

## SONDA TÉRMICA PARA MEDIDA DE VELOCIDADE DO AR E DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO PERTO DE PAREDES COM GEOMETRIA COMPLEXA

H. Patire Jr., J. J. Barroso e J. G. Ferreira

Laboratório Associado de Plasma  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Av. dos Astronautas, 1758 - Jd. Granja  
C.P. 515  
12201-970 São José dos Campos - SP

Palavras-chave: sonda térmica, velocidade do ar, coeficiente de convecção

### RESUMO

Durante o desenvolvimento de um sistema de resfriamento para um canhão de elétrons de 5A e 50kV, a necessidade de determinar a taxa de transferência de calor entre a parede externa corrugada do canhão e o fluxo de ar forçado motivou a construção de uma sonda térmica para medidas de velocidade do ar e, conseqüentemente, do coeficiente de transferência de calor por convecção perto da parede. A sonda térmica é um dispositivo que associa as medidas das temperaturas da sonda e do fluxo de ar com correlações matemáticas empíricas para fluxos turbulentos de ar, possibilitando medidas no fluxo perto da parede corrugada externa do canhão. A principal característica da sonda consiste em possuir hastes de dimensões reduzidas que possibilitam o uso da sonda para realização de medidas em regiões que são inadequadas para os dispositivos de medidas de velocidade de ar disponíveis comercialmente. Os resultados obtidos com a sonda apresentaram excelente concordância com os fornecidos por dispositivos comerciais em testes comparativos, validando o uso da sonda em outras aplicações onde são requeridas medidas do fluxo de ar.

### ABSTRACT

During the development of a cooling system for a 5A, 50kV electron gun, the need for knowing the heat transfer rate between the gun corrugated external wall and the forced air cooling flow, motivated the construction of a thermal probe for measuring the air velocity and therefore the convective heat transfer coefficient close to the wall surface. The thermal probe is a device which associates temperature measurements with mathematical correlations for turbulent air flows, thus enabling flow quantities to be measured close to the gun external wall. The main feature of the probe stems from its small dimensions which give the probe better handling flexibility to make measurements in local regions that are unsuitable for commercially available devices. Measured results using the probe showed excellent agreement with those obtained from commercial devices in comparative tests which validated the use of the

probe in other applications where air flow measurements are required.

### 1. INTRODUÇÃO

O canhão de elétrons desenvolvido no Laboratório Associado de Plasma<sup>[1]</sup> (Fig. 1.1) é usado para geração de um feixe de elétrons em um girotron, que é um dispositivo gerador de microondas de alta potência ( $10^5$ W) a ser usado em aquecimento de plasma.

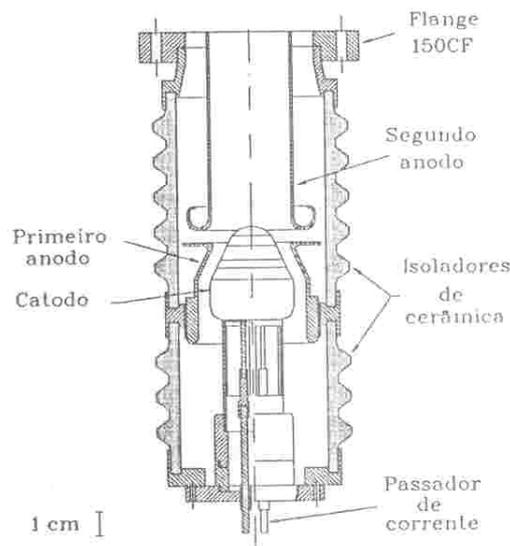


Figura 1.1 - Canhão de elétrons.

O canhão de elétrons opera sob alto vácuo<sup>[2]</sup>, requisito indispensável para a qualidade do feixe de elétrons gerado. Um sistema de vácuo eficiente, baseado em uma bomba difusora, reduz a pressão interna a  $\sim 5,0 \times 10^{-6}$  Torr durante a operação. Como a geração de elétrons ocorre por efeito termoiônico, altas temperaturas estão presentes nas peças internas do canhão, provocando uma transferência de calor entre as peças e a parede externa, onde ocorre o resfriamento por meio de fluxo de ar forçado. A parede externa do canhão é composta de anéis de cerâmica (alumina), com a função de isolamento térmico e elétrico e flanges metálicas (titânio) para a alimentação elétrica de dispositivos internos do canhão.

A união entre o anel de cerâmica e os flanges externos é realizada por meio de solda cerâmica-metal<sup>[3]</sup> (brazagem) (Fig.1.2). Para uma solda de alta confiabilidade, usa-se um metal dúctil de interface como o cobre, para que as superfícies a serem soldadas possuam uma melhor selagem e aderência. Sendo esta região o elo entre as peças internas e a parede externa do canhão, o fluxo de calor proveniente do aquecimento interno migra através da solda elevando a temperatura local e tornando o metal de interface mais dúctil, o que pode gerar pontos de vazamento para o vácuo. Devido a este risco é importante reduzir a temperatura da parede externa e da região da solda a valores próximos à temperatura ambiente.

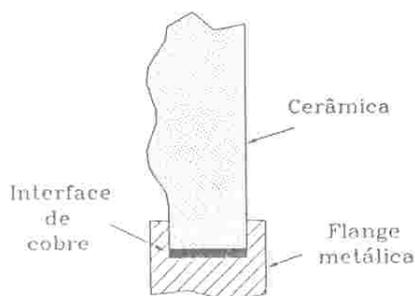


Figura 1.2 - Detalhe da solda cerâmica-metal.

Um sistema de resfriamento por meio de fluxo de ar forçado<sup>[4]</sup> foi usado. Com o objetivo de avaliar a eficiência de resfriamento, era importante conhecer as velocidades e os coeficientes de convecção do ar em vários pontos próximos da parede. Uma sonda térmica foi desenvolvida para realizar medidas de temperatura do ar na parede externa do canhão de elétrons, e com o auxílio de correlações matemáticas para fluxo turbulento de ar, determinaram-se as velocidades e os coeficientes de convecção entre o fluxo e a parede.

O presente estudo apresenta o desenvolvimento da sonda, a comparação dos resultados com fluxômetros comerciais e os resultados obtidos pela sonda térmica na parede do canhão de elétrons.

## 2. CONSTRUÇÃO DA SONDA TÉRMICA

Como a separação entre a bobina do canhão e a parede externa é muito estreita (~3,0 cm), não sendo possível realizar as medidas de velocidades com aparelhos comerciais, conforme mostra a Figura 2.1, a construção da sonda térmica foi necessária.

A sonda é composta de uma ponta resistiva em formato cilíndrico de pequenas dimensões (L=15mm e φ=3mm), aquecida por meio de corrente elétrica com potência dissipada conhecida e constante. A temperatura superficial é determinada por meio de um termopar onde os resultados apresentam erro absoluto de 0.5 °C. A alimentação elétrica DC é realizada por meio de hastes metálicas isoladas por cerâmica, que também servem para posicionar a ponta

resistiva. A Figura 2.2 apresenta um desenho esquemático da sonda construída.

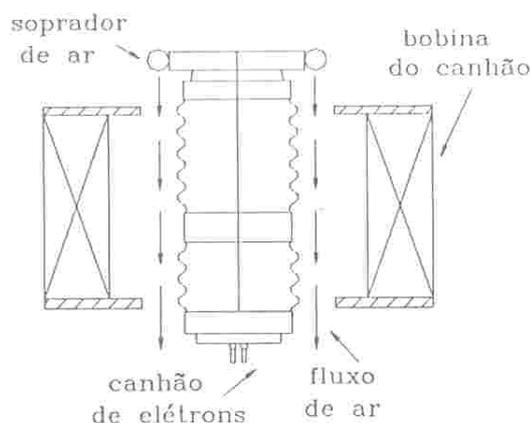


Figura 2.1 - Detalhe da região de resfriamento do canhão.

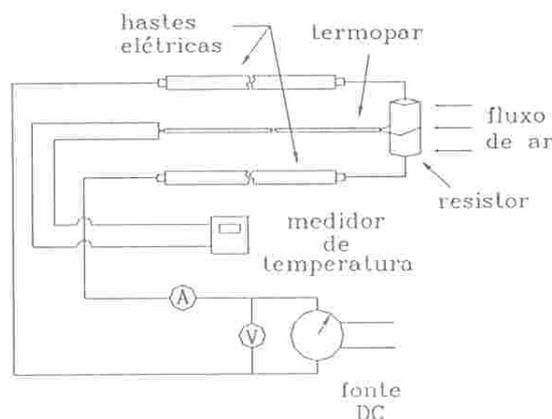


Figura 2.2 - Esquema da sonda térmica.

## 3. CORRELAÇÕES MATEMÁTICAS PARA FLUXO TURBULENTO DE AR.

- parâmetro básico obtido com a sonda térmica é a temperatura superficial do corpo cilíndrico da sonda sob efeito do fluxo de ar no ponto medido. Conhecendo previamente a temperatura do fluxo de ar, a diferença entre as duas temperaturas permite determinar-se o coeficiente de convecção entre a sonda e o fluxo de ar ( $h_{sonda}$ ).

$$\Delta T = (T_{sonda} - T_{ar}) \quad 3.1$$

$$h_{sonda} = Q A \Delta T \quad 3.2$$

em que:  $h_{sonda}$  = coeficiente de convecção da sonda ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ),  $Q$  = Potência elétrica dissipada (W),  $A$  = Área superficial da sonda ( $m^2$ ),  $T$  = temperatura ( $^\circ C$ ).

Calcula-se então o número de Nusselt para a sonda ( $Nu_{sonda}$ ).

$$Nu_{sonda} = \frac{h_{sonda} D_{h_{sonda}}}{k_{ar}} \quad 3.3$$

$$D_{h_{sonda}} = 4 \frac{A_{t_{sonda}}}{P_{sonda}} \quad 3.4$$

em que:  $k_{ar}$  = coeficiente de condutividade do ar ( $W/m^{\circ}C$ ),  $D_{h_{sonda}}$  = diâmetro hidráulico da sonda ( $m$ ),  $A_{t_{sonda}}$  = área transversal da sonda ( $m^2$ ),  $P_{sonda}$  = perímetro circular da sonda ( $m$ ).

Usando a correlação de Whitaker para fluxo turbulento de ar transversal a um cilindro isolado<sup>[5,6]</sup>, calcula-se o número de Reynolds da sonda ( $Re_{sonda}$ ), obtendo-se então a velocidade do ar ( $v_{ar}$ ) no ponto medido pela sonda.

$$Nu_{sonda} = (0,4 Re_{sonda}^{0,5} + 0,06 Re_{sonda}^{2/3}) Pr_{ar}^{0,6} \quad 3.5$$

$$Re_{sonda} = \frac{v_{ar} D_{h_{sonda}}}{\nu_{ar}} \quad 3.6$$

em que:  $Pr_{ar}$  = número de Prandt do ar (0,76),  $\nu_{ar}$  = viscosidade cinemática do ar ( $m^2/s$ )

Uma vez determinada a velocidade média do ar para cada ponto medido, e sabendo que este valor é comum à sonda e à parede externa do canhão, podemos então determinar o coeficiente de convecção entre a parede e o fluxo de ar ( $h_{canhao}$ ), usando as equações acima aplicadas à geometria do canhão, na sequência inversa.

Primeiramente determina-se o número de Reynolds do fluxo de ar perto da parede externa do canhão ( $Re_{canhao}$ ).

$$Re_{canhao} = \frac{v_{ar} D_{h_{canhao}}}{\nu_{ar}} \quad 3.7$$

$$D_{h_{canhao}} = 2(r_{bobina} - r_{canhao}) \quad 3.8$$

em que:  $D_{h_{canhao}}$  = diâmetro hidráulico anular entre a bobina magnética e a parede corrugada externa ( $m$ ),  $r_{bobina}$  = raio interno da bobina magnética ( $m$ ),  $r_{canhao}$  = raio externo da parede corrugada do canhão ( $m$ ).

Para cálculo do número de Nusselt do canhão ( $Nu_{canhao}$ ), adotou-se por aproximação a correlação de Colburn<sup>[5,6]</sup>, aplicável a fluxos turbulentos em tubo liso, embora a relação comprimento e diâmetro no canhão seja menor que a necessária para um fluxo plenamente desenvolvido. Com esta aproximação determinou-se o coeficiente de convecção entre a parede externa do canhão e o fluxo de ar.

$$Nu_{canhao} = 0,022 Pr_{ar}^{0,5} Re_{canhao}^{0,8} \quad 3.9$$

$$Nu_{canhao} = \frac{h_{canhao} D_{h_{canhao}}}{k_{ar}} \quad 3.10$$

#### 4. VALIDAÇÃO DA SONDA TÉRMICA

Após a construção da sonda térmica era necessário realizar testes de validação para que os resultados das medidas no fluxo de ar fossem confiáveis. Para isso, uma bancada de teste de velocidade do ar foi montada (Fig. 4.1), comparando os resultados de velocidade do ar obtido pela sonda com os resultados de fluxômetros calibrados disponíveis no mercado, da marca Dwair (AF140) [1] e Airflow (DVA 30VT) [2] que fornecem medidas de velocidade com incerteza relativa de 5%.

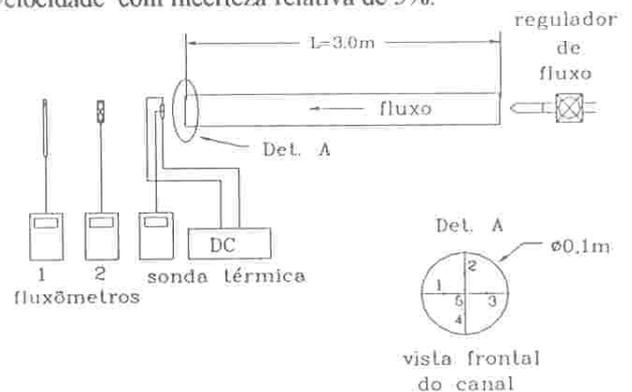


Figura 4.1 - Bancada de medidas de velocidade do ar

A comparação das três medidas de velocidade do ar é apresentada na Figura 4.2, e na Figura 4.3 são apresentados os valores dos números de Nusselt obtidos pela sonda em relação aos números de Reynolds obtidos pelos fluxômetros na bancada de teste, comparados à curva teórica de Whitaker.

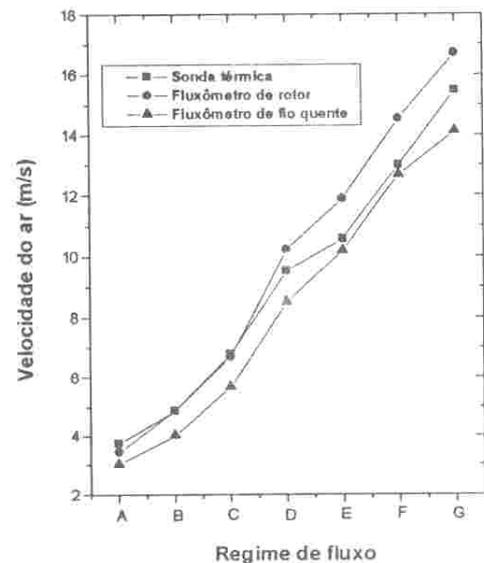


Figura 4.2 - Comparação das medidas de velocidades do ar.

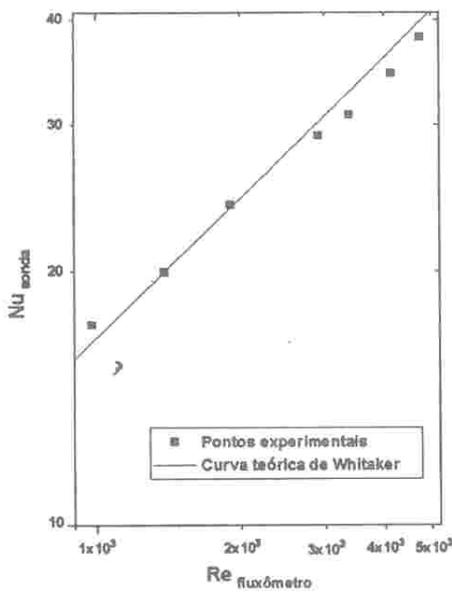


Figura 4.3 - Comparação dos pontos experimentais com curva teórica de Whitaker.

5. RESULTADOS DA Sonda Térmica no Canhão de Elétrons

Concluída a validação da sonda térmica, foram realizadas as medidas do fluxo de ar no corpo do canhão de elétrons. As medidas foram efetuadas em várias regiões ao longo da parede externa do canhão, conforme apresenta a Figura 5.1, obtendo-se o valor médio para cada região

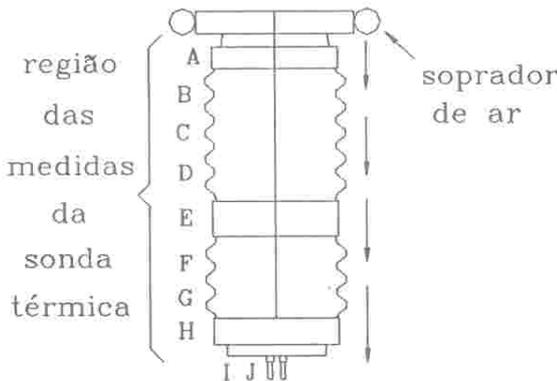


Figura 5.1 - Regiões do canhão onde foram realizadas as medidas com a sonda térmica.

Os valores dos coeficientes de convecção entre a parede externa do canhão e o fluxo de ar, obtidos através das medidas realizadas pela sonda térmica, são apresentados na Figura 5.2. Os pontos A, I e J apresentam valores reduzidos porque se referem a regiões localizadas fora do fluxo desenvolvido do ar, como pode-se observar na Figura 5.1.

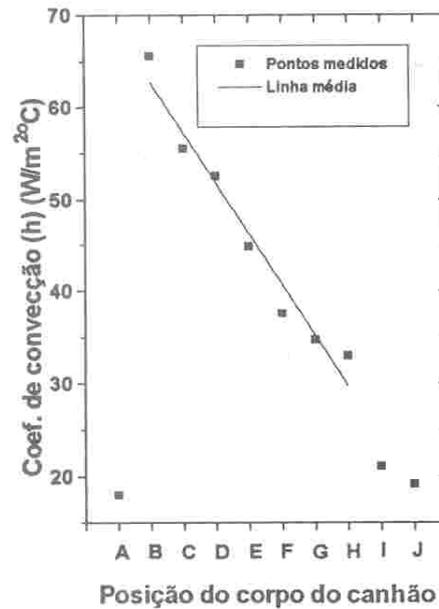


Figura 5.2 - Coeficientes de convecção na parede externa do canhão de elétrons.

6. CONCLUSÕES

Dentro das necessidades de conhecer as características do fluxo de ar para resfriamento da parede externa do canhão de elétrons, o desenvolvimento da sonda térmica e os resultados alcançados foram muito importantes. Pôde-se avaliar a eficiência do resfriamento do canhão, permitindo ajustes na vazão de ar e determinar as características que dominam a troca de calor entre a parede externa do canhão e o fluxo de ar. A sonda térmica mostrou-se bem adequada na realização de medidas em locais de difícil acesso e geometria complexa. As medidas de velocidades do ar apresentaram excelentes concordâncias no teste de validação da sonda e os valores dos coeficientes de convecção do ar calculados apresentaram boa concordância com valores obtidos na literatura. A sonda mostrou-se útil, podendo ser estendida sua aplicação a outros experimentos que requeiram o seu uso.

7. BIBLIOGRAFIA

- 1 Barroso J. J., Montes A., Ludwig G. O., Correa R. A., Design of a 35 Ghz Gyrotron, "International Journal of Infrared and Millimeter Waves", (11-2), 251-274, Feb. 1990.
- 2 Gilmour J. A. S., Microwave Tubes., Artech House, 1986.
- 3 Espe W., Materials of High Vacuum Technology., Pergamon Press, 1966.
- 4 Holman J. P., Heat Transfer., MacGraw-Hill, 1972.
- 5 Ozisik M. N., Transferência de Calor., Ed. Guanabara, 1985.
- 6 Kays W. M., Crawford M. E., Convective Heat and Mass Transfer., McGraw-Hill, 1980.