

## EFEITOS DA CAMADA DUPLA SOBRE OS PARÂMETROS DE PLASMA DE UM ARCO EM BAIXA PRESSÃO DE ARGÔNIO

Petraconi, G., Maciel, H.S. e Urruchi, W.I.

Departamento de Física - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, SJCampos, Brasil

### RESUMO

Foi construído um sistema coaxial de descarga elétrica para operar em regime de arco (corrente entre 1 e 5 A) a baixa pressão de argônio ou vapor de mercúrio (entre  $10^{-3}$  e  $10^{-4}$  torr). O tubo cilíndrico interno aloja uma constrição que permite a continuidade da descarga através da região entre os dois tubos coaxiais, de modo a dividir a coluna positiva do arco em dois plasmas de diferentes propriedades. Para pressões maiores que  $4 \times 10^{-4}$  torr e corrente de descarga em torno de 1 A, a variação de potencial de plasma entre as regiões adjacentes à constrição ao longo do eixo do tubo é fornecida essencialmente pela camada dupla de constrição. Abaixo de  $4 \times 10^{-4}$  torr, predomina o efeito da superposição de uma camada dupla livre, que, por sua vez, sustenta potenciais cada vez mais elevados a medida que a pressão da descarga diminui. Nestas condições, foram investigados os modos de operação da descarga, bem como o comportamento da temperatura de elétrons ( $T_e$ ), densidade de elétrons ( $N_e$ ), potenciais de plasma ( $V_p$ ) e flutuante ( $V_f$ ), inferidos da característica de sondas cilíndricas de Langmuir localizadas nas proximidades da constrição. Os resultados foram comparados com trabalhos anteriores em tubos de descargas similares mas sem constrição geométrica.

### 1. INTRODUÇÃO

A importância de se investigar a estrutura de camadas duplas (CD) e seus efeitos reside no fato de que sua formação implica em dividir a coluna positiva do arco em plasmas de diferentes propriedades (plasma de baixo potencial e plasma de alto potencial), separados pela CD a qual suporta uma diferença de potencial muito alta em relação às perturbações típicas na região de plasma. Isto implica na presença de intensos campos elétricos dentro da região compreendida pela CD. Ions do plasma que penetram nesta região são acelerados através da CD formando um feixe de alta energia e baixa densidade na região de baixo potencial. Similarmente os elétrons são acelerados na direção oposta formando um feixe de alta energia na região de alto potencial. Uma intensa CD (que sustenta altos potenciais) produz essencialmente feixes monoenergéticos com energias fornecidas pela diferença de potencial através da CD [1, 3].

A estrutura de uma camada dupla de constrição com a variação de potencial ao longo do eixo do tubo de descarga é mostrada na figura 1a, que também distingue as regiões de cargas espaciais e linhas equipotenciais formadas. A região de transição tem espessura da ordem de vários comprimentos de Debye, tipicamente duas ou três ordens de grandeza menor que o raio do tubo [2].

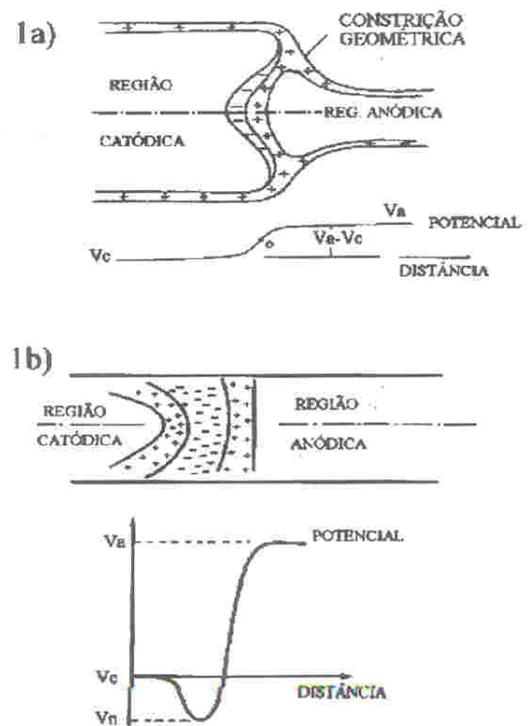


Figura 1. a) Diagrama esquemático das regiões de carga espacial próxima a constrição geométrica de uma descarga elétrica. b) Representação das regiões de cargas espaciais de uma camada dupla livre, com estrutura de uma camada tripla. Também mostra-se o perfil do potencial ao longo do eixo.

A figura 1 b mostra a distribuição de carga espacial e o perfil de potencial de uma camada dupla livre, com estrutura de camada tripla[3]. Neste caso ocorre uma depressão no potencial na região de catodo seguida de um salto até um potencial mais elevado na região de anodo das camadas eletrostáticas. Assim, o campo elétrico axial é bipolar e é mais intenso na região anódica adjacente à camada.

No presente trabalho, foi medida a diferença de potencial ( $V_a - V_c$ ) entre as regiões dos plasmas adjacentes às camadas eletrostáticas e a queda de potencial ( $V_a - V_n$ ), inferindo-se o potencial de plasma da característica de sonda cilíndrica de Langmuir ao longo do eixo da descarga. Devido ao seu comprimento, a sonda cilíndrica não tem resolução para avaliar o perfil do potencial através de todas as camadas eletrostáticas. Este perfil pode ser verificado pela determinação pontual do potencial de plasma por sondas emissivas[4] movendo-as ao longo do eixo da descarga. Se o interesse é somente a queda de potencial na região anódica ( $V_a - V_n$ ), pode-se dispor na direção normal ao eixo do tubo, um analisador eletrostático de energia, cuja característica revela diretamente a energia do feixe acelerado nesta direção e consequentemente o potencial acelerador [5].

## 2. APARATO EXPERIMENTAL

O desenho esquemático do tubo de descarga é mostrado na figura 2. Nesta nova estrutura, a seção central de 30 cm de comprimento é composta de dois tubos dispostos coaxialmente, sendo que o tubo interno de 25 mm de diâmetro possui uma constrição fixa numa das extremidades que reduz para  $\frac{1}{4}$  de seu diâmetro interno.

O tubo de descarga é confeccionado em pyrex, sendo somente a constrição moldada em quartzo. Esta região, em particular, chega a atingir a temperatura de fusão do quartzo quando a descarga opera em pressões em torno de  $2 \times 10^{-4}$  torr ou correntes acima de 6 A para pressões na faixa de  $(3 - 4)10^{-4}$  torr. Esse forte aquecimento ocorre devido à dissipação localizada de energia na camada dupla. Com isso a constrição torna-se incandescente (avermelhada) notando-se em seguida uma queda brusca da corrente e um aumento da voltagem da descarga. Para manter a descarga em operação é preciso aumentar a corrente elevando ainda mais a temperatura na constrição.

O tubo externo de 67 mm de diâmetro é confeccionado em pyrex e deve ser constantemente refrigerado por meio de ventiladores, principalmente próximo à constrição do tubo interno.

Nas regiões dos eletrodos (catodo e anodo principais), é adaptado o sistema de injeção de gás. A região central é separada das regiões de eletrodos pelo sistema de condensação de vapor de mercúrio. Este sistema é constituído por duas armadilhas de nitrogênio líquido confeccionadas em pyrex, uma conectada diretamente ao tubo interno e a outra ao tubo externo como mostra a figura 2.

Um reservatório de nitrogênio líquido colocado logo abaixo das armadilhas pode mover-se na direção vertical, possibilitando o controle do nível de nitrogênio líquido e consequentemente da área de condensação do vapor de mercúrio.

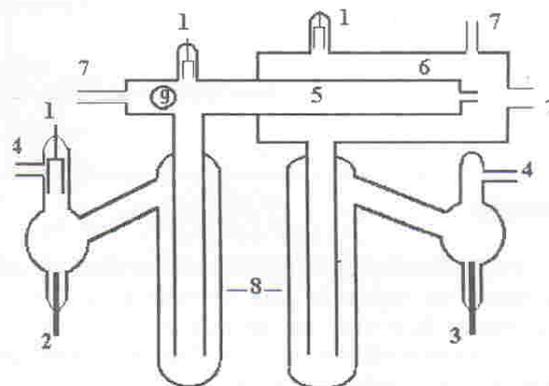


Figura 2. Desenho esquemático do tubo de descarga

- |                       |                                   |
|-----------------------|-----------------------------------|
| 1 - anodos auxiliares | 6 - tubo externo                  |
| 2 - catodo principal  | 7 - entrada de sondas             |
| 3 - anodo principal   | 8 - condensadores                 |
| 4 - entrada de gás    | 9 - saída para o sistema de vácuo |
| 5 - tubo interno      |                                   |

A ignição da descarga é feita inicialmente injetando gás argônio a uma pressão de  $2 \times 10^{-2}$  torr. A descarga percorre gradualmente os anodos auxiliares até completar-se ao longo de todo o tubo. Na fase inicial da descarga (ruptura) uma fonte de voltagem de até 450 volts é necessária. A voltagem de operação fica em torno de 180 volts. Com o arco fechado pode-se controlar a pressão na região central por dois métodos: 1-Variando-se o nível de nitrogênio líquido na armadilha e simultaneamente diminuindo-se a pressão do gás injetado. Para níveis mais baixos de nitrogênio líquido, uma maior quantidade de vapor de mercúrio passa pelo sistema de condensação aumentando consequentemente a pressão de vapor na região central. 2-Mantendo-se o nível de nitrogênio fixo com as duas armadilhas totalmente submersas, todo o vapor de mercúrio é condensado e o controle da pressão é possível somente em atmosfera de um outro gás (argônio, oxigênio, nitrogênio ou hidrogênio) por meio de válvulas agulhas. Neste caso, a descarga na região central assume a coloração característica do gás injetado, enquanto que, nas regiões de eletrodos predomina a coloração característica da descarga em vapor de mercúrio (azul clara). Esta última, passa então a atuar como anodo e catodo da descarga na região central.

No primeiro método a pressão na região central é facilmente controlada na faixa de  $(10^{-3} - 10^{-4})$  torr e no segundo método na faixa de  $(10^{-1} - 10^{-4})$  torr.

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1. Variação Dos Parâmetros De Controle Da Descarga

Para determinar os regimes de operação da descarga, foram obtidas duas curvas: a primeira (figura 3) relaciona tensão (Vd) e corrente da descarga (Id) para três valores de pressão (P), onde se observa o aumento da resistividade da descarga à medida que se reduz a pressão.

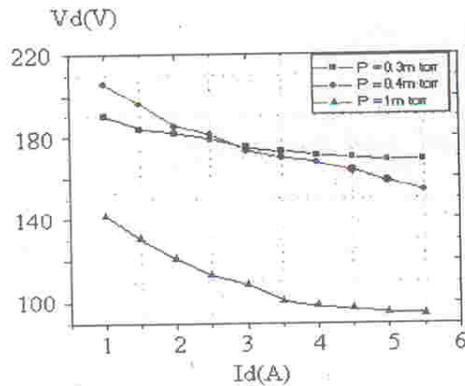


Figura 3. Característica tensão-corrente da descarga em argônio para diferentes valores de pressão.

A segunda (figura 4) mostra o efeito da intensificação da camada dupla livre, resultado da queda de pressão da descarga para valores abaixo de  $3 \times 10^{-4}$  torr. A incandescência na constrição é acompanhada de uma limitação da corrente da descarga, baixando-a para valores menores que 1 A e a manutenção da descarga somente é possível pelo aumento da tensão na fonte. Nesse regime com a CD, a característica da descarga exibe uma curva de voltagem decrescente com a corrente Id, contrariamente ao que se observa em descargas de tubo reto porém sem constrição geométrica [3].

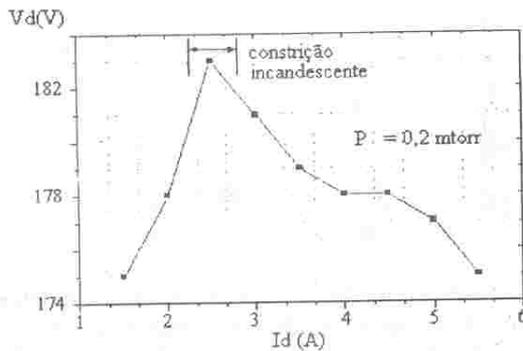


Figura 4. Variação da tensão da descarga em relação à sua corrente. P =  $2 \times 10^{-4}$  torr de argônio.

#### 3.2. Resultados De Medidas Com Sondas

As medidas de temperatura de elétrons, densidades de elétrons e campo elétrico médio na bainha, foram obtidas para uma corrente de descarga fixa de 1 A, variando-se a pressão na faixa de  $(2 - 4) \times 10^{-4}$  torr. As sondas foram posicionadas como mostra a figura 5.

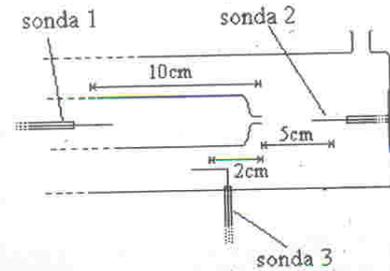


Figura 5. Posicionamento das sondas na região de trabalho.

A figura 6 mostra um comportamento esperado para temperatura de elétrons no eixo do tubo em função da pressão da descarga (sondas 1 e 2), ou seja,  $T_e$  mostra-se decrescente com P.

As características das sondas apresentaram-se idênticas às de uma sonda emissiva na região de coleção de íons, ou seja, corrente de saturação da ordem de mA, quando deveria ser da ordem de dezenas de  $\mu A$  para o caso de sonda fria [3].

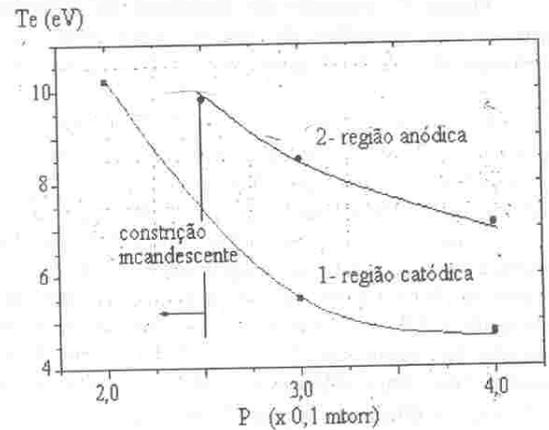


Figura 6. Variação da temperatura de elétrons com a pressão em atmosfera de argônio para uma corrente fixa de 1 A. 1- Região de cátodo. 2- Região de ânodo da CD.

Essa corrente tem origem na emissão termoiônica de elétrons devido ao auto-aquecimento da sonda, por isso chamada de auto-emissiva. Já na região exponencial da característica da sonda, a emissão de elétrons não se mostra mais significativa, pois mantém-se uma diferença entre o potencial de plasma e flutuante ( $V_p - V_f$ ) grande quando comparado com a obtida em uma sonda emissiva, onde  $V_p \approx V_f$ .

A variação da densidade de elétrons no eixo do tubo com a pressão é mostrada na figura 7.

A constatação de que a densidade de elétrons diminui com o aumento da pressão da descarga na região catódica sugere um aumento da velocidade de deriva de elétrons com a pressão -corrente de descarga fixa-, observando-se um efeito oposto na região anódica.

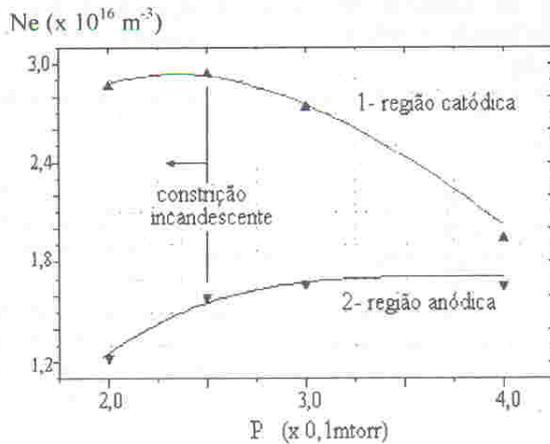


Figura 7. Variação da densidade de elétrons com a pressão em atmosfera de argônio para uma corrente da descarga de 1 A. 1 - Região catódica. 2 - Região anódica.

O comportamento da densidade e temperatura de elétrons indica um valor de comprimento de Debye ( $\lambda_D$ ) em torno de 0,1 mm para pressões próximas de  $4 \times 10^{-4}$  torr em ambas regiões, sendo que este valor não varia muito com a pressão na região catódica, mas atinge 0,2 mm na região anódica com a construção incandescente. Como a queda de potencial ( $V_p - V_f$ ) na bainha da sonda mantém valores em torno de  $3 kT_e/e$ , o campo elétrico na bainha é bem mais intenso na região catódica da CD. A figura 8 mostra a variação do campo elétrico na bainha da sonda (de espessura  $\sim 10 \lambda_D$ ) em função da pressão da descarga.

Deslocando-se a sonda 2 ao longo do eixo do tubo até penetrar na construção, verificou-se que a queda de potencial na região anódica ( $V_a - V_n$ ) aumenta de 16 V para 32 V quando a pressão da descarga diminui de  $3 \times 10^{-4}$  torr para  $2 \times 10^{-4}$  torr, respectivamente. Passando pela construção o potencial de plasma volta a aumentar, indicando a presença da

terceira camada de carga espacial. Ficou descartada a presença de uma quarta camada, pois não foi observado nenhuma depressão no potencial na região anódica. Uma ilustração da evolução da CD com a pressão da descarga é mostrada na figura 9, quantificando somente os valores experimentais de  $V_a$ ,  $V_c$  e  $V_n$ .

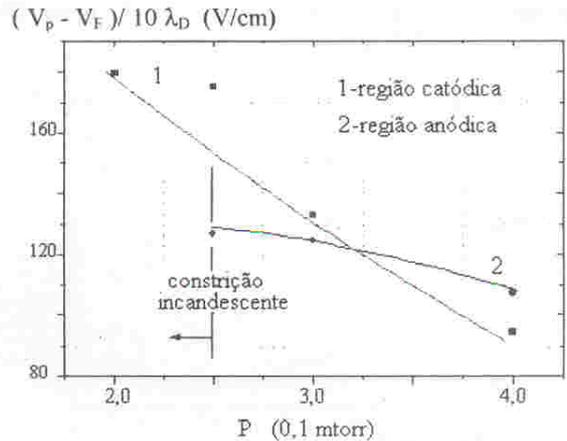


Figura 8. Campo elétrico na bainha em função pressão da descarga em argônio. 1 - Região catódica. 2 - Região anódica.  $(V_p - V_f)$  é a queda de potencial na bainha da sonda (da ordem de  $3kT_e/e$ ), onde  $k$  é a constante de Boltzmann e ( $e$ ) a carga do elétron.

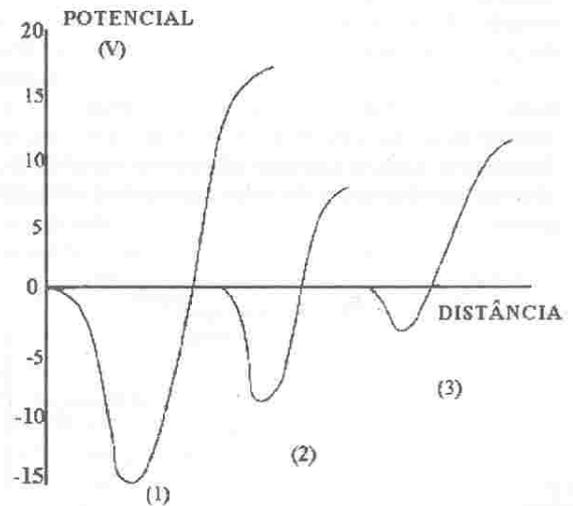


Figura 9. Ilustração da evolução do perfil de potencial da camada dupla com a pressão da descarga em argônio. (1)  $P = 2 \times 10^{-4}$  torr (construção incandescente). (2)  $P = 3 \times 10^{-4}$  torr. (3)  $P = 4 \times 10^{-4}$  torr.

#### 4. CONCLUSÃO

Um sistema de tubos coaxiais de descarga operando em regime de arco em baixa pressão de argônio e vapor de mercúrio foi caracterizado pelo levantamento de curvas de tensão da descarga em função de sua corrente e pela determinação dos parâmetros de plasma por meio de técnicas de sondas eletrostáticas. Observa-se, para pressões abaixo de  $4 \times 10^{-4}$  torr e altas correntes -acima de 1A-, a formação de uma camada dupla livre que se localiza no início da redução do diâmetro do tubo interno. Neste trabalho os parâmetros de plasma como densidade de elétrons, temperatura de elétrons e comprimento de Debye foram determinados mediante o diagnóstico com sonda de Langmuir. A presença da CD propicia um forte aquecimento da região de constrição e afeta as propriedades dos plasmas adjacentes. Foram feitas caracterizações utilizando-se três sondas, sendo uma sonda móvel ao longo do eixo do tubo, na região catódica da CD, outra sonda similar na região anódica da CD e uma sonda fixa na região entre os tubos. A variação de potencial através da CD é obtida fazendo-se medidas do potencial de plasma a partir das características das sondas. As medidas, embora não forneçam resolução espacial adequada, são compatíveis com o perfil de uma camada dupla livre que é caracterizada pela existência de uma depressão de potencial a partir da região catódica, seguida de um salto de potencial até a região anódica. A estrutura de camadas é, na verdade, a de uma tripla-camada, isto é, uma camada de carga espacial negativa limitada por uma camada positiva de cada lado.

A pressão altera substancialmente a variação global de potencial através da CD, reduzindo a diferença de potencial entre os dois plasmas adjacentes a medida que aumenta-se a pressão. Esse efeito indica a natureza dessa camada dupla como fenômeno não-linear e não colisional do plasma sujeito a alta densidade de corrente. É substancial o aquecimento da sonda na vizinhança da CD, provocando inclusive incandescência e emissão termoiônica principalmente quando a sonda está em potencial muito negativo e portanto sujeito a bombardeamento iônico. Adicionalmente à emissão termoiônica há uma indicação de aumento da emissão de elétrons secundários por bombardeio iônico pois a medida que se reduz o potencial acelerador de íons e a sonda passa a coletar elétrons, o efeito de corrente espúria de elétrons partindo da superfície da sonda não é tão evidente. A incandescência da sonda é vantajosa no processo de obtenção de medidas do perfil de potencial pois esta se torna auto-emissiva[4] fazendo o potencial flutuante aproximar-se do potencial de plasma.

Finalmente o trabalho mostra que o sistema de descarga construído pode operar em regime de arco em baixa pressão de vapor, em condições operacionais propícias à formação de CD com estrutura de três camadas de cargas espaciais. A CD age como região localizada dissipadora de energia, provendo

intenso aquecimento do gás e portanto das paredes. Considerando esse efeito e também a existência de feixe de partículas carregadas associadas a CD, pode-se antever aplicações tecnológicas de interesse em processamento de materiais, utilizando-se esta estrutura de descarga elétrica.

#### 5. REFERÊNCIAS

- [1]-RAADU, M.A.; "Global effects of double layers"; Second Symposium on plasma double layers and related topics; Innsbruck, Austria (1984).
- [2]-FRANKLIN, R.N.; "Plasma phenomena in gas discharges"; Clarendon Press; Oxford (1976)
- [3]MACIEL, H.S. and ALLEN, J.E.; "Free double layers in mercury-arc discharge"; Journal of Plasma Phys. 42,321(1989).
- [4]-HERSHKOWITZ, N.; NELSON, B. and D GATES, D.; "Self-emissive probes"; Rev. Sci. Instruments 54, 29 (1983)
- [5]-PETRACONI, G. and MACIEL, H.S.; "Energy analysis of electrons, positive and negative ions in oxygen plasma beams"; 2º Encontro Brasileiro de Física dos Plasmas. Serra Negra/SP, (1993).
- [6]-PETRACONI, G.; "Investigações em plasmas de arco a baixa pressão de vapor de mercúrio". Tese de Mestrado; ITA - São José dos Campos-SP (1991).