

1. Publicação nº 1151 <i>INPE-4279-PRE/1150</i>	2. Versão	3. Data <i>Agosto 1987</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DMC</i>	Programa <i>A8B 508500</i>		
6. Palavras-chave - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>JATOS DE GÁS</i> <i>MANOBRAS DE CONTROLE DE ATITUDE</i> <i>ELETROVÁLVULAS</i> <i>CONTROLE DE ATITUDE</i>			
7. C.D.U.: <i>629.7.062.2</i>			
8. Título <i>SISTEMA DE JATOS DE GÁS FRIO PARA O CONTROLE DE ATITUDE DE SATÉLITE-MODELAGEM E SIMULAÇÃO</i>		10. Páginas: <i>5</i>	
		11. Última página: <i>4</i>	
		12. Revisada por	
9. Autoria <i>Ismael Emílio de Oliveira Júnior</i> <i>Otávio de Mattos Silveiras</i>		<i>Antonio F.M. Neto</i> Antonio F.M. Neto	
Assinatura responsável <i>Ismael E. de Oliveira Jr</i>		13. Autorizada por <i>Marcos Antonio Raupp</i> Diretor Geral	
14. Resumo/Notas <p style="text-align: center;"><i>Este trabalho apresenta um modelo para sistemas de jatos de gás frio empregados no controle de atitude de satélites. O modelo inclui os períodos transitórios de ligamento e desligamento, nos quais a válvula de controle exerce grande influência. A válvula é estudada em detalhe através de uma análise eletromagnética de sua atuação. Do modelo obtêm-se gráficos das grandezas relativas à válvula de controle e do empuxo produzido pelos micromotores do sistema em função do tempo. Apresenta-se a simulação de manobras de dessaturação de rodas de reação e de alteração da atitude do satélite.</i></p>			
15. Observações <i>Este trabalho será submetido no IX Congresso Brasileiro de Eng^o Mecânica - COBEM/87, de 07 a 11 de Dezembro em Florianópolis Santa Catarina.</i>			

SISTEMA DE JATOS DE GÁS FRIO PARA CONTROLE DE ATITUDE DE SATÉLITES - MODELAGEM E SIMULAÇÃO -



ISMAEL EMÍLIO DE OLIVEIRA Jr.
Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE/MCT

OTÁVIO DE MATTOS SILVARES
Escola Politécnica da USP
Escola de Engenharia Mauá - S.P.



SUMÁRIO

Este trabalho apresenta um modelo para sistemas de jatos de gás frio empregados no controle de atitude de satélites. O modelo inclui os períodos transitórios de ligação e desligamento, nos quais a válvula de controle exerce grande influência. A válvula é estudada em detalhe através de uma análise eletromagnética de sua atuação. Do modelo obtêm-se gráficos das grandezas relativas à válvula de controle e do empuxo produzido pelos micromotores do sistema em função do tempo. Apresenta-se a simulação de manobras de dessaturação de rodas de reação e de alteração da atitude do satélite.

INTRODUÇÃO

Um satélite, para cumprir sua missão, deve estar posicionado em relação a uma determinada referência. Normalmente, a precisão deste apontamento é determinada pela missão e sua obtenção depende de um Sistema de Controle de Atitude (SCA).

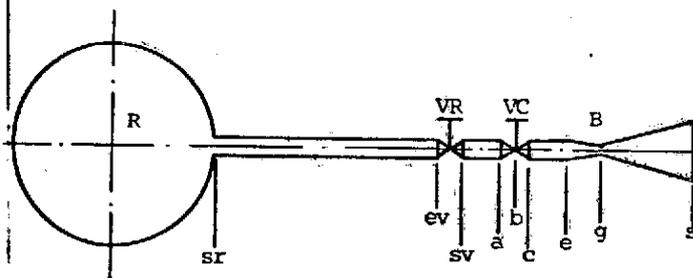
Neste trabalho mostra-se um modelo para um SCA por jatos de gás frio. Neste sistema, a válvula de controle (VC) é uma das principais responsáveis pelos atrasos durante os transitórios, sendo, por isto, detalhada no estudo.

Inicialmente mostra-se o modelo termodinâmico do sistema; em seguida apresenta-se o modelo eletromagnético da VC, obtendo-se os parâmetros de interesse durante os transitórios; finalmente são apresentados exemplos de aplicação típicos.

MODELO TERMODINÂMICO DO SISTEMA

A Fig.1 mostra o esquema básico do SCA. Na modelagem do escoamento do gás são feitas as seguintes hipóteses:

- o gás comporta-se como gás perfeito;
- o escoamento do gás é adiabático com atrito (escoamento de Fanno) entre os pontos (sr) e (ev) e isentrópico entre os pontos (sv) e (a) e entre (c) e (e);
- a pressão de estagnação em (sv) é constante.



R - reservatório
B - bocal
VR - válvula reguladora de pressão
VC - válvula de controle

Fig.1 - Esquema de um SCA por jatos de gás frio.

O coeficiente de pressão da válvula de controle é definido pela relação entre a pressão real e a isentrópica na secção (c), é dado por:

$$\xi_v = (\bar{P}_c / P_c) = (\bar{P}_{oc} / P_{oc}) \quad (1)$$

onde o índice (o) indica propriedade de estagnação e a barra significa propriedade real (não-isentrópica). O bocal é considerado não isentrópico e de rendimento dado por:

$$\eta_b = (\bar{v}_s^2 - v_e^2) / (v_s^2 - v_e^2) \quad (2)$$

que é a relação entre o aumento de energia cinética entre as secções (e) e (s) no caso real e a mesma quantidade no caso isentrópico.

O empuxo produzido pelo bocal é dado por:

$$F_e = \lambda \cdot \bar{m} \cdot \bar{v}_s + (p_s - p_{at}) \cdot A_s \quad (3)$$

onde \bar{m} é a vazão em massa real, p_s e A_s são, respectivamente, a pressão do gás e a área na secção (s) e p_{at} é a pressão ambiente exterior. O fator λ leva em conta o efeito do ângulo da velocidade do gás na saída do bocal e é definido por [4]:

$$\lambda = (1 + \cos \theta) / 2 \quad (4)$$

onde θ é o semi-ângulo do divergente do bocal. A vazão em massa é obtida de:

$$\bar{m} = \bar{\rho}_s \cdot \bar{v}_s \cdot A_s \quad (5)$$

$$\bar{p}_s = p_s / (R_g \cdot \bar{T}_s) \quad (6)$$

sendo $\bar{\rho}_s$ e \bar{T}_s respectivamente a massa específica e a temperatura reais do gás em (s) e R_g a constante do gás. A pressão e a temperatura em (s) no bocal é:

$$p_s = \frac{p_o}{\left(1 + \frac{k-1}{2} M_s^2\right)^{\frac{k}{k-1}}} \quad (7)$$

$$T_s = \frac{T_o}{1 + \frac{k-1}{2} M_s^2} \quad (8)$$

onde as propriedades p_o e T_o são as de estagnação para o bocal isentrópico.

Para uma dada geometria do bocal, o valor de M_s é dado pela expressão:

$$\frac{1}{M_s} \left| \left(\frac{2}{k+1} \right) \left(1 + \frac{k-1}{2} M_s^2 \right) \right|^{\frac{k+1}{2k-1}} = \frac{A_s}{A_g} \quad (9)$$

e a velocidade na saída do bocal isentrópico é dada por:

$$v_s = M_s \cdot \sqrt{k \cdot R_g \cdot T_s} \quad (10)$$

A velocidade real na saída do bocal é dada por:

$$\bar{v}_s = \sqrt{2 c_p (T_e - T_s) + v_e^2} \cdot \eta_b \quad (11)$$

As condições do gás na entrada do bocal são determinadas pelas relações do escoamento de Fanno no tubo entre o reservatório e VR e das condições de operação admitidas para a VR e VC [1].

MODELO DA VÁLVULA DE CONTROLE

Conforme mencionado, a VC é uma das principais responsáveis pelos atrasos do sistema. Para poder modelar esta válvula, será feita uma analogia entre circuitos elétricos e magnéticos, de forma que o fluxo magnético corresponde à corrente, a diferença de potencial magnético equivale à tensão e as relutâncias são análogas às resistências. A Fig.2 mostra a seção transversal da válvula de controle e o caminho percorrido pelo fluxo magnético no interior da válvula.

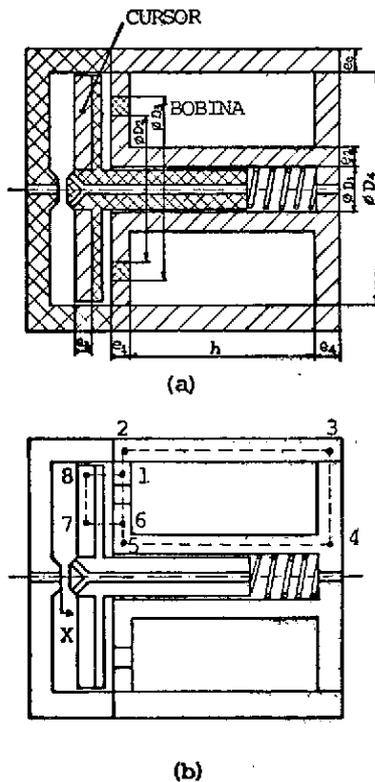


Fig.2 - Válvula de controle: a) seção transversal; b) caminho do fluxo magnético.

Quando não acionada, a válvula permanece fechada devido à ação da mola que pressiona o cursor contra a carcaça. Ao ser acionada, a corrente no solenóide cresce, fazendo aumentar o fluxo magnético e a força magnética que atrai o cursor. Quando esta força supera as forças de resistência, o cursor começa a mover-se, aumentando a área de passagem do fluido. Para o fechamento, um raciocínio análogo é aplicável. A Fig.3 mostra o circuito elétrico análogo ao circuito magnético.

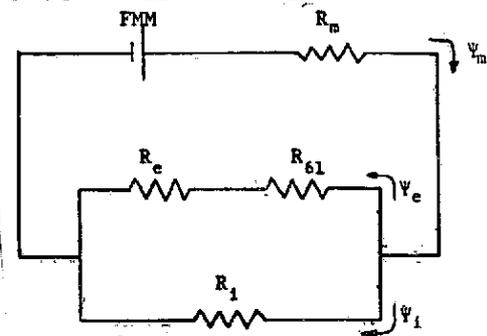


Fig.3 - Circuito elétrico análogo ao circuito magnético.

Para o cálculo do empuxo durante os períodos transitórios, é preciso conhecer a abertura da válvula em cada instante. Para isto, admite-se um modelo termodinâmico para a VC, no qual ela é representada por um bocal convergente-divergente com seção de garganta variável.

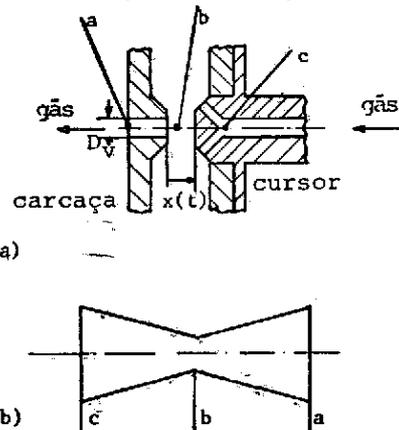


Fig.4 - Válvula de controle: a) principais seções; b) modelo adotado.

Segundo este modelo, a área mínima de passagem do fluido (garganta) é dada por:

$$A_b(t) = H \cdot D_v \cdot x(t) \quad (12)$$

onde D_v pode ser visto na Fig.4 e $x(t)$ é a abertura da válvula, calculada por meio de um balanço de forças no cursor:

$$m_c \cdot \ddot{x} = F_m - F_{m0} - F_r \quad (13)$$

sendo F_m a força magnética, F_r as forças de resistência e F_{m0} a força da mola.

A força da mola é obtida de:

$$F_{m0} = F_{ab} + k_m \cdot x \quad (14)$$

sendo F_{ab} a força de mola quando a válvula está fechada e k_m a constante da mola.

Como força de resistência, considera-se apenas a força de pressão do gás, devida à diferença entre as pressões nos pontos (a) e (c), resultando:

$$F_r = F_p = (p_a - p_c) \cdot A_v \quad (15)$$

sendo A_v a seção de escoamento na válvula. O cálculo da força magnética é mais complexo que o das outras forças. Admite-se inicialmente que a energia magnética do circuito esteja acumulada no entreferro. Obtém-se a força magnética de [3]:

$$F_m = \left(\frac{N_c \cdot I \cdot Q}{R_{eq}} \right)^2 \frac{1}{2\mu_0 S_{eq}} \quad (16)$$

Nesta equação, N_e é o número de espiras do solenóide e I é a corrente que o percorre; R_{eq} é a relutância equivalente do circuito e S_{eq} é uma área média na região do entreferro; μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo e Q é uma variável auxiliar que depende das relutâncias.

Na Eq.(16), tanto Q quanto R_{eq} dependem de corrente, cujo cálculo é feito por meio de um estudo do circuito elétrico da bobina. Este circuito é do tipo R-L com indutância variável e sua equação característica é:

$$U = Z \cdot I + I \cdot \frac{dL_c}{dt} + L_c \cdot \frac{dI}{dt} \quad (17)$$

A indutância é dada por:

$$L_c = \frac{N_e^2}{R_{eq}} \quad (18)$$

verifica-se que a indutância é função apenas da corrente e do entreferro, ou seja:

$$L_c = L_c(x, I) \quad (19)$$

Esta relação pode ser substituída na Eq.(17) para obter uma expressão que fornece dI/dt em função dos parâmetros conhecidos. A expressão obtida forma um sistema de equações diferenciais com Eq.(13), sua solução foi obtida com o uso do método de Runge-Kutta combinado com o método preditor-corretor, ambos de 4ª ordem.

Da solução destas equações, obtém-se o valor de $x(t)$, que substituído na Eq.(12) fornece a área mínima de passagem do gás. Com este valor obtém-se o empuxo produzido pelo bocal durante o transitório.

EXEMPLOS

O modelo foi aplicado a dois tipos de manobra do satélite usando o sistema de jatos de gás.

A primeira delas, de dessaturação de rodas de reação, aplica-se quando uma destas rodas, usadas para controle fino de atitude, atinge sua velocidade máxima. Neste estado diz-se que a roda está saturada e é necessário reduzir sua velocidade. Para isto emprega-se o jato de gás para 'segurar' o satélite enquanto a roda é desacelerada.

A outra manobra, de alteração de atitude, aplica-se quando se deseja que o satélite de sensoramento remoto mude de orientação para obter imagens de outro ponto da superfície terrestre.

Para os exemplos, admitiram-se as seguintes características para a VC e para o satélite.

Características da Válvula de Controle:

Material: aço 430

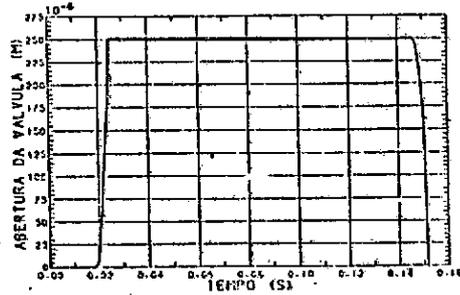
$D_1 = 4 \text{ mm}$	$e_1 = e_2 = e_3 = e_4 = 10 \text{ mm}$
$D_2 = 12 \text{ mm}$	$e_c = 0,5 \text{ mm}$
$D_3 = 21 \text{ mm}$	$h = 20 \text{ mm}$
$D_4 = 26 \text{ mm}$	$F_{ab} = 6 \text{ N}$
$K_m = 11500 \text{ N/m}$	$U = 12 \text{ V}$
$Z = 76,127 \Omega$	

Características do satélite:

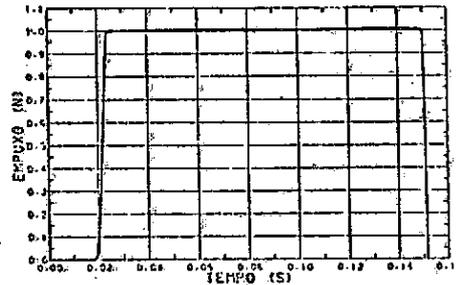
Momento de inércia: 100 Kg.m^2
 Ângulo de giro na correção de atitude: 60°
 Momento de inércia da roda: $0,017 \text{ Kg.m}^2$
 Velocidade Inicial da roda: 3500 rpm
 Velocidade final da roda: 4 rpm

A Fig.5 mostra o resultado da simulação do comportamento da válvula de controle durante um transitório a partir de $t=0$ até ser desenergizada. A Fig.5.a mostra a abertura da válvula $x(t)$, 5.b mostra o empuxo provocado no satélite, 5.c mostra as forças no cursor da válvula e 5.d, 5.e e 5.f mostram as características

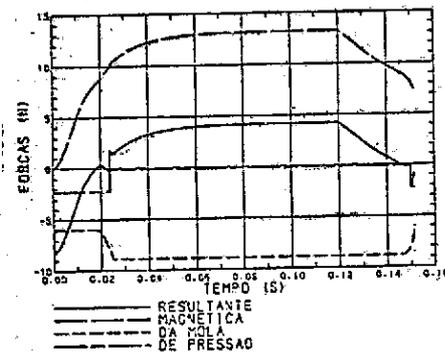
elétricas da válvula durante o transitório, respectivamente indutância, corrente e relutância.



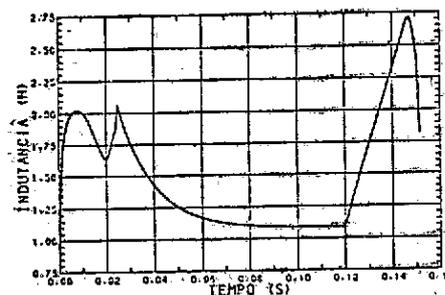
a) Abertura da válvula



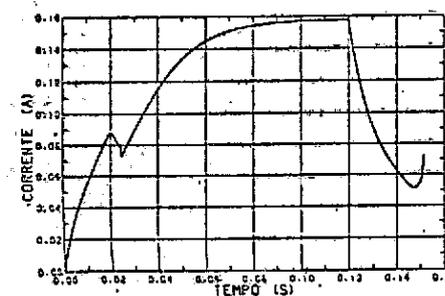
b) Empuxo do jato



c) Forças na válvula

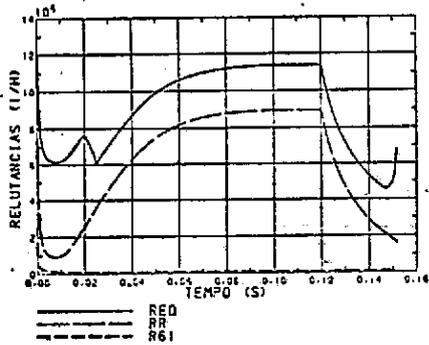


d) Indutância da válvula



e) Corrente elétrica no solenóide

Fig.5 - Curvas para a eletroválvula (contínua)



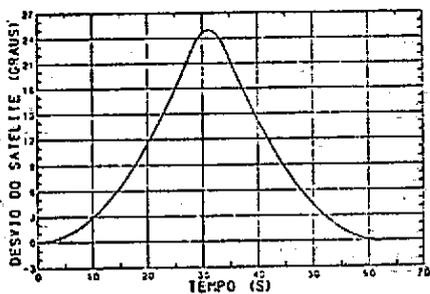
f) Relutâncias da válvula

Fig. 5 - Curvas para a eletroválvula.

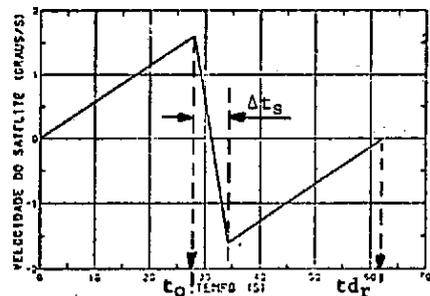
A manobra de dessaturação de roda de reação é efetuada como descrito a seguir: no instante $t=0$ inicia-se a desaceleração da roda; em $t=t_0$ acionam-se os micromotores que produzem um torque contrário ao da roda; em $t=t_0 + \Delta t_s$ os micromotores são desligados; em $t=td_r$ a roda é desligada. Neste instante ela deve estar com velocidade próxima de zero e o satélite deve estar com velocidade angular nula e apontado para a referência desejada.

A Fig. 6 mostra a velocidade angular e o desvio angular do satélite durante a operação de dessaturação da roda de reação com o uso dos jatos de gás.

A manobra de alteração de atitude se processa da seguinte maneira: no instante t_0 acionam-se os motores que giram o satélite em um sentido; em t_1 estes motores são desligados; em t_2 acionam-se os motores opostos, que tendem a frear a rotação do satélite; em t_3 são desligados estes motores e o satélite deve estar com rotação nula após girar o ângulo desejado.



a) Posição angular do satélite em função do tempo

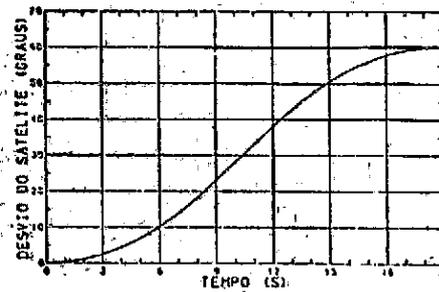


b) Velocidade angular do satélite em função do tempo

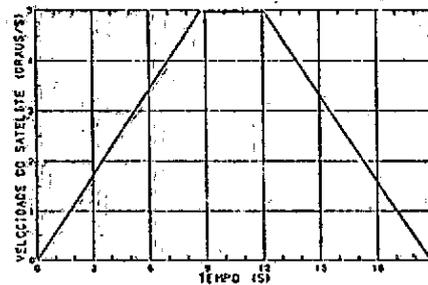
Fig. 6 - Manobra de dessaturação da roda de reação do satélite.

O efeito do transitório da válvula foi avaliado simulando-se as manobras com uma válvula ideal (sem transitório). Os tempos obtidos foram aplicados na simulação com a válvula real obtendo-se o ângulo e a velocidade angular residual, para a manobra de dessaturação obtém-se respectivamente $-5,6 \times 10^{-3}$ graus e $3,2 \times 10^{-3}$

graus/s; para uma manobra de alteração de atitude de 60 graus obtém-se uma diferença de 0,085 graus e a velocidade angular final é nula.



a) Posição angular do satélite em função do tempo



b) Velocidade angular do satélite em função do tempo

Fig. 7 - Manobra de alteração de atitude do satélite.

CONCLUSÕES

Através do modelo desenvolvido podem-se calcular os parâmetros de interesse em todos os instantes das manobras, inclusive durante os transitórios de acionamento e desacionamento. Com este modelo pode-se programar o computador de bordo do satélite de forma a se efetuar manobras mais precisas, com conseqüente economia de tempo e principalmente de propelente.

REFERÊNCIAS

- [1] Oliveira Jr., I.E., Modelagem do Funcionamento de um Sistema de Jatos de Gás Frio para Controle de Atitude de Satélites. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, São Paulo, Escola Politécnica da USP, Mar. 1987.
- [2] Shapiro, A.H., Compressible Fluid Flow, John Wiley and Sons, Arlington, EUA, 1953.
- [3] Kraus, J.D.; Carver, K.R., Eletromagnetismo. 2 ed. Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1978.
- [4] Oliveira Jr., I.E., Modelagem Matemática, Otimização e Análise de Sistemas de Jatos de Gás Frio para Controle de Atitude de Satélites. Relatório INPE-3638-RPI/138, São José dos Campos, 1985.

ABSTRACT

This paper presents a model for cold gas jet systems employed in Satellite Attitude Control. The model includes the transient flow of the gas. During the transient the control valve plays an important role in defining the time delay of the S.A.C. The valve is studied in detail through an electromagnetic analysis of its operation. The response of the system is represented through curves of its main parameter as a function of time. The model is applied to the simulation of the manoeuvres of reaction wheel dessaturation and of satellite attitude change.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS

**PROPOSTA PARA
 PUBLICAÇÃO**

- DISSERTAÇÃO
- TESE
- RELATÓRIO
- OUTROS

TÍTULO

SISTEMA DE JATOS DE GÁS FRIO PARA O CONTROLE DE ATITUDE DE SATÉLITES-MODELAGEM E SIMULAÇÃO

IDENTIFICAÇÃO

AUTOR(ES)

Ismael Emílio de Oliveira Júnior 4279-150
 Otávio de Mattos Silveiras

ORIENTADOR

CO-ORIENTADOR

DISS. OU TESE

DIVULGAÇÃO

- EXTERNA INTERNA RESTRITA COBEM
- CONGRESSO REVISTA OUTROS

LIMITE

DEFESA

CURSO

ORGAO

— / — / —

— / — / —

— / — / —

DMC

NOME DO REVISOR

Antonio Felix Martins Neto

NOME DO RESPONSÁVEL

WILSON CUSTÓDIO CARNEIRO
 Chefe do Departamento de
 Mecânica Espacial e Controle

REV. TÉCNICA

RECEBIDO

DEVOLVIDO

ASSINATURA

29,5,87

29,5,87

x Antonio Felix Martins Neto

APROVADO

SIM

NÃO

DATA

29,5,87

ASSINATURA

W. C. Silveira

APROVAÇÃO

REV. LINGUAGEM

Nº

PRIOR

RECEBIDO

NOME DO REVISOR

142

1

29,5,87

Otávio de Mattos Silveiras

PÁG

29,5,87

ASSINATURA

W. C. Silveira

OS AUTORES DEVEM MENCIONAR NO VERSO INSTRUÇÕES ESPECÍFICAS, ANEXANDO NORMAS, SE HOUVER

RECEBIDO

DEVOLVIDO

NOME DA DATILÓGRAFA

— / — / —

DATILOGRAFIA

Nº DA PUBLICAÇÃO

4279 PRB/150

CÓPIAS

Nº DISCO

LOCAL

AUTORIZO A PUBLICAÇÃO

SIM

NÃO

— / — / —

DIRETOR

OBSERVAÇÕES E NOTAS