



PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS

AUTORES  
AUTHORS

Câmara de vácuo  
Propulsor iônico  
Simulação espacial

AUTORIZADA POR/AUTHORIZED BY

*Ludwig*  
Gerson Otto Ludwig

AUTOR RESPONSÁVEL  
RESPONSIBLE AUTHOR

*[Signature]*  
Gilberto Marrega Sandonato

DISTRIBUIÇÃO/DISTRIBUTION

INTERNA / INTERNAL  
 EXTERNA / EXTERNAL  
 RESTRITA / RESTRICTED

REVISADA POR / REVISED BY

*[Signature]*  
Edson Del Bosco

CDU/UDC

533.9

DATA / DATE

Outubro, 1989

TÍTULO/TITLE	PUBLICAÇÃO Nº PUBLICATION NO
	LNPE-4997-PRE/1559
<p>PROJETO CONCEITUAL DE UMA CÂMARA DE VÁCUO PARA O DESENVOLVIMENTO DE PROPULSORES IÔNICOS EM SIMULAÇÃO DE AMBIENTE ESPACIAL</p>	
AUTORES/AUTHORSHIP	Gilberto Marrega Sandonato

ORIGEM  
ORIGIN

LAP

PROJETO  
PROJECT

PION

Nº DE PAG.  
NO OF PAGES

07

ULTIMA PAG.  
LAST PAGE

05

VERSÃO  
VERSION

Nº DE MAPAS  
NO OF MAPS

RESUMO-NOTAS/ABSTRACT-NOTES

Este trabalho relata o projeto conceitual de uma câmara de vácuo a ser utilizada no desenvolvimento de propulsores iônicos em simulação de ambiente espacial.

OBSERVAÇÕES/REMARKS

Trabalho apresentado no X CBRVIC, 24-26 de julho, 1989  
São José dos Campos, SP.

ABSTRACT

*This paper describes the conceptual project of a vacuum chamber intended to be used in the space simulation for ion thrusters development.*

PROJETO CONCEITUAL DE UMA CÂMARA DE VÁCUO PARA O DESENVOLVIMENTO DE PROPULSORES IÔNICOS EM SIMULAÇÃO DE AMBIENTE ESPACIAL

G.M. SANDONATO

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE

Foi projetada uma câmara de vácuo visando o desenvolvimento de propulsores iônicos que utilizam gases nobres como propelente. Esta câmara apresenta diâmetro de 120cm e comprimento total de 250cm e poderá receber até três bombas difusoras com velocidade nominal de bombeamento de 2000l/s (ar a 20°C). De forma a melhorar o desempenho em bombeamento foi previsto um painel criogênico que poderá fornecer velocidades de bombeamento acima de 60.000l/seg, se empregado hélio líquido como refrigerante. Este trabalho trata então da estimativa da pressão de trabalho da câmara bem como a determinação da influência do gás residual sobre o feixe iônico.

#### 1 - INTRODUÇÃO

O Laboratório Associado de Plasma (LAP) do INPE vem desenvolvendo propulsores iônicos do tipo bombardeio eletrônico em gases nobres, visando a sua possível utilização no controle de atitude e correção de órbita de satélites geoestacionários.

Um protótipo de propulsor com câmara de ionização de 7cm de diâmetro e 14cm de comprimento, utilizando argônio como propelente vem sendo testado desde 1985 (1).

A câmara de vácuo utilizada nos testes preliminares deste propulsor, conta com um diâmetro interno de 60cm e um comprimento de 150cm, contando com um sistema composto por uma bomba difusora com velocidade nominal de 2000l/seg (com anteparo refrigerado a nitrogênio líquido) e uma bomba rotativa de 40m<sup>3</sup>/h. Sendo esta câmara cedida em caráter provisório, surgiu a necessidade da construção de uma nova câmara de testes. Esta câmara foi então projetada de forma a atender as necessidades inerentes ao desenvolvimento de propulsores iônicos. Os requisitos básicos exigidos para uma câmara com tal finalidade, foram os seguintes:

- Sistema de vácuo com grande velocidade de bombeamento de forma a reduzir ao máximo a pressão de trabalho no interior da câmara de vácuo.

- Versatilidade de maneira a permitir a execução de testes de componentes e introdução de diagnósticos com facilidade.

- Grande volume útil para evitar possíveis efeitos de contorno das paredes internas sobre o feixe iônico e também para facilitar o alojamento de todo o sistema de propulsão iônica (fonte de íons, sistema de armazenamento e alimentação de propelente e fontes de alimentação elétrica).

A descrição do projeto estrutural e a estimativa das características de funcionamento desta câmara, atendendo as exigências acima serão então abordadas a seguir.

#### 2 - PROJETO DA CÂMARA DE VÁCUO

##### 2.1 - CONCEPÇÃO ESTRUTURAL

De forma a atender todas as exigências impostas, foi elaborada uma câmara de vácuo com diâmetro interno de 120cm e comprimento de 250cm, que poderá receber até três bombas difusoras com velocidade nominal de 2000l/seg (ar a 20°C) e também um painel criogênico refrigerado a hélio líquido. Esta câmara conta com um total de 15 bocais flangeados, com variados diâmetros internos, que podem ser utilizados na montagem de diagnósticos em geral. Para simplificar a montagem de todo o sistema de propulsão foi projetado uma porta deslizante sobre trilhos com a possibilidade de girar 360° sobre seu eixo. Além desta porta, foi introduzida uma segunda, com menor diâmetro e disposta lateralmente, de maneira a permitir a realização de testes com catodos, independentemente dos testes de desempenho do propulsor. Foi incluída também uma pequena câmara de vácuo, disposta lateralmente, com conexão para pré-vácuo e isolada da câmara principal por meio de uma válvula do tipo gaveta, com o intuito de permitir a introdução de diagnósticos sem que haja a necessidade da interrupção do bombeamento em regime de alto vácuo. Os diagnósticos serão

Introduzidos serão presos a um suporte especial, montado sobre uma mesa móvel sobre guias e acionado externamente através de um passador de movimentos estanque. Todas estas soluções adotadas ao projeto da câmara de vácuo podem ser vistos na Fig. 1.

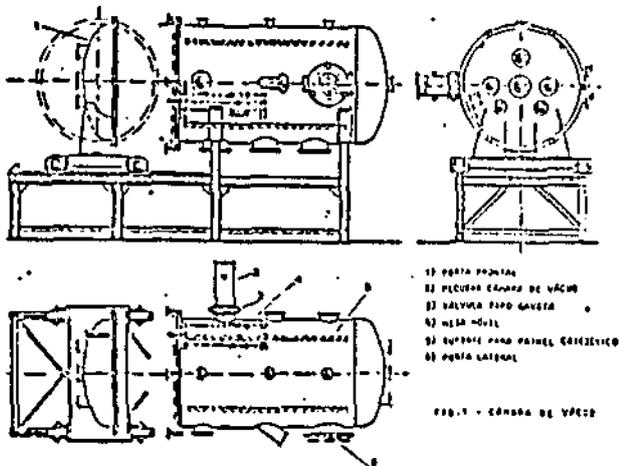


Fig. 1 - Câmara de vácuo

## 2.2 - DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE VÁCUO

O dimensionamento do sistema de vácuo foi feito estimando-se principalmente o efeito da degaseificação das paredes internas da câmara. Neste caso, considerou-se a câmara como sendo um paralelepípedo com seção transversal quadrada com dimensões 120 x 120cm e seção longitudinal retangular com dimensões 120 x 256cm.

O limite máximo de pressão na câmara de vido a degaseificação, pode ser estimado por (2):

$$P = 2,26 \times 10^{-3} A/S \cdot t \text{ [mbar]} \quad (1)$$

onde  $A$  é a área da superfície degaseificante [ $\text{cm}^2$ ],  $s$  e  $t$  são a velocidade e o tempo de bombeamento em [ $\text{l/s}$ ] e [ $\text{s}$ ] respectivamente.

Sendo então a área interna das paredes da câmara  $A = 1,5 \times 10^5 \text{ cm}^2$  e impondo que a pressão deve ser no máximo da ordem de  $10^{-6}$  mbar devido a degaseificação, obtém-se a través da equação 1 que o produto velocidade de pelo tempo de bombeamento deve ser igual ou maior que  $3,4 \times 10^6 \text{ l}$ . Considerando que o sistema de vácuo seja composto inicialmente de apenas uma bomba difusora com velocidade nominal de 2000  $\text{l/seg}$  (semelhante à utilizada na câmara provisória), obtém-se que o tempo de bombeamento para degaseificação deve ser ( $21994 \text{ s} = 28 \text{ min}$ ). No entanto, considerando que a bomba difusora em questão apresenta diferentes velocidades para diferentes gases absorvidos nas superfícies internas da câmara, na tabela 1 estão mos

trados, então, os tempos de bombeamento para cada tipo de gás, no caso de haver predominância de um destes.

Gás	Ar	Hidrogênio	Vapor H <sub>2</sub> O
velocidade de bombeamento ( $\text{l/s}$ )	1700	3000	6000
tempo de bombeamento (min)	28	19	9,5

Tabela 1 - Tempo de bombeamento para degaseificação considerando predominância de um dado tipo de gás absorvido na superfície interna da câmara.

Conhecendo-se então a velocidade de bombeamento para um dado gás, pode se obter a velocidade de bombeamento para um outro gás qualquer utilizando a equação 2.

$$\frac{S_1}{S_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} \quad (2)$$

onde  $M_1$  e  $M_2$  são os pesos atômicos dos diferentes gases.

Sendo o argônio o gás utilizado durante os testes de desempenho do propulsor, e utilizando a velocidade de bombeamento para o ar, a equação 2 resulta em:

$$S_A = 0,9 S_{ar} \text{ [l/s]} \quad (3)$$

Para o xenônio tem-se também

$$S_{Xe} = 0,5 S_{ar} \text{ (l/s)} \quad (4)$$

A taxa de gás é definida por:

$$Q = SP \text{ [mbar l/seg]} \quad (5)$$

Durante os testes preliminares do propulsor iônico de 7cm, observou-se que a pressão de trabalho na câmara provisória foi tipicamente  $P = 5 \times 10^{-3}$  mbar. Utilizando então as equações (3) e (5) obtém-se para o argônio que  $S_A = 1530 \text{ l/seg}$  e  $Q_A = 76,5 \text{ mbar l/seg}$ . No caso de ser utilizado o xenônio com a mesma pressão, obtém-se  $S_{Xe} = 850 \text{ l/seg}$  e  $Q_{Xe} = 42,5 \text{ mbar l/s}$ . Fixando-se a taxa de propelente e conhecendo-se a condutância das grades de oscilação do propulsor, pode-se estimar a pressão na câmara de ionização do propulsor. A condutância das grades do propulsor, pode ser estimada para o argônio (20°C), utilizando:

$$C_g = 9,9 \phi_0 A_g \quad (6)$$

onde  $\phi_0$  e  $A_g$  são a transparência e a área das grades de oscilação. Substituindo-se a velocidade de bombeamento na equação 5, pela condutância expressa pela equação 6 e utilizando os parâmetros construtivos do propulsor iônico, obtém-se o resultado exibido

do na tabela 2.

taxa de propelente	(ubar l/s)	76,5
transparência da grade	%	30
área da grade	cm <sup>2</sup>	7
Pressão na câmara do propulsor	ubar	4
Gás propelente		Argônio

Tabela 2 - Parâmetros construtivos e de operação do propulsor iônico de 7cm de diâmetro

De forma a comprovar se o valor obtido para a pressão na câmara de ionização do propulsor está dentro dos limites experimentais utilizados, será suposto que o gás é injetado na câmara do propulsor simplesmente por uma expansão isotérmica. Pode-se ver o esquema desta expansão pela fig. 2.

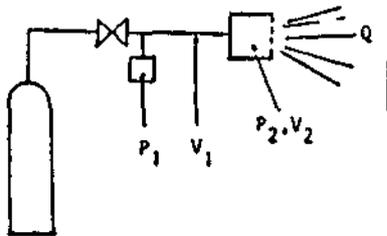


Fig. 2 - Propulsor Iônico.

Considerando então que  $P_2 = 4\text{ubar}$ ,  $V_2 = 550\text{ cm}^3$  e  $V_1 = 12\text{cm}^3$ , utilizando a lei de Boyle, obtém-se que  $P_1 = 0,2\text{mbar}$ . Este valor corresponde ao valor típico utilizado nos testes de desempenho do propulsor. Fixando-se então o valor da pressão na câmara de ionização, a taxa de gás fornecida pelo propulsor será alterada com a variação da condutância das grades de aceleração. Na fig. 3 estão mostradas a variação da taxa de gás expelida em função da transparência das grades do propulsor.

Utilizando o resultado apresentado pela fig. 3, é possível estimar o valor da pressão de trabalho na câmara de vácuo durante os testes de performance do propulsor iônico. Na fig. 4 estão os resultados assim obtidos considerando que o sistema de vácuo é composto de apenas uma bomba difusora (1530 l/s) ou com três bombas difusoras (4590 l/s).

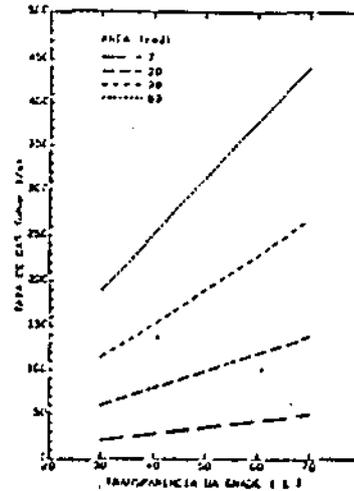


Fig. 3 - Efeito da transparência das grades de aceleração sobre a taxa de gás propelente, para diversas áreas das grades.

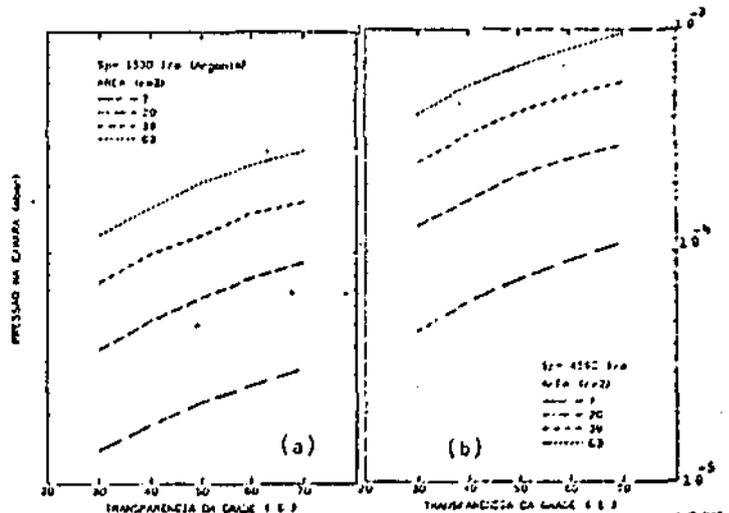


Fig. 4 - Pressão de trabalho na câmara de vácuo em função da transparência das grades do propulsor, para diversas áreas das grades de aceleração do propulsor, considerando a mínima velocidade (1530 l/s) e a máxima velocidade de bombeamento (4590 l/s).

Note-se pela fig. 4(b) que a pressão na câmara de vácuo não chega a ser inferior a  $3 \times 10^{-5}\text{mbar}$ , mesmo utilizando três bombas difusoras.

O efeito do gás residual sobre o feixe de íons pode ser estimado calculando-se o coeficiente de transmissão deste feixe considerando-o monoenergético, com ausência de dispersão e que o processo colisional pre-

- dominante  $\phi$  por efeito de transferência de carga. Com isto, o coeficiente de transmissão é dado por:

$$\Gamma = \frac{I}{I_0} = \exp(-\sigma n x) \quad (7)$$

onde  $I$  é a intensidade de corrente iônica para uma dada distância  $x$  e  $I_0$  é a intensidade da corrente iônica para  $x=0$ . A densidade de partículas de gás residual pode ser obtida em função da pressão e temperatura através de:

$$n = 12,84 \times 10^{18} \frac{P}{T} \text{ [cm}^{-3}\text{]} \quad (8)$$

[P] = mbar e [T] = K.

A seção transversal de colisão para transferência de carga pode ser obtida através da fig. 5, em função da energia do feixe de ions.

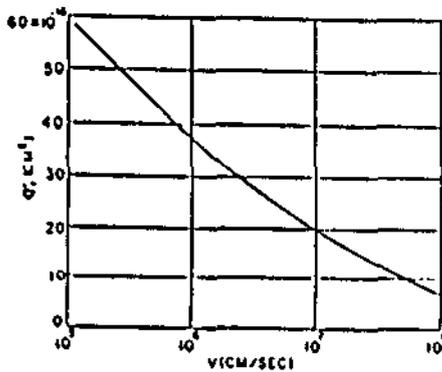


Fig. 5 - Seção transversal de colisão para transferência de carga para  $A^+$  em A (Brown, 1966).

Na fig. 6, pode-se ver os resultados obtidos para o fator de transmissão em função da pressão de gás residual na câmara de vácuo, calculado para as energias típicas empregadas em propulsão iônica e considerando diversas distâncias de propagação para o feixe além do propulsor iônico.

Os resultados apresentados na fig. 6 são importantes para a análise do efeito de neutralização do feixe iônico provocado pelo gás residual. Idealmente este não deve existir, pois no espaço de órbita no qual o propulsor deve operar, a pressão é muito baixa ( $\sim 10^{-6}$  mbar) o que obriga a realização de neutralização do feixe de ions por meio de um segundo feixe de elétrons. Para que seja possível estudar o efeito de evolução de carga espacial é preciso então que não haja neutralização do feixe pelas partículas neutras do gás residual, e tal condição só é conseguida para pressões iguais ou menores que  $10^{-6}$  mbar, onde o coeficiente de transmissão é 100%. Pela fig. 6 esta condição só é possível para uma distância máxima de propagação de 50 cm.

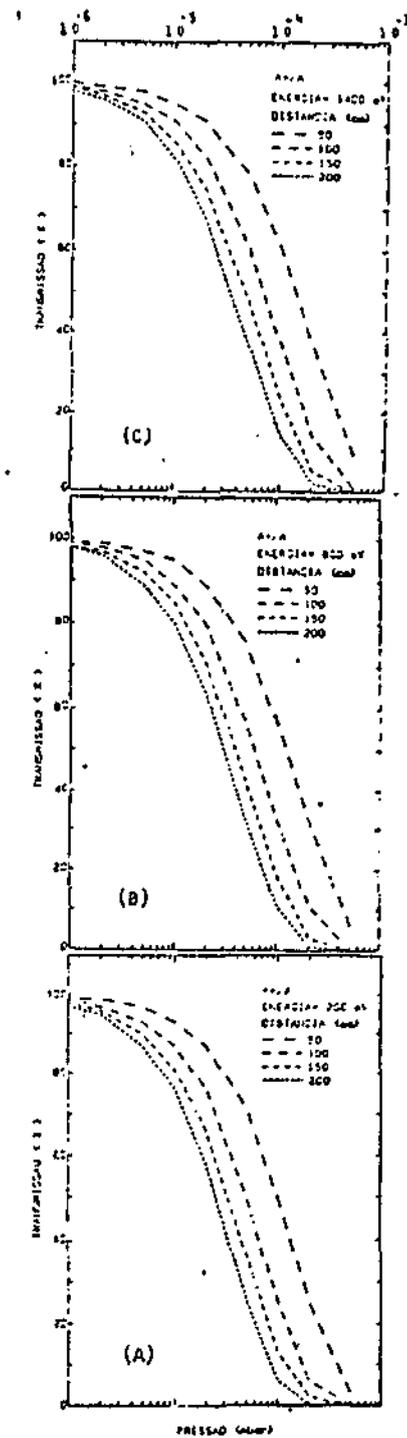


Fig.6 Fator de transmissão para o feixe de ions de argônio em função da pressão na câmara de vácuo para energias típicas do feixe e para diversas distâncias de propagação além do propulsor.

No entanto, pela fig. 4(b) a mínima pressão possível é da ordem de  $3 \times 10^{-3}$  mbar para uma transparência de 30% das grades.

A forma de reduzir a pressão ainda mais, sem alterar a taxa de gás expelido pelo propulsor, é portanto através do aumento da velocidade de bombeamento.

Pode-se conseguir ganhos consideráveis de velocidade de bombeamento se for utilizado um painel criogênico. Neste caso a velocidade de bombeamento é dada por<sup>(2)</sup>:

$$S = 3,64 f_T A \left[ \frac{T}{M} \right]^{1/2} \left[ 1 - \frac{P_v}{P} \right] \quad (10)$$

onde  $f_T$  é o coeficiente de captura à temperatura  $T$ ,  $A$  é a área da superfície criogênica ( $\text{cm}^2$ ),  $P$  é a pressão de gás, a temperatura  $T$  e  $P_v$  é a pressão do vapor a temperatura  $T_v$ .

Escolhendo-se o hélio líquido como refrigerante do painel, os gases nobres apresentam neste caso uma pressão de vapor da ordem de  $10^{-3}$  mbar. Considerando  $f_T = 0,5$ ,  $T = 300\text{K}$ ,  $P = 10^{-3}$  mbar,  $M = 40$  (argônio) e que o painel cilíndrico apresenta um diâmetro interno de 110cm e comprimento 50cm, a velocidade de bombeamento calculado pela equação 10 é  $S = 78.253\text{l/s}$  e  $S = 117.337\text{l/s}$  se uma das extremidades do painel for fechada.

Com a menor destas velocidades já é possível uma pressão inferior a  $10^{-4}$  mbar como o desejado.

#### CONCLUSÃO

Se o sistema de vácuo desta câmara contar apenas com as bombas difusoras, o propulsor iônico poderá ser desenvolvido até o instante em que surgir a necessidade de a valiação do efeito de neutralização do feixe. Neste caso o estudo de evolução de carga espacial deverá ser, então, realizado necessariamente sob bombeamento criogênico de forma que a pressão na câmara seja inferior a  $10^{-4}$  mbar.

Deve-se observar no entanto que esta câmara já se encontra em fase de instalação no Laboratório Associado de Plasma do INPE.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SANDONATO, G.M.; FERREIRA, J.L.; FERREIRA, J.G.; LUDWIG, G.O.; MONTES, A. Propulsor Iônico (PION 1) Testes e Resultados Preliminares. São José dos Campos, SP, INPE, 1987. 70p (INPE-4200 RPE/545).
- (2) ROTH, A. Vacuum Technology North Holland, 2ª Ed. 1982.
- (3) BROWN, S.C. Basic Data of Plasma Physics, 2ª Ed. Cambridge, MA, MIT, 1967.



**PROPOSTA PARA  
 PUBLICAÇÃO**

- DISSERTAÇÃO
- TESE
- RELATÓRIO
- OUTROS

TÍTULO

Projeto conceitual de uma câmara de vácuo para o desenvolvimento de propulsores iônicos em simulação de ambiente espacial.

IDENTIFICAÇÃO

AUTOR(ES)

Gilberto Marrega Sandonato

ORIENTADOR

CO-ORIENTADOR

DISS. OU TESE

LIMITE

DEFESA

CURSO

ORGAO

\_\_/\_\_/\_\_

\_\_/\_\_/\_\_

\_\_/\_\_/\_\_

\_\_/\_\_/\_\_

DIVULGAÇÃO

EXTERNA    INTERNA    RESTRITA

EVENTO/MEIO

CONGRESSO    REVISTA    OUTROS

REV. TÉCNICA

NOME DO REVISOR

Edson Del Bosco

NOME DO RESPONSÁVEL

Gerson Otto Ludwig

APROVAÇÃO

RECEBIDO

DEVOLVIDO

ASSINATURA

\_\_/\_\_/\_\_

\_\_/\_\_/\_\_

*Edson Del Bosco*

APROVADO

DATA

ASSINATURA

SIM  
 NÃO

\_\_/\_\_/\_\_

*Gerson Otto Ludwig*

REV. LINGUAGEM

Nº

PRIOR.

RECEBIDO

NOME DO REVISOR

\_\_/\_\_/\_\_

\_\_/\_\_/\_\_

\_\_/\_\_/\_\_

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

DATILOGRAFIA

PÁG.

DEVOLVIDO

ASSINATURA

\_\_/\_\_/\_\_

\_\_/\_\_/\_\_

\_\_/\_\_/\_\_

RECEBIDO

DEVOLVIDO

NOME DA DATILOGRAFA

\_\_/\_\_/\_\_

Nº DA PUBLICAÇÃO:

PÁG.:

CÓPIAS:

Nº DISCO:

LOCAL:

AUTORIZO A PUBLICAÇÃO

SIM

NÃO

\_\_/\_\_/\_\_

DIRETOR

OBSERVAÇÕES E NOTAS