

ESTUDOS DO SISTEMA DE VÁCUO PARA UM
ACELERADOR LINEAR DE ELÉTRONS

O.L.Gonçalez e R.Silva
Instituto de Atividades Espaciais, EAV-CTA
12200 - São José dos Campos - SP

No estudo de parâmetros de sistema de vácuo na estrutura de um acelerador linear de elétrons alimentado por radio frequência, deve-se levar em conta a liberação periódica, induzida pela rádio frequência, dos gases adsorvidos nas paredes. Para máquinas de alta potência torna-se recomendável uma estrutura contida numa camisa de vácuo.

Acelerador de Partículas, Dessorpção

1. INTRODUÇÃO

Um acelerador linear de elétrons (LINAC) é um aparato que faz com que elétrons sejam acelerados pelo campo elétrico de uma onda eletromagnética que se desloca ao longo de um guia de onda retilíneo. Para que haja uma interação uniforme entre o campo acelerador e os elétrons é preciso que estejam em repouso relativamente à onda, isto é, que a sua velocidade de seja igual à velocidade de fase da onda (LOEW & NEAL, 1970).

A redução da velocidade de fase da onda é conseguida através de uma estrutura do tipo mostrado na figura 1, que corresponde a um tubo cilíndrico dentro do qual são colocados discos com um orifício circular no centro. Essa estrutura é normalmente construída em cobre OFHC.

Os elétrons produzidos e agrupados num injetor são introduzidos na estrutura aceleradora em pulsos cuja duração pode variar entre nano e micro segundos. Esses pulsos são constituídos de pequenos subgrupos que devem ser injetados em perfeita sincronia de fase com a onda de rádio frequência.

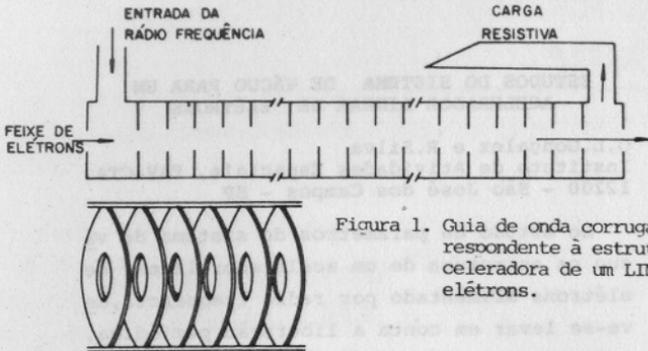


Figura 1. Guia de onda corrugado cor-
respondente à estrutura a
celeradora de um LINAC de
elétrons.

Parâmetros típicos de uma máquina dimensionada para fei-
xe de alta potência são mostrados na tabela I, onde se pode
constatar a existência de intensos campos elétricos na estru-
tura aceleradora (15 MV/m).

TABELA I

PARÂMETROS DE UM ACELERADOR USADO COMO FONTE DE NÊUTRONS

Energia	180 Mev
Modo Armazenado:	
Largura do Pulso	10 A
Corrente de Pico	10 A
Taxa de Repetição	1000 Hz
Modo Estacionário:	
Largura do Pulso	1 μ s
Corrente de Pico	0,5 A
Taxa de Repetição	500 Hz
Modo de Operação	$2\pi/3$
Potência média R.F.	290 KW
Largura pulso R.F.	2 μ s
Gradiente de Campo	15 MV/m
Comprimento Total	12 m
Nº de secções aceleradoras com 69 cavidades cada uma	5
Nº de Klystrons (23 MW pico)	5

2. O VÁCUO NA ESTRUTURA ACELERADORA

Para se evitar possíveis faiscamentos, decorrente de um intenso campo elétrico, a pressão do gás residual (tipicamente: 60% de H_2 e 40% de CO) em qualquer ponto da estrutura deve ser menor que 1×10^{-7} torr (GONÇALEZ & SILVA, 1981). Desse modo a velocidade local de bombeamento deve ser suficiente para remover os gases provenientes de degaseificação e vazamentos.

Dois tipos de envelope de vácuo são usuais:

- a) TIPO I - a estrutura consiste no próprio envelope de vácuo (figura 2).

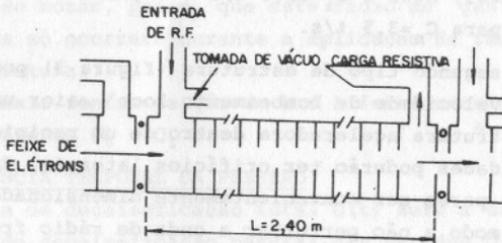


Figura 2. Vista de uma estrutura aceleradora tipo I.

Nesta estrutura o ponto crítico é a cavidade central onde a velocidade efetiva de bombeamento é baixa.

- b) TIPO II - a estrutura é envolvida numa camisa de vácuo (figura 3)

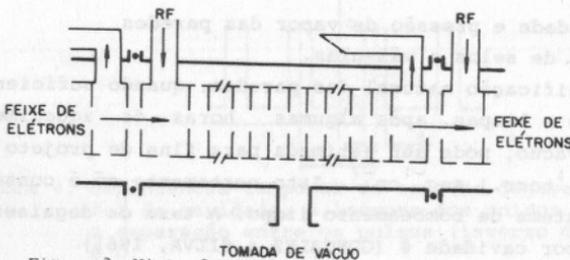


Figura 3. Vista de uma estrutura aceleradora tipo II.

Para o tipo I a condutância oferecida aos gases pela cavidade central é calculada considerando-se que essa estrutura corresponde à associação em série das cavidades à esquerda e das cavidades à direita da n-ésima cavidade. A condutância para a n-ésima cavidade é

$$C_n = \left[\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{c_i} \right]^{-1} + \left[\sum_{i=n+1}^m \frac{1}{c_i} \right]^{-1} \quad \text{com } (1 < n < m) \quad (1)$$

onde c_i é a condutância de cada cavidade e m é o número total de cavidades em uma secção aceleradora. Assim, para a cavidade central: $m=69$, $n=35$ e $c_i=59,8$ l/s (GONÇALEZ & SILVA, 1981) encontramos para $C_n=3,5$ l/s.

Para o segundo tipo de estrutura (figura 3) pode-se encontrar uma velocidade de bombeamento local maior, uma vez que, estando a estrutura aceleradora dentro de um recipiente em vácuo, as cavidades poderão ter orifícios laterais. Esses orifícios deverão porém ser convenientemente dimensionados e posicionados de modo a não perturbar a onda de rádio frequência. Para as dimensões de nossa cavidade podem ser usados oito orifícios circulares de 0,5 cm de diâmetro, resultando uma condutância total por cavidade de 28,7 l/s.

A escolha do tipo de estrutura a ser usada virá a ser determinada, além de outras conveniências construtivas e de projeto, pelo nível de vácuo que pode ser atingido. As fontes que introduzem gases no sistema consideradas são:

- Degaseificação natural das paredes
- Degaseificação induzida por choques de elétrons com as paredes
- Permeabilidade e pressão de vapor das paredes
- Vazamentos de selos e válvulas.

A degaseificação natural das paredes, quando suficientemente polidas e limpas, após algumas horas de aquecimento (-100°C) em vácuo, pode ser estimada para fins de projeto na ordem de 10^{-11} torr.l seg $^{-1}$ cm $^{-2}$. Isto certamente só é conseguido com um sistema de bombeamento limpo. A taxa de degaseificação natural por cavidade é (GONÇALEZ & SILVA, 1981)

$$Q = 1,75 \times 10^{-9} \text{ torr.l seg}^{-1} \quad (2)$$

A presença de fortes campos elétricos nas cavidades provocam emissão de elétrons de uma superfície os quais são acelerados em direção a outra superfície metálica, onde se chocam provocando degaseificação por ESD (Dessorpção Estimulada por Elétrons). Para uma corrente eletrônica avaliada em 32 mA, uma eficiência de ESD de 0,1 moléc/elétron e considerando-se que o elétron produz dessorpção tanto na sua saída quanto na sua chegada à superfície, encontramos para a taxa de degaseificação induzida por estes choques de elétrons (GONÇALEZ & SILVA):

$$Q = 1,3 \times 10^{-3} \text{ torr}\cdot\text{l}/\text{seg} \quad (3)$$

Deve-se notar, porém, que este fluxo de gás emergente das paredes só ocorrerá durante a aplicação da rádio frequência na estrutura.

As demais fontes de gás (c e d) foram consideradas desprezíveis frente Q_0 e Q_1 .

3. DEPENDÊNCIA TEMPORAL DA PRESSÃO

A taxa de degaseificação total $Q(t)$ será a soma da taxa constante de degaseificação natural das paredes Q_1 e da taxa periódica Q_0 (mesmo período da R.F.) e é mostrada na figura 4. Como $Q(t)$ é uma função periódica pode ser expandida em série de Fourier:

$$Q(t) = Q_1 + Q_0 \left\{ Fd - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \text{sen} \left[n\pi(1-Fd) \right] \cos \left[2n\pi Ft \right] \right\} \quad (4)$$

onde F é a frequência de pulsação da RF e d a largura de pulso.

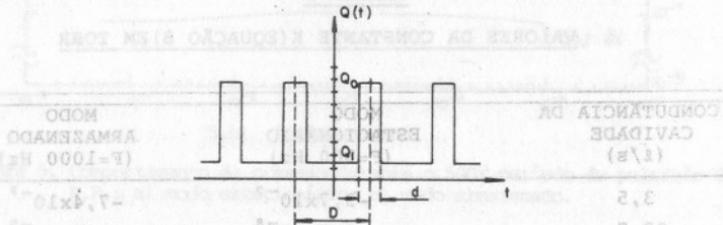


Figura 4. Dependência temporal da taxa de degaseificação total da cavidade. A largura dos pulsos de RF é d e a separação entre os pulsos (inverso da frequência) é D .

Por outro lado o comportamento temporal da pressão numa cavidade de condutância C e volume V pode ser descrito por

$$Q(t) = V \frac{dp}{dt} + C p \quad (5)$$

cuja solução para $p(t)$, usando-se a equação (4) é:

$$p(t) = \frac{Q_1}{C} + \frac{Q_0}{C} \left\{ Fd - \frac{f}{\pi^2 F} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \frac{\text{sen} [n\pi(1-Fd)]}{\left[1 + \left(\frac{f}{2n\pi F} \right)^2 \right]} \cdot \right. \\ \left. \cdot \left[\frac{f}{2n\pi F} \cos(2n\pi Ft) + \text{sen}(2n\pi Ft) \right] \right\} + K e^{-ft} \quad (6)$$

onde $f = C/V$.

O valor de K é dado pela seguinte condição inicial: no tempo $t = 0$, isto é, início da operação em alto vácuo, a pressão anterior ao primeiro pulso de RF é dado por:

$$p(t=0) = \frac{Q(t=0)}{C} = \frac{Q_0}{C} \quad (7)$$

resultando:

$$K = \frac{Q_0}{C} \left\{ - Fd + \frac{1}{2\pi^3} \left(\frac{f}{F} \right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} \frac{\text{sen} [n\pi(1-Fd)]}{\left[1 + \left(\frac{f}{2n\pi F} \right)^2 \right]} \right\} \quad (8)$$

Valores numéricos para K calculados para ambos os tipos de estruturas e nos modos de operação estacionário e armazenado são apresentados na tabela 2.

TABELA 2
VALORES DA CONSTANTE K (EQUAÇÃO 8) EM TORR

CONDUTÂNCIA DA CAVIDADE (l/s)	MODO ESTACIONÁRIO (F=500 Hz)	MODO ARMAZENADO (F=1000 Hz)
3,5	$-3,7 \times 10^{-7}$	$-7,4 \times 10^{-7}$
28,7	$-4,5 \times 10^{-8}$	$-9,0 \times 10^{-8}$

Com os valores numéricos de f e K o último termo da equação (6) cai rapidamente a valores desprezíveis. Dessa forma a função $p(t)$ oscila em torno de um valor assintótico máximo. Na figura 5 é mostrado um período desta oscilação, onde pode-se ver que a sua amplitude é muito pequena. Assim a pressão média tem significado relevante na região assintótica (tipicamente $T > 1$ segundo). Da equação 6 obtém-se o valor da pressão média \bar{P} :

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{Q_1 + Q_0 Fd}{C} \quad (9)$$

Valores da pressão média calculados em função da condutância da cavidade, para as duas frequências de pulsação da R.F., são mostrados na figura 6.

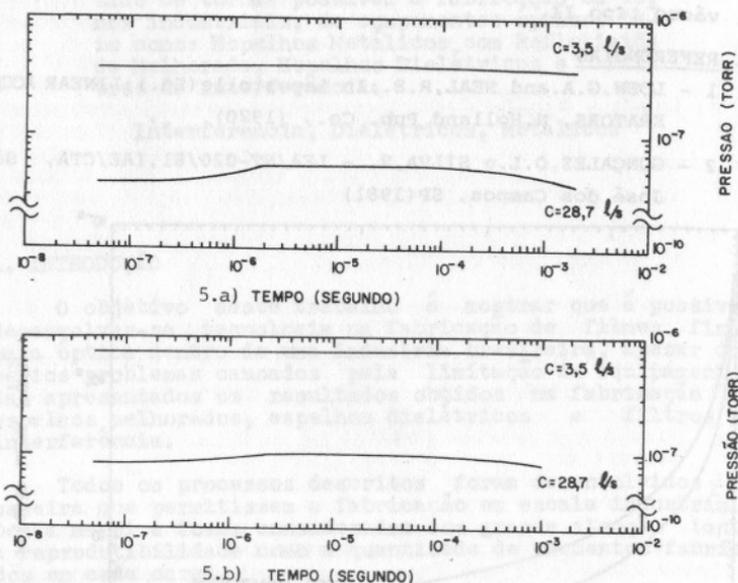


Figura 5. Comportamento da pressão durante o 500º período de pulsação da R.F.: a) modo estacionário; b) modo armazenado.

4. CONCLUSÃO

Considerando-se que $Q_0 Fd \gg Q_1$ e que a pressão média não pode ultrapassar um valor máximo (para evitar faiscamentos) a condutância mínima necessária deve obedecer a seguinte re

lação:
$$C_{\text{MIN}} = \frac{Q Fd}{P} \quad (10)$$

Essa relação estabelece que a condutância mínima necessária para cada cavidade e consequentemente o tipo de estrutura, fica definida por dois fatores:

- a) A degaseificação induzida pela RF (fator Q), que por sua vez é proporcional a intensidade do campo elétrico (potência de RF) e também à eficiência de ESD (ligada a limpeza das paredes).
- b) Pelo ciclo útil da RF (fator Fd).

De fato pode-se verificar que aceleradores de alto ciclo útil (SACLAY e MIT) e de alto campo elétrico (ORFEL e GELINE) atualmente em operação, são construídos em estruturas de vácuo tipo II.

5. REFERÊNCIAS

- 1 - LOEW, G.A. and NEAL, R.B.: In Lapostolle (Ed.): LINEAR ACCELERATORS, N.Holland Pub. Co., (1970).
- 2 - GONÇALEZ, O.L. e SILVA, R. - LEA/NT-020/81, IAE/CTA, São José dos Campos, SP (1981)

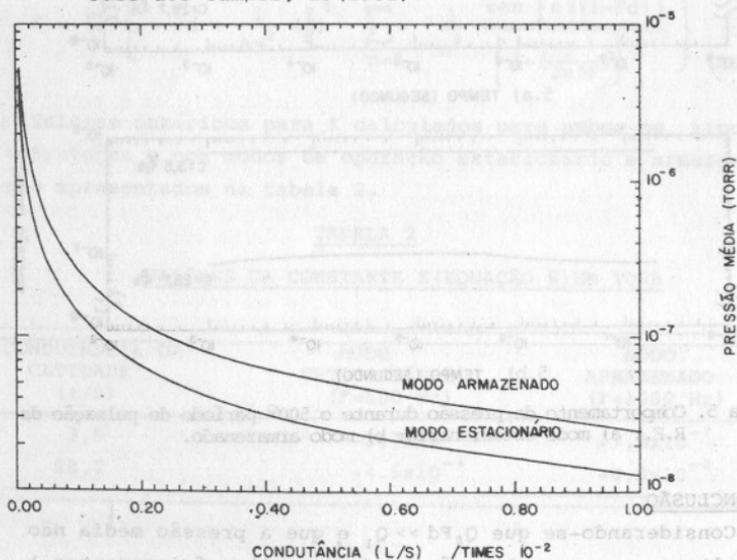


Figura 6. Pressão média em uma cavidade (Eq. 9) versus condutância.