



Universidade Estadual de Campinas  
Instituto de Física Gleb Wataghin



# **Produção de Plasma por RF para Demonstração das Linhas de Campo e Magnético estudo das Cores**

**Aluno:** Hugo Leonardo Metz

**Orientador:** Prof. Dr. Munemasa Machida – DEQ – IFGW – Unicamp

**F 809** – Instrumentação para o Ensino

## Resumo

Estamos acostumados com três estados da matéria, a saber: sólido, líquido e gasoso. Porém existe um 4º estado, chamado Plasma. Este estado é mais comum do que o que imaginamos, visto que mais de 99% de toda a matéria do universo.

O plasma possui várias utilidades práticas diárias, como as lâmpadas fluorescentes, por exemplo, ou aplicações mais novas, como a purificação de água através da radiação UV emitida pelo plasma.

Outro exemplo interessante e particularmente intrigante são as auroras boreais, efeito no qual o céu adquire um brilho diferente.

O plasma também possui algumas características, como o fato de sofrer o efeito de um campo magnético externo ou ter sua cor alterada quando alterada a pressão, bem como o fato de que cada elemento possui cores específicas, que quando estudadas com a técnica de espectroscopia de emissão, revela a “assinatura” de cada átomo. No entanto, não empregamos tal técnica por motivos técnicos.

## O que é o Plasma

O plasma é o quarto estado da matéria, que se obtém cedendo energia às moléculas de um gás de modo a que elas aumentem a sua agitação térmica. Energia é necessária para arrancar elétrons de átomos para produzir plasma. A energia pode ter várias origens: térmica, elétrica ou luminosa (luz ultravioleta ou luz visível muito intensa de um laser). Com energia de sustentação insuficiente, plasmas recombina-se em gases neutros. Pela ionização, cada átomo transforma-se num par íon-elétron e o meio que era neutro passa a ser condutor. Quando o número de pares íon-elétron for suficientemente elevado para que o novo meio exhiba comportamento coletivo diz-se que estamos perante um plasma.

Comportamento coletivo significa que o meio, porque é condutor, deixa de ser regido por forças de pequeno alcance, como por exemplo as colisões, e passa a ser governado por forças de longo alcance do tipo, por exemplo, da Lei de Coulomb.

Temperatura e energia são dois conceitos que estão intimamente relacionados. Por isso as temperaturas dos plasmas são normalmente expressas em eletronsvolts.

Um eletronsvolt (eV) corresponde a 11600 graus Celsius, o que é equivalente também a  $1,6 \times 10^{-19}$  Joules.

A temperatura e densidade dos plasmas se estendem desde relativamente frios e tênues (como a aurora) até muito quentes e densos (como o centro de uma estrela). Sólidos, líquidos e gases comuns são eletricamente neutros e muito frios ou densos para estarem no estado de plasma.

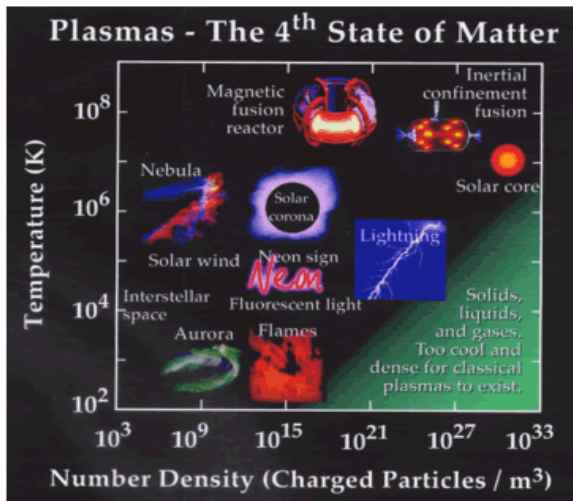
Ainda sobre o conceito de temperatura, chamo a atenção para o fato das temperaturas dos íons e dos elétrons de um plasma serem diferentes, dado que estas duas espécies de partículas têm normalmente estados de equilíbrio diferentes.

## O Estudo dos Plasmas

As equações de Navier-Stokes são a base para o estudo de sistemas fluidos e de gases neutros. As equações de Maxwell para o Eletromagnetismo e a equação de Boltzmann para o plasma são a base para o estudo de sistemas eletrodinâmicos, cujo plasmas são os principais exemplos.

Plasmas são agregados condutivos de partículas carregadas e neutros que exibem efeitos coletivos. Além disso, plasmas carregam corrente elétrica e geram campos magnéticos. Plasmas são a forma de matéria mais comum, compondo mais de 99% do universo visível.

Plasmas são radicalmente multiescalares em dois sentidos: (1) a maioria dos sistemas de plasmas envolvem acoplamentos eletrodinâmicos entre a micro, meso e macroescala e (2) sistemas de plasmas ocorrem na maioria dos limites físicos possíveis no espaço, energia e escalas de densidade. A fig. 1 ilustra onde os sistemas de plasma podem ocorrer em termos da densidade e condições de temperatura.



**Fig. 1** - Ocorrência dos Sistemas de Plasmas

No entanto, a extensão completa de densidade e energia (temperatura) possíveis e escalas espaciais vão além dessa ilustração. Por exemplo, alguns plasmas espaciais medidos apresentaram densidade de  $10^{-10} / \text{m}^3$  (13 ordens de grandeza abaixo da escala apresentada na figura!). Por outro lado, plasmas de quark-gluons são estados nucleares de matéria extremamente densos. Para temperatura (ou energia), alguns estados cristalinos de plasmas produzidos em laboratório tem temperaturas próximas ao zero absoluto. No outro extremo, plasmas espaciais medidos apresentaram temperaturas térmicas acima de  $10^9$  Kelvin e raios cósmicos são observados à energias acima daquelas produzidas em qualquer acelerador feito pelo homem.

Por causa de os plasmas serem condutivos e responderem a campos elétricos e magnéticos e poderem ser eficientes fontes de radiação, eles podem ser usados em inúmeras aplicações onde tais controles são necessários ou quando alguma fonte especial de energia ou radiação é requerida.

Um exemplo interessante e de efeito bem bonito é a chamada *aurora boreal*. A aurora boreal é um fenômeno causado pela interação dos ventos solares com os pólos magnéticos terrestres, que são constituídos por partículas carregadas eletricamente. São fenômenos luminosos caracterizados por faixas brilhantes e coloridas no céu observados nos pólos Norte e Sul.

O estudo do comportamento dessas partículas e campos magnéticos é importante para a operação de satélites de comunicações, estações de rádio e mesmo centrais elétricas. "Tempestades" eletromagnéticas espaciais podem afetar esses sistemas.

As nuvens de plasma - constituído por íons, partículas carregadas eletricamente - do vento solar têm um campo magnético forte, que interage com o da Terra.

O planeta é como um ímã, com pólos magnéticos sul e norte. A região do espaço em torno da Terra onde o campo magnético afeta as partículas vindas do Sol chama-se magnetosfera. Essa região age como "um grande casulo magnético" envolvendo o planeta.

O vento solar atinge a Terra pelo lado iluminado pelo Sol e cria uma "cauda" de partículas que se estende para fora do lado escuro do planeta. Os satélites mostraram como mudanças no campo magnético e na velocidade das partículas elétricas precedem por alguns minutos a intensificação do brilho da aurora, isto é, ao acontecer a reconexão na "cauda" da magnetosfera terrestre, a energia solar flui para a Terra na forma desse fenômeno luminoso. A reconexão na "cauda" formada pela passagem do vento solar ocorre em uma região cuja distância da Terra varia de 140 mil km a 160 mil km.

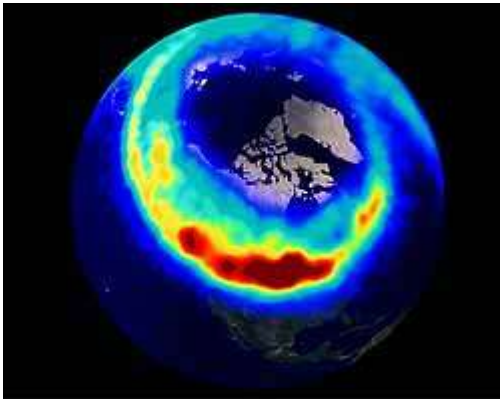


Fig. 2 - Aurora no hemisfério Norte da Terra, registrada na frequência ultravioleta pelo satélite Polar

As tempestades magnéticas resultantes das erupções solares --que nos dois casos desta semana avançaram em direção à Terra a velocidades estimadas entre 6,4 milhões e 8 milhões de quilômetros por hora-- provocam interferências nas comunicações e colocaram em alerta o setor de energia, mas também promoveram auroras boreais espetaculares.



Fig. 3 - Aurora Boreal sobre o Mar Báltico

No hemisfério norte, grande parte da Europa tem conseguido avistar clarões avermelhados nos céus, resultado do impacto no campo magnético terrestre da energia liberada pelas

erupções solares. As cores destas auroras variam de azul e verde a vermelho, roxo e violeta, conforme o tipo de vento solar que atinge o campo magnético terrestre.

O fenômeno costuma se produzir apenas nas zonas mais próximas dos pólos, acima dos 60 graus de latitude, como no Canadá e na Islândia. Isso porque "o campo magnético terrestre puxa a energia [recebida durante a tempestade solar] para os pólos", diz o astrônomo Sandro Batista, do Observatório Astronômico de Coimbra.

## **Aplicações do Plasma**

### **Plasmas para Energia**

A vasta potência irradiada pelo nosso sol é gerada pelo processo de fusão em que átomos leves se combinam com uma grande liberação de energia. Na natureza, as condições ideais para fusão ocorrem apenas no interior das estrelas. Pesquisadores estão tentando produzir as condições que permitirão que a fusão aconteça na Terra.

Fusão requer colisões energéticas de elementos muito leves, geralmente hidrogênio e isótopos, resultando em reações nucleares que levam a núcleos de hélio mais estáveis e outros subprodutos. Uma perda líquida de massa ocorre, produzindo energia livre de acordo com a famosa equação de Einstein.

Atualmente um grande esforço tem sido empregado para a obtenção da instrumentação adequada para produção de fusão nuclear em laboratório, e grandes máquinas, como a da fig. 4, têm sido projetadas e construídas com esse propósito.



**Fig. 4** - Tokamak de Princeton

### **Sistemas de Purificação de Água**

Fontes baseadas em plasmas podem emitir feixes intensos de radiação UV e raios-x ou feixes de elétrons para uma variedade de aplicações ambientais. Para esterilização de água, emissões intensas de UV afeta o DNA dos microorganismos de forma que eles não possam mais se reproduzir. Não muda o sabor ou o odor da água e o processo demora apenas 12 segundos. Este método é eficaz contra todos os vírus e bactérias da água.

Sistemas de purificação de água com UV intenso são especialmente importantes para desenvolvimento dos países porque é simples para usar e têm baixo custo alto rendimento.

## Produção de Plasmas por Radiofrequência

A geração de plasma por radiofrequência pode ser entendida se lembrarmos que a radiofrequência são ondas eletromagnéticas que, ao se propagarem, transmitem energia.

Para se conseguir o plasma, deve-se levar a RF através de um eletrodo até o gás, dentro da câmara de vácuo. O eletrodo funcionará como uma antena, e fará com que a energia das ondas de rádio sejam transferidas para o gás.

A transferência de energia ocorre porque o campo elétrico oscilante das ondas faz com que os elétrons do gás entrem em ressonância e oscilem com amplitudes cada vez maiores, até que tenham energia suficiente para se desligar do núcleo. Quando isso ocorre, o átomo fica ionizado, ou seja, se transforma num par íon-elétron, e o meio se transforma num meio condutor por causa do efeito de grupo, ou seja, muitos átomos ionizados ao mesmo tempo. Porém o átomo não permanece ionizado por muito tempo. Logo que um átomo perde um elétron, logo outro elétron se liga a ele novamente e o átomo volta a ser estável, e o processo continua, pois a RF ainda está lá.

## O Plasma e o Campo Magnético

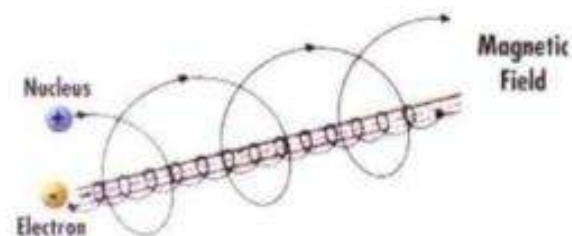
Sabemos, do estudo do Eletromagnetismo, que cargas em movimento constituem correntes, e que quando tais cargas em movimento, ou correntes, são postas sob a influência de um campo magnético  $B$  externo, elas sofrem o efeito de uma força, chamada Força Eletromagnética (eq. 1).

$$F_{mag} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (\text{eq. 1})$$

Esta força não existe se as cargas não tiverem velocidade. Como mencionado anteriormente, o plasma é um aglomerado de cargas positivas (os íons) e cargas negativas (os elétrons) que estão em constante agitação, se movendo em todas as direções aleatoriamente. Assim, é de se esperar que, embora o plasma não se comporte como uma corrente da forma como conhecemos, ou seja, orientada num sentido, este sofra os efeitos de uma força eletromagnética quando colocado sob a influência de um campo magnético externo. E é justamente o que se pode observar experimentalmente!

O arquétipo do movimento de uma partícula carregada num campo elétrico é circular, com a força eletromagnética provendo a aceleração centrípeta. Porém, se a velocidade  $v$  da carga contiver uma componente  $v$  paralela ao campo magnético, esta componente não será afetada pelo campo magnético, e a partícula se moverá com uma trajetória helicoidal, conforme ilustra a fig. 5.

Pela eq. 1, vemos que se a carga  $q$  tiver valor negativo, a força eletromagnética terá um valor negativo, o que quer dizer que esta aponta no sentido oposto. Por isso os elétrons se movem no sentido oposto aos íons.



**Fig. 5** - Trajetória helicoidal de um par íon-elétron num campo magnético **B**.

## A Cor do Plasma

No processo de produção de plasmas, constantemente há recombinação de elétrons e íons. Essa recombinação gera luz. Ao se passar essa luz por uma rede de difração, encontraremos não um espectro contínuo, mas um espectro discreto, ou seja, apenas algumas linhas de cores. Isso indica que a radiação eletromagnética emitida por átomos livres está concentrada em um conjunto de comprimentos de onda discretos. A investigação desse espectro mostra que cada átomo tem seu próprio espectro, e isso faz com que o plasma de cada gás tenha uma cor diferente.

A cor do plasma está relacionada à energia que o elétron adquire. Essa energia vem da RF, que faz com que os íons adquiram energia cinética e colidam uns com os outros. Quando a energia de colisão é suficiente, há ionização, recombinação e então aparece a luz. A energia de colisão está relacionada com a densidade do gás dentro da câmara. Quanto maior a pressão, maior a densidade, e vice-versa.

A distância que uma molécula percorre antes de se chocar com outra ou com as paredes do recipiente que a contém é chamada de livre caminho médio (eq. 2),

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi \left( \frac{nNA}{V} \right) * d^2} \quad \text{eq. 2}$$

onde  $n$  é o número de mols,  $M$  é o peso molecular,  $A$  é o  $n^\circ$  de Avogadro,  $V$  é o volume e  $d$  é o diâmetro molecular.

Para uma molécula à pressão ambiente, o livre caminho médio corresponde a  $10^5$  cm. Para uma pressão de  $10^{-3}$  torr, o caminho já aumenta para 7 cm, e para uma pressão de  $10^{-16}$  torr o livre caminho médio é de  $7 \times 10^8$  km!!!, sendo que o número de colisões entre moléculas (desprezando as colisões com as paredes do recipiente) cai para uma colisão a cada 50 anos.



Portanto, variando-se a pressão, varia-se a energia dos íons, e com isso varia-se o nível de excitação do elétron.

Cada átomo tem uma energia de ligação do elétron com o núcleo diferente um do outro. Essa energia é chamada de função trabalho, e é pelo menos essa energia que o elétron precisa para poder se desprender do núcleo.

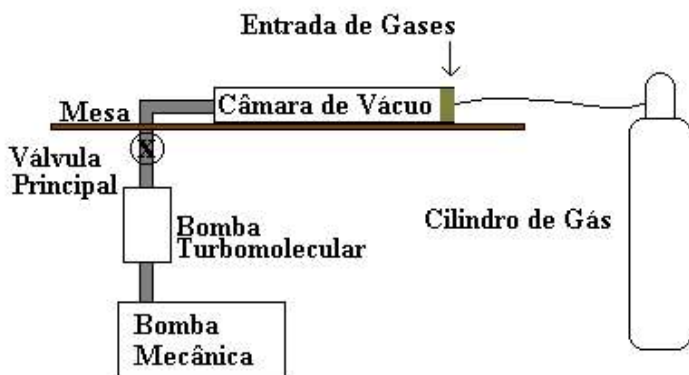
A energia está associada ao comprimento de onda através da eq. 3, onde  $h$  é a constante de Plank ( $h=6,63 \times 10^{-34}$  J\*s),  $n$  é um número inteiro (1, 2, 3, ...) e  $\nu$  é a frequência do fóton emitido.

$$E=nh\nu \quad \text{eq. 3}$$

Porém o elétron não vai guardando energia até que tenha energia maior do que a função trabalho. O elétron absorve energias discretas, ou seja, múltiplos inteiros de  $h$ . Por isso, ao se recombinar, o elétron emite exatamente a mesma energia que ganhou para deixar o átomo. Vemos portanto a relação entre a pressão, energia e cor do plasma.

## Materiais Utilizados e Montagem Experimental

Para este projeto, foi utilizado um sistema de vácuo constituído por uma bomba mecânica associada a uma bomba turbomolecular, conforme representado pela fig. 6.

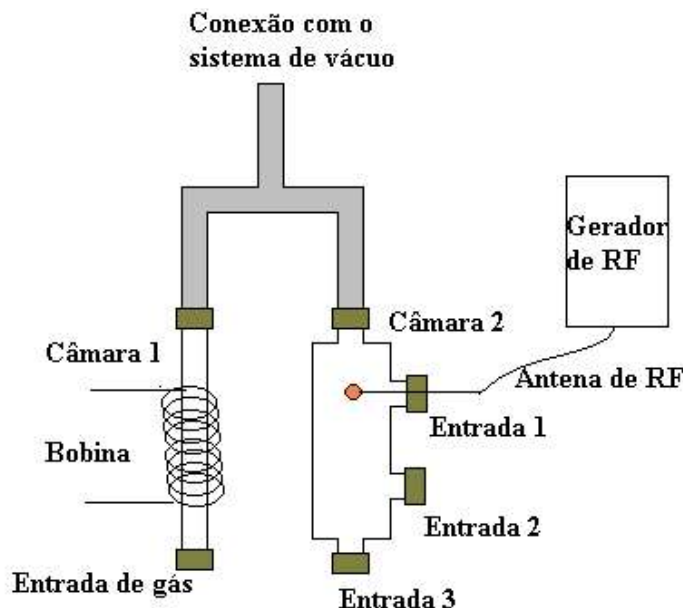


**Fig. 6** - Sistema de Vácuo

Este conjunto está ligado a duas câmaras de vácuo de vidro transparentes, as Câmaras 1 e 2, onde a Câmara 1 possui uma entrada para os gases, controlada por uma válvula agulha, e a Câmara 2 possui 3 entradas, que podem ser combinadas de várias maneiras, de acordo com o experimento a ser realizado. No nosso caso, utilizamos apenas a entrada 1, por onde introduzimos o eletrodo (ou antena) de RF no interior da Câmara 2.

A antena de RF está ligada a um gerador comercial de RF de frequência e potência não reguláveis (constantes). O esquema das câmaras de vácuo e do gerador estão representados pela fig. 7.

Esta antena de RF é utilizada para produzir plasma apenas na Câmara 2. A produção de plasma na câmara 1 se dá através de uma bobina enrolada em torno da câmara.



**Fig. 7-** Câmaras de Vácuo, gerador de RF, antena de bobina

A Câmara 1 tem 22 cm de comprimento e aproximadamente 2,2 cm de diâmetro interno, enquanto que a Câmara 2 possui 22 cm de comprimento e 7 cm de largura em sua parte mais larga. Cada uma das entradas possui o mesmo diâmetro interno de 2,2 cm, compatível com as conexões de vácuo utilizadas na montagem.

O eletrodo (ou antena de RF) foi feito utilizando-se uma pequena moeda de R\$ 0,01 e a bobina foi feita utilizando-se um pedaço encapado de fio de cobre comum, de feixe único.

Os gases utilizados para o experimento foram a atmosfera (ar), o hélio e o argônio. Esses gases foram utilizados para se demonstrar as diferentes cores produzidas por átomos diferentes e por pressões diferentes na câmara.

## Procedimentos

É necessário que a câmara onde se deseja obter o plasma esteja numa pressão adequada, ou seja, nem alta demais e nem baixa demais. No nosso caso a pressão ideal é da ordem de  $10^{-2}$  torr. Para se chegar a essa pressão, ligamos o conjunto bomba mecânica e bomba turbomolecular (figs. 6 e 7), abrimos totalmente a válvula principal e aguardamos alguns instantes, até que se atingisse uma pressão da ordem de  $10^{-3}$  torr. Atingida essa pressão, controlamos a entrada de gás pela válvula agulha da Câmara 1, mantendo um fluxo de gás tal que a pressão de  $10^{-2}$  torr fosse mantida.

Inicialmente procuramos demonstrar as linhas de campo magnético. Utilizamos para essa demonstração a Câmara 2, e o gás adotado foi o ar. O procedimento adotado foi como descrito acima.

Atingida a pressão ideal, utilizamos um dispositivo carregado para injetar um elétron no interior da câmara. Esse dispositivo pode ser uma pistola desenvolvida para este fim, ou algo alternativo, como um pente atritado com o cabelo ou mesmo a própria mão, dependendo da pressão dentro da câmara.

Este elétron injetado fornece a energia necessária para se iniciar o processo de ionização. Este processo é mantido pela RF introduzida na Câmara. Para se demonstrar as linhas de campo magnético, utilizamos o ímã cilíndrico, aproximando-o da Câmara primeiramente de frente e depois de lado.

Após demonstrar as linhas de campo magnético, procuramos demonstrar as cores que o plasma de diferentes gases gera. Para esta demonstração, utilizamos a Câmara 1. Iniciamos a demonstração com o ar. Novamente, utilizamos um dispositivo carregado para injetar um elétron no interior da câmara. Este procedimento é idêntico ao descrito no parágrafo anterior. A diferença é que agora a RF não é injetada no interior da câmara por uma antena, mas por uma bobina enrolada na própria câmara.

Após a obtenção do plasma com o ar, variamos a pressão interna através do fluxo pela válvula agulha, para verificar a variação na cor devido à pressão. Repetimos este procedimento com o Hélio e com o Argônio.

## Resultados

As linhas de campo magnético ficam bem evidentes, tanto quando se aproxima o ímã de frente quanto quando se aproxima o ímã de lado. A evidência é maior quando o ímã é colocado na direção da antena de RF. O que vemos se parece com um fluxo de plasma, que toma a forma do campo magnético em uma das extremidades do ímã.

Ao colocar o ímã de lado, vemos claramente que o "fluxo" de plasma toma a forma de um semi-arco, saindo de uma das extremidades e entrando na outra. Isso demonstra que as linhas de campo magnético começam e terminam no ímã. Este resultado concorda plenamente com a lei de Maxwell do Eletromagnetismo que diz que o divergente do campo magnético é zero. Em outras palavras, "todo o campo que entra por um lado sai pelo outro".

Com relação às cores do plasma, obtivemos os seguintes resultados:

*Plasma do ar atmosférico:* vemos que o plasma do ar, com pressão da ordem de  $10^2$  torr, apresenta uma coloração lilás, e quando se rarefaz um pouco mais essa atmosfera, a cor tende para um azul acinzentado claro;

*Plasma de Hélio:* Com pressão da ordem de  $10^2$  torr, a cor é bem azulada. Em atmosfera mais rarefeita, da ordem de  $10^3$  torr, a cor vai para um verde bem definido, e quando

aumenta-se a pressão para um valor intermediário entre  $10^1$  e  $10^2$  torr, o plasma fica com cor lilás, muito parecida com a cor do ar atmosférico;

*Plasma de Argônio:* O plasma de argônio, para pressões da ordem de  $10^2$  torr, apresenta a cor amarela bem definida, e quando se rarefaz a atmosfera, a cor tende para o azul;

*Plasma de  $CO_2$ :* O plasma de  $CO_2$ , para pressão da ordem de  $10^2$  torr, apresenta uma coloração bem azulada bem clara. Para pressões mais baixas, essa cor se aproxima de um cinza esbranquiçado.

Como podemos verificar, a pressão está diretamente relacionada à cor do plasma, que por sua vez está relacionada com a energia das partículas (eq. 3).

A energia das partículas está associada ao livre caminho médio. Quanto mais baixa a pressão, menos partículas estão na atmosfera. Logo, a densidade é menor e por isso elas têm mais espaço para viajar antes de colidir, atingindo assim energias mais altas. Por isso percebemos a coloração tendendo ao azul para pressões baixas e coloração tendendo ao vermelho para pressões mais altas.

## **Conclusão**

Através deste projeto pode-se apresentar algumas formas de se conseguir plasma, além de se apresentar várias aplicações práticas, algumas delas fazendo parte do dia a dia das pessoas, bem como pudemos demonstrar experimentalmente as linhas de campo magnético de um ímã, cuja teoria é base para as equações do eletromagnetismo de Maxwell. Pudemos ainda demonstrar um resultado muito importante da física quântica, que é a quantização da energia, através da demonstração de cores nos plasmas, pois essas cores são entendidas apenas quando se utiliza a eq. 1, que é a equação fundamental da quantização da energia.

Como considerações finais, fica demonstrado, através deste projeto, que o ensino de física moderna para o Nível Médio pode ser feito sem grandes complicações ou grandes investimentos, podendo-se abranger vários fenômenos numa única montagem.

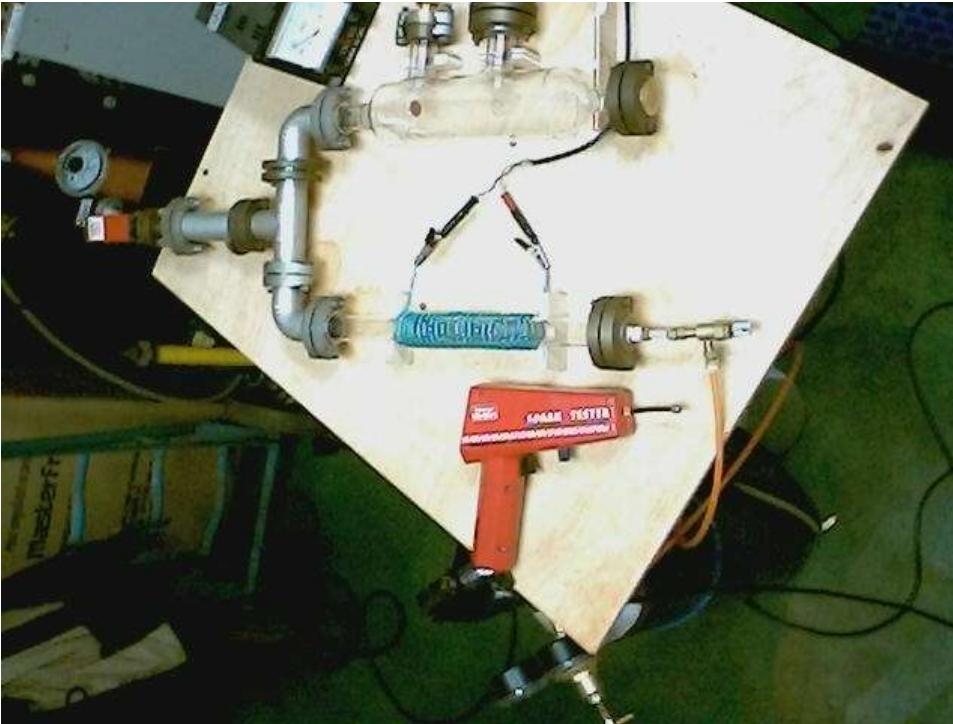
## **Fotos do Experimento**



**Foto 1** - Vista frontal da montagem, com destaque para os balões de gás e para o gerador de RF



**Foto 2** - Vista lateral da montagem, com destaque para as bombas mecânica (em baixo) e turbomolecular (acima)



**Foto 3** - Vista superior da montagem, onde podem ser observadas as duas câmaras de vácuo, o eletrodo (na câmara maior), a bobina de RF (na câmara menor), a válvula agulha com a mangueira de gás e também a pistola utilizada para acender o plasma.



**Foto 4** - Plasma de Hélio sendo produzido pela bobina na câmara menor. Podemos perceber a cor verde do plasma de Hélio.



**Foto 5** - Demonstração das linhas de campo magnético de um ímã cilíndrico. É fácil perceber a forma adquirida pelo plasma. Temos a impressão de um "fluxo" de plasma saindo do ímã.





**Foto 6** - Agora o ímã foi colocado de lado. Percebemos claramente a forma adquirida pelo plasma. A impressão que temos é que existe um "fluxo" de plasma de uma extremidade até a outra. Esse fluxo se torna menos denso à medida que se afasta do ímã.

## Referências:

Para este projeto, alguns sites sobre o assunto foram pesquisados, dentre os quais podem ser citados, como os mais importantes para o embasamento teórico, os seguintes:

- <http://www.plasmas.org/basics.htm>, que fala sobre algumas aplicações e de onde a maioria das imagens foi obtida;
  - <http://www.pppl.gov>, que fala principalmente das aplicações tecnológicas;
- <http://www.materiais.ufsc.br/Disciplinas/EMC5732/apostilapb.pdf>, que fala sobre o plasma, como é formado, bombas de vácuo, etc.

## Comentários do Prof. Lunazzi

*Projeto:* Projeto aprovado, embora tenho sido entregue muito fora do prazo

*Relatório Parcial:* Relatório parcial aprovado. Consta o atraso, que influi na note. Por outro lado, precisa ficar bem claro quando do relatório final, a diferença no trabalho com o do Maurício, 04 GERAÇÃO E MODELAMENTO DE PLASMA POR RÁDIO FREQUÊNCIA, que parece próximo mas não dá para julgar bem porque o relatório parcial dele é muito sucinto.