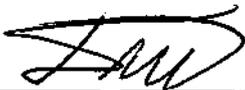


## Referência Completa

**Tipo da Referência** Conference Proceedings  
**Repositório** sid.inpe.br/iris@1905/2005/07.27.02.19  
**Metadados** sid.inpe.br/iris@1905/2005/07.27.02.19.20  
**Site** mtc-m05.sid.inpe.br  
**Rótulo** 5426  
**Chave Secundária** INPE-3935-PRE/965  
**Chave de Citação** PereiraOliv:1986:AnInPa  
**Autor** 1 Pereira, Eduardo Augusto Gomes  
 2 Oliviera Junior, Ismael Emílio de  
**Grupo** 1 DMC-INPE-BR  
**Título** Análise da influencia de parâmetros no desempenho de uma eletrovalvula de controle   
**Nome do Evento** Congresso Brasileiro de Automática, 6.  
**Ano** 1986  
**Data** 25-28 nov. 1986  
**Localização do Evento** Belo Horizonte  
**Palavras-Chave** ENGENHARIA ETECNOLOGIA ESPACIAL, válvula de controle, desempenho de eletroválvula, eletroválvula.  
**Tipo Secundário** PRE CN  
**Area** ETES  
**Projeto** A81  
**Ultima Atualização dos Metadados** 2015:03.03.11.54.20 sid.inpe.br/bibdigital@80/2006/04.07.15.50 administrator  
**Estágio do Documento** concluído  
**e-Mail (login)** marciana  
**Grupo de Usuários** administrator  
**Visibilidade** shown  
**Transferível** 1  
**Tipo do Conteúdo** External Contribution  
**Conteúdo da Pasta source** não têm arquivos  
**Conteúdo da Pasta agreement** não têm arquivos  
**Histórico** 2015-03-03 11:54:20 :: administrator -> marciana :: 1986  
**Campos Vazios** abstract accessionnumber affiliation archivingpolicy archivist booktitle callnumber copyholder copyright creatorhistory descriptionlevel dissemination documentstage doi e-mailaddress edition editor electronicmailaddress format isbn issn language lineage mark mirrorrepository nextedition nexthigherunit notes numberoffiles numberofvolumes organization pages parameterlist parentrepositories previousedition progress publisher publisheraddress readergroup readergroup readpermission resumeid rightsholder secondarydate secondarymark serieseditor session shorttitle size sponsor subject targetfile tertiarymark tertiarytype type url versiontype volume  
**Data de Acesso** 30 jul. 2015  
**atualizar**

1. Publicação nº <i>INPE-3935-PRE/965</i>	2. Versão	3. Data <i>Junho, 1986</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DMC</i>	Programa <i>A81</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>VÁLVULA DE CONTROLE DESEMPENHO DE ELETROVÁLVULA ELETROVÁLVULA</i>			
7. C.D.U.: <i>629.7.05:629.783</i>			
8. Título <i>ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS NO DESEMPENHO DE UMA ELETROVÁLVULA DE CONTROLE</i>		10. Páginas: <i>5</i>	
		11. Última página: <i>4</i>	
		12. Revisada por <i>Valcir Orlando</i>	
9. Autoria <i>Eduardo Augusto Gomes Pereira Ismael Emílio de Oliveira Júnior</i>		13. Autorizada por <i>Marco Antonio Raupp</i> Director General	
Assinatura responsável 			
14. Resumo/Notas <p><i>Este trabalho analisa a variação do desempenho de uma eletroválvula de controle quando são alterados certos parâmetros eletromagnéticos, bem como a mola empregada e a tensão elétrica no solenóide. Verifica-se a variação no desempenho por meio dos tempos totais de abertura. A válvula em estudo deverá ser empregada em satélites brasileiros e é do tipo monoestável, ou seja, permanece na posição dechada por ação contínua de uma mola. Dado o sinal de acionamento, o solenóide energiza-se e atrai o cursor que veda a válvula, permitindo a passagem do fluido. Para efetuar a análise, empregou-se um modelo matemático desenvolvido no INPE que leva em conta a variação da permeabilidade magnética do material e considera também a indutância do circuito variável. Obtêm-se gráficos da abertura em função do tempo para as várias condições propostas e faz-se uma análise comparativa delas.</i></p>			
15. Observações <i>Este trabalho será apresentado no 6º Congresso Brasileiro de Automática, em Belo Horizonte, M.G.</i>			

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS NO DESEMPENHO DE UMA ELETROVÁLVULA DE CONTROLE

Eduardo Augusto Gomes Pereira  
Ismael Emílio de Oliveira Júnior  
Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE/MCT  
Caixa Postal 515  
12201 - São José dos Campos - SP  
Brasil

RESUMO

Este trabalho analisa a variação do desempenho de uma eletroválvula de controle quando são alterados certos parâmetros eletromagnéticos, bem como a mola empregada e a tensão elétrica no solenóide. Verifica-se a variação no desempenho por meio dos tempos totais de abertura. A válvula em estudo deverá ser empregada em satélites brasileiros e é do tipo monoestável, ou seja, permanece na posição fechada por ação contínua de uma mola. Dado o sinal de acionamento, o solenóide energiza-se e atrai o cursor que veda a válvula, permitindo a passagem do fluido. Para efetuar a análise, empregou-se um modelo matemático desenvolvido no INPE que leva em conta a variação da permeabilidade magnética do material e considera também a indutância do circuito variável. Obtêm-se gráficos da abertura em função do tempo para as várias condições propostas e faz-se uma análise comparativa delas.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF PARAMETERS IN A CONTROL ELECTROVALVE PERFORMANCE

ABSTRACT

This work analyzes the changing in the performance of a control electrovalve when some electromagnetic parameters are altered, as well as the springs and the electric tension in the coil. The performance variation is studied by means of opening delay times. The valve considered will be used in Brazilian satellites and is of the monostable type, i.e., it keeps closed by action of a spring. Given the on signal, the coil energizes and attracts the cursor which seals the valve, allowing the passage of the fluid. To do the analysis, one employed a mathematic model developed at INPE that takes into account the material magnetic permeability variation, besides considering the circuit inductance variable. Graphics of the opening as a function of time for the various proposed conditions are obtained and a comparative analysis among them is done.

1. INTRODUÇÃO

A partir da concepção da eletroválvula monoestável, foi desenvolvido um modelo físico para análise. Seu funcionamento pode ser compreendido com o auxílio do esquema apresentado na Figura 1.

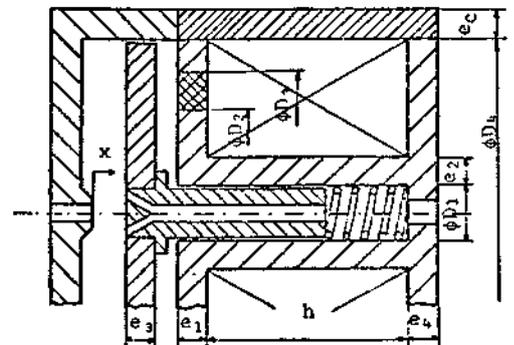


Fig. 1 - Esquema de eletroválvula monoestável de controle.

Quando desligada, a válvula mantém-se fechada pela ação da mola. Ao ser acionada, o cursor é atraído para a base magneticamente. Quando o esforço magnético supera a

força da mola, o atuador começa a movimentar-se, abrindo a válvula. O intervalo de tempo entre a aplicação do sinal de abertura e o início da movimentação do cursor é chamado de atraso. Quando a tensão nos terminais do solenóide é eliminada, a força magnética decai; ao tornar-se menor que a força da mola, a válvula retorna à condição inicial, ou seja, fechada. A dinâmica deste cursor, que determina o transitório da válvula, pode ser conhecida através da resolução de um sistema de equações diferenciais, dentre as quais as mais importantes são:

$$m_c \cdot \frac{dx}{dt} = F_m - F_{mo} \quad (1)$$

$$\frac{dW_m}{dx} = F_m \quad (2)$$

$$L_c \cdot \frac{dI}{dt} = U - R \cdot I - I \cdot \frac{dL_c}{dt} \quad (3)$$

onde:  $m_c$  - massa do cursor;  
 $F_m$  - força magnética;  
 $F_{mo}$  - força da mola;  
 $W_m$  - energia magnética do circuito;  
 $L_c$  - indutância do solenóide;  
 $I$  - corrente elétrica;  
 $U$  - tensão nos terminais do solenóide;  
 $R$  - resistência da bobina.

Neste trabalho mostra-se a influência de alguns parâmetros de projeto no tempo de abertura, que é um dos fatores demonstrativos do desempenho de uma eletroválvula. Para tal, utilizou-se o programa ABERTURA desenvolvido no INPE, o qual resolve numericamente o modelo matemático proposto pelo método de Runge-Kuta de quarta ordem, acelerado pelo algoritmo de Hamming.

## 2. INFLUÊNCIA DO ISOLANTE MAGNÉTICO

O isolante magnético é um elemento que exerce grande influência no funcionamento da válvula. Sua função é forçar a maior parte do fluxo magnético a passar pelos entreferros, pois é este fluxo que produz a força atrativa de abertura da válvula.

Para estudar sua influência, deram-se vários valores a  $D_3$  e, para cada um deles, variava-se o diâmetro  $D_2$ , mantendo-se constantes os demais parâmetros. A Figura 2 mostra o tempo de abertura em função de  $D_2$  para diversos valores do diâmetro externo do isolante.

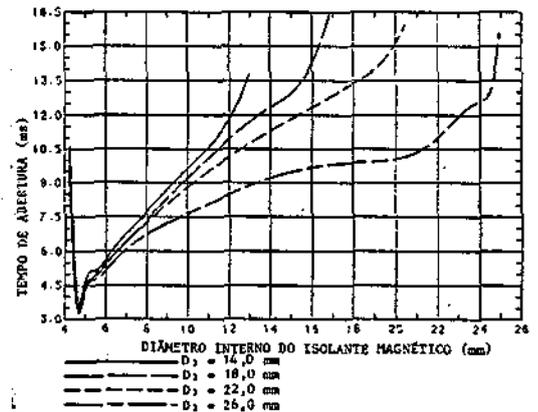


Fig. 2 - Atraso na abertura para vários valores de  $D_3$  e  $D_2$ .

Para o exemplo acima, as principais características da válvula são:

$D_1 = 4,0$  mm,  $D_4 = 28,0$  mm,  $N_e = 4091$  espiras,

$U = 24$  volts,  $e_1 = 1,0$  mm.

Como se pode notar, para todos os casos, ao reduzir o diâmetro interno do isolante,  $D_2$ , o tempo de abertura diminui até atingir um valor mínimo. A partir deste ponto, novos decréscimos em  $D_2$  produzem um aumento brusco naquele tempo. Da mesma forma, quando  $D_2$  tende ao valor de  $D_3$ , a abertura torna-se mais lenta.

A espessura do isolante ( $e_1$ ) também foi variada, sendo considerada a faixa de 0,5 a 4,0 mm. Para este caso, a válvula possuía as seguintes características principais:

$D_1 = 4,0$  mm,  $D_2 = 16,0$  mm,  $D_3 = 20,0$  mm,

$D_4 = 28,0$  mm,  $U = 24$  volts,  $D_{fio} = 0,22$  mm,

$N_e = 4091$  espiras.

O resultado desta análise pode ser visualizada na Figura 3.

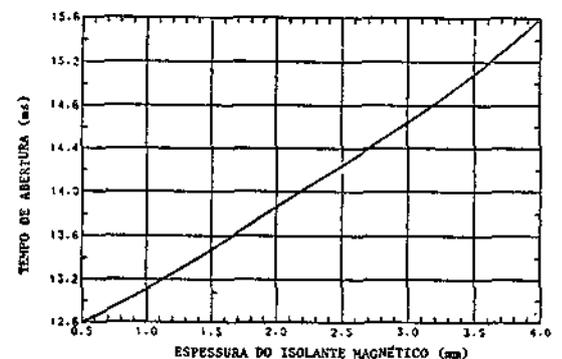


Fig. 3 - Tempo de abertura em função da espessura do isolante.

Como se pode ver pela Figura 3, para o caso estudado o tempo de abertura cresce suavemente e quase linearmente com o incremento de  $e_1$ .

### 3. INFLUÊNCIA DAS ESPESSURAS DAS PAREDES

Foram analisadas 3 espessuras de parede que poderiam afetar o circuito magnético. São elas a espessura da carcaça externa,  $e_1$ , a espessura da aba inferior do carretel,  $e_4$ , e a espessura da aba do cursor,  $e_3$ .

O efeito de  $e_2$  não pode ser avaliado isoladamente visto que qualquer alteração nesta espessura induz a modificações no enrolamento.

Em todas as situações estudadas, as principais características da válvula eram:

$$D_1 = 4,0 \text{ mm}, D_2 = 16,0 \text{ mm}, D_3 = 20,0 \text{ mm},$$

$$D_4 = 28,0 \text{ mm}, N_e = 4091 \text{ espiras}, U = 24 \text{ volts}.$$

Todas as espessuras foram variadas na faixa de 0,5 a 4,0 mm. Durante a variação de uma destas espessuras, as duas outras foram mantidas com o valor de 1,0 mm. A Figura 4, a seguir, mostra o resultado desta análise.

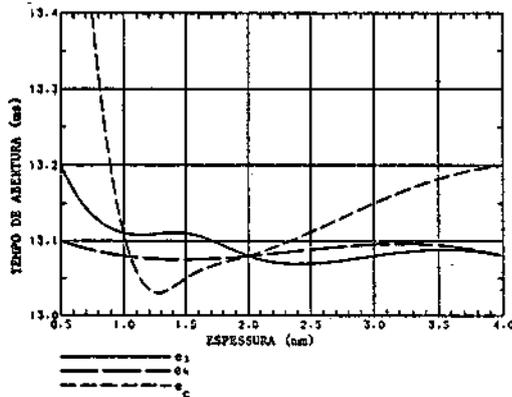


Fig. 4 - Efeito das espessuras no tempo de abertura.

Conforme se pode notar, a variação do tempo de abertura é muito pequena para variações das espessuras dentro da faixa considerada.

### 4. INFLUÊNCIA DO ENROLAMENTO

Nas seções anteriores, a potência foi mantida constante para que se tivesse uma melhor comparação. Ao variar o enrolamento, entretanto, o valor deste parâmetro se altera. Para melhor elucidar seu efeito, todos os gráficos da análise do enrolamento apresentam conjuntamente as curvas do tempo de abertura e da potência consumida. A tensão é um fator de grande influência em uma bobina, como se pode ver pela Figura 5. Os principais parâmetros da válvula para este caso são:

$$D_1 = 4,0 \text{ mm}, D_4 = 28,0 \text{ mm}, h = 20,0 \text{ mm}.$$

$$N_e = 4091 \text{ espiras e } D_{\text{fio}} = 0,22 \text{ mm}.$$

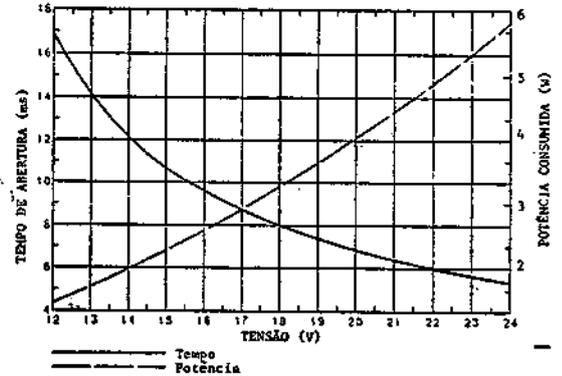


Fig. 5 - Efeito da tensão no tempo de abertura e na potência consumida.

A figura acima mostra que, aumentando a tensão, o tempo de abertura cai segundo uma curva aproximadamente hiperbólica, notando-se uma aparente limitação inferior para este tempo em cerca de 4ms. Por outro lado, a potência necessária cresce segundo uma curva quase-parabólica. Isto leva a crer que, embora se possa aumentar a potência, a diminuição do tempo de abertura a partir de um certo ponto torna-se insignificante.

Outra característica que afeta o enrolamento é o comprimento do solenóide. A Figura 6 mostra o tempo de abertura e a potência em função deste parâmetro para uma válvula com as seguintes condições:

$$D_1 = 4,0 \text{ mm}, D_2 = 6 \text{ mm}, D_3 = 26,0 \text{ mm},$$

$$D_4 = 28,0 \text{ mm}, U = 18 \text{ volts}, D_{\text{fio}} = 0,22 \text{ mm}.$$

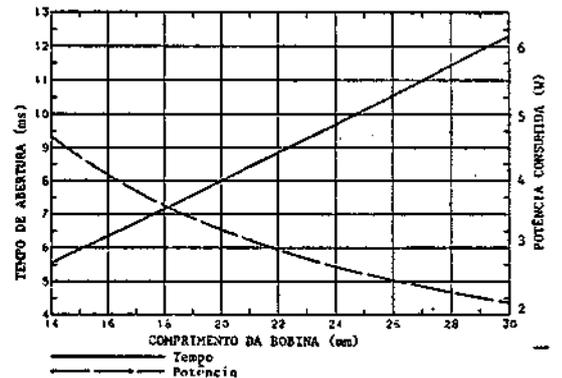


Fig. 6 - Influência do comprimento da bobina no tempo de abertura e na potência da válvula.

Analisando a figura acima, nota-se um aumento aproximadamente linear do tempo de resposta quando se incrementa o comprimento da bobina. A potência, por sua vez, apresenta uma curva de decaimento semelhante a uma parábola.

O diâmetro do fio foi o terceiro parâmetro analisado na verificação da influência do enrolamento no tempo de abertura da válvula.

la. A Figura 7, mostrada a seguir, resume os resultados desta análise. A válvula estuda da possui as mesmas características daquela do exemplo anterior, com exceção do comprimento da bobina, fixado em  $h = 18$  mm, e da tensão, alterada para 24 volts.

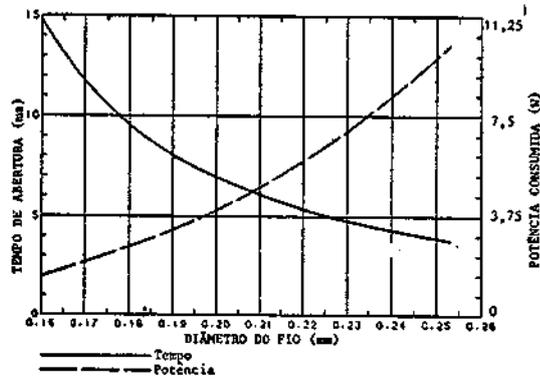


Fig. 7 - Influência do diâmetro do fio no tempo de abertura.

As curvas da figura acima mostram que aumentando o diâmetro do fio, o tempo de abertura diminui e a potência necessária cresce. Como se pode observar, a partir de um certo diâmetro do fio, a redução do tempo de abertura é muito pequena, enquanto o aumento da potência consumida é elevado. É importante notar que, apesar de as curvas apresentadas serem traçadas de maneira contínua, os fios são encontrados comercialmente apenas com diâmetros que variam discretamente.

##### 5. INFLUÊNCIA DA FORÇA DE ABERTURA

O último elemento estudado neste trabalho foi a força de fechamento imposta pela mola. Para realizar esta análise, tomou-se uma válvula com as seguintes dimensões:

$$D_1 = 4,0 \text{ mm}, D_2 = 6,0 \text{ mm}, D_3 = 26,0 \text{ mm},$$

$$D_4 = 28,0 \text{ mm e } h = 20,0 \text{ mm},$$

tendo, ainda, suas espessuras iguais a 1 mm. O enrolamento para este caso tem as seguintes características:

$$N_e = 4909 \text{ espiras, } D_{\text{fio}} = 0,22 \text{ mm}$$

$$\text{e } U = 18 \text{ volts.}$$

Como se pode notar pela Figura 8, o tempo de abertura cresce de maneira praticamente linear com o aumento da força de abertura. Isto significa que a tensão de vedação, a qual determina a força a ser exercida pela mola, deve ser conhecida com precisão, uma vez que ela interfere diretamente no desempenho da válvula.

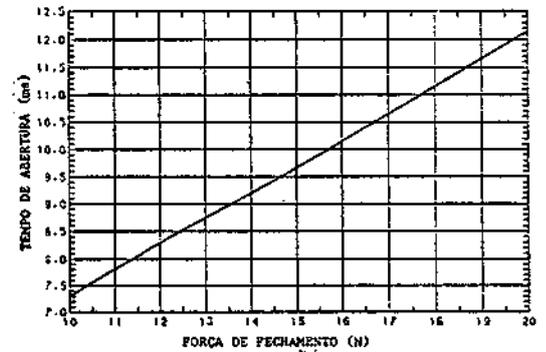


Fig. 8 - Tempo de resposta em função da força de abertura.

##### 6. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Os gráficos apresentados neste trabalho visam mostrar a tendência do comportamento da válvula quando são modificados alguns de seus principais parâmetros. Através desta análise obtêm-se noções sobre quais alterações devem ser introduzidas a um projeto inicial para que se alcance o desempenho desejado.

As faixas de variação dos parâmetros foram escolhidas de forma que se tenha sempre uma válvula possível de ser construída. Assim, por exemplo, as espessuras ficaram entre 0,5 e 4,0 mm porque dimensões fora desta faixa inviabilizariam o projeto da válvula.

Embora o objetivo final deste trabalho não seja otimizar a válvula, verifica-se que é possível, através de comparações obtidas com o uso desta metodologia, obter o melhor conjunto de parâmetros dentro de um conjunto de válvulas com características diferentes.

##### BIBLIOGRAFIA

- OLIVEIRA Jr., I.E.; PEREIRA, E.A.G. Modelagem do funcionamento transitório de uma válvula solenóide de controle. CLCA, 2., Buenos Aires, 13-17 Out., 1986, Sp. (No prelo).
- PEREIRA, E.A.G.; OLIVEIRA Jr., I.E. Análise da força magnética de acionamento de uma eletroválvula de controle. Seminário ADUNESP, 6., Guaratinguetá, SP, 4-9 Nov., 1985. 8p.
- OLIVEIRA Jr., I. E.; PEREIRA, E.A.G. Modelling of a cold gas jet system for satellite attitude control. TELECOM, Rio de Janeiro, RJ, 10-13 Dez., 1985. 8p.
- KRAUS, J.D., CARVER, K.R. Eletromagnetismo. 2. ed., Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1978.

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS .....	<i>xi</i>
LISTA DE TABELAS .....	<i>xii</i>
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u> .....	1
<u>CAPÍTULO 2 - ESTABELECIMENTO DO PROBLEMA E ESCOLHA DA SOLUÇÃO</u> ....	3
2.1 - Estabelecimento da necessidade: a simulação física de SCA ..	3
2.2 - Formulação do problema .....	8
2.2.1 - Entradas .....	8
2.2.2 - Saídas .....	9
2.3 - Análise de possíveis soluções .....	11
2.3.1 - Análise de alguns mancais .....	11
2.3.1.1 - Mancais de rolamento .....	11
2.3.1.2 - Mancais auto-sustentáveis .....	12
2.3.1.3 - Mancais magnéticos .....	12
2.3.1.4 - Mancais pressurizados externamente .....	13
2.3.2 - Suprimento de energia da plataforma .....	15
2.3.3 - Recepção e transmissão de dados .....	17
2.3.4 - Sistema de medida de posição e velocidade da plataforma ..	17
2.4 - Configuração básica .....	20
2.4.1 - Escolha dos mancais .....	21
2.4.2 - Escolha do sistema de medida de posição e velocidade .....	25
2.4.3 - Esquematização da solução adotada .....	26
<u>CAPÍTULO 3 - MODELAGEM DE MANCAIS AEROSTÁTICOS</u> .....	29
3.1 - Escoamento viscoso incompressível laminar entre placas planas paralelas .....	29
3.2 - Escoamento compressível em orifícios .....	34
3.3 - Modelo para mancais aerostáticos radiais alimentados por uma estação central .....	36
3.4 - Modelo para mancais aerostáticos axiais alimentados por um anel de orifícios.....	42
3.5 - Torque de atrito no mancal radial .....	47
3.6 - Torque de atrito no mancal axial .....	48

	<u>Pág.</u>
<u>CAPÍTULO 4 - PROJETO DOS MANCAIS</u> .....	51
4.1 - Projeto do mancal axial .....	51
4.1.1 - Escolha das dimensões do mancal .....	52
4.1.2 - Dimensionamento para carga variável .....	55
4.1.3 - Cálculo da carga e da rigidez .....	59
4.1.4 - Cálculo da vazão .....	60
4.1.5 - Dimensionamento dos bolsões e estabilidade do mancal .....	62
4.2 - Projeto do mancal radial .....	66
4.2.1 - Escolha da geometria .....	66
4.2.2 - O coeficiente de pressão efetiva coaxial .....	69
4.2.3 - Dimensionamento dos orifícios e da folga .....	73
4.2.4 - Cálculo da capacidade de carga e rigidez .....	76
4.2.5 - Cálculo da vazão .....	77
4.2.6 - Dimensionamento dos bolsões radiais .....	79
4.3 - Avaliação do torque perturbador e da vazão nos mancais .....	81
<u>CAPÍTULO 5 - PROJETO DA INSTALAÇÃO PNEUMÁTICA</u> .....	85
5.1 - Características da alimentação dos mancais aerostáticos .....	85
5.2 - Instalação pneumática disponível .....	86
5.3 - Formulação do problema .....	88
5.3.1 - Entradas .....	88
5.3.2 - Saídas .....	88
5.4 - Descrição do circuito projetado .....	89
<u>CAPÍTULO 6 - PROJETO E CONSTRUÇÃO DA MESA DE SIMULAÇÃO</u> .....	93
6.1 - Projeto dos mancais e sua estrutura .....	93
6.1.1 - Trajeto do fluido .....	96
6.1.2 - Mancal axial .....	96
6.1.3 - Mancal radial .....	97
6.1.4 - Materiais empregados .....	99
6.1.5 - Principais tolerâncias de forma .....	101

- c) Precisão do eixo de rotação melhor que  $0,01^{\circ}$  em inclinação e deslocamento radial do eixo (batida radial) na altura do plano de referência menor que  $1 \mu\text{m}$ , em relação a um Sistema de referência fixo no Laboratório.
  - d) Capacidade de sustentação de uma carga variável axial maior que  $800\text{N}$  e de uma carga variável radial maior que  $50\text{N}$ , com rigidez suficiente para manter o eixo de giro dentro das especificações.
  - e) Torque perturbador total menor que  $10^{-4}\text{Nm}$  em velocidades angulares abaixo de  $1 \text{rpm}$  ( $6^{\circ}/\text{s}$ ).
  - f) Nível de vibração menor que  $10^{-2}\text{g}$ , em todas as direções.
- 2) Medida de posição e velocidade da plataforma, dentro de precisões melhores que  $0,05^{\circ}$  (posição) e  $6,5 \times 10^{-4}^{\circ}/\text{s}$  (velocidade), ou seja, dez vezes mais preciso que as especificações do SCA dos satélites de sensoriamento remoto. A frequência de obtenção dessas medidas deve possibilitar simulações em tempo real.
  - 3) Sinais que representam o desempenho do SCA, tais como medidas dos sensores e ação dos atuadores, enviados da plataforma sem qualquer ligação física com o Laboratório.
  - 4) Capacidade de obtenção de parâmetros importantes da mesa, que permitem a avaliação de seu desempenho visando o seu aperfeiçoamento.
  - 5) Modularidade dos diversos subsistemas da mesa para possibilitar alteração de algumas características de desempenho.

- 5) Energia suficiente para as simulações e testes previstos, fornecida em níveis estabilizados de tensão. O uso de anéis de contato deslizante ("slip rings") ou fios condutores provocam torques perturbadores acima do permissível.
- 6) Sinais provenientes de referências celestes simuladas, ou seja, simuladores solar, terrestre e estelar.
- 7) Sinais de comando para alguns equipamentos, enviados do Laboratório sem qualquer vínculo físico (fios ou anéis de contato deslizante) com a plataforma.
- 8) Desbalanceamentos estáticos e dinâmicos
- 9) Vibrações provenientes do solo e do edifício.
- 10) Choques na plataforma durante a sua utilização no Laboratório.
- 11) Poeria e demais impurezas comuns a um ambiente laboratorial não controlado.
- 12) Variações de temperatura e umidade.

#### 2.2.2 - SAÍDAS

- 1) Plataforma com um grau de liberdade (rotação), sem limitação de giro, com as seguintes características:
  - a) Possibilidade de fixação rígida de diversos equipamentos e apêndices.
  - b) Plano de referência com planicidade melhor que 0,05mm e ortogonalidade em relação ao eixo de rotação melhor que 0,003/100. Outra superfície com tolerâncias de forma equivalentes pode ser utilizada. Possibilidade de ajuste da superfície em relação à vertical local (prumo) com precisão de 0,002/100.