

Relatório Final

F 809

Instrumentação Para o Ensino de Física



Interação de Plasma de RF com Campos Eletromagnéticos

Aluno: Rafael Henrique Zerbetto

Orientador: Prof. Dr. Munemasa Machida

Técnico Responsável Colaborador: Douglas Cioban

**Departamento de Eletrônica Quântica
Instituto de Física “Gleb Wataghin”
Universidade Estadual de Campinas
2º sem./2004**

Resumo:

O objetivo deste projeto é produzir plasma em uma câmara circular com eletrodos ligados a um excitador de gás, um equipamento que gera radiofrequência (RF), provocando a ionização do gás no interior da câmara, de modo que este se transforma em um plasma. Aplicando-se uma diferença de potencial em outros dois eletrodos, cria-se um campo elétrico, ao qual o plasma se molda para se manter eletricamente neutro. Esta é uma característica muito interessante dos plasmas, e é devida à existência de íons e elétrons que tendem a se moldar ao campo elétrico de modo que o plasma seja eletricamente neutro.

Introdução:

O que é um plasma

Estima-se que mais de 99% da matéria do universo conhecido está na forma de plasma. No entanto, plasmas só existem a altas temperaturas, de modo que a vida só poderia surgir em locais mais frios, como a Terra. Isto explica porque, apesar de serem tão abundantes, os plasmas nos parecem tão raros.

Plasmas muitas vezes são descritos como gases ionizados, pois são constituídos por íons e elétrons. Em um gás neutro, as moléculas são constituídas por átomos, que são constituídos por um núcleo de nêutrons (partículas sem carga) e prótons (partículas com carga positiva), e há elétrons (portadores de carga negativa) orbitando em torno do núcleo, de forma que a carga líquida é nula; conseqüentemente, o gás é eletricamente neutro.

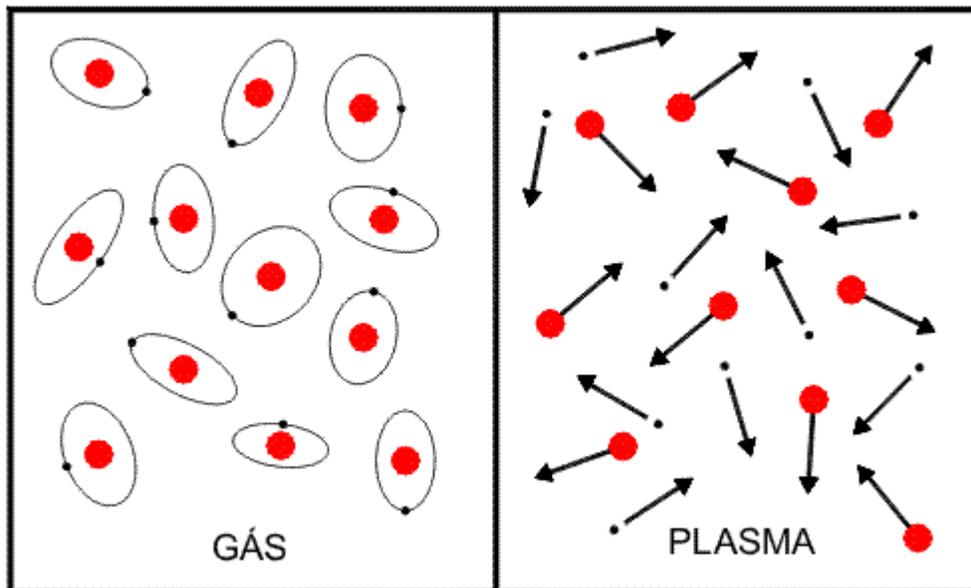


Fig. 1: Diferença entre gás e plasma: Nos gases os elétrons (simbolizados pelos pontos pretos) orbitam ao redor de um núcleo, enquanto no plasma eles ficam livres junto com os íons.

Quando aquecemos um gás, fornecemos energia a suas moléculas, causando a separação dos átomos, que ainda se mantêm neutros. Continuamos o aquecimento e os elétrons adquirem energia suficiente para escapar de suas órbitas, temos então átomos com um ou mais elétrons faltando (o que chamamos de íons) e elétrons livres. É isto que

chamamos de plasma. Macroscopicamente, o plasma é quase neutro, visto que o número de elétrons é igual ao número de prótons.

Plasma usualmente é chamado de quarto estado da matéria, e possui todas as propriedades dinâmicas de fluidos. Devido à existência de elétrons livres, plasmas são bons condutores de eletricidade. O movimento de cada partícula que compõe o plasma é influenciado pelo das demais, criando um aspecto coletivo. Isto significa que, devido ao fato do meio ser condutor, deixa de ser regido por forças de pequeno alcance (por exemplo, forças de contato, como as provocadas por colisões, que só existem enquanto há contato entre os corpos) e passa a ser controlado por forças de longo alcance (forças de campo, como as eletromagnéticas, que agem à distância).

Outra propriedade interessante dos plasmas é a diferença entre a temperatura dos elétrons e a dos íons, devido ao fato deles terem estados de equilíbrio diferentes.

O fogo, raios e auroras são exemplos de plasmas que ocorrem naturalmente em nosso planeta. Apesar disso a existência dos plasmas não é notada pela maioria da população, e não é nem mesmo citada por professores de ensino médio. Nos acostumamos a viver em um planeta onde plasmas são raros, por isso temos dificuldade em perceber a existência de um outro estado da matéria que ocupa praticamente todo o universo visível.

O sol emite plasma continuamente, que se move em todas as direções através do sistema solar, criando o que chamamos de vento solar. Este, ao passar pela magnetosfera da Terra, interage com o campo magnético do planeta, produzindo as auroras, comuns em grandes latitudes (ou seja, próximas aos pólos do campo magnético da Terra). A ionosfera terrestre também é formada por plasmas.

Várias tecnologias obtidas a partir dos plasmas, podem ser encontradas em residências, os exemplos mais conhecidos são as lâmpadas fluorescentes e a televisão de plasma.

Tecnologias de plasmas usadas na indústria movimentam cerca de 200 bilhões de dólares por ano no mundo. Plasmas são usados em processos de tratamento de materiais, deposição de filmes finos, eletroerosão, e vários outros.

Plasmas também podem ser usados em processos de purificação de água, reaproveitamento de lixo e esterilização de equipamentos, além de muitas outras aplicações.

O projeto mais ambicioso na área de plasmas consiste em criar um reator de fusão nuclear, um processo que consiste em fundir dois núcleos de hidrogênio pesado (deutério e trício), convertendo massa em energia, de modo que uma quantidade muito grande de energia é liberada. Para isso ser possível são necessárias temperaturas altíssimas para poder quebrar as barreiras de potencial (repulsão coulombiana), permitindo que os núcleos de hidrogênio se unam formando um núcleo de hélio.

Há três maneiras de se confinar um plasma para realizar a fusão nuclear: O confinamento gravitacional, que ocorre nas estrelas, só é possível se há um plasma muito denso e quente, além de ser necessária uma massa muito grande para criar campos gravitacionais intensos o suficiente para as reações ocorrerem. Isso torna inviável o uso deste método para a criação de um reator de fusão na Terra.

O confinamento inercial consiste em enviar um pulso de radiação em direção a uma cápsula de combustível (mistura deutério-trício), aquecendo-a rapidamente e mantendo o plasma confinado por inércia a densidades altíssimas durante um tempo suficiente para que a energia liberada seja maior do que a gasta pelo pulso de radiação.

Por fim, o confinamento magnético é o mais promissor, e consiste em formar um plasma de baixa densidade, mas com temperatura muito maior do que a do centro do sol. Devido às propriedades eletromagnéticas do plasma, podemos confina-lo através de campos magnéticos, que funcionam como “recipientes” que contém o plasma sem se deformar

devido às altas temperaturas, impedindo que haja contato entre o plasma e as paredes do reator.

Teoria:

Ionização e recombinação:

Para ionizar um átomo é necessário fornecer energia suficiente para que um ou mais elétrons da camada mais externa escape de sua órbita, o que pode ser conseguido através de colisões entre partículas. Plasmas em laboratórios geralmente são produzidos em vácuo, pois a existência de poucas partículas facilita o processo de ionização, afinal, se há muitas partículas a energia fornecida ao sistema é distribuída entre elas de tal modo que cada uma recebe uma parcela pequena da energia que foi cedida inicialmente, assim, quanto menos partículas no interior da câmara, menos energia é necessária para ionizar os átomos, gerando o plasma.

Contudo, um elétron e um íon se atraem para se manter eletricamente neutros, mas para o elétron orbitar ao redor do íon gerando um átomo neutro precisa perder energia, e esta energia excedente é liberada na forma de fóton (partícula de luz), num processo chamado de recombinação.

Outro processo, que ocorre em menor escala, consiste em excitar um elétron de uma camada mais interna, de tal modo que ele pula para uma camada mais externa, mas como as camadas mais internas precisam ficar completamente preenchidas, algum elétron de uma camada mais externa perde energia e muda pra uma camada mais interna, emitindo um fóton. A energia do fóton varia muito de acordo com as transições eletrônicas realizadas.

Por fim, outro processo que gera fótons é a radiação de *Bremstrahlung*: fótons são emitidos quando um elétron é freado devido a uma colisão ou quando ele faz uma curva.

A energia de um fóton é dada por:

$$E = h\nu \qquad \text{Eq. 1}$$

Sendo h a constante de Plank, $6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}$, e ν a frequência do fóton. Observando-se esta equação, pode-se perceber que quanto mais energético for o fóton, maior será a sua frequência. Assim, como o comprimento de onda é inversamente proporcional à frequência, dois fótons com energias diferentes terão comprimentos de onda diferentes. Conseqüentemente, se fornecermos mais energia para o plasma, sua cor deverá variar, pois os fótons emitidos serão mais energéticos.

Para manter o plasma é necessário que a taxa de ionização seja igual à taxa de recombinação, pois assim sempre haverá elétrons e íons livres, e a emissão de fótons pelo processo de recombinação também será contínua, dando ao plasma a sua cor característica, que depende da natureza do gás utilizado, do processo de ionização, entre outros.

Geração de plasma por RF:

Para produzir o plasma, utilizamos um excitador de gás para enviar RF (que são ondas eletromagnéticas) para um eletrodo no interior da câmara (ou para a superfície da câmara), fazendo-a funcionar como antena. Este processo consiste simplesmente em provocar oscilações nos elétrons existentes na câmara, devido ao campo elétrico oscilante da RF, transferindo energia para eles, o que os faz oscilar com amplitudes cada vez maiores até terem energia suficiente para sair da órbita, ionizando o átomo.

Para manter o plasma é necessário manter a RF, pois logo que o átomo se ioniza, outro elétron se liga a ele, mas para isso precisa perder energia, que é liberada na forma de fótons (processo de recombinação). Porém, este elétron passará a oscilar, devido à RF, dando continuidade ao processo de ionização.

Distância de Debye:

A distância de Debye é um parâmetro importante para a descrição de um plasma. Trata-se de uma medida da distância sob a qual o campo elétrico gerado por uma partícula carregada é sentido por outra. As partículas carregadas se distribuem de tal maneira que blindam qualquer campo elétrico a uma distância da ordem da distância de Debye. Esta blindagem é uma consequência do aspecto coletivo das partículas que compõe o plasma. A distância de Debye é dada pela seguinte fórmula:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 kT}{n_e e^2}} \quad \text{Eq. 2}$$

Nesta fórmula, λ_D é a distância de Debye, ϵ_0 é a constante de permissividade elétrica do vácuo, e vale $8,85 \times 10^{-12}$ F/m, k é a constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23}$ J/K, T é a temperatura eletrônica do plasma, n_e é a densidade de elétrons no plasma, e e é a carga do elétron, $1,60 \times 10^{-19}$ C. Percebemos que λ_D depende apenas de T e de n_e , visto que são as únicas variáveis presentes na fórmula.

Campos elétricos em plasmas:

Partículas eletricamente carregadas sofrem a ação de forças elétricas quando estão em um campo elétrico. A intensidade destas forças é dada pela seguinte equação:

$$F = qE \quad \text{Eq. 3}$$

Sendo q o módulo da carga da partícula e E o valor do campo elétrico, sendo que cargas negativas são atraídas para o pólo positivo e as cargas positivas para o pólo negativo. Considerando a segunda lei de Newton e substituindo-a na Eq. 3 temos:

$$a = \frac{qE}{m} \quad \text{Eq. 4}$$

Nesta fórmula, a é a aceleração da partícula e m sua respectiva massa.

Como já foi discutido acima, quando um plasma sofre a ação de um campo elétrico tende a se moldar a ele, blindando-o. Os elétrons que compõe o plasma possuem massa muito pequena, logo, são acelerados com facilidade até o eletrodo positivo, mesmo que o campo elétrico seja de baixa intensidade; já os íons possuem massa muito maior do que a dos elétrons, e por isso precisam de campos elétricos mais intensos para ser acelerados até o pólo negativo.

Montagem Experimental

Geração de campo elétrico:

Para gerar um campo elétrico no interior do plasma, foram usados dois eletrodos, conectados a um circuito, esquematizado a seguir, que consiste de uma ponte de diodos e um transformador ligados a um variac, e as saídas positiva e negativa são conectadas a eletrodos no interior do plasma, onde o campo elétrico é gerado. Há, ainda, um fusível na saída do variac, para proteger o circuito caso haja algum pico de corrente.

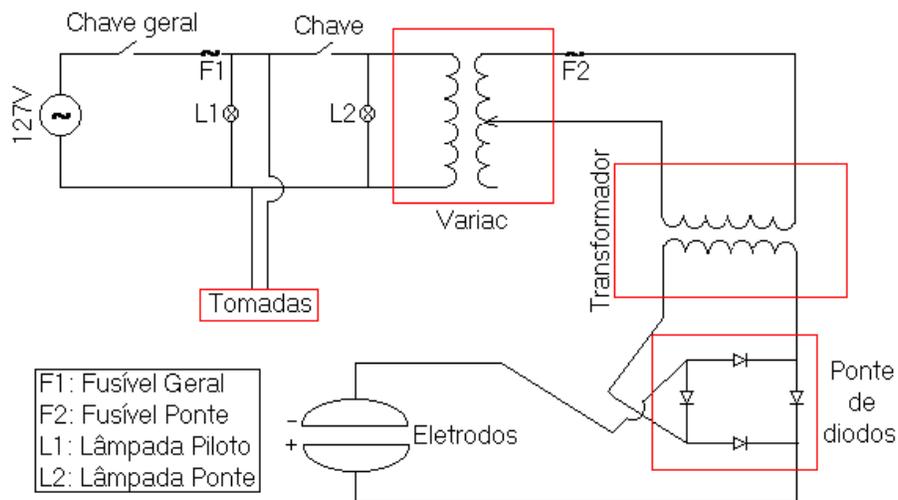


Fig. 2: Esquema do circuito usado para gerar o campo elétrico

A rede elétrica funciona com corrente alternada, porém desejamos observar o que acontece quando colocamos uma tensão nos eletrodos que estão dentro da câmara, e se ligarmos os eletrodos diretamente na corrente alternada, que oscila com uma frequência de 60 Hz, a observação do comportamento do plasma poderia ser observada somente através de equipamentos fotossensíveis (um fotodiodo, por exemplo), visto que nosso olho não é capaz de observar mudanças tão rápidas, por isso foi montado este circuito, que recebe a corrente alternada do variac e a converte para corrente contínua, de modo que um dos eletrodos será positivo e o outro negativo, assim pode-se observar a olho nu o que acontece quando colocamos uma tensão nos eletrodos, tornando o experimento mais simples e didático.

O transformador foi adicionado ao circuito com a finalidade de aumentar a tensão entre os eletrodos, pois com os 127 V da rede elétrica, os elétrons iriam se mover para o eletrodo positivo, mas os íons, por serem mais pesados, não iriam se mover para o eletrodo positivo. Neste experimento foi usado um transformador capaz de aplicar uma tensão de 300 V aos eletrodos quando a tensão de entrada é 127 V, mas como a ponte de diodos multiplica o valor da tensão de saída do transformados pelo fator $2^{1/2}$, a tensão máxima que pode ser aplicada aos eletrodos é de 424 V.

A entrada do variac foi ligada a uma chave liga-desliga, que possibilita ligar e desligar o circuito quando for necessário, e à rede elétrica. Também foi colocada uma lâmpada, de modo que podemos saber se a chave está ligada, além de ajudar a diagnosticar possíveis problemas (por exemplo, se a chave estiver ligada e a lâmpada não acender, pode significar que o fusível queimou, a tomada não está conectada ou então há mal-contato no fio). Note que o circuito responsável pela tensão nos eletrodos é independente do resto do circuito simbolizado na figura 2 pela chave geral, lâmpada piloto, fusível geral e tomadas, sendo que

as últimas fornecem energia elétrica para o gerador de RF, sistema de vácuo e outros equipamentos necessários para o funcionamento da máquina.

Os eletrodos foram feitos com ralos para pia, que foram parafusados a pequenos cilindros de metal colados a tubos de vidro que fazem a ligação dos eletrodos com o meio externo através de barras de latão em seu interior. Obviamente, os tubos possuem uma boa vedação, de modo que o ar externo não pode entrar na câmara através deles. Este sistema de vedação é feito com torr seal, uma cola especial para vácuo (pode-se usar araldite ou algum similar) e são usadas presilhas e “o-rings” para apertá-los, deve-se tomar cuidado para não danificar o vidro. As barras de latão se encaixam por pressão a buracos feitos no centro dos cilindros

Eletrodos também podem ser feitos com moedas, basta fazer furos nos centros destas e parafusá-las aos tubos que as ligam com o exterior da câmara, sendo que a troca destes eletrodos pelos citados no parágrafo anterior ou qualquer outro que se queira testar é muito simples, bastando-se desparafusar um e parafusar o outro. Eletrodos feitos com moedas são mais baratos, mas por possuírem área menor, não trazem resultados tão bons. No entanto pode-se realizar o experimento sem problemas.

Sistema de vácuo:

Para produzir o plasma nessas condições, é necessário bombear o ar no interior da câmara, tornando-o rarefeito, pois desse modo há pouco gás para ionizar e ele se ioniza mais facilmente. Por isso foi utilizado um sistema de bombeamento constituído por duas bombas de vácuo: uma mecânica e uma turbomolecular (a descrição do funcionamento destas bombas pode ser encontrada na ref. 6). A bomba mecânica produz um pré-vácuo que possibilita uma queda da pressão até um valor suficientemente pequeno para que a turbomolecular possa funcionar, reduzindo ainda mais a pressão. Além das bombas e da tubulação, há uma ventoinha para refrigerar a bomba turbomolecular, um painel que controla as bombas e um medidor de vácuo do tipo pirani, que são mostrados abaixo:

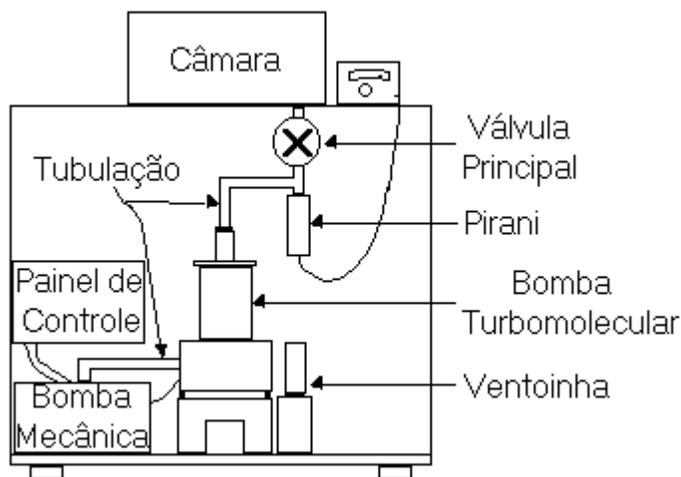


Fig. 3: Sistema de vácuo usado no experimento

Quando a bomba mecânica é ligada, a pressão no interior da câmara começa a cair. Após alguns instantes a bomba turbomolecular começa a funcionar, fazendo com que haja uma queda maior na pressão. O fluxo de gás que é enviado para a câmara pode ser controlado por uma válvula agulha, de modo que a pressão pode ser controlada pela injeção

de gás. A válvula mostrada na figura possibilita isolar a câmara após desligar as bombas de vácuo, evitando a entrada de ar.

Procedimento

Antes de qualquer coisa, é necessário ligar a fonte de RF e colocá-la em “standby” para aquecer a válvula que há em seu interior. Em seguida liga-se a chave geral da mesa onde o experimento está montado e liga-se o sistema de vácuo, provocando queda da pressão no interior da câmara.

Quando a pressão estiver baixa o suficiente, a fonte de RF é ligada e uma pistola que gera descargas elétricas é usada para injetar elétrons no interior da câmara iniciando o processo de ionização. Uma vez gerado, o plasma é mantido pela RF.

Em seguida, deve ser ligado o circuito, e conforme se varia a tensão no variac, pode-se observar que quanto maior a tensão nos eletrodos, mais intensa será a luz emitida pelo plasma em torno do eletrodo positivo. Isto é devido ao fato do plasma se moldar ao campo elétrico para se manter eletricamente neutro, e como os elétrons possuem maior mobilidade do que os íons, se moldam ao eletrodo positivo. A partir de uma certa tensão, os íons existentes no plasma passam a se mover e também se observa luz ao redor do eletrodo negativo.

A tensão entre os eletrodos é suficiente para manter o plasma, de modo que o gerador de RF pode ser desligado. Diminuindo-se a tensão o plasma desaparece.

Resultados

Foi possível observar claramente o comportamento do plasma, visto que a uma pressão adequada quase todo o plasma se concentra ao redor do eletrodo positivo quando a tensão é tal que os elétrons sejam atraídos até ele, e a uma tensão um tanto maior os íons passam a ser atraídos pelo eletrodo negativo, enquanto que sem tensão o plasma se molda aos dois eletrodos, sendo que a intensidade da luz ao redor dos eletrodos é praticamente a mesma.

Além disso, pôde-se observar que, quando a tensão entre os eletrodos é grande, o plasma formado ao redor do eletrodo positivo tem uma cor violeta, enquanto que ao redor do eletrodo negativo a cor do plasma é roxa. Isto é devido a diferenças de energia entre os elétrons existentes nas proximidades de cada eletrodo resultando em fótons com energias diferentes.

Também se pode observar que há uma certa distância entre o plasma e os eletrodos, ou seja, eles não chegam a entrar em contato, exatamente como previsto por Debye. A distância entre o plasma e o eletrodo é a distância de Debye.

Com relação a medições quantitativas pode-se dizer que, a uma pressão de 6×10^{-1} torr, estando os eletrodos a uma distância de 15 mm, o plasma de RF se forma mesmo não havendo tensão entre os eletrodos. Com uma tensão de 50V o plasma se molda ao redor do eletrodo positivo, e com 200V pode-se observar claramente que ele está se moldando aos dois eletrodos. A tensão máxima que pode ser obtida é de cerca de 390 V (embora seja difícil medir devido às oscilações na rede elétrica), menor do que os 424V esperados. O plasma ioniza sozinho (sem necessidade de RF) se a tensão for de no mínimo 250V. A RF interfere um pouco nas medições, de modo que o erro nas medidas das tensões (devido não somente à RF, mas também a erros sistemáticos, oscilações na rede elétrica e todas as outras eventuais fontes de erros) é de aproximadamente 5%.

Conclusão

Este experimento visa demonstrar uma propriedade interessante do plasma, que pode ser observada facilmente a olho nu, possibilitando o uso deste experimento para demonstrar propriedades básicas de plasmas mesmo para pessoas sem conhecimento algum sobre este assunto.

Embora alguns equipamentos usados neste experimento sejam relativamente caros, como bombas de vácuo, a montagem de uma máquina como esta é simples, seu custo não chega a ser muito alto e o uso do ar atmosférico para gerar plasma elimina a necessidade de usar cilindros de gás. O experimento é seguro, visto que não necessita de alta tensão e o isolamento elétrico é barato e fácil de fazer, portanto, é uma forma interessante de divulgar a física de plasmas para leigos e estudantes dos mais diversos níveis.

Outros experimentos sobre plasmas foram apresentados em semestres anteriores, e são citados nas referências. A ref. [7] é um trabalho bem interessante, onde se pode obter informações sobre o uso de ímãs para se observar as linhas de campo magnético e sobre as cores emitidas pelo plasma, sendo que cada espécie química emite luz em certos comprimentos de onda discretos. Essa diferença nas cores também pode ser observada neste experimento, conectando-se um cilindro de gás à entrada de gás existente na parte inferior da câmara e observando as cores de diferentes plasmas.

Já a ref. [8] consiste em aplicar campos elétricos ou magnéticos ao plasma para moldá-lo, fazendo com que ele assuma formas geométricas diversas.

Por fim, a ref. [9] tem um aprofundamento teórico muito maior, podendo complementar o texto deste relatório. Com relação ao experimento descrito, trata-se de ionizar gases diferentes, para mostrar a diferença das cores, além de mostrar como o plasma se comporta quando se varia a pressão no interior da câmara, o que também pode ser feito com a montagem experimental deste trabalho.

A inovação deste trabalho consiste em demonstrar como o plasma se comporta na presença de um campo elétrico externo, e como ele se molda aos eletrodos conforme se varia a tensão (com o uso de um variac), o que ainda não havia sido feito.

As referências apresentadas aqui são boas opções para quem desejar aprender mais sobre este assunto.

Fotografias do experimento:



Fig. 4: Visão frontal do experimento, pode-se ver os painéis de controle do circuito, do sistema de vácuo e do pirani, o variac e o transformador. Na mesa ao lado do experimento está o gerador de RF.



Fig. 5: Vista superior da máquina, pode-se ver a câmara, os eletrodos, a pistola, a chave geral e os painéis de controle.



Fig. 6: Sistema de vacío

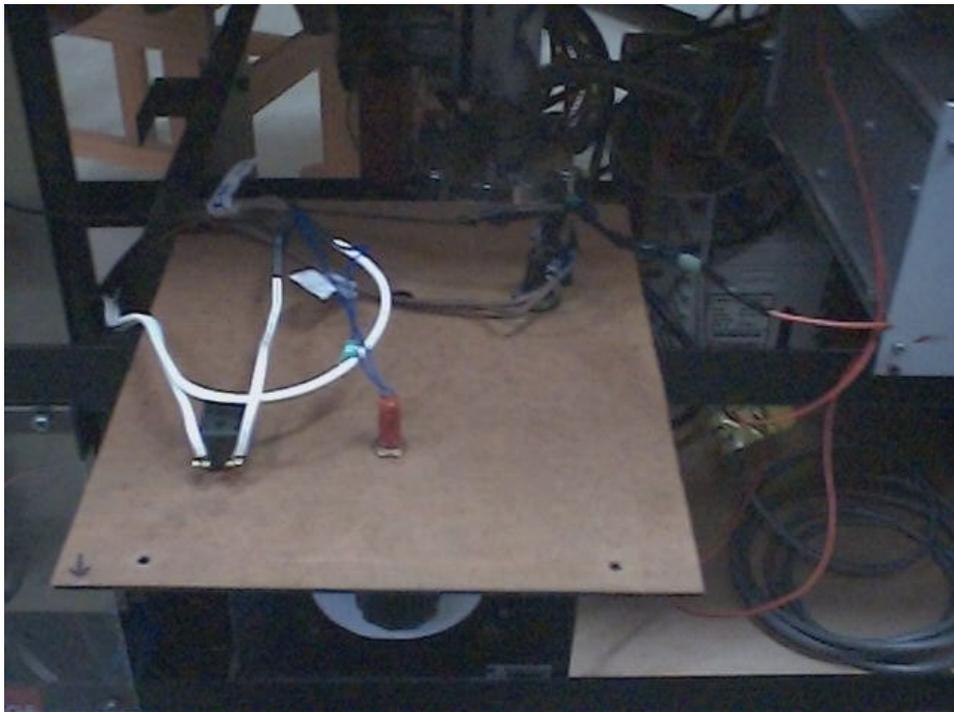


Fig. 7: Circuito



Fig. 8: Plasma no interior da câmara. Uso de moedas como eletrodos.



Fig. 9: Plasma se moldando aos eletrodos quando não há tensão aplicada nestes.

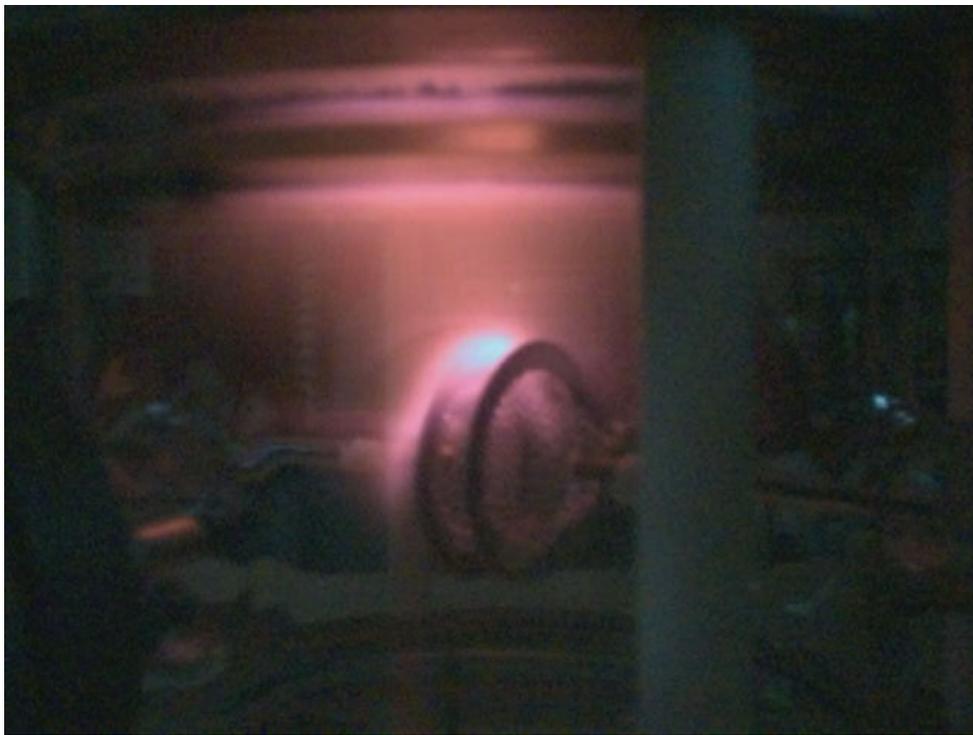


Fig. 10: Plasma se moldando ao eletrodo positivo quando há uma tensão de 50V entre os eletrodos.

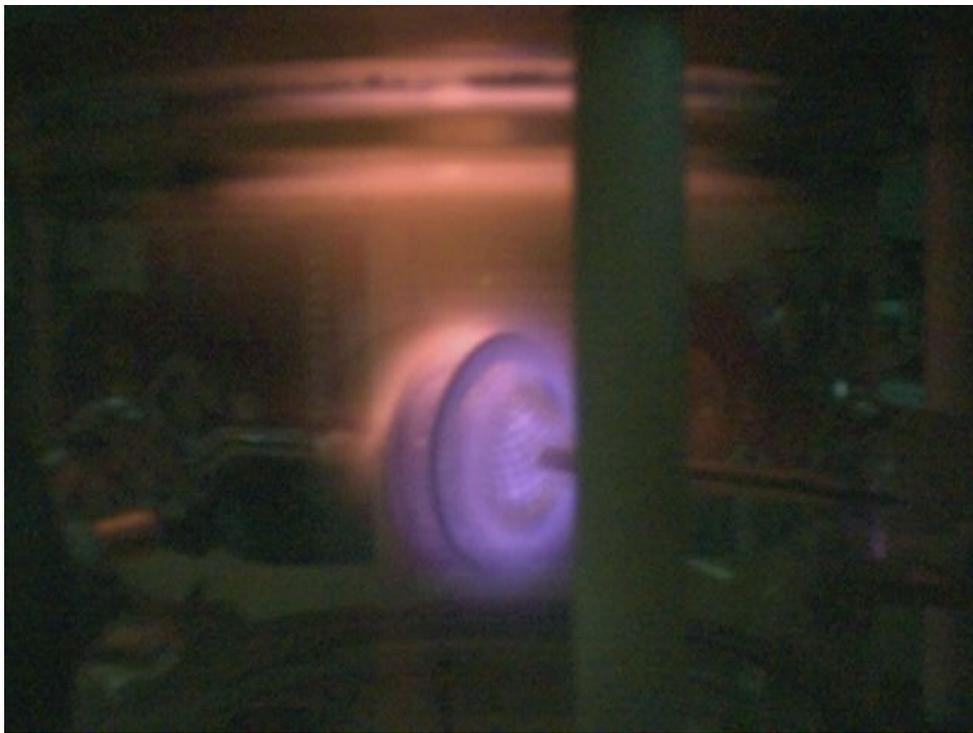


Fig. 11: Plasma se moldando aos eletrodos quando a tensão entre eles é máxima. Repare a diferença nas cores.

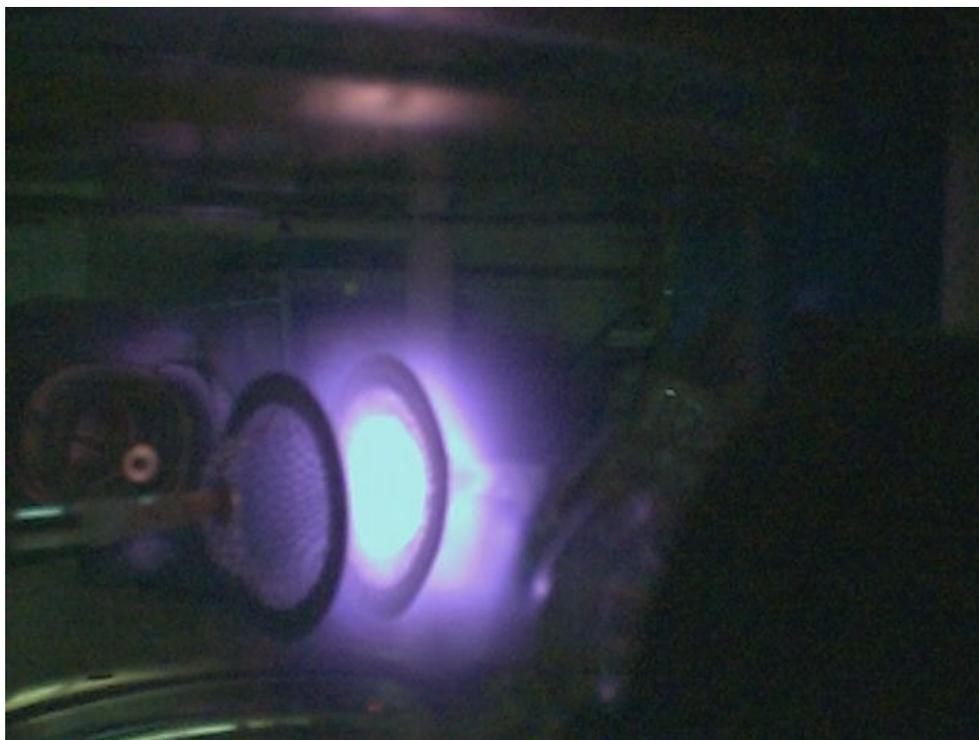


Fig. 12: Não há mais necessidade de RF para manter o plasma.

Referências bibliográficas

- 1 – Chen, F. F.; Introduction to Plasma Physics; Plenum Press, New York, 1974.
- 2 – Bittencourt, J. A.; Fundamentals of Plasma Physics – Second Edition; Edição do Autor, S. J. dos Campos, SP, 1995

- 3 – www.plasma.inpe.br
- 4 – www.plasmas.org
- 5 – <http://ippex.pppl.gov>
- 6 – Gama, S.; Introdução à ciência e tecnologia de vácuo – Apostila de F 640, IFGW – Unicamp, Campinas, SP, 2002
- 7 – Metz, H. L.; Produção de plasma por RF para demonstração das linhas de campo magnético e estudo das cores; relatório de F 809 – 2º sem. 2003
- 8 – Manfrini, M. A.; Geração e modelamento de plasma por radiofrequência; relatório de F 809 – 2º sem. 2003
- 9 – Costa, R. N. P.; Plasma gerado por fonte de radiofrequência; relatório de F 809 – 1º sem. de 2003