - Controle com Estrutura Variável e Modos Deslizantes - Um Estudo para Aplicação em Controle Carga-frequência da Geração - JOSE PAULO F. GARCIA, JOCELYN FREITAS BENNATON

- BT/PEE/9508 - Recuperação das Margens de Ganho e de Fase para Sistemas de Fase Não Mínima por Realimentação da Saída - MARCO H. TERRA, VITOR M. P. LEITE
- BT/PEE/9509 - Sistema de Inspeção Óptica de Dispositivos Bi-Dimensionais - CASIMIRO DE ALMEIDA BARRETO, PEDRO LUÍS PRÓSPERO SANCHEZ
- T/PEE/9510 - Sistema de Partículas Uma Poderosa Técnica de Animação em Computação Gráfica - RENATO CURTO RODRIGUES, JOÃO ANTÔNIO ZUFFO
- BT/PEE/9511- Efeito de Ruídos em Sinais de Voz Visualizados em Trajetórias Neurais de Kohonen - CELSO S. KURASHIMA, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9601 - "Um Reconhecedor de Sinais Sonoros Utilizando LVQ" - ALEXANDRE TORNICE, EUVALDO CABRAL JR.
- BT/PEE/9602 - "Coleção Artificial Neural Networks: Uma Visão Geral dos Sistemas Neurais Artificiais de Stephen Grossberg" - CHIU HSIUNG HUANG
- BT/PEE/9603 - "Reactively-Sputtered TiN Formation Using a RF Magnetron System"- SÉRGIO PAULO AMARAL OSÓRIO, LUIZ SÉRGIO ZASNICOFF
- BT/PEE/9604 - Aspectos em Tradução de Linguagens Naturais Através de Redes Neurais Artificiais - CARLOS EDUARDO DANTAS DE MENEZES, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9605 - Implementação de Blocos Passa-Tudo Utilizando Realimentação de Erro - SÉRGIO JOSÉ CARNEIRO LEÃO, MAX GERKEN
- BT/PEE/9606 - Coleção SANN group Redes Neurais Artificiais: A Rede Neural de Sakoe - ANDRÉ BORDIN MAGNI, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9607 - Coleção SANN group Redes Neurais Artificiais: A Rede Neural de Steinbuch - ROBERTO AMILTON BERNARDES SÓRIA, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9608 - Desenvolvimento de uma Estrutura de Duplo Nível de Metal para a Confecção de Interconexões em Circuitos Integrados - JOSÉ AUGUSTO DE ALENCAR PEREIRA, LUIZ CARLOS MOLINA TORRES
- BT/PEE/9609 - Determinação de Parâmetros de Processo para Fotomáscara "Balzers" Utilizando Gerador de Padrões - JORGE SEKI, MEGUMI SAITO
- BT/PEE/9610 - Um Ambiente para Desenvolvimento de Sistemas Distribuídos - PEDRO F. ROSA, JOÃO A. ZUFFO
- BT/PEE/9611 - Interpretações Teóricas do Funcionamento Cerebelar: Uma Revisão - MARCUS FRAGA VIEIRA, ANDRÉ FÁBIO KOHN
- BT/PEE/9612 - Marcapasso Cardíaco Temporário Microcontrolado de Demanda e Baixo Consumo - FLAVIO ANTONIO MENEGOLA, JOSÉ CARLOS TEIXEIRA DE BARROS MORAES
- BT/PEE/9613 - Um Sistema de Planejamento de Ação Baseado em Casos para uma Célula Flexível de Manufatura - RICARDO LUÍS DE FREITAS, MÁRCIO RILLO
- BT/PEE/9614 - Aplicações do Boundary-Scan para o Teste de Módulos Multichip - ROBERTO C. COSSI JR., JOSÉ ROBERTO DE A. AMAZONAS
- BT/PEE/9615 - A 2.488 Gb/s GaAs 1:4/1:16 Demultiplexer IC with Skip Circuit for Sonet STS-12/48 Systems - TAUFIK ABRÃO, FATIMA S. CORRERA
- BT/PEE/9616 - Uma Contribuição para a Construção de Algoritmos em Projetos de Redes - ALLAN DE SOUZA, JOSÉ ROBERTO CASTILHO PIQUEIRA
- BT/PEE/9617 - Análise Crítica dos Métodos de Medição do Intervalo QT do Eletrocardiograma - SÍDNEY DA SILVA VIANA, JOSÉ CARLOS TEIXEIRA DE BARROS MORAES
- BT/PEE/9618 - Deposição e Caracterização de Filmes de SiO<sub>2</sub> Crescidos pela Técnica de PECVD a Baixa Temperatura - MARCO ALAYO CHÁVEZ, INÉS PEREYRA
- BT/PEE/9619 - PARSTOOL: Uma Ferramenta de Auxílio à Simulação de Sistemas Paralelos - LI KUANG CHING, LIRIA MATSUMOTO SATO
- BT/PEE/9620 - Análise de um Método de Otimização por Malha no Treinamento de Robôs - OLÍMPIO MURILO CAPELI, JOSÉ CARLOS T. B. MORAES, SADA O ISOTANI
- BT/PEE/9701 - Identification of Unstable Mechanical Systems - ROBERTO MOURA SALES, ANSELMO BITTAR, MICHAEL PORSCH, LAÉRCIO LUCCHESI
- BT/PEE/9702 - Analysis of the Subthreshold Slope Transition Region in SOI nMOSFET - VICTOR SONNENBERG, JOÃO ANTONIO MARTINO
- BT/PEE/9703 - Introduction of the SOI MOSFET Dimensions in the High-Temperature Leakage Drain Current Model - MARCELO BELLODI, JOÃO ANTONIO MARTINO, DENIS FLANDRE
- BT/PEE/9704 - Controle de Largura de Banda Dinâmica para Transmissões Multicast para Redes de Alta Velocidade - SANG SOON LEE, SERGIO TAKEO KOFUJI
- BT/PEE/9705 - Uma Modificação Proposta para o Controle Preditivo Generalizado com Filtro de Kalman - JAIME QUINTERO R., OSWALDO L. V. COSTA
- BT/PEE/9706 - Aplicações de Redes Neurais em Previsões Financeiras - OLÍMPIO MURILO CAPELI, EUVALDO F. CABRAL JR.

- BT/PEE/9707 - Sistema Microcontrolado, Multicanal e Portátil para Estimulação Neuromuscular Funcional - ROGÉRIO QUIARIM ZARZA, JOSÉ CARLOS TEIXEIRA DE BARROS MORAES
- BT/PEE/9708 - Requisitos para o Mapeamento Tecnológico em Projetos de Microeletrônica - LUCIANO DE OLIVEIRA CORRÊA DE BRITO, JOSÉ ROBERTO DE ALMEIDA AMAZONAS
- BT/PEE/9709 - Sistemas PRMA com Dados Acoplados - JOSÉ AUGUSTO DE LIMA, PAUL JEAN ETIENNE JESZENSZY
- BT/PEE/9710 - Algoritmos Genéticos (AG's) para a Otimização de Controladores Nebulosos - JULIO CESAR CEBALLOS AYA, OSWALDO L. V. COSTA
- BT/PEE/9711 - Um Estudo Sobre a Redução de Ruídos em Sinais Caóticos - ERNANE JOSÉ XAVIER COSTA, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9712 - Geradores não Lineares de Sequência para uso em Sistemas Spread Spectrum - ANGEL ANTONIO GONZALEZ MARTINEZ, PAUL JEAN ETIENNE JESZENSZY
- BT/PEE/9713 - Modelamento Físico do Sistema Heteroestrutura - Metal - CECÍLIA WETTERLE RODRIGUES, MEGUMI SAITO
- BT/PEE/9714 - Tensões Induzidas em Linhas Aéreas por Descargas Atmosféricas Indiretas - Modelagem e Aplicação ao Cálculo de Interrupções - ALEXANDRE PIANTINI, JORGE M. JANISZEWSKI
- BT/PEE/9715 - RECMAP - Uma Ferramenta para Otimização em Síntese de Alto Nível Baseada em Reconhecimento Funcional e Mapeamento de Componentes - ANDRÉ GERHARD, JOSÉ VIEIRA DO VALE NETO
- BT/PEE/9716 - Estudo da Sinterização de Contatos Al/Ti por Recozimento Térmico Rápido Visando a Aplicação em Circuitos Integrados - ANGELO EDUARDO BATTISTINI MARQUES, ROGÉRIO FURLAN
- BT/PEE/9717 - Mixed H2/H- Control of Discrete-Time Markovian Jump Linear Systems - OSWALDO L. V. COSTA, RICARDO P. MARQUES
- BT/PEE/9718 - Aluminium Etching with CCl4-N2 Plasmas - ANGELA MAKIE MAKAZAWA, PATRICK VERDONCK
- BT/PEE/9719 - O Uso de Resistes Amplificados Quimicamente e de Sililação em Litrografia por Feixe de Elétrons - ANTONIO C. SEABRA, PATRICK B. VERDONCK
- BT/PEE/9720 - Implementação de um Simulador de um Circuito Neuro-Medular que Atua no Controle da Força Motora - LUIZ JURANDIR SIMÕES DE ARAÚJO, ANDRÉ FÁBIO KOHN
- BT/PEE/9721 - Avaliação das Características Físico-Químicas e Elétricas de Filmes de SiO2 Depositados por PECVD a Partir da Reação entre O2 e TEOS - ALVARO ROMANELLI CARDOSO E CLAUS MARTIN HASENACK
- BT/PEE/9722 - Controle e Simulação Dinâmica de Colunas de Destilação: Aplicação Prática em uma Coluna com Refluxo por Gravidade
- BT/PEE/9723 - Circuitos de Portas Lógicas Primitivas Implementados a Partir de uma Classe de Lógicas Paraconsistentes Anotadas - JOÃO INÁCIO DA SILVA FILHO, JAIR MINORO ABE, PEDRO LUÍS PRÓSPERO SANCHEZ
- BT/PEE/9724 - Lattice Heating and Energy Balance Consideration on the I-V Characteristics of Submicrometer Thin-Film Fully Depleted SOI NMOS Devices - CLAUDIA BRUNETTI, NELSON L. A. BRAGA, LUIZ S. ZASNICOFF
- BT/PEE/9725 - Identificação de um Processo de Neutralização de pH via Redes Neurais - SILVIO FLABOREA, CLAUDIO GARCIA
- BT/PEE/9726 - Uma Estratégia de Migração de Sistemas de Telefonia Móvel com Tecnologia AMPS para a Tecnologia CDMA - RONALD LUÍS CLARKSON EISNER, PAUL JEAN ETIENNE JESZENSZY
- BT/PEE/9727 - Controle de pH Usando Conceitos de Invariantes de Reações e Geometria Diferencial - OSCAR A. ZANABARIA S., CLAUDIO GARCIA
- BT/PEE/9728 - Estudo da Influência dos Parâmetros de Recozimento Térmico Rápido na Morfologia dos Filmes de TiSi2 Formados e sua Correlação com a Tensão Mecânica - SILVANA GASPAROTTO DE SOUZA, ARMANDO ANTONIO MARIA LAGANÁ, SEBASTIÃO GOMES DOS SANTOS FILHO
- BT/PEE/9729 - Analysis of Silicon Surface Microirregularities by LASER Light Scattering - JOSÉ CÂNDIDO DE SOUSA FILHO, SEBASTIÃO GOMES DOS SANTOS FILHO
- BT/PEE/9730 - Wavelets in Music Analysis and Synthesis: Timbres Analysis and Perspectives - REGIS ROSSI ALVES FARIA, RUGGERO ANDREA RUSCHIONI, JOÃO ANTONIO ZUFFO
- BT/PEE/9731 - Estudo de Efeitos Mútuos da Distribuição de Corrente em Condutores - AUGUSTO CARLOS PAVÃO, JORGE MIECZYSLAW JANISZEWSKI
- BT/PEE/9801 - Equivalência entre a Semântica da Lógica de Transações e a Semântica de sua Implementação Prolog - PAULO E. SANTOS, FLÁVIO S. C. DA SILVA
- BT/PEE/9802 - Nash Game in Mixed H2/Hoo Control Theory a Convex Optimization Approach - HELENICE OLIVEIRA FLORENTINO, ROBERTO MOURA SALES
- BT/PEE/9803 - Text-Independent Speaker Recognition Using Vector Quantization and Gaussian Mixture Models - THOMAS E. FILGUEIRAS Fº., RONALDO O. MESSINA E EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9804 - Elementos Piezoresistivos para Sensores de Pressão com Tecnologia CMOS - LUIZ ANTONIO RASIA, E. C. RODRIGUEZ

- BT/PEE/9805 - Automação do Processo de Casamento de Impedância em Sistemas de Aquecimento por Microondas - J. C. DE SOUZA, J. T. SENISE, V. C. PARRO, F. M. PAIT
- BT/PEE/9806 - Considerações para o Projeto de Células de Memória SI com Transistores HEMT - JAIME H. LASSO, EDGAR CHARRY R.
- BT/PEE/9807 - Covariance Controller with Structure Constraint and Closed Loop H Bound - ANTÔNIO CARLOS DE LIMA, ROBERTO MOURA SALES
- BT/PEE/9808 - Controle Unidimensional de Objetos: Uma Aplicação Prática em Fresadora Automática - MÁRCIO A. F. MURATORE, OSWALDO L. V. COSTA
- BT/PEE/9809 - Redes Neurais com Retardos Temporais Aplicadas ao Reconhecimento Automático do Locutor - ROGÉRIO CASAGRANDE, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9810 - Topological Computation and Voluntary Control - HENRIQUE SCHÜTZER DEL NERO, JOSÉ ROBERTO CASTILHO PIQUEIRA, ALFREDO PORTINARI MARANCA
- BT/PEE/9811 - Casamento de Impedância em Guia de Onda Retangular Utilizando como Variável Medida a Potência Refletida - J. C. DE SOUZA JR., J. T. SENISE
- BT/PEE/9812 - Applied Surface Science - RONALDO D. MANSANO, PATRICK VERDONCK, HOMERO S. MACIEL
- BT/PEE/9813 - Contribuição ao Estudo da Morfologia da Superfície e da Interface do Siliceto de Titânio Formado sobre Si (100) Empregando a Técnica de Microscopia de Força Atômica (AFM) - N. M. HASAN, A. A. M. LAGANÁ, S. G. SANTOS FILHO
- BT/PEE/9814 - Estudo Experimental da Tensão Mecânica em Filmes Finos de Cobre Obtidos por Evaporação ou Deposição Eletroquímica Espontânea - A. I. HASHIMOTO, S. G. FILHO
- BT/PEE/9815 - Controle Híbrido de Manipuladores Robóticos - WEBER ALLEGRI, JOSÉ JAIME DA CRUZ
- BT/PEE/9816 - Entropia Informacional e Cronobiologia - ANA AMÉLIA BENEDITO SILVA, JOSÉ ROBERTO CASTILHO PIQUEIRA
- BT/PEE/9817 - Estabilidade de Lyapunov e Controle de Atitude - FERNANDO SOUSA, FREITAS JÚNIOR, PAULO SÉRGIO PEREIRA DA SILVA
- BT/PEE/9818 - Projeto de um Conversor de Frequências Resistivo em Tecnologia MMIC - CLÁUDIA C. A. APARÍCIO, DENISE CONSONNI
- BT/PEE/9819 - Estudo de Sensibilidade de um Sistema de Modulação Digital via Simulação - RONALDO DI MAURO, LUIZ ANTONIO BACCALÁ
- BT/PEE/9820 - Engenharia do Conhecimento Aplicada ao Conhecimento Aplicado ao Domínio de Gerenciamento de Falhas em Redes de Comunicação: Uma Abordagem Baseada em Modelo - MARILZA ANTUNES DE LEMOS, MARCIO RILLO
- BT/PEE/9821 - Uma Biblioteca de Métodos de Resolução de Problemas de Planejamento para Fornecer Apoio à Aquisição de Conhecimento - LELIANE NUNES DE BARROS, MARCIO RILLO
- BT/PEE/9822 - Um Estudo de Técnicas de Aprendizado por Reforço Livre de Modelo - Aplicação ao Pêndulo Invertido - SÉRGIO RIBEIRO AUGUSTO, ADEMAR FERREIRA
- BT/PEE/9823 - Identificação de Sistemas Dinâmicos com Redes Neurais - FRANCISCO CARLOS PONS, CLÁUDIO GARCIA
- BT/PEE/9824 - Comparison between Single and Double Langmuir Probe Techniques for Analysis of Inductively Coupled Plasmas - RAUL M. DE CASTRO, GIUSEPPE A. CIRINO, PATRICK VERDONCK, HOMERO S. MACIEL, MARCOS MASSI, MARCELO B. PISANI, RONALDO D. MANSANO
- BT/PEE/9825 - DECMEF: Um Sistema de Decomposição Aplicada à Síntese de Máquinas de Estados Finitos - CARLOS HUMBERTO LLANOS QUINTERO, MARIUS STRUM
- BT/PEE/9826 - Controladores Preditivos Através de Desigualdade Matriciais Lineares - RENATO C. BARÃO, RICARDO P. MARQUES, OSWALDO L. V. COSTA
- BT/PEE/9827 - Parametrization of all H2 Optimal Output Feedback Controllers - JOÃO YOSHIYUKI ISHIHARA, ROBERTO MOURA SALES
- BT/PEE/9901 - Digital Equalization Using Time Delay Neural Network (TDNN) - MARIO ANDRÉS VERGARA ESCOBAR, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9902 - Simulação e Análise Estrutural do Modelo de Deposição da Publicação ICRP 66 - JOAQUIM CARLOS SANCHES CARDOSO, JOSÉ CARLOS T. DE BARRÓS MOARAES
- BT/PEE/9903 - Modelamento e Ajuste por Regra Sub-Ótica de Maximização da Informação da Mútua de um Sistema Reconhecedor de Palavras Isoladas, Independente do Falante, para Ambientes Adversos, com Redundância de Informação - MÁRIO MINAMI, IVANDRO SANCHES
- BT/PEE/9904 - Modelagem Matemática e Controle Multivariável do Tanque de Contato Empregado no Processo de Lixiviação dos Minerais Niquelíferos - DANIEL GUZMÁN DEL RÍO, CLAUDIO GARCIA
- BT/PEE/9905 - Avaliação de Transdutores para Análise Metabólica Humana - HENRIQUE TAKACHI MORIYA, JOSÉ CARLOS T. DE BARROS MORAES
- BT/PEE/9906 - Estudo da Aplicação do Método TLM-2D à Análise de Campos Eletromagnéticos - MARCO ANTONIO MATHIAS, JORGE M. JANISZEWSKI

BT/PEE/9907 – Comportamento Transitório de Campos Eletromagnéticos em Meios Condutivos: Simulação Computacional Eficiente por Diferenças Finitas no Domínio do Tempo – ALEXANDRE AUGUSTO OTTATI NOGUEIRA, JORGE MIECZYSLAW JANISZEWSKI

BT/PEE/9908 –  $H_2$  and  $H_\infty$  Control for Maglev Vehicles – ANSELMO BITTAR, ROBERTO MOURA SALES

BT/PEE/9909 – Amplificador Distribuído em GaAs – 1 a 17 GHz – CRISTIANE FERREIRA DE ARAÚJO, FATIMA SALETE CORRERA

BT/PEE/9910 – Modelo Não-Linear de MESFET para Simulação de Amplificadores de Alta Eficiência – ANTONIO SANDRO VERRI, FATIMA SALETE CORRERA

