

F 809 – Instrumentação para Ensino

Relatório Final de Atividades

## ESPECTROSCOPIA DE PLASMA FRIO

Aluno: Myriano Henriques de Oliveira Junior RA.:992253  
myriano@ifi.unicamp.br

Orientador: Prof. Dr. Francisco das Chagas Marques  
marques@ifi.unicamp.br

Instituto de Física “Gleb Wataghin” – Unicamp  
27 de junho de 2002

## Índice

### Relatório das Atividades Realizadas (montagem do equipamento)

<b>Resumo do Projeto.....</b>	<b>2</b>
<b>Resumo das Atividades Desenvolvidas.....</b>	<b>2</b>

### Apostila

<b>I - Introdução.....</b>	<b>6</b>
<b>II - Suporte Teórico.....</b>	<b>6</b>
A – Ionização e Recombinação.....	6
B - Processos de formação.....	7
C - Descarga de gás (Descarga luminescente d.c. a baixa pressão).....	9
<b>III - Parte Experimental.....</b>	<b>11</b>
A – Aparato.....	11
B – Procedimento.....	11
1 - Preparação do sistema para a produção de plasma.....	11
2 - Produção de plasma.....	12
3 - Obtenção das linhas de emissão.....	12
4 - Determinando o comprimento de onda de cada pico.....	13
5 - Salvando os dados.....	13
<b>IV - Análise de dados.....</b>	<b>13</b>
<b>Apêndice I – Calibração do Espectrômetro.....</b>	<b>14</b>
<b>Apêndice II – Transições Ópticas Observadas no <sup>18</sup>Ar.....</b>	<b>15</b>
<b>Apêndice III – Linhas de Emissão do <sup>18</sup>Ar e <sup>80</sup>Hg.....</b>	<b>16</b>
- Linhas de emissão do Argônio.....	16
- Linhas de emissão do mercúrio.....	19
<b>Bibliografia.....</b>	<b>22</b>

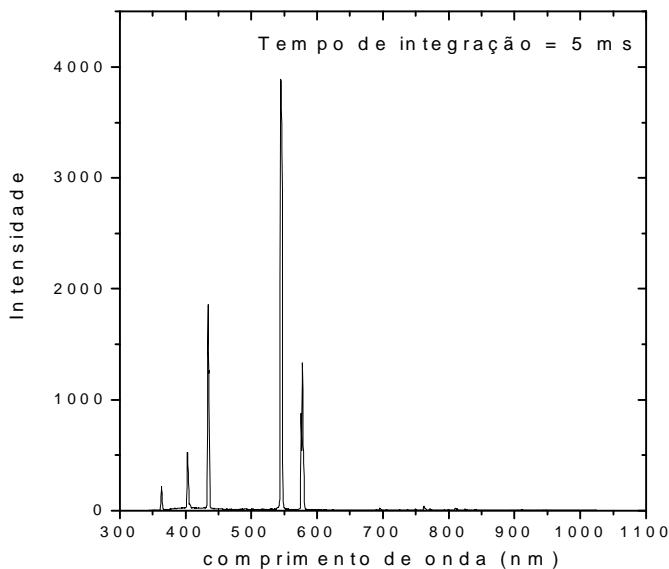
## RESUMO DO PROJETO

Neste trabalho deve ser montado um sistema para a produção de plasma frio e obtenção das linhas do espectro de emissão deste plasma, assim como a elaboração de um guia com as instruções necessárias para a realização de medidas com este equipamento.

## RESUMO DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

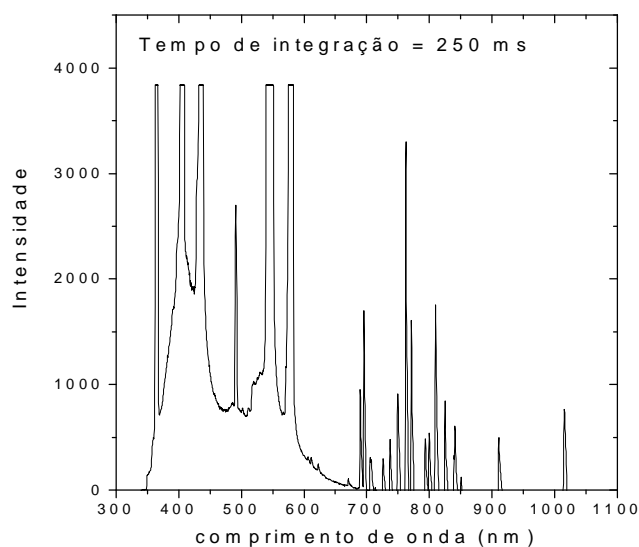
Como a apostila elaborada para a disciplina F-640 (anexa a este relatório) contém toda a parte teórica relativa a este projeto e o procedimento para a realização de medidas utilizando este sistema, esta primeira parte do relatório se limitará em descrever as atividades realizadas pelo aluno no desenvolvimento do projeto.

Inicialmente instalamos, no laboratório, um microcomputador e um espectrômetro da *Ocean Optics*, modelo USB2000 (*Miniature Fiber Optic Spectrometer*), e o *software OOIBase32* para interface micro-espectrômetro, sendo este *software* parte integrante do equipamento que constitui o espectrômetro. Em seguida foi realizado um teste com o espectrômetro, utilizando um lâmpada de Hg (emprestada pelo Laboratório de Ensino de Óptica; Técnico Responsável R.C. Costa), onde foi verificada a necessidade de calibrar o equipamento. As linhas de emissão da lâmpada de Hg obtidas são mostradas nas figuras 1 e 2 respectivamente.<sup>1</sup>



**Figura 1-** Linhas de emissão do Hg encontradas com tempo de integração de 5ms.

<sup>1</sup> O procedimento utilizado na calibração e a relação do comprimento de onda com o número de pixel são mostrados no Apêndice I (pág. n) da apostila que segue anexa a este relatório.



**Figura 2-** Linhas de emissão do Hg encontradas com tempo de integração de 250ms.

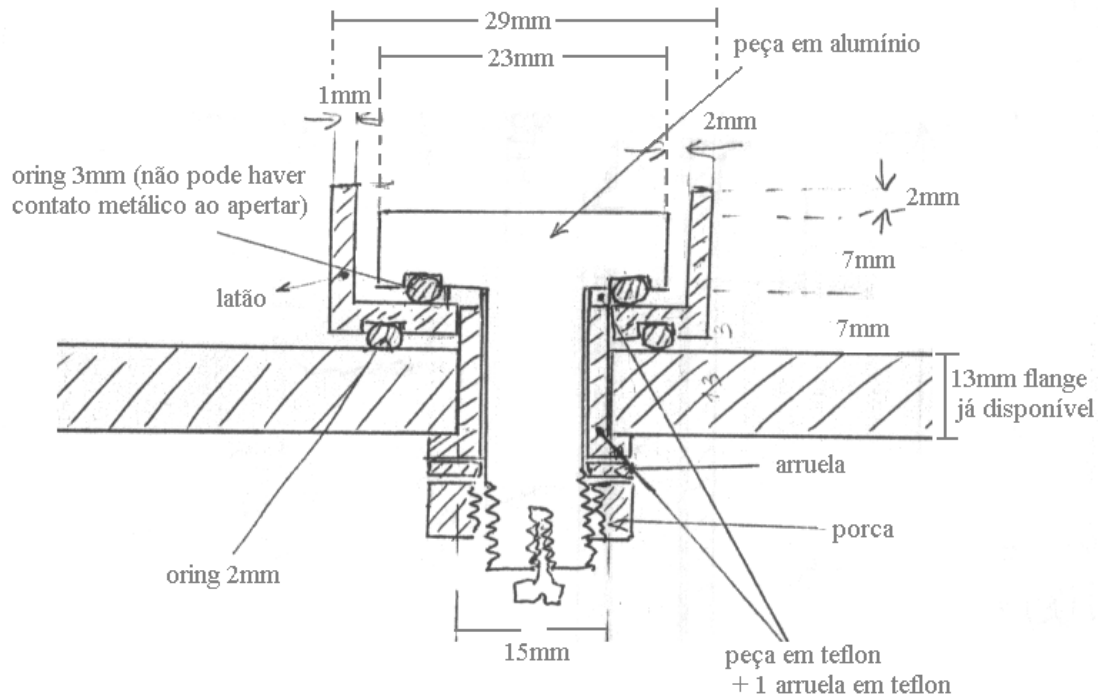
Posteriormente projetamos uma peça, que é constituída basicamente de dois eletrodos, que nos permitisse mover o eletrodo superior na vertical sem que houvesse a necessidade de abrir a câmara de vácuo (o projeto da peça foi enviado à oficina mecânica central da unicamp, onde foi confeccionada; o projeto é mostrado nas figuras 3 e 4). Adquirimos, também, uma campana de vidro para a montagem da câmara que seria acoplada ao sistema de vácuo já existente no laboratório (uma bomba difusora e uma mecânica).

Após termos montado o sistema de vácuo, fizemos alguns testes e verificamos a existência de vazamento, que nos tomou bastante tempo. Como eram vários pontos de vazamento (inclusive na própria câmara havia mais de um ponto de vazamento), tivemos um pouco de dificuldade para encontrar e vedar todos. Terminada esta etapa, como não tínhamos nenhum medidor de pressão devidamente calibrado à nossa disposição, calibramos um pirani (pertencente ao laboratório de ensino de vácuo e criogenia) que não estava sendo utilizado e o instalamos no equipamento, na parte superior da câmara. Instalamos, também na câmara, uma válvula agulha e a conectamos a um garrafão de argônio (este argônio foi adquirido para esta experiência). Para a montagem do sistema de vácuo, algumas peças foram requisitadas à oficina de vácuo.

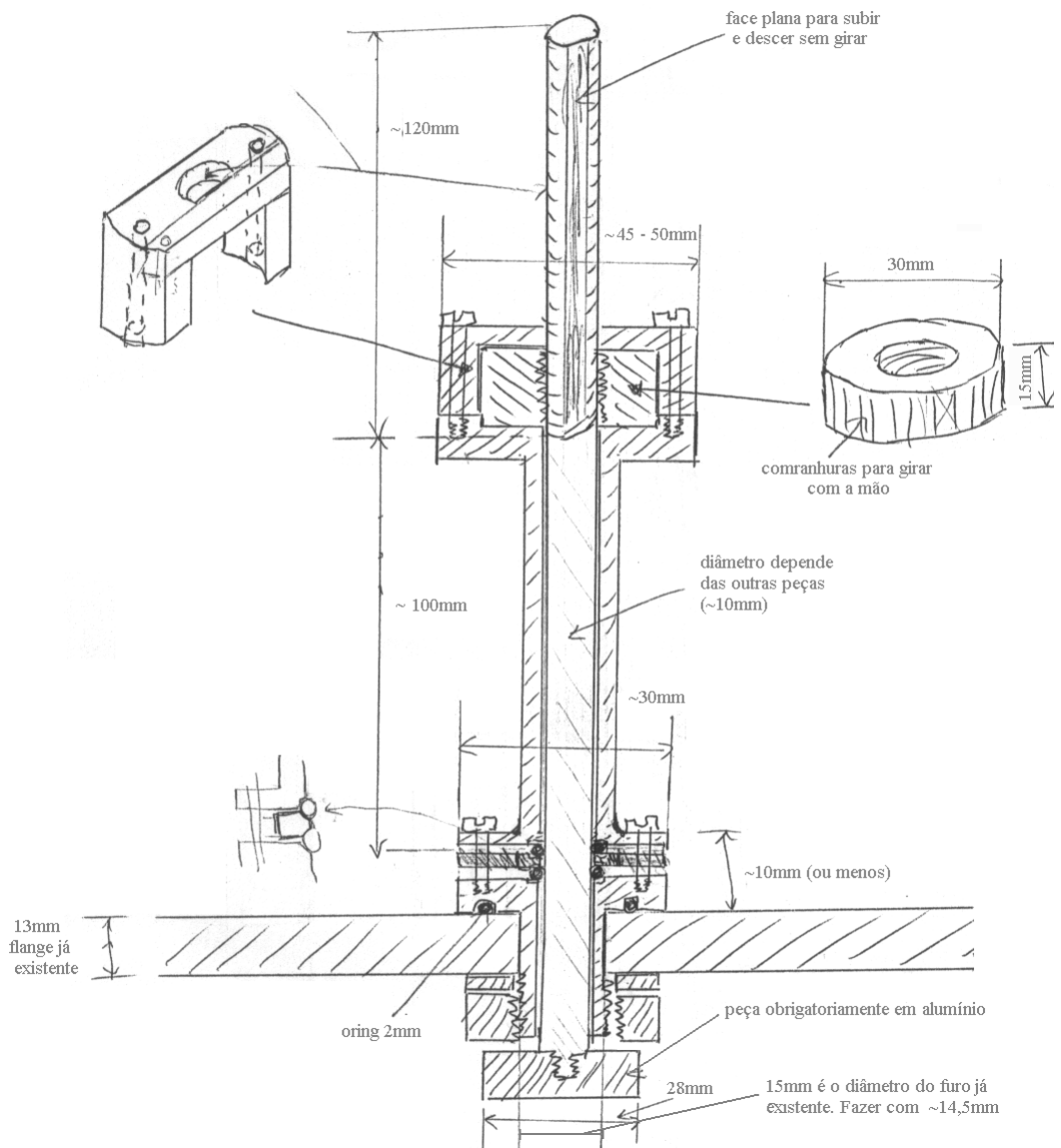
Realizada a montagem e os testes com o equipamento, aterramos todo o sistema e ligamos uma fonte d.c. de alta tensão em um dos eletrodos. Esta fonte foi emprestada pelo técnico Sales (do Departamento de Física Aplica), pois a fonte comprada para este experimento deverá chegar apenas no final do mês de julho deste ano.

Após estarmos com todo o sistema pronto, produzimos plasma de Ar (este ainda é o único gás que temos disponível), obtemos suas linhas de emissão (página 7) e observamos a estrutura da descarga luminescente, com o intuito de reconhecermos as suas distintas regiões (vide página 10). Como já era de se esperar, como a coluna positiva tem uma luminescência mais intensa que o restante da descarga, foi possível observar apenas a região escura de Faraday, a coluna positiva e a luminescência negativa.

Junto com o aparato experimental foi também elaborado um guia para a realização da experiência, que segue anexo a este relatório.



**Figura 3** – Projeto de como deve ser fabricado o eletrodo inferior.



**Figura 4** - Projeto de como deve ser fabricada a peça que possibilita o deslocamento na vertical do eletrodo superior.

## I - Introdução

Existem cinco estados físicos da matéria; sólido, líquido, gasoso, plasma e condensado de Bose-Einstein. Uma substância qualquer pode existir em um ou mais desses três primeiros estados, dependendo apenas dos valores de determinados parâmetros, tais como temperatura e pressão. Em geral, se tivermos uma substância inicialmente no estado sólido, podemos, adicionando energia suficiente ao sistema, fazer com que esta mude para o estado líquido, como por exemplo aquecendo a substância. Se continuarmos fornecendo energia ao sistema, até atingir pelo menos o calor de vaporização da substância, o líquido irá evaporar e será formado gás. Caso continuemos a fornecer energia ao sistema até que esta atinja o valor da energia de ionização da substância, o gás se ionizará, isto é, suas moléculas e átomos se separarão em elétrons e íons, resultando em uma “sopa” de íons e elétrons, a qual I. Langmuir<sup>2</sup> chamou de plasma.

A formação de plasmas ocorre em vários processos na natureza, por exemplo: O material interestelar encontra-se na forma de plasma, devido às altíssimas temperaturas nessa região; a aurora boreal e a ionosfera são plasmas, assim como descargas luminosas e elétricas. Sua formação pode também ser induzida e controlada pelo homem, como nas lâmpadas de vapor de mercúrio e de sódio e lâmpadas fluorescentes (Apesar de a luz que vemos ser emitida pelo fósforo depositado na superfície interna do tubo, e não pelo plasma diretamente), além de sua vasta aplicação em pesquisas científicas e tecnológicas.

Os principais objetivos desta experiência são: Observar a formação de plasmas e a estrutura da descarga luminescente e, obter as linhas de emissão do elemento utilizado para gerar o plasma identificando quais as transições eletrônicas envolvidas na emissão desta radiação.

## II - Suporte Teórico

### A – Ionização e Recombinação

Quando um plasma é produzido, vários fenômenos ocorrem simultaneamente e continuamente no seu interior. Devemos considerar esses fenômenos para que possamos compreender quais os efeitos por eles produzidos no comportamento do plasma, mas uma análise de todos esses fenômenos, e de seus detalhes, fogem do interesse desse material e da experiência que o aluno deve realizar, portanto faremos apenas uma abordagem simplificada<sup>3</sup> dos fenômenos que serão observados pelos alunos.

Para ionizar um átomo ou uma molécula, é necessário fornecer energia suficiente para que um ou mais elétrons das camadas mais externas escapem, a energia pode ser proveniente tanto de um fóton de radiação como por meios de processos de colisão entre duas partículas. O processo de colisão é muito comum na produção de plasmas em laboratório. Como os íons e os elétrons que formam o plasma são eletricamente carregados (embora o plasma não seja), eles podem ser acelerados por uma combinação de campos elétricos e magnéticos (ou eletromagnéticos) d.c. e a.c. aplicados externamente. Essa aceleração pode aumentar a velocidade das partículas de tal forma que estas sejam capazes de ionizar átomos neutros ao colidirem com eles. É importante notar que a

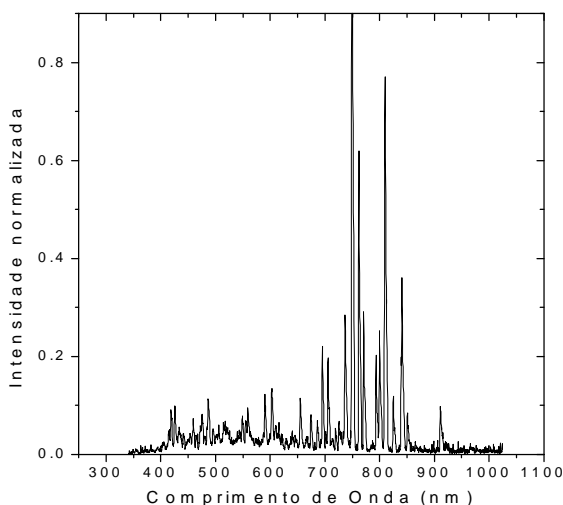
---

<sup>2</sup> I. Langmuir, *Physical Review*, Vol 33, p. 954 (1929).

<sup>3</sup> Apesar de simplificado, é de se esperar que esse material seja o suficiente para que o aluno compreenda quais fenômenos estão ocorrendo na experiência e “por que?”. Na página n, existe uma lista de sugestões de leitura para o aluno que estiver interessado em compreender estes fenômenos com um pouco mais de detalhes.

existência desse fenômeno só é possível devido à existência de algumas partículas carregadas presentes em gases não ionizados.

Ao mesmo tempo ocorre o processo oposto à ionização, a recombinação, onde elétrons e íons juntam-se para formar átomos neutros. Esse processo sozinho poderia eventualmente resultar no desaparecimento do plasma. Entretanto, se a ionização ocorre ao mesmo tempo e com a mesma taxa que a recombinação, o plasma continua a existir. Ao recombinar-se com um íon o elétron libera uma determinada quantidade de energia (energia de ligação) em forma de radiação eletromagnética, o que explica as linhas de emissão observadas nos plasmas [1].



**Figura 5** - Linhas de emissão observadas no plasma de  $^{18}\text{Ar}$

Na maioria dos casos observados na natureza o plasma não estará cem por cento ionizado, sempre existirão alguns átomos neutros presentes na “sopa”. Essas partículas neutras colidem com os elétrons e íons no plasma fazendo com que estes percam energia. Por outro lado, eles podem, por um processo de colisão chamado de troca de carga, forçar o íon a “capturar” um elétron de um átomo neutro. Isso pode resultar em uma perda de energia do próprio plasma, a troca de carga entre um íon “quente” (muito energético) e um átomo “frio” (pouco energético) resulta em um íon “frio” e um átomo “quente” [2].

Plasmas em laboratório são, tipicamente, produzidos em vácuo com pressão da ordem de  $10^{-6}$ Torr, e têm densidades de  $10^7$  a  $10^{18}$  partículas/cm<sup>3</sup> quando as condições para produzir ionização são alcançadas. Entretanto, é possível produzir plasmas tanto em pressões iguais ou superiores a 1atm como em pressões inferiores a  $10^{-6}$ Torr, sendo também possível em sólidos e líquidos. A energia média das partículas varia desde menos de 1eV até mais de 1MeV para elétrons (1eV=11,605K).

## **B - Processos de formação**

Para fazer plasma, é necessário que as energias das partículas neutras e das poucas partículas carregadas, que estão sempre presentes no material ainda não ionizado, sejam elevadas o suficiente para causar a ionização do material por colisão. As energias requeridas podem ser



ligeiramente baixas, temperatura ambiente, ou alguns milhares de graus, como para algum vapor de metal pesado, ou milhões de graus como é o caso das cerâmicas e bons dielétricos. Alguns métodos de produção e aquecimento de plasmas são enumerados na tabela 1.

Produção térmica	Descarga d.c.
Chamas	eletrodos frios
aquecimento de contato	eletrodos quentes ou emissores
Injeção de feixe	Descarga a.c. e r.f.
feixe de plasma	eletrodos (frios)
feixe de elétrons	eletrodos quentes (emissores)
feixe de íons	sem eletrodos
feixe energético neutro	ressonância ciclotron de elétrons ou íons
Foto-ionização	Descarga pulsada
	descarga induzida (ondas de choque)

**Tabela 1** – Processos utilizados para produção de plasmas.

A produção térmica de um plasma consiste simplesmente em aquecer o material, que normalmente é um gás, até que ocorra a ionização. Chamas de várias substâncias são parcialmente ionizadas e o grau de ionização pode ser realçado pela adição de metais alcalinos, sendo que esse tipo de plasma pode existir em pressão atmosférica. A ionização de contato é observada sob vácuo onde um metal é inserido no sistema para evaporar e colidir com uma placa aquecida. Tais plasmas são altamente ionizados e estáveis, mas as partículas têm, normalmente, baixas energias.

A descarga d.c. (método que será utilizado nesta experiência) normalmente é realizada utilizando dois eletrodos. Quando um potencial d.c. alto o suficiente é aplicado entre os eletrodos, o gás se ioniza e um plasma de descarga luminescente (*glow discharge*) é formado. Se a pressão for elevada o suficiente (talvez igual à atmosférica ou maior) e/ou a energia de formação for muito alta, o processo de ionização torna-se bastante abrupto e a descarga então se torna um arco (*arc discharge*) ou possivelmente uma onda de choque de plasma (relâmpago é um exemplo de arco). Os eletrodos podem ser alimentados a partir de uma fonte de alimentação d.c. ou excitados por um dispositivo de armazenamento de energia pulsado, tal como uma bobina indutora. Além disso, se o eletrodo negativamente carregado for aquecido, ele pode emitir elétrons por emissão térmica, o que aumenta a taxa de ionização.

A descarga a.c. ou r.f. pode ser feita pela aplicação de um potencial a.c. ou r.f. alto na mesma configuração de eletrodos. Entretanto, o uso de eletrodos pode não ser necessário se algum tipo de mecanismo, tal como uma cavidade de micro-ondas, for usada para combinar a saída da fonte de r.f. ou a.c. ao plasma. Outros mecanismos para aumentar a energia do plasma são algumas vezes usados, tais como guias de onda ou várias outras estruturas de micro-ondas.

O fenômeno de foto-ionização é uma extensão da descarga r.f. para frequências ópticas, onde às vezes são usados *lasers* para produzir a ionização. Nesses comprimentos de onda, os próprios fótons criam a ionização ao serem absorvidos por elétrons ligados aos átomos.

Se um campo magnético d.c. é aplicado na região do plasma, um dos primeiros efeitos observados é um aumento da ionização, densidade e temperatura. Podemos também adicionar energia ao plasma através de ressonância com elétrons ou íons em frequências de *cyclotron*. Este é um método extremamente eficiente para aumentar a energia de um plasma e é usada frequentemente para produzir plasmas de alta energia.

A última categoria de produção de plasmas a ser discutida é a injeção. Vários sistemas para produção de feixes altamente intensos de plasma, elétrons, íons ou átomos neutros são usados para produzir plasma. O método básico consiste em injetar um desses tipos de feixes em uma região especialmente preparada para confinamento de plasma, onde a ionização de átomos neutros presentes possa ocorrer.

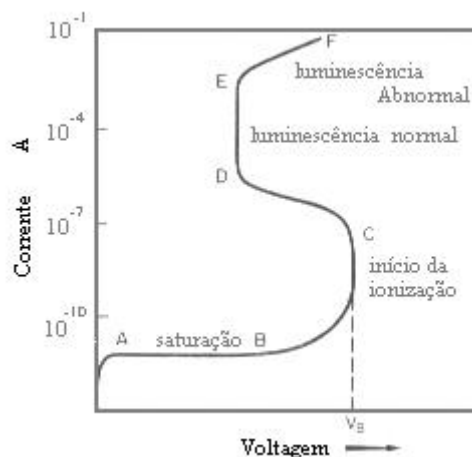
### C - Descarga de gás (Descarga luminescente d.c. a baixa pressão)

O termo descarga de gás é usado para designar o fluxo de corrente elétrica através de um meio gasoso. As descargas de gás em estados estáveis podem ser classificadas em três tipos, de acordo com a corrente que carregam, são elas:

- (i) Descarga escura, quando a corrente é menor que  $10^{-6}$  A.
- (ii) Descarga luminescente, quando a corrente está, aproximadamente, entre  $10^{-6}$  A e  $10^{-1}$  A.
- (iii) Descarga de arco, quando a corrente é superior a  $10^{-1}$  A.

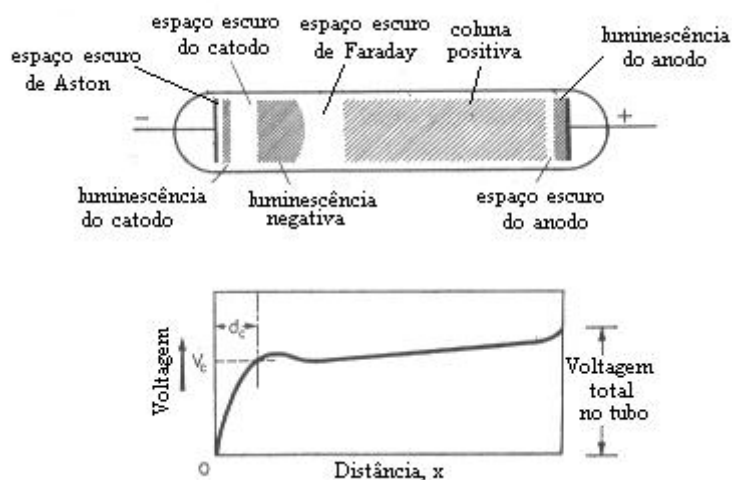
Como trabalharemos com correntes localizadas no intervalo de  $10^{-6}$  a  $10^{-1}$  A voltaremos nossa atenção para a descarga luminescente, não entrando, assim, em detalhes sobre a descarga escura e a descarga de arco.

Após o rápido aumento do fluxo de corrente que ocorre devido à ionização, estabelece-se uma descarga estável que pode assumir várias formas. Se a ionização ocorre em uma pressão da ordem de 1mmHg entre os eletrodos alimentados por uma fonte d.c., a relação entre a diferença de potencial entre os eletrodos e a corrente terá a forma ilustrada na figura 6.



**Figura 6** – Característica da descarga luminescente

A luminescência d.c. a baixa pressão é uma das descargas de gás mais conhecidas, em grande parte devido à facilidade com que pode ser produzida e mantida, e por causa de sua aparência que, dependendo da pressão usada, pode assumir a forma ilustrada na figura 7.



**Figura 7** – Descarga luminescente a baixa pressão.

O comprimento da descarga é composto de varias regiões, as quais são dados os nomes indicados, e a voltagem ao longo da descarga varia como é mostrado.

Se, para uma descarga com esta aparência, a pressão é mantida constante e o comprimento é reduzido, apenas o comprimento da coluna positiva será afetado, o restante da estrutura permanece inalterado e (desde que o campo na coluna positiva seja baixo), a tensão requerida cai ligeiramente. Esse processo continua até o anodo entrar na região de luminescência negativa, situação a partir da qual a tensão requerida começa a crescer. A partir dessas observações parece que a coluna positiva não é importante, e certamente desnecessária para a operação da descarga [3].

Se a descarga estiver operando no interior da região DE da figura 6., a luminescência do catodo cobrirá somente uma parte da superfície do catodo, sendo a área dessa luminescência diretamente proporcional à corrente. Entretanto, no ponto E, onde a voltagem através do tubo começa a crescer com a corrente, o catodo passa a ter toda sua superfície coberta por essa luminescência. A partir desse ponto parece que a densidade de corrente no catodo tende a ser constante, e que a voltagem do tubo também permanece constante, mas se a densidade de corrente for confinada a crescer, a voltagem também crescerá. Esse efeito não é sempre claramente observado na prática, às vezes a luminescência do catodo estabelece-se sobre outras superfícies, como por exemplo, no suporte metálico atrás do eletrodo ou na base da câmara. A região DE é referente à chamada luminescência normal, enquanto que a descarga na região EF é chamada luminescência abnormal.

O efeito da mudança de pressão é bem pronunciado e segue uma lei bastante simples: o comprimento do espaço escuro do catodo é inversamente proporcional à pressão. Os comprimentos das outras regiões variam aproximadamente da mesma maneira, exceto para a coluna positiva, que continua a ocupar a maior parte possível do espaço entre os eletrodos. Em pressões muito baixas, nas quais o espaço escuro do catodo preenche todo o espaço entre os eletrodos, a descarga começa a se tornar um feixe de elétrons, e além disso, com pressões inferiores a  $1\mu\text{Hg}$ , a fonte de elétrons por bombardeamento de íons positivos passa a não ser mais o suficiente para manter a corrente, a não ser que a voltagem seja muito alta.

### **III - Parte Experimental**

#### **A – Aparato**

O aparato experimental utilizado para a realização deste trabalho é constituído por:

- Um sistema de vácuo formado por uma bomba mecânica e uma difusora;
- Uma válvula agulha conectada na parte superior da câmara para o controle do fluxo de gás injetado;
- Uma câmara de vácuo com um par de eletrodos no seu interior (o eletrodo superior possui um grau de liberdade na vertical);
- Um medidor de pressão (pirani) digital;
- Uma fonte de alta tensão d.c.;
- Um espectrômetro acoplado a uma fibra óptica;
- Um microcomputador com o software de interface micro-espectrômetro para a aquisição de dados;
- Garrações com diferentes gases.

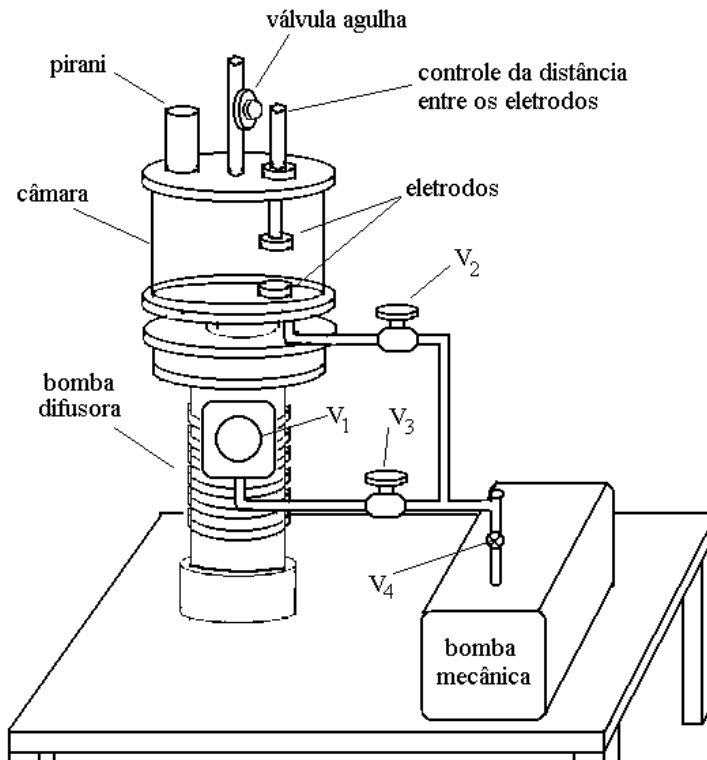
#### **B - Procedimento**

Para a produção de plasma e obtenção de suas linhas de emissão com o equipamento citado acima, o seguinte procedimento deve ser efetuado:

##### **1 - Preparação do sistema para a produção de plasma**

Inicialmente, com todas as válvulas fechadas, ligue a bomba mecânica (BM) e, em seguida, abra a válvula  $V_3$  (veja o esquema da figura 8) e o fluxo de água responsável pela refrigeração de bomba difusora (BD). Ligue a BD e aguarde alguns minutos (entre 30 a 50 minutos), até que ela fique bem quente.

Quando a BD estiver pronta, feche  $V_3$  e abra  $V_2$  (ATENÇÃO: quando a bomba difusora estiver ligada, a válvula  $V_2$  somente poderá ser aberta quando  $V_3$  e  $V_1$  estiverem fechadas), espere a pressão na câmara atingir cerca de  $2 \times 10^{-2}$  Torr e, então, feche  $V_2$  e abra  $V_3$  e  $V_1$ , nesta ordem, e espere alguns minutos (aproximadamente 5 minutos).




**Figura 8** – Esquema do sistema de vácuo.

## 2 - Produção de plasma

Com  $V_3$  e  $V_1$  abertas, abra a válvula agulha e controle o fluxo de gás até estabilizar a pressão no interior da câmara em algum valor superior a  $2 \times 10^{-2}$  Torr (a medida do pirani não é confiável para pressões com valores inferiores a este) e inferior a  $2 \times 10^{-1}$  Torr (pressões superiores a esta são muito altas para a BD).



Depois de escolhida e fixada uma distância entre os eletrodos, ligue a fonte d.c. de alta tensão e aumente a tensão até obter o plasma. Observe a estrutura do plasma e tente encontrar as regiões mencionadas no item C para várias distâncias ente os eletrodos.

## 3 - Obtenção das linhas de emissão

Posicione a lente do espectrômetro, bem próximo da câmara, na direção do espectrômetro. Abra o *software* OOBase32 e escolha a opção **scope mode**, clicando no ícone .

Aparecerão na tela alguns picos (linhas de emissão) característicos do material com o qual está sendo feito o plasma. Se os picos estiverem muito pequenos aumente o tempo de integração, se estiverem fora de escala diminua o tempo de integração. Obtenha os comprimentos de onda do máximo de emissão de cada pico.

#### 4 - Determinando o comprimento de onda de cada pico

Para encontrar o comprimento de onda no ponto de intensidade máxima do pico clique no ícone  para paralisar a imagem, em seguida clique no ícone , aparecerá na tela uma linha paralela à ordenada do sistema de coordenadas. Utilizando o mouse ou o teclado posicione esta reta no centro do pico desejado, no canto inferior esquerdo da tela aparecerá o comprimento de onda correspondente a este ponto [4].

#### 5 - Salvando os dados

Existem, basicamente, duas formas distintas de salvar os dados:

(i) Com a imagem paralisada, escolha no menu a opção **File/Save/experiment**. Neste formato, os dados só poderão ser visualizados através deste *software*.

(ii) Com a imagem paralisada, escolha no menu a opção **Edit/Copy/Spectral Data/All Spectrometer Channels**. Em seguida abra o editor *WordPad* e no menu **Edit** escolha a opção **Paste**. Salve o arquivo com a extensão .txt ou .dat para que seja possível abri-lo pelo *Origin* ou *Excel*.

#### IV - Análise de dados

Verifique se os comprimentos de onda encontrados para os picos concordam com os valores encontrados na literatura (no Apêndice III estão tabeladas as linhas de emissão do  $^{18}\text{Ar}$  e do  $^{80}\text{Hg}$ ). Caso não haja concordância, verifique novamente a calibração do espectrômetro.

Identifique as transições eletrônicas dos elétrons opticamente ativos correspondentes às linhas de emissão encontradas. No Apêndice II existe uma tabela com as transições ópticas do  $^{18}\text{Ar}$ , caso utilize outros elementos consulte o *Handbook of the Physicochemical Properties of the Elements*, biblioteca do “IFGW” - R546.

## Apêndice I – Calibração do Espectrômetro

A relação entre o comprimento de onda da radiação detectada e o número de pixels é dada por um polinômio de terceiro grau, como mostrado abaixo:

$$\lambda(p) = I + C_1 p + C_2 p^2 + C_3 p^3$$

onde  $\lambda(p)$  é o comprimento de onda relacionado ao pixel  $p$ ,  $I$  é o comprimento de onda para pixel 0 (zero) e  $C_i$  são os coeficientes dados em (nm/pixel), que devem ser calculados juntamente com  $I$ .

Para este procedimento será necessária uma fonte de linhas espectrais, como por exemplo; uma lâmpada de Hg, Ar ou qualquer outra fonte que contenha pelo menos entre 4 e 6 linhas de emissão.

Inicialmente, utilizando o programa OOIbase32 no **scope mode**, tire o espectro de emissão da sua fonte de luz. Se necessário, ajuste o tempo de integração para que nenhum pico fique fora de escala.

Posicione o cursor do mouse sobre o ponto de intensidade máxima de um dos picos e anote o número de pixel e o comprimento de onda, repita este procedimento para todos os picos. Utilizando uma planilha (Origin, Excel...) faça uma tabela com os números de pixel e o comprimentos de onda  $\lambda_v$  real dos picos de emissão correspondentes, para algumas fontes os valores de  $\lambda_v$  podem ser encontrados no Apêndice III.

Faça um gráfico selecionando  $\lambda_v$  como variável dependente ( $y$ ) e o número de pixel  $p$  como variável independente ( $x$ ) e, então, execute a regressão polinomial de terceira ordem.

Certifique-se de que o valor do coeficiente de correlação  $R$  possui um valor bem próximo de 1, se não tiver, verifique se não houve nenhum erro ao digitar os dados.

Selecione o menu **Spectrometer/Configure**, escolha a opção **Wavelength Calibration** e substitua os valores dos coeficientes encontrados. Repita este procedimento para todos os canais [5].

## Apêndice II – Transições Ópticas Observadas no $^{18}\text{Ar}$

Comprimento de onda (Å)	Energia (eV)	Transição
9657,78	12,90	$4s^3P_1 - 4p^1S_1$
8521,44	13,28	$4s^1P_1 - 4p^1P_1$
8115,31	13,1	$4s^3P_2 - 4p^3D_3$
8103,69	13,15	$4s^3P_1 - 4p^3D_1$
7635,11	13,16	$4s^3P_2 - 4p^1D_2$
7503,87	13,5	$4s^1P_1 - 4p^1S_0$
3948,98	14,68	$4s^3P_2 - 5p^3P_1$

**Tabela 2** – Comprimento de onda e energia da radiação emitida pelo  $^{18}\text{Ar}$  e sua transição eletrônica correspondente.

Na terceira coluna da tabela usamos a seguinte simbologia  $ns^aP_c$ , onde temos que:

n = número quântico principal do nível eletrônico.

s ou p (minúsculos) = orbital do elétron.

a = número de estados não degenerados para um determinado valor do momento angular orbital total dos elétrons opticamente ativos.

S, P ou D (maiúsculos) = soma dos momentos angulares orbitais dos elétrons opticamente ativos (momento angular orbital total).

c = valor da soma entre o momento angular orbital total com o momento angular total de spin dos elétrons opticamente ativos<sup>4</sup>.

<sup>4</sup>Para uma explicação mais detalhada sobre a quebra da degenerescência dos estados eletrônicos devido ao acoplamento LS dos elétrons opticamente ativos veja; Eisberg, R e Resnick, R., *Física Quântica*, editora Campus, cap 10 [6].



### Apêndice III – Linhas de Emissão do $^{18}\text{Ar}$ e $^{80}\text{Hg}$

Seguem abaixo as figuras com as linhas de emissão do  $^{18}\text{Ar}$  e  $^{80}\text{Hg}$ , onde na abscissa temos o comprimento de onda em Å.

Linhas de emissão do Argônio:

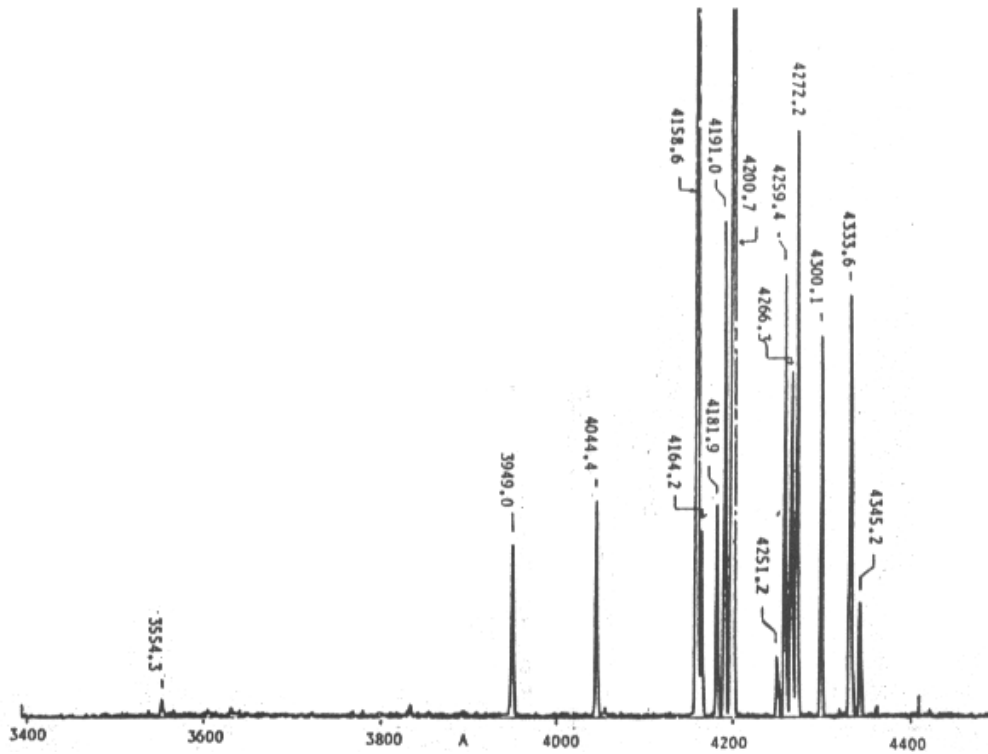


Figura 9

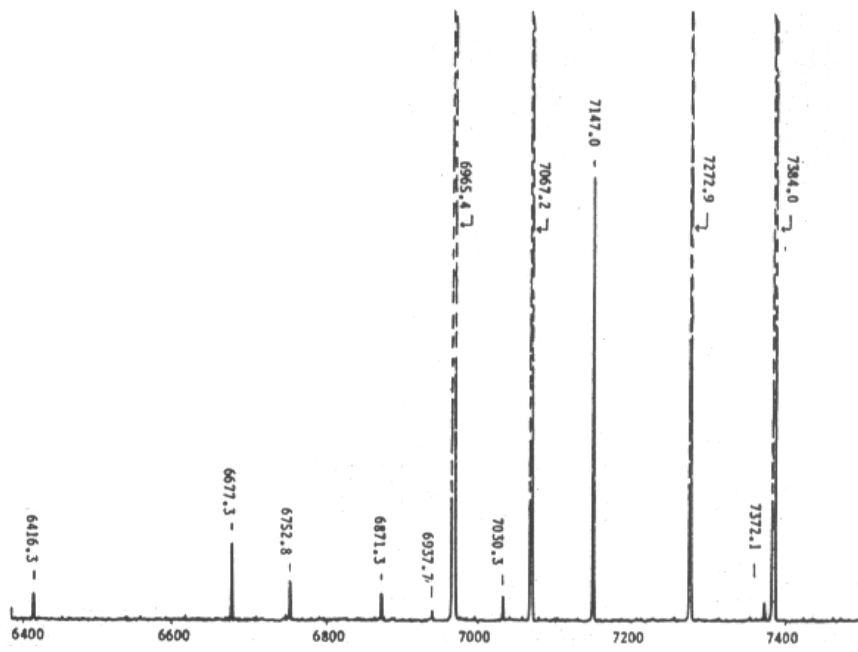


Figura 10

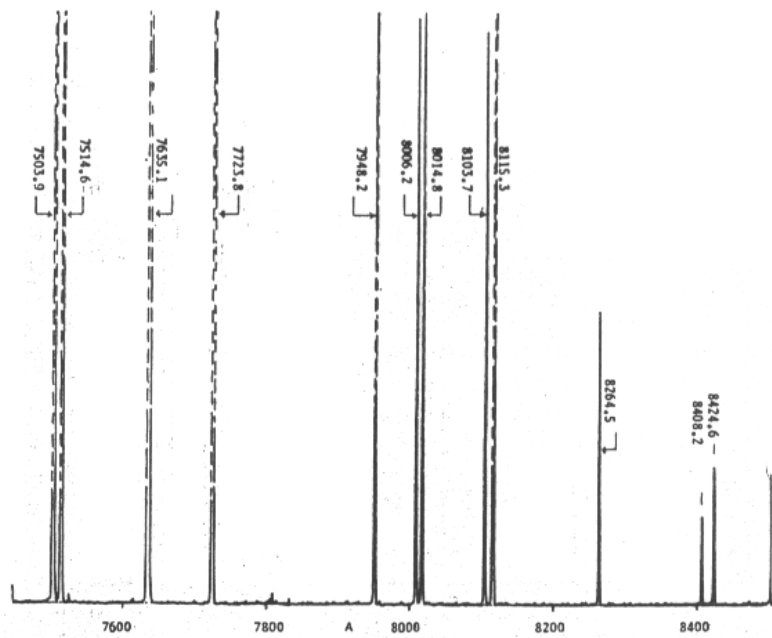


Figura 11

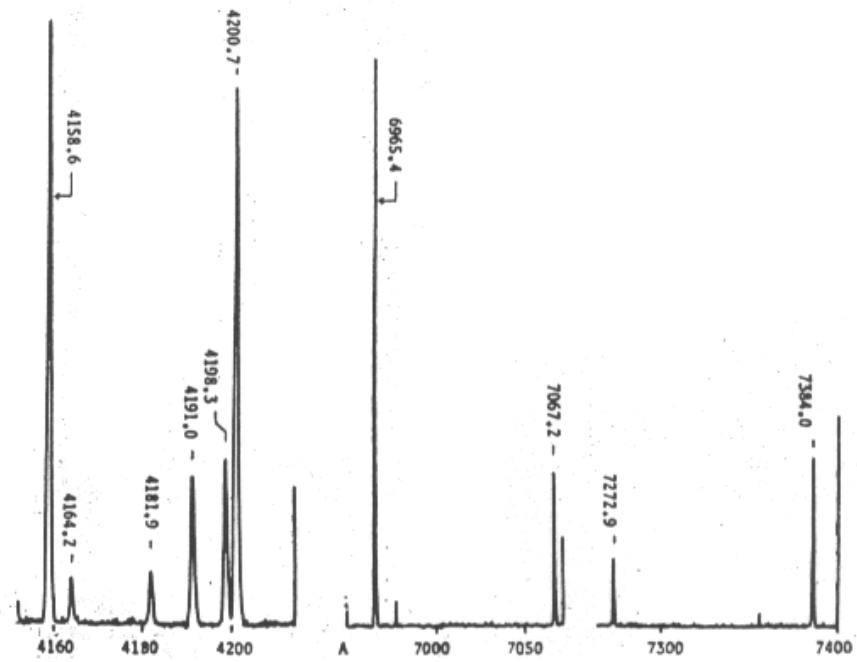


Figura 12

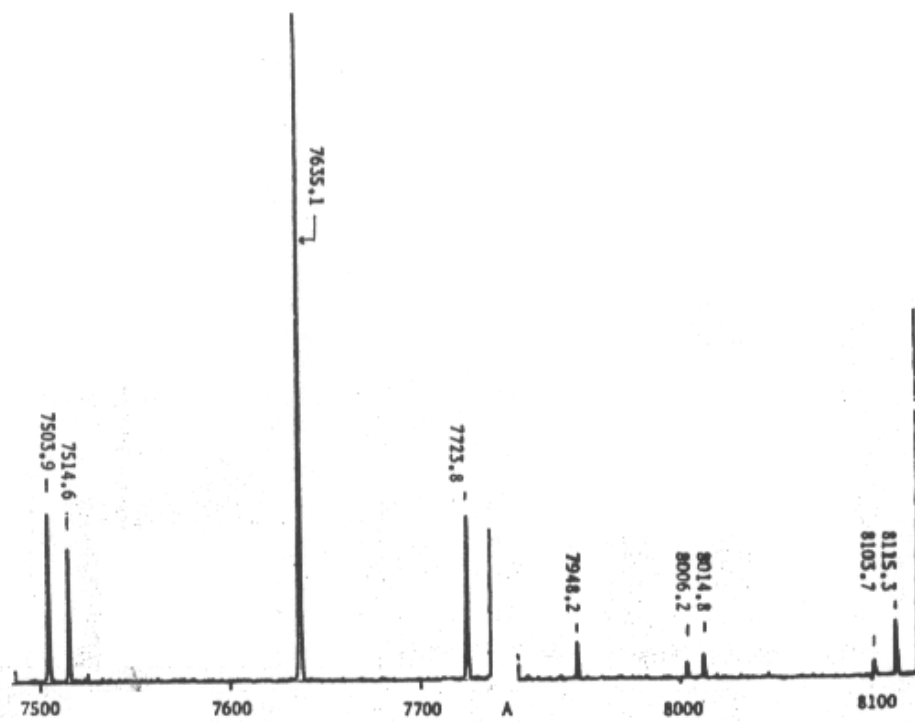


Figura 13

Linhas de emissão do mercúrio:

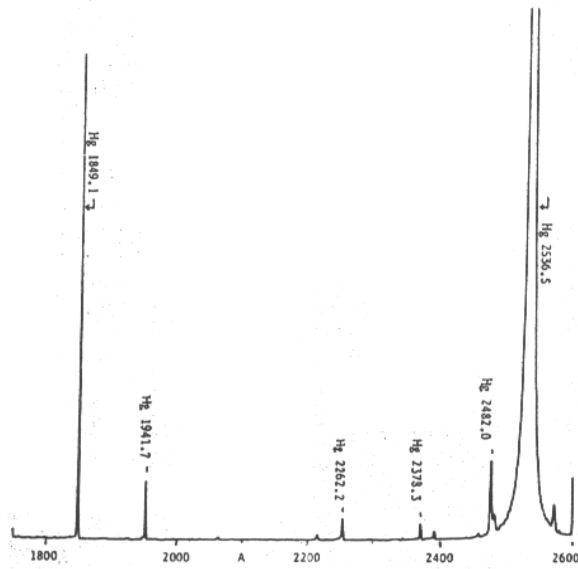


Figura 14

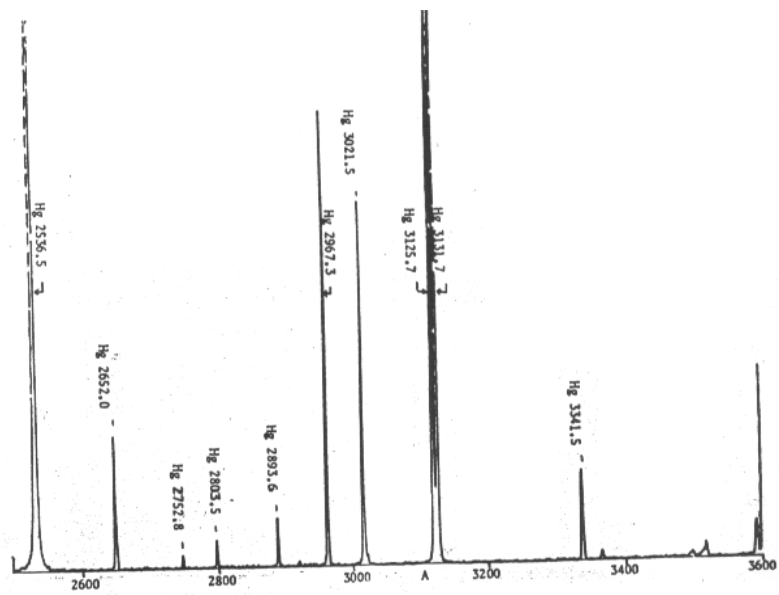


Figura 15

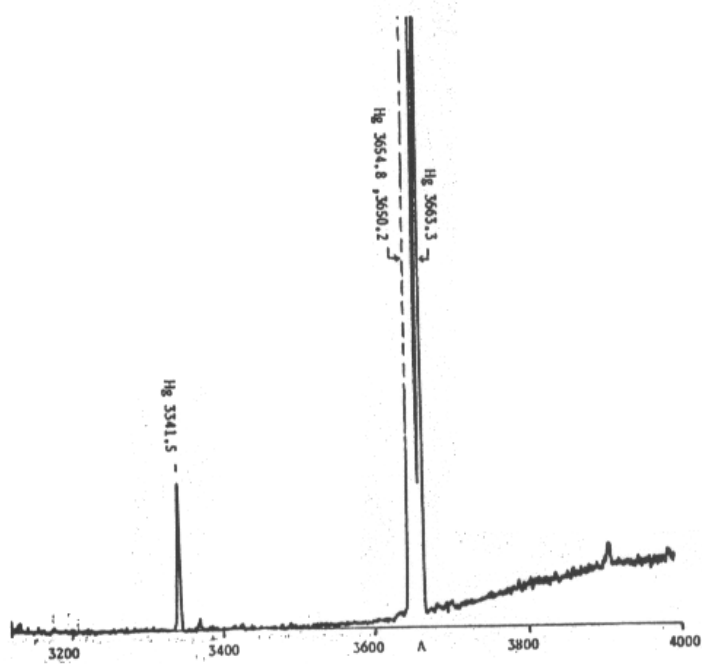


Figura 16

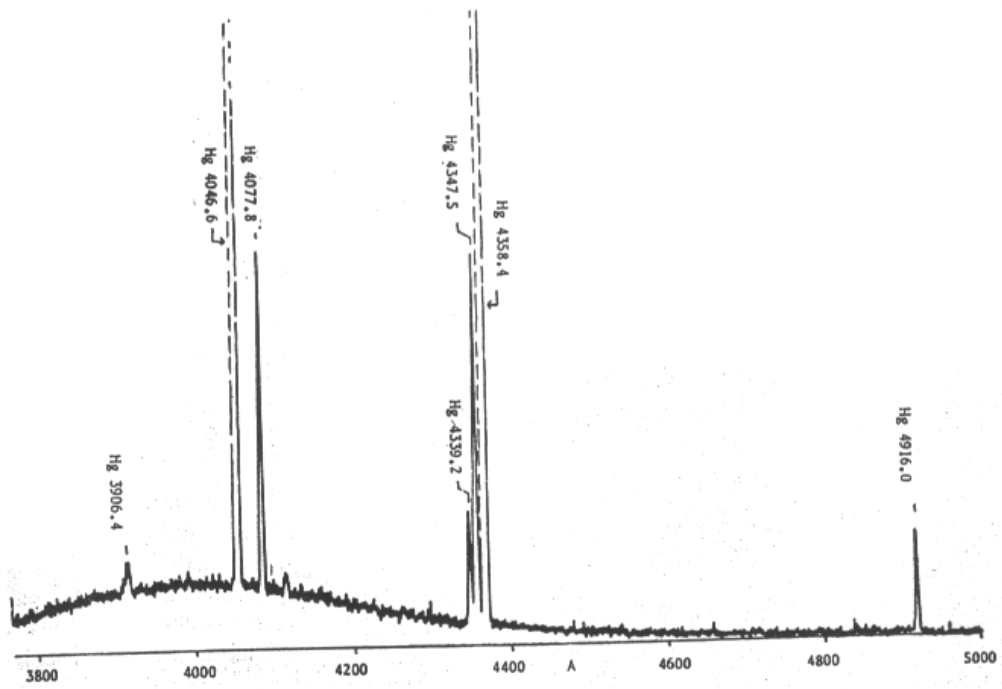


Figura 17

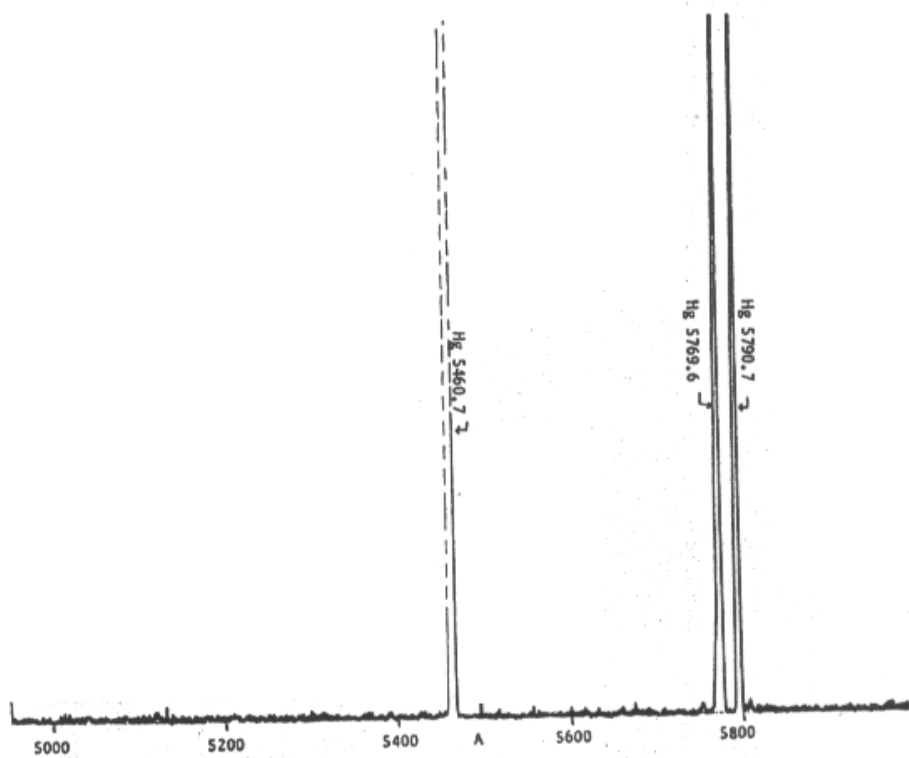


Figura 18

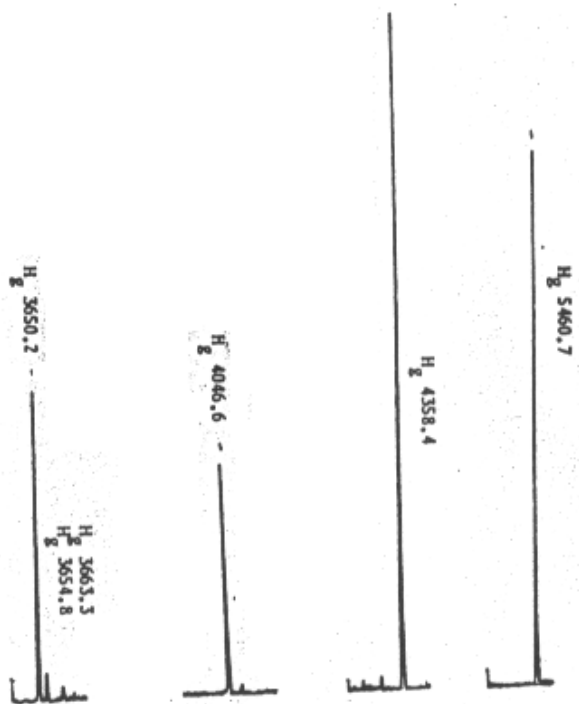


Figura 19

## **Bibliografia:**

- [1] - Sminorv. B M., *Introduction to Plasma Physics*, Mir Publishers, Moscow (1975).
- [2] - Shohet, J. L., *The Plasma State*, Academic Press, New York (1971).
- [3] - Howatson, A. M., *An Introduction to Gas Discharge*, Pergamon Press, Oxford (1965).
- [4] - OOIBase32<sup>TM</sup> Spectrometer Operating Software Manual, Ocean Optics, Inc.(2000).
- [5] - *Operating Manual and User's Guide (USB2000 Miniature Fiber Optic Spectrometers and Accessories)*, Ocean Optics, Inc. (2000).
- [6] - Eisberg, R. e resnick, R., *Física Quântica*, Editora Campus, Rio de Janeiro (1979).