

1. Publicação nº <i>INPE-4140-PRE/1048</i>	2. Versão	3. Data <i>Março, 1987</i>	5. Distribuição ☐ Interna ☒ Externa ☐ Restrita
4. Origem <i>EME</i>			Programa
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>ELETROVÁLVULA</i> <i>CAMPO MAGNÉTICO</i> <i>VÁLVULA DE CONTROLE</i>			
7. C.D.U.: 629.7.062.2			
8. Título <i>MODELAGEM ELETROMAGNÉTICA DE UMA VÁLVULA DE CONTROLE</i>		10. Páginas: 13	
		11. Última página: 12	
		12. Revisada por	
9. Autoria <i>Eduardo Augusto Gomes Pereira</i> <i>Ismael Emílio de Oliveira Júnior</i>		 <i>Antonio Felix Martins Neto</i>	
		13. Autorizada por	
Assinatura responsável		 <i>Marco Antonio Raupp</i> Diretor Geral	
14. Resumo/Notas <i>Este trabalho mostra a modelagem feita para uma eletroválvula de controle empregada em sistemas de controle de atitude de satélites. Esta modelagem dá ênfase aos períodos transitórios de abertura e fechamento que determinam o tempo de resposta do sistema durante os quais é necessário calcular as grandezas magnéticas e a corrente elétrica, as quais são variáveis com o tempo. Um exemplo é resolvido e são apresentados os gráficos das grandezas mencionadas e mais o da abertura da válvula em função do tempo.</i>			
15. Observações <i>Trabalho aceito para apresentação no 1º Simpósio Franco-Brasileiro sobre Cálculo de Campos Elétricos e Magnéticos, março de 1987, em Florianópolis - SC, Brasil.</i>			

ABSTRACT

This paper presents the modelling developed for a control electrovalve employed in satellite attitude control systems. This modelling emphasizes the on and off transient periods which determine the system response time during which it is necessary to calculate the magnetic parameters and the electric current that are variable with time. A example is solved, and the graphics of the mentioned parameters and the graphic of the valve opening as a function of time are presented.

MODELAGEM ELETROMAGNÉTICA DE UMA ELETROVÁLVULA DE CONTROLE

1. INTRODUÇÃO

Devido à alta precisão e acuidade necessárias aos sistemas de controle de apontamento (atitude) de satélites, cada um de seus componentes deve ser estudado de forma a conhecer o melhor possível seu funcionamento.

Neste trabalho é apresentado um modelo para a eletroválvula de controle, a principal responsável pelos transitórios do sistema. Este modelo utiliza campos magnéticos variantes com o tempo, cujo cálculo é mostrado nos próximos itens.

2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

O funcionamento da eletroválvula pode ser entendido com o auxílio da Figura 1.

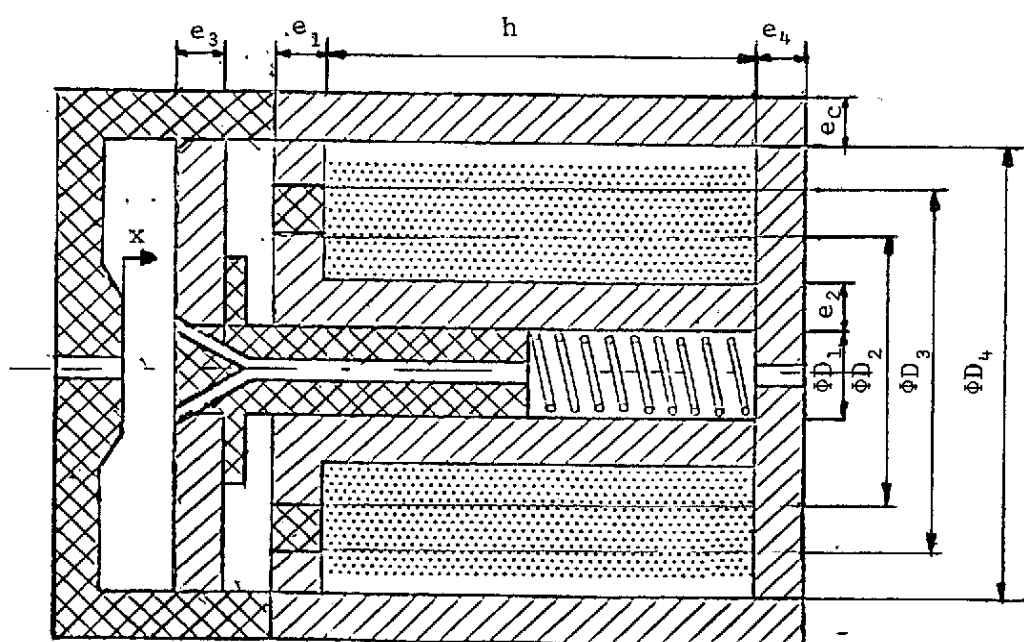


Fig. 1 - Esquema da eletroválvula.

Quando desligada, a ação da mola sobre o cursor mantém a válvula fechada. Ao ser acionada, surge uma força magnética sobre o cursor que, ao superar o esforço imposto pela mola, provoca o deslocamento daquele, abrindo a válvula. Ao ser retirada dos terminais do solenóide a tensão elétrica responsável pelo acionamento, a força magnética decresce e quando seu valor é superado pela força da mola inicia-se o fechamento da válvula.

Considerando que a posição do cursor determina o estado da válvula, o transitório desta última pode ser descrito conhecendo a dinâmica do atuador.

Fazendo um balanço de forças no cursor obtêm-se:

$$mc.\ddot{x} = F_m + F_f, \quad (1)$$

onde mc é a massa do cursor, $\ddot{x}$ a derivada segunda do deslocamento em relação ao tempo, F_m a força magnética e F_f a força de fechamento exercida pela mola. Esta última é dada por:

$$F_f = K.(x_0 + x), \quad (2)$$

sendo K a constante da mola e x_0 seu deslocamento inicial.

O modelo utilizado para o cálculo da força magnética é apresentado a seguir.

3. MODELO ELETROMAGNÉTICO

3.1 - EQUACIONAMENTO DA FORÇA MAGNÉTICA

Para o cálculo da força magnética utilizou-se a analogia entre circuitos elétricos e magnéticos. Nesta analogia o fluxo magnético, a relutância e a diferença de potencial magnético correspondem, respectivamente, à intensidade de corrente, à resistência e à tensão elétrica.

A Figura 2 mostra o circuito magnético de acionamento e o circuito elétrico equivalente.

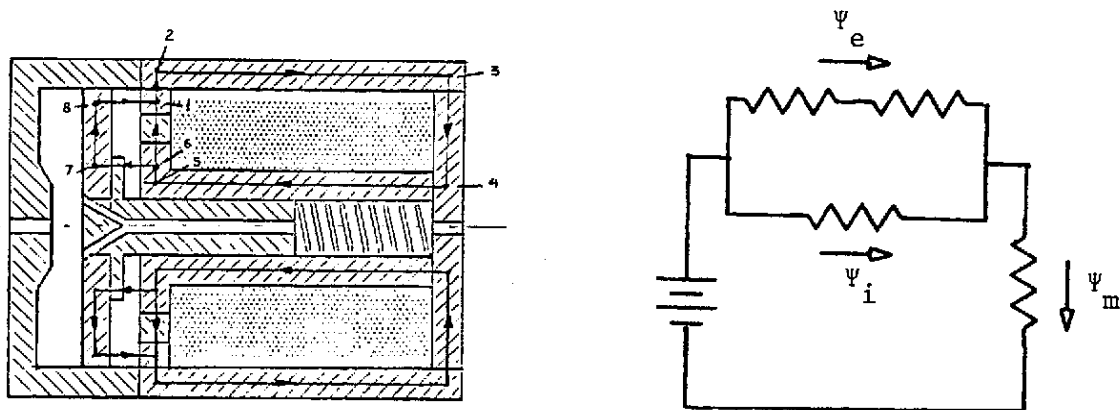


Fig. 2 - Circuito magnético e circuito elétrico equivalente.

Foram feitas as seguintes hipóteses para o equacionamento da força magnética:

- não há fugas no circuito magnético;
- os fluxos magnéticos seguem os caminhos mostrados na Figura 2;
- a energia magnética acumulada no entreferro é muito maior que a do resto do circuito;
- a densidade de fluxo magnético possui um valor médio para a região situada no caminho 1-2-3-4-5-6, de nome B_m , e outro para a região do caminho 6-7-8-1, denominado B_{61} .

Através da Figura 2 nota-se que na aplicação da analogia foram feitas as seguintes considerações:

- R_t é a relutância total do trecho 1-2-3-4-5-6;

- a relutância do trecho 6-7-8-1 foi dividido em duas partes: uma delas calculada no entreferro, R_e , e a outra no material ferro magnético, R_{61} ;
- o material de coroa circular compreendida entre os diâmetros D_2 e D_3 , por ser não-ferromagnético, foi chamado "isolante" e pos sui relutância R_i , passando através deste trecho um fluxo Y_i .

De acordo com o princípio dos trabalhos virtuais, a força magnética entre os dois pólos de um entreferro é calculada por:

$$F = \frac{dW_m}{dz} , \quad (3)$$

sendo W_m a energia magnética do circuito, z o comprimento do entreferro ($z = x_{\max} - x$) e $x_{\max}$ o deslocamento máximo do cursor. A energia magné tica acumulada no entreferro é dada por:

$$W_m = \frac{Y_e^2 \cdot z}{2\mu_0 \cdot \text{Seq}} , \quad (4)$$

onde Seq é uma área equivalente que leva em conta os dois entreferros existentes: um entre os pontos 8 e 1 e o outro entre os pontos 6 e 7.

Efetuada a substituição da equação 4 na 3 encontra-se:

$$F_m = \frac{Y_e^2}{2\mu_0 \cdot \text{Seq}} . \quad (5)$$

Da Figura 2 verifica-se;

$$Y_m = Y_e + Y_i, \quad (6)$$

Além disto, é válida a relação:

$$Y_e \cdot (R_e + R_i) = Y_i \cdot R_i. \quad (7)$$

Definindo uma grandeza auxiliar Q como:

$$Q = \frac{R_i}{R_i + R_e + R_{61}}, \quad (8)$$

e usando as expressões 6 e 7, chega-se a:

$$Y_e = Q \cdot Y_m. \quad (9)$$

O fluxo magnético Y_m é dado por:

$$Y_m = \frac{DPM}{Req}, \quad (10)$$

sendo Req a relutância equivalente do sistema, calculada pela expressão:

$$Req = R_r + \frac{R_i \cdot (R_e + R_{61})}{R_i + R_e + R_{61}}, \quad (11)$$

e sendo a diferença de potencial magnético definida como:

$$DPM = Ne \cdot I, \quad (12)$$

onde Ne é o número de espiras do solenóide e I é a corrente que o percorre. Logo,

$$Y_m = \frac{Q \cdot Ne \cdot I}{Req}, \quad (13)$$

Assim, a equação 5 toma a forma:

$$F_m = \frac{1}{2\mu_0 \cdot Seq} \cdot \left[\frac{Q \cdot Ne \cdot I}{Req} \right]^2. \quad (14)$$

As relutâncias podem ser calculadas a partir de sua fórmula geral:

$$R = \int \frac{dl}{\mu \cdot S}, \quad (15)$$

onde dl é a distância percorrida pelo fluxo, S é a área transversal e μ é a permeabilidade do material no trecho dl .

Nos meios não-ferromagnéticos foi adotado o valor de permeabilidade do vácuo, μ_0 , e nos ferromagnéticos, μ_m e μ_{61} , que são valores calculados com base nas densidades de fluxo magnético médias B_m e B_{61} , de acordo com o trecho.

3.2 - EQUACIONAMENTO DA CORRENTE

Como pode ser verificado através da equação 14, para obter a força magnética é necessário o conhecimento, a cada instante, da corrente no solenóide. Esta grandeza é calculada pela resolução do circuito R-L com indutância variável e tem a seguinte equação característica:

$$U = R \cdot I + L_c \cdot \dot{I} + I \cdot \dot{L}_c. \quad (16)$$

Nesta equação, R representa a resistência do solenóide e L_c sua indutância. Uma vez que esta última é, por definição:

$$L_c = \frac{N_e \cdot Y_m}{I} \quad (17)$$

e lembrando as equações 10 e 12, fica-se com:

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

Verifica-se, portanto, que L_c é função apenas de R_{eq} que, por sua vez, é função da posição do cursor e da intensidade de corrente. Então pode-se escrever:

$$\frac{dL_c}{dt} = \frac{\partial L_c}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial L_c}{\partial I} \frac{dI}{dt} \quad (19)$$

Desenvolvendo as derivadas parciais e definindo as seguintes grandezas auxiliares:

$$G1 = 1 - \frac{K_r \cdot N_e \cdot I \mu m'}{S_m \cdot R_{eq}^2 \mu m^2} \quad (20)$$

$$G2 = \frac{K61 \cdot Q^2 \cdot N_e \cdot I \cdot \mu61'}{S61 \cdot R_{eq} \mu61^2} \quad (21)$$

$$G3 = \frac{1}{R_i} + \frac{Q}{R_{eq} \cdot G1} \quad (22)$$

onde K_r e $K61$ são constantes ligadas à geometria da válvula e $\mu m'$ e $\mu61'$ são as derivadas de μ em relação a B nos pontos B_m e $B61$, chega-se a uma expressão para dL_c/dt que, substituída na equação 19, fornece, após isolar dI/dt :

$$\dot{I} = \frac{R_{eq}}{N_e^2} \cdot \frac{R_{eq} \cdot G1 \cdot (R_i - G2) - Q \cdot R_i \cdot G2}{R_{eq} \cdot (G1 - 1) \cdot (R_i - G2) - Q \cdot R_i \cdot G2} \cdot \left[U - R \cdot I + \right. \\ \left. - \frac{N_e^2 \cdot I \cdot Q}{\mu_0 \cdot S_{eq} \cdot R_{eq}^2 \cdot G1 \cdot (1 - G2 \cdot G3)} \cdot \dot{x} \right] \quad (23)$$

4. SOLUÇÃO DO MODELO

Como se pode notar, as expressões que descrevem o comportamento do modelo proposto devem ser resolvidas simultaneamente devido ao acoplamento entre as equações 1 e 23. Considerando que os métodos de solução de sistemas de equações diferenciais trabalham com equa

ções de primeira ordem, foi necessário reduzir a ordem da relação 1 por meio da seguinte mudança de variáveis:

$$\dot{x} = v_c \quad (24)$$

e

$$\dot{v}_c = \frac{1}{mc} \cdot (F_m - F_f), \quad (25)$$

esta última sendo a própria equação 1 já com a nova variável.

Para a resolução do sistema de equações apresentado acima, foram empregados métodos numéricos, procedendo-se da seguinte maneira:

- i - cálculo dos três primeiros pontos através do método de Runge-Kutta de quarta ordem;
- ii - estimativa do novo ponto usando o preditor de Milne de quarta ordem;
- iii - correção deste valor por meio do corretor de Hamming de quarta ordem.

Os dois últimos passos repetem-se utilizando os três pontos mais recentes até chegar ao fim da integração.

A técnica empregada demonstrou uma precisão semelhante àque-la obtida com o uso somente do método de Runge-Kutta, porém propiciando um número menor de iterações para chegar ao ponto integrado.

O valor das densidades de fluxo magnético necessárias para os cálculos da relutâncias é obtido iterativamente através do emprego do método de localização de zeros denominado "Regula Falsi", e a curva característica do material (B x H) foi ajustada por meio de polinômios suavizados de terceiro grau (em Inglês o método é chamado "spline").

5. RESULTADOS

Para verificar a consistência do modelo foram resolvidos exemplos genéricos. Embora as dimensões das válvulas não fossem otimizadas, os tempos transitórios obtidos estão em concordância com as características de válvulas existentes para a mesma aplicação.

A Figura 3 mostra a curva de magnetização do material, além das curvas em função do tempo da força magnética, da intensidade de corrente, da densidade de fluxo magnético, da indutância e da posição do cursor. Para o exemplo mostrado, as principais características da válvula são:

$D1 = 4\text{mm}$; $D2 = 12\text{mm}$; $D3 = 21\text{mm}$; $D4 = 26\text{mm}$;

$h = 20\text{mm}$; $e1 = 1\text{mm}$; $e2 = 1\text{mm}$; $e3 = 1\text{mm}$;

$e4 = 1\text{mm}$; $ec = 0,5\text{ mm}$; $U = 12\text{V}$; $mc = 15\text{g}$;

$z_{\text{max}} = 0,5\text{mm}$; $z_{\text{min}} = 0,25\text{mm}$; $K = 11500\text{ N/m}$;

$F_f = 6\text{N}$; $R = 76,127\text{ohm}$.

O material ferromagnético desta válvula é o aço 430.

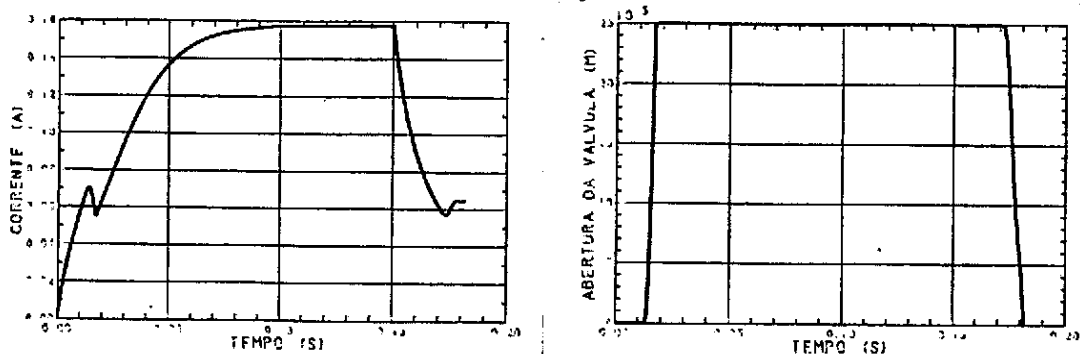
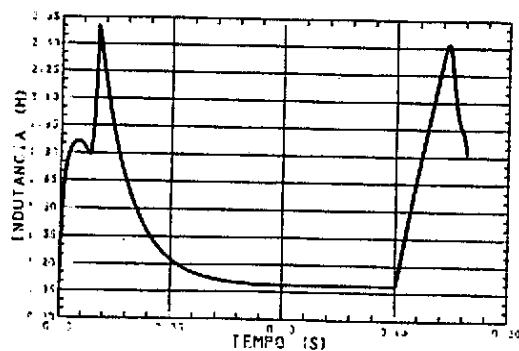
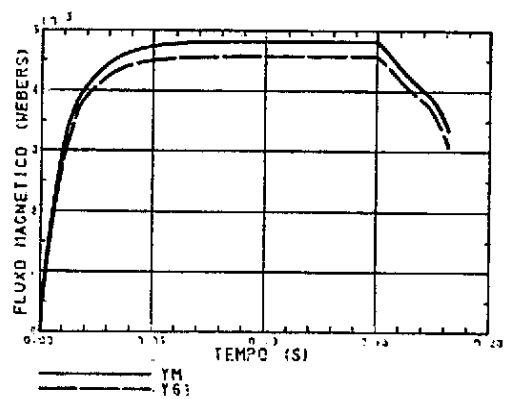
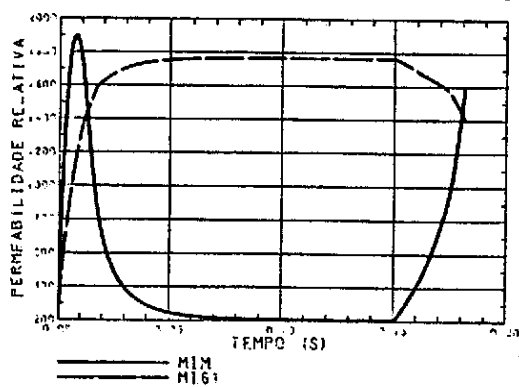
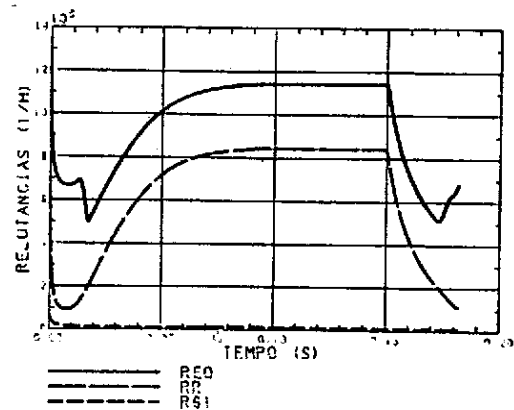
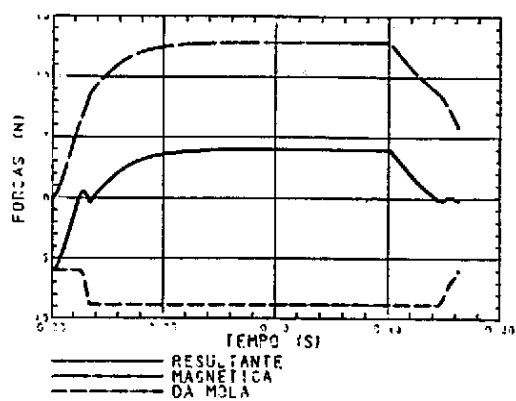


Fig. 3-- Curvas obtidas para a válvula.



continuação

Fig. 3 - Curvas obtidas para a válvula.

Para o exemplo mostrado, como se pode notar, a indutância apresenta variações significativas, não podendo ser considerada constante, o que justifica o equacionamento desenvolvido para o cálculo da corrente.

Em etapa posterior, deverão ser construídos protótipos específicos, de maneira a confirmar a validade deste equacionamento. Assim, a aplicação deste modelo proporciona um avanço na análise e no desenvolvimento do projeto de eletroválvula monoestáveis.

BIBLIOGRAFIA

- KRAUS, J.D.; CARVER, K.R. Eletromagnetismo, 2 Ed. Rio de Janeiro, Ed. Guanabara Dois, 1978.
- PEREIRA, E.A.G.; OLIVEIRA Jr., I.E. Análise da Força Magnética de Aci^onamento de uma Eletroválvula de Controle. Seminário ADUNESP, 6., Guaruatingetã, SP, 4-9 Nov., 1985. 8p.
- OLIVEIRA Jr., I.E.; PEREIRA, E.A.G. Modelling of a Cold Gas Set System for Satellite Attitude Control. Proceedings of the Conference TELECON' 85, pp 350-353, Rio de Janeiro.
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM). Metals Handbook, 8 ed., OHID, 1976, V.1.
- CARNAHAN, B.; LUTHER, H.A.; WILKES, J.O. Applied Numerical Methods. N. York, John Wiley and Sons Inc., 1979.
- HAMMING, R.W. Numerical Methods for Scientists and Engineers. N.York, PA, Mc. Graw Hill Book Company Inc., 1962.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS

PROPOSTA PARA PUBLICAÇÃO

DATA
17/12/86

483

IDENTIFICAÇÃO	TÍTULO	
	MODELAGEM ELETROMAGNÉTICA DE UMA ELETROVÁLVULA DE CONTROLE	
	AUTORIA	PROJETO/PROGRAMA
	Eduardo A.G. Pereira Ismael E. Oliveira Júnior	A81
		DIVISÃO
		DGC
		DEPARTAMENTO
		DMC
DIVULGAÇÃO ☒ EXTERNA ☐ INTERNA		MEIO: 1º Simp. Franco-Bras. sobre Cal culo de Campos Elet. e Mag.

REVISÃO TÉCNICA	REVISOR TÉCNICO	APROVADO: ☐ SIM ☐ NÃO ☐ VER VERSO	
	A.F. Martins Neto	DATA	CHEFE DIVISÃO
	RECEBI EM: _____ REVISADO EM: _____	APROVADO: ☐ SIM ☐ NÃO ☐ VER VERSO	
	OBSERVAÇÕES: ☐ NÃO HÁ ☐ VER VERO	DATA	
	DEVOLVI EM: _____	CHEFE DEPARTAMENTO	
	ASSINATURA		

REVISÃO DE LINGUAGEM	Nº: 470	PRIORIDADE: 1	O(S) AUTOR(ES) DEVE(M) MENCIONAR NO VERSO, OU ANEXAR NORMAS E/OU INSTRUÇÕES ESPECIAIS	DATILOGRAFIA
	DATA: 22.12.86			
	REVISADO ☐ COM ☐ SEM	CORREÇÕES ☐ VER VERO		
	POR: Maria do Carmo S. Soares	ASSINATURA		
	23-12-86			
	DATA			

PARECER	
FAVORÁVEL: ☐ SIM ☐ NÃO	☐ VER ☐ VERSO
DATA	RESPONSÁVEL/PROGRAMA

EM CONDIÇÕES DE PUBLICAÇÃO EM: _____	AUTOR RESPONSÁVEL
--------------------------------------	-------------------

AUTORIZO A PUBLICAÇÃO: ☐ SIM ☐ NÃO	
DIVULGAÇÃO ☐ INTERNA ☐ EXTERNA	
MEIO: _____	
OBSERVAÇÕES: _____	
DATA	DIRETOR

SEC	PUBLICAÇÃO: 9140-PRB/W98	PÁGINAS: _____	ÚLTIMA PÁGINA: _____
	CÓPIAS: _____	TIPO: _____	PREÇO: _____