

# Universidade Estadual de Campinas



## Projeto De Iniciação Científica (F809)

### Plasma Gerado Por Fonte de Radiofrequência

Aluno: Raimundo N P Costa, RA: 002362 – Unicamp-2003

Orientador: Prof. Dr Munemasa Mashida - Unicamp

## PLASMA

**Um gás ionizado contendo elétrons, íons e átomos neutros, mantendo-se macroscopicamente neutro.**

Devido à energia cinética de suas partículas, o plasma é hoje identificável como sendo o 4º estado da matéria, representando 99,99% da matéria visível do Universo. Sabe-se que, segundo o grau de aquecimento, o movimento térmico dos átomos de qualquer corpo sólido adquire um caráter cada vez mais energético, enquanto não comecem a enfraquecer e depois se rompam as ligações que determinam a estrutura da substância. A primeira coisa a romper-se é a rede cristalina, e o corpo sólido funde-se e converte-se em líquido. Depois debilitam-se as ligações entre as moléculas e a substância toma a forma de gás. Ao aquecer um vaso com gás, conforme a temperatura vai aumentando, o movimento dos átomos do gás torna-se cada vez mais enérgico, e os átomos cada vez com mais frequência e cada vez com mais força chocam-se uns com os outros. Como resultado destes choques, começam a separar-se os elétrons situados nas órbitas mais exteriores, que são os mais debilmente ligados aos núcleos dos seus átomos. Dentro do gás, como que aparece um segundo gás formado por estes elétrons, cujo número aumenta ininterruptamente, ao mesmo tempo em que se vão “despindo” os núcleos dos átomos. Depois deles, chega a vez dos elétrons “escondidos” nas órbitas mais profundas e mais sólidas. O gás, no qual, sob a ação de uma temperatura extraordinariamente alta, teve lugar a divisão da substância, a qual se compõe de elétrons livres com uma velocidade vertiginosa, que se chocam entre si e com as paredes

do vaso, com os núcleos dos átomos completamente “nus” e com os átomos que por casualidade ainda mantêm uma parte dos seus elétrons, formam o “plasma”. O plasma “ideal” com as partículas atômicas completamente divididas, corresponde a uma temperatura de várias dezenas de milhões de graus. Em todos os lugares onde a matéria está extraordinariamente quente, ela encontra-se no estado plásmico. Todavia, o plasma não é apenas uma substância aquecida até temperaturas superaltas. É um estado físico completamente distinto que manifesta todo um conjunto de propriedades importantes e mesmo extraordinárias.

Por exemplo, o estado plásmico de uma substância gasosa pode surgir a temperaturas relativamente baixas, em dependência da composição, estrutura e grau de rarefação do gás. A chama de uma vela, a luminescência da lâmpada de luz fria, o arco elétrico, a descarga elétrica, o jato de fogo que sai da tubagem do motor de reação ou do foguete, o rastro que deixa o relâmpago, são, numa enumeração muito incompleta, alguns dos fenômenos com os quais o homem toma contato de uma forma direta ou indireta e, em alguns casos, utiliza para seu benefício, deste quarto estado da matéria.

Na verdade o plasma é, em alguns pontos, muito parecido com o gás. Ambos são rarefeitos e fluidos. Todavia, ao nível dos átomos e das moléculas, a natureza das suas estruturas é completamente diferente, e isto explica precisamente a extraordinária variedade das suas propriedades e do seu comportamento, que diferencia o plasma de todos os outros estados da matéria.

No seu conjunto, o plasma é neutro, já que contém uma quantidade igual de partículas carregadas positiva e negativamente. Mas a interação destas cargas dá ao plasma uma grande variedade de propriedades diferentes das dos gases.

Em certas condições, o plasma pode conduzir corrente elétrica melhor do que o cobre, pode fluir como um líquido viscoso, intervir em reações com outras substâncias, como a mais forte solução química. Além disso, é facilmente orientável em campos elétricos e magnéticos. A física do plasma tornou-se rapidamente num dos ramos mais destacados do progresso científico, apresentando grande potencial em aplicações industriais.

## 1. Teoria do Plasma

No seu conjunto, o plasma é neutro, já que contém uma quantidade igual de partículas carregadas positiva e negativamente. Quase neutro significa que, devido à existência de muitas partículas carregadas, qualquer potencial que seja aplicado ao plasma é curto-circuitado numa distância de alguns comprimentos de Debye do ponto onde o potencial foi aplicado ao plasma. De fato, enquanto no vácuo o potencial criado por uma carga  $q$  varia com:

$$V = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

onde  $r$  representa a distância do ponto onde medimos o potencial à carga, num plasma

$$V = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} e^{-\frac{r}{\lambda_D}}$$

onde  $\lambda_D$  representa o comprimento de Debye, definido através da expressão

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi n_o e^2}}$$

Comportamento coletivo significa que o movimento das partículas carregadas do plasma (iões e eletrões) é regido por forças de longo alcance, do tipo da Lei de Coulomb, e não por forças de pequeno alcance como, por exemplo, as colisões. A força que as partículas carregadas de um plasma exercem sobre uma dada carga  $q$  diminui com o quadrado da distância. Simplesmente como o número de cargas que atua sobre  $q$  aumenta com  $r^3$ , a força que estas cargas exercem sobre a carga alvo  $q$  aumenta com  $r$ . Por esta razão, as forças devidas à Lei de Coulomb num meio ionizado são forças de longo alcance. Por vezes medimos a temperatura das partículas de um plasma (iões ou eletrões) em eV. Neste caso, estamos a apresentar o valor da energia térmica ( $KT$ , em que  $K$  é a constante de Boltzmann). Como

$$K=1.38 \times 10^{-23} \text{ J}^\circ\text{k}$$

podemos concluir que

$$1 \text{ eV} = 11600 \text{ }^\circ\text{C}$$

As temperaturas típicas das partículas de um plasma laboratorial vão desde alguns décimos de eV, até 10 a 20 keV num grande dispositivo experimental de plasmas de fusão por confinamento magnético. Os eletrões dos plasmas da ionosfera e do vento solar têm respectivamente  $10^{-1}$  eV e 50 eV. A temperatura no centro do Sol está estimada em cerca de 2 keV.

A Frequência de Plasma

Suponhamos que uma partícula carregada de um plasma é afastada da sua posição de equilíbrio. Deste modo, quebra-se a neutralidade do plasma e cria-se um campo elétrico que vai fazer regressar a partícula a sua posição de equilíbrio. Simplesmente quando esta posição for atingida, embora o campo elétrico seja nulo, a partícula possui energia cinética (foi acelerada pelo campo elétrico desde a posição de afastamento máximo até à posição de equilíbrio), pelo que continua o seu movimento para o outro lado até que a energia cinética seja nula. Mas quando se verificar esta condição, estamos novamente numa situação de quebra da neutralidade do plasma, pelo que novamente sob a ação de um campo elétrico a partícula inicia um movimento de sentido contrário. Quer dizer, o afastamento de uma partícula carregada do plasma da sua posição de equilíbrio cria um oscilador harmónico, com uma frequência de oscilação, designada por frequência de plasma, dada por:

$$\omega_p = \sqrt{n_e e^2 / m \epsilon_0}$$

em que  $n_e$ ,  $e$  e  $m$  representam, respectivamente, a densidade, o módulo da carga e a massa da partícula.

Se não considerarmos as colisões, as oscilações anteriormente descritas tem amplitude constante. Se o plasma for finito ou se a temperatura das partículas for diferente de zero, estas oscilações propagam-se e transformam-se nas chamadas ondas de plasma.

Como num plasma existem dois tipos de partículas carregadas (electrões e iões), podemos definir duas frequências de plasma, a dos electrões ( $\omega_{pe}$ ) e a dos iões ( $\omega_{pi}$ ). Como os iões tem uma massa muito maior do que os electrões,  $\omega_{pi} \ll \omega_{pe}$ .

## Geração de Plasma por Radiofrequência

RF pode produzir plasmas sem eletrodos internos, como em descargas DC . O campo gerado pelo RF cede energia aos elétrons livres que oscilam e colidem com os átomos neutros. Quando a energia cinética na colisão excede o potencial de ionização dá-se a multiplicação de elétrons e ocorre o colapso ou rompimento (breakdown) do gás, originando o plasma. O colapso acontece se o ganho em densidade de elétrons causado pela ionização excede, por algum tempo, as perdas por difusão ou recombinação. Depois, uma situação de equilíbrio é estabelecida e podemos escrever a equação,

$$\partial n / \partial t = \nu_i - \nabla \cdot \tau = 0$$

onde  $\nu_i$  é a frequência de ionização. Como  $\tau = -\nabla(Dn)$  a equação acima fica

$$\nabla^2(Dn) + (\nu_i/D) \cdot Dn = 0$$

Definimos o comprimento característico de difusão  $\Lambda$  como

$$\nu_i/D = 1/\Lambda^2$$

Experimentalmente o potencial de colapso depende da pressão do gás neutro, da frequência do campo de RF e do tipo de gás. Ele é função também da forma e volume do recipiente e do material de suas paredes. Para um determinado gás e frequência há uma pressão para a qual esse potencial é mínimo. Nas frequências em que trabalhamos este mínimo ocorre para uma pressão de cerca de  $10^{-2}$ Torr e o campo elétrico de colapso da ordem de 100 V/cm. É conhecido que campos magnéticos podem diminuir substancialmente o valor do potencial de colapso.

## 2. Composição do Plasma

Numa descarga reativa (plasma), a energia é distribuída entre os diversos constituintes, quais sejam: neutros estáveis, elétrons, fragmentos moleculares (radicais), íons negativos e positivos e neutros excitados. Estes, por sua vez, constituem-se numa “sopa” química de grandes aplicações em vários ramos da tecnologia. Destes componentes, deve ser ressaltado o papel dos elétrons que, devido a sua maior mobilidade, são os responsáveis pela condutividade elétrica do plasma e pelos processos de formação de radicais, neutros excitados e íons, importantes para a reatividade do plasma.

Na maioria dos casos, a determinação completa da composição química do plasma é tarefa impraticável. Normalmente, se busca a determinação quantitativa ou qualitativa das espécies que considera-se as mais importantes e que podem fornecer informações sobre sua reatividade.

### 3. Exemplos de Plasmas

Apesar de, numa primeira vista, a existência de plasma nos parecer muito rara, mas não o é. Ou melhor, podemos lhe informar dizendo que, de fato, nós é que estamos acostumados a sólidos, líquidos e gases, estados bem raros da matéria.

-O fogo é um exemplo de plasma.

-As lâmpadas fluorescentes são plasma, assim como as lâmpadas de neon.

-Raios são plasma.

-A aurora é o mais belo exemplo de plasma ligado ao nosso planeta.

- O sol, visto que todas as estrelas são plasma. E as estrelas, ao morrerem, ejetam sua massa, a qual forma nebulosas, também plasma. Um conjunto de estrelas: nossa galáxia.

#### 4. Formação do Plasma

O principal fator que implica na dificuldade de se obter plasma na superfície terrestre é a pressão atmosférica. Para produzir plasma precisamos de baixa pressão, visto que a diferença de potencial necessária para produzir a descarga elétrica que dá início ao plasma é proporcional à pressão, sendo que, na pressão atmosférica, esta é extremamente difícil de se obter. Um segundo ponto vem da recombinação das partículas (troca de cargas). Num meio muito denso (alta pressão) os íons facilmente seriam neutralizados, não havendo assim tempo suficiente para existir o plasma.

Logo, o plasma somente ocorre naturalmente no espaço (no vácuo), ou na alta atmosfera (à exceção das chamas e dos raios). No laboratório o mesmo é obtido sempre em câmaras nas quais é feito vácuo através de Bombas de Vácuo.

#### 5. Aplicação do Plasma

Uma das áreas de aplicação de plasma é o tratamento superficial de materiais por plasma, haja vista que nas últimas duas décadas tem havido diversos progressos na tecnologia utilizada nos processos de tratamentos superficiais, principalmente com o desenvolvimento dos métodos de nitretação, cementação e nitrocementação por plasma. A nitretação de metais, por exemplo, é um processo que permite alterar as propriedades de dureza superficial, desgaste, corrosão e resistência térmica do material. É utilizada, por ordem de importância, no tratamento de metais ferrosos, metais refratários e, mais recentemente, de alumínio. O processo de nitretação de superfícies se aplica, entre outras, à indústria mecânica, automotiva, hidráulica, de deformação de metais, siderúrgica, etc.

O tratamento termoquímico por plasma oferece diversas vantagens quando comparado aos métodos tradicionais de tratamentos; entre outros pode-se mencionar:

- 1) Componentes nitretados com plasma, por exemplo, sofrem menos distorção dimensional do que no caso da nitretação gasosa, devido à menor temperatura requerida no tratamento e ao fato do processo ser realizado em vácuo;
- 2) Melhor acabamento das peças, em função da menor temperatura, forno limpo e uso do vácuo. Como consequência, elimina-se ou minimiza-se o trabalho das peças após o tratamento;
- 3) Permite conseguir melhores propriedades metalúrgicas com materiais de custo menor;
- 4) Permite obter uma camada uniforme em tratamentos superficiais, mesmo em peças de formas complexas;
- 5) Permite resultados reprodutíveis e de qualidade constante, devido ao controle microprocessado dos parâmetros do processo;
- 6) Não produz contaminação ambiental; os processos de tratamento com plasma usam baixa quantidade de gases neutros, enquanto que os processos convencionais usam, muitas, vezes sais tóxicos ou grandes quantidades de gases tóxicos;
- 7) Menor custo, se comparado aos processos convencionais, por ser um processo mais rápido, que usa menores quantidades de produtos químicos.

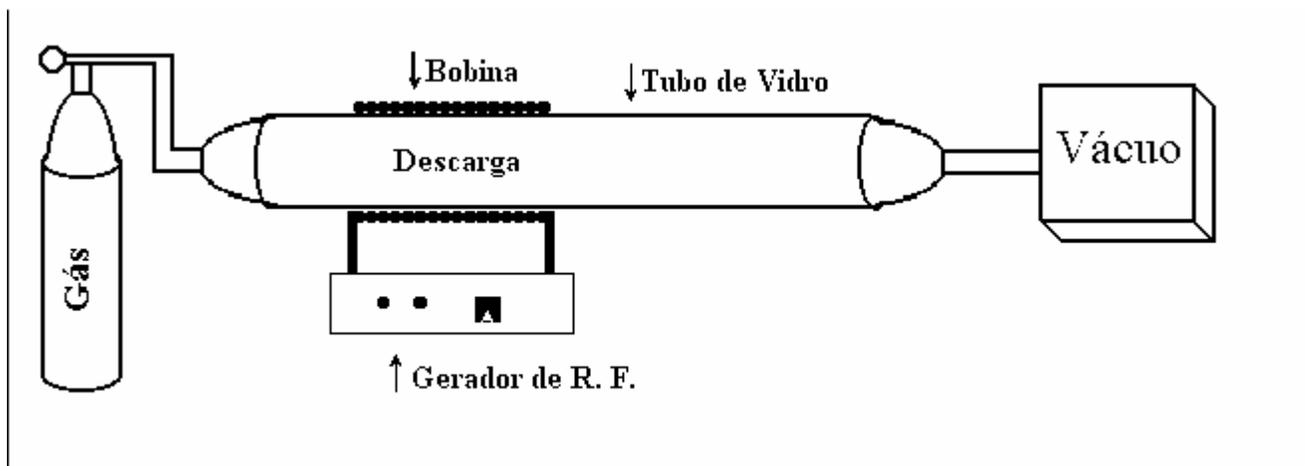
## **II. OBJETIVOS**

O presente projeto visa familiarizar o aluno secundarista com o plasma. Esse estado da matéria é ainda pouco discutido ou mesmo desconhecido pelos alunos. Assim, propõe realizar a criação do plasma por uma fonte de rádio frequência e mostrar que muitas informações sobre a matéria podem ser conhecidas através do estudo da radiação emitida pelo plasma. Também, será enfocada a importância que o plasma tem na tecnologia atual.

## **III. MÉTODO**

Em um tubo de vidro contendo uma bobina ligada ao gerador de rádio frequência (RF), será introduzido um gás sob baixa pressão. Através de uma centelha inicial se produz o plasma a depender das condições de pressão do gás número de espiras da bobina e frequência do RF. Para monitorização da pressão utilizamos um medidor tipo Penny. Para a geração do plasma utilizaremos os gases Hélio e Argônio, a fonte de RF numa frequência de 27MHz, 200W, pressão entre  $10^{-1}$  a  $10^{-2}$ Torr.

Fig.1: Mostra Esquemática do Aparato para Geração do Plasma



#### IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os gases Hélio e Argônio formaram plasma no intervalo de pressão de  $10^{-1}$  a  $10^{-2}$  Torr na frequência de RF de 27MHz. A radiação eletromagnética no visível emitidas pelas transições eletrônicas desses elementos são observadas a olho nu nas cores característica do seu espectro de emissão atômico.

## V. CONCLUSÕES

Um plasma é um gás parcialmente ionizado, ou seja, um gás onde coexistem elétrons, íons, fótons e espécies neutras; entretanto o gás se mantém macroscopicamente neutro. Isto significa que embora muitos átomos estejam ionizados, na forma de íons, há tantos íons quanto elétrons no volume em que o plasma está confinado. A física dos plasmas tornou-se área de intensa pesquisa, visto as aplicações nos processos de tratamentos de superfícies de materiais e perspectiva de geração de energia.

Referências:

1. Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion . Francis F Chen.
2. Introduction Plasma Physics. Robert J Godston, Paul H Rutherford.