

Universidade Estadual de Campinas
Instituto de Física Gleb Wataghin
Grupo de Física de Plasmas e Fusão Termonuclear Controlada

Relatório Final

Diagnóstico de Plasmas Utilizando Sondas de Langmuir

Aluno: Célio Massaki Nakamoto
Orientador: Prof. Dr. Munemasa Machida

1 – Introdução

Neste trabalho estudaremos a sonda de Langmuir.

O objetivo deste projeto é estudar em detalhes as teorias envolvidas nesta técnica, melhoramento, obtenção e processamento de dados experimentais fornecendo os valores da temperatura para cada descarga.

Foi estudado o funcionamento da sonda de Langmuir desde a sua fabricação até a interpretação da curva obtida instalando-a em uma máquina de plasma contínua de pequeno porte onde é possível obter um estudo mais apropriado, pois é uma máquina bem simples e de fácil operação, diferentemente do Tokamak, onde o plasma é criado na forma pulsada, com duração de alguns mili-segundos.

A sonda de Langmuir utilizada nesta fase inicial é o mais simples, onde a fonte de alimentação é contínua e a variação da corrente da sonda é obtida via variação manual da tensão da fonte de alimentação.

Expomos a seguir em detalhe os trabalhos realizados.

2 - Sonda de Langmuir

Para obtermos a temperatura da borda do plasma, será criando uma sonda denominada sonda de Langmuir (Fig.2) desenvolvida por volta de 1924 [3] e que consiste de um eletrodo, o qual é inserido no plasma e a partir dos valores coletados da corrente e tensão, é criada uma curva denominada curva característica da sonda de Langmuir (Fig.1) do qual podemos extrair os valores desejados.

A curva característica teórica que devemos obter tem a forma conforme ilustra a figura 1.

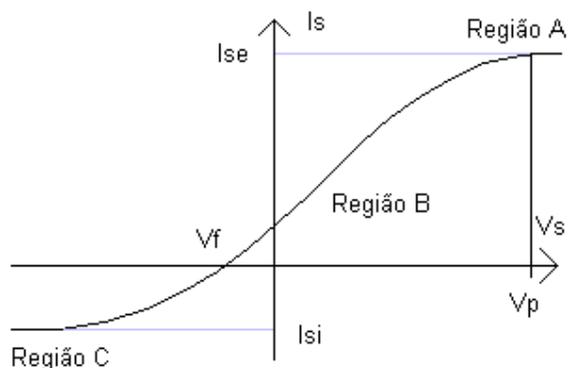


Figura 1 - Curva característica da sonda de Langmuir.

A figura 1 mostra a variação da corrente que atravessa a sonda (I_{se}) em função do potencial aplicado (V_s) também na sonda. O potencial de plasma é indicado por V_p e o potencial flutuante por V_f e as regiões representadas acima são:

Região A - Região da corrente de saturação eletrônica;

Região B - Região de transição;

Região C - Região de corrente de saturação iônica;

Perto do potencial flutuante é onde a variação de corrente melhor se comporta exponencialmente e podemos determinar a temperatura eletrônica com maior precisão.

2.1 – Região A

A saturação eletrônica ocorre quando aumentamos a tensão na sonda, devido a sonda agora ter um potencial positivo e estar em contato com o plasma, este irá atrair os elétrons, quanto mais positivo o potencial na sonda, mais elétrons serão capturados, definindo assim uma corrente de saturação eletrônica dado por:

$$I_{se} = n e A C_e \quad (1)$$

onde n é a densidade do plasma, e é a carga eletrônica, A a área do eletrodo e C_e é a velocidade térmica dos elétrons $(K_B T_e / m_e)^{1/2}$

2.2 – Região B

A região intermediária entre as correntes de saturação dos íons e dos elétrons é conhecida como região de transição, e é a região que fornece informações mais precisas da temperatura e densidade eletrônica. Nesta região a corrente da sonda é dada por:

$$I_S = I_{Se} \exp [e (V_S - V_p) / K_B T_e] \quad (2)$$

2.3 – Região C

Quando a sonda em contato com o plasma for polarizada muito negativamente em relação ao recipiente no qual o plasma está contido, o mesmo irá atrair os íons do plasma até um ponto de saturação dada por:

$$I_{Si} = \sim 0,5 n e A C_s \quad (3)$$

onde C_s é a velocidade térmica $[K_b T_i / m_i]^{1/2}$

2.4 – Potencial de Plasma [1]

Ao inserir uma sonda condutora no plasma e aplicarmos um potencial externo V_s , e se $V_s = V_p$, onde V_p é o potencial do plasma, o plasma não sentirá nenhuma diferença de potencial em relação à sonda, portanto nem elétrons ou íons serão repelidos ou atraídos, e então, neste caso não será formada uma bainha na sonda (o qual se comporta como uma blindagem). Apenas os elétrons com movimento térmico randômico, assumindo que a distribuição de velocidade seja maxwelliana, dada por[1]:

$$\hat{f}(r, v, t) = \left(\frac{m}{2 \cdot k \cdot T_e} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left(- \frac{m \cdot v^2}{2 \cdot k \cdot T_e} \right) \quad (4)$$

serão coletados pelo condutor.

Da equação acima, encontramos que a velocidade média é dada por:

$$\langle v \rangle = \int_0^{\infty} v \cdot \hat{f}(v) \cdot 4\pi v^2 \cdot d^2v = \left(\frac{8 \cdot k \cdot T_e}{\pi \cdot m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

O fluxo randômico que atravessa um plano imaginário de uma unidade de área de um lado para outro é dado por usando-se $\langle v_x \rangle = \langle v \rangle / 2$

$$\Gamma_{random} = \frac{1}{4} n \langle v \rangle \quad (6)$$

onde n é a densidade com movimento térmico randômico (da velocidade média $\langle v \rangle$).

Então, a densidade de corrente será:

$$J_{re} = -\frac{e}{4} n_e \langle v \rangle \quad (7)$$

Portanto, a corrente resultante, quando se iguala o potencial na sonda com o potencial do plasma, é dado por $I_p = -J_{re} A_s$, A_s é a área da sonda, ou

$$I_p = e \cdot A_s \cdot n_e \cdot \sqrt{\frac{k \cdot T_e}{2 \cdot \pi \cdot m}} \quad \text{para } V_s = V_p \quad (8)$$

onde V_s é o potencial aplicado na sonda e $V_p = k_B T_e / e$ é o potencial de plasma.

Os íons randômicos que saem da sonda não contribuem para a corrente, por causa da pequena velocidade média.

A equação acima indica que a densidade eletrônica, n_e , pode ser medida se a corrente na sonda for medida para $V_s = V_p$, sabendo-se a temperatura eletrônica.

2.5 Análise das equações da sonda para o tratamento de dados [1]

A corrente na sonda será constituída pela soma de duas correntes a dos elétrons e a dos íons, ou seja, a corrente total vista pela sonda será dada por:

$$I_s = I_i + I_e = -I_{si} + I_{se} \exp\left(\frac{-e(V_p - V_s)}{kT_e}\right) \quad (9)$$

A relação 9 mostra a corrente na sonda, e da análise desta corrente em função do potencial aplicado na sonda podemos determinar a temperatura eletrônica do plasma local. Para facilitar, tomando-se o logaritmo natural dessa relação, temos:

$$\ln\left[-\frac{I_s + I_{si}}{I_{se}}\right] = \left(\frac{e}{kT_e}\right) V_s - \frac{eV_p}{kT_e} \quad (10)$$

A equação 10 conta-nos que o logaritmo da corrente da sonda é uma função linear da tensão relativa na sonda com o potencial do plasma e, a tensão retarda os elétrons e os elétrons têm uma distribuição de velocidade Maxwelliana. A temperatura absoluta T_e no plasma pode ser determinada via coeficiente angular desta reta.

Da equação 10, podemos obter uma relação entre o potencial de plasma e o potencial flutuante, tomando-se a corrente na sonda igual a zero, temos então:

$$V_p = V_f + \frac{kT_e}{e} \ln\left(-\frac{I_{se}}{I_{si}}\right) \quad (11)$$

3 - Procedimento Experimental

A sonda foi fabricada utilizando-se um tubo de vidro e um eletrodo, conforme a figura abaixo.



Figura 2 - Sonda de Langmuir

A parte do eletrodo exposta ao plasma possui 12,86mm de comprimento e 1mm de diâmetro.

O circuito originalmente montado foi o seguinte:

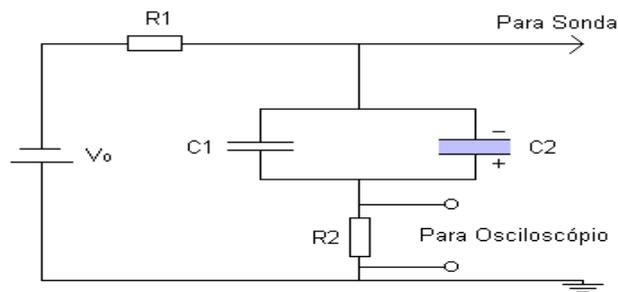


Figura 3 - Circuito utilizado Inicialmente.

Os valores são:

\$R_1 = 10\text{Kohms}\$, \$R_2 = 10\text{ Ohms}\$, \$C_1 = 0,1\mu\text{F}\$, \$C_2 = 500\mu\text{F}\$

Esse circuito foi simplificado segundo o circuito descrito abaixo:

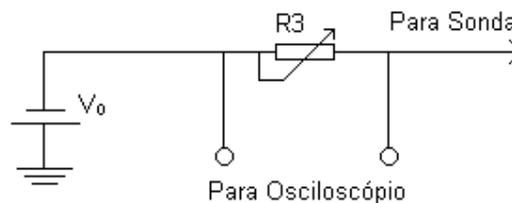


Figura 4 - Circuito utilizado neste projeto.

A razão de tal mudança foi porque o Tokamak cria plasma de curtos períodos de tempo, fazendo com que os capacitores da fig.3 se comportassem como um curto circuito, sendo possível assim, a aquisição da corrente pelo osciloscópio acoplado ao R2. Mas no presente caso, trabalhamos com um plasma contínuo, fazendo com que a corrente sobre os capacitores fossem a zero, resultando assim, em um sinal nulo em R2.

A figura seguinte ilustra a máquina de plasma onde este circuito foi instalado.



Figura 5 – Máquina de Plasma.

O plasma gerado com ar atmosférico (coloração roxa) é contínuo e pode ser visualizado na figura 6.

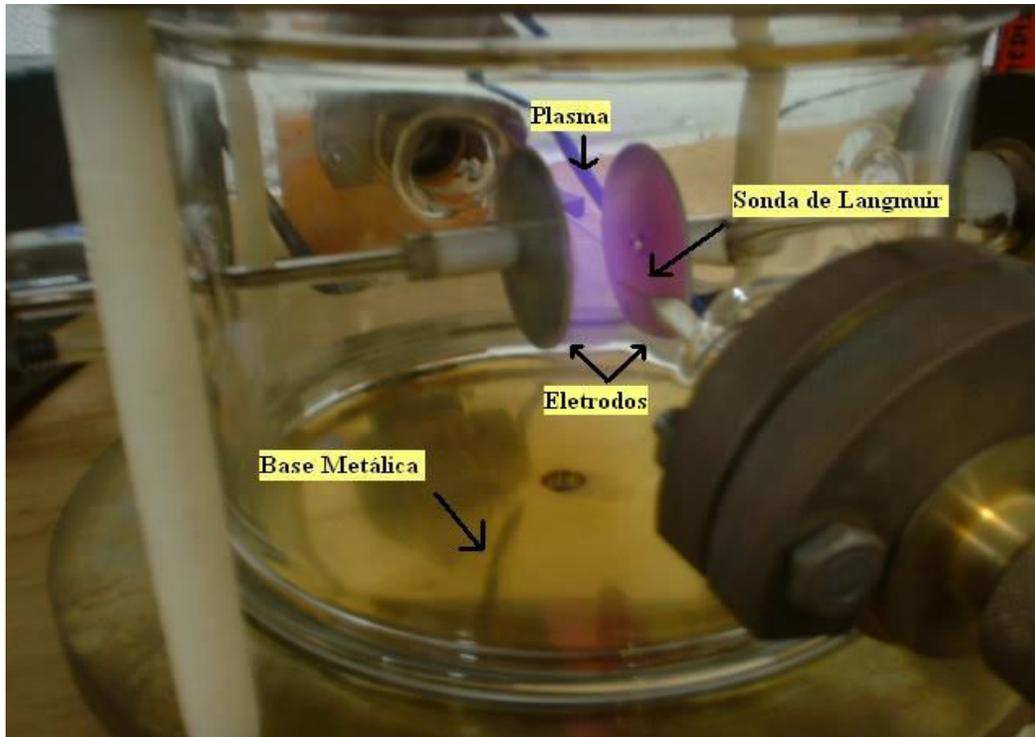


Figura 6 – Visualização de um Plasma Gerada por Fonte DC.

Utilizando o circuito da fig.4, e o sinal obtido em cima de R3 ($13,78K\Omega$) com um potenciômetro, e variando a tensão V_0 de aproximadamente $-138V$ até $+200V$ e obtemos a respectiva corrente na resistência R3.

4 - Análise de Dados e Discussões

Obteve-se a temperatura do plasma em algumas posições medida em relação ao centro do plasma ao longo do eixo radial utilizando ar atmosférico, hélio, nitrogênio e argônio.

A figura seguinte apresenta uma curva de Langmuir característica obtida utilizando argônio.

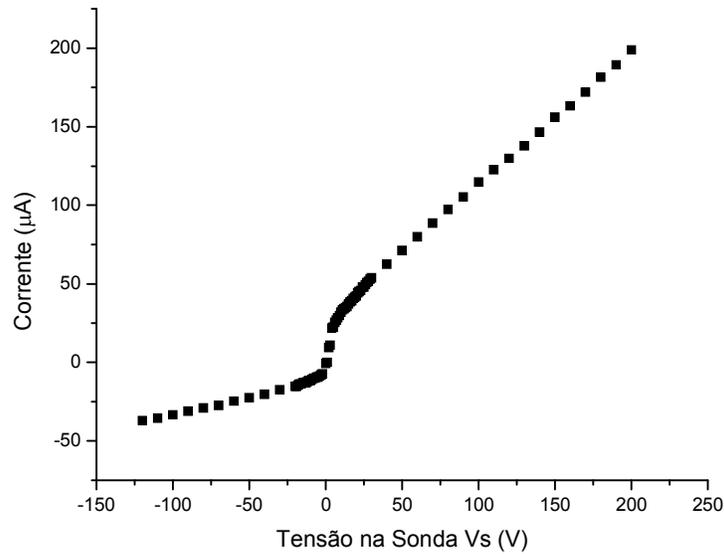


Figura 7 – Curva de Langmuir utilizando argônio

Os dados obtidos estão ilustrados nas figuras seguintes detalhando melhor a parte da curva de Langmuir em torno do potencial flutuante V_f (Aproximadamente em $V_s=0V$), pois, é a região onde a variação da corrente melhor se comporta exponencialmente e obtemos as melhores condições para a determinação da temperatura [1] e d representa à distância da extremidade da sonda ao centro do plasma, essas figuras representam gráficos $\ln(I_{se}) \times V_s$, onde I_{se} é a corrente obtida na sonda e V_s é a tensão aplicada no mesmo, próxima ao potencial flutuante V_p (potencial na qual a corrente que atravessa a sonda é igual a zero, ou seja, indicando que a corrente de elétrons é igual a corrente de íons).

As figuras 8, 9, 10 e 11 mostram os gráficos obtidos para o ar atmosférico nas distâncias do centro do plasma de 2,5cm, 3cm, 3,5cm e 4cm respectivamente.

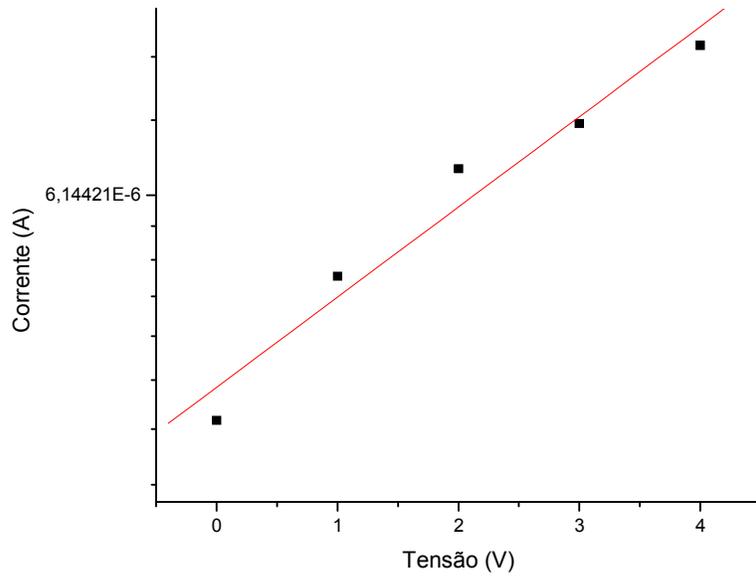


Figura 8 – Gráfico obtido utilizando ar atmosférico com $d = 2,5\text{cm}$

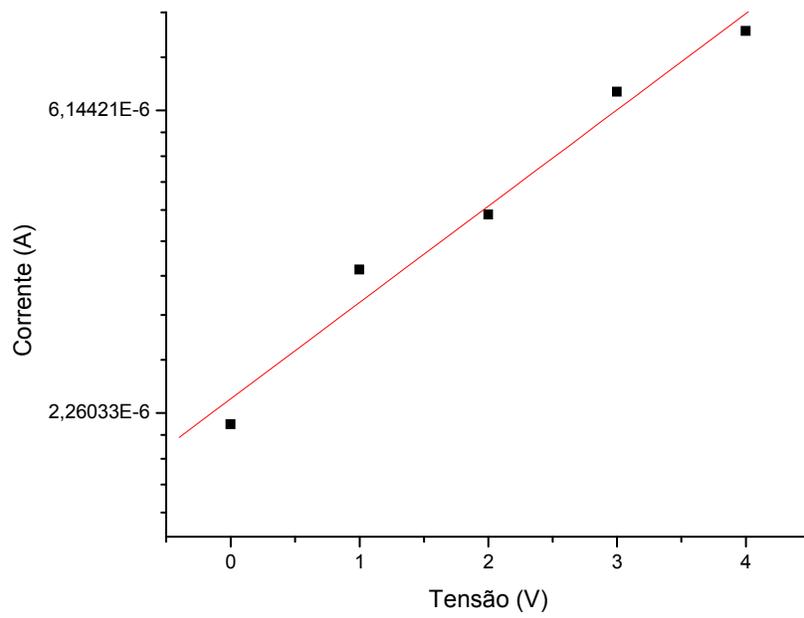


Figura 9 – Gráfico obtido utilizando ar atmosférico com $d = 3\text{cm}$

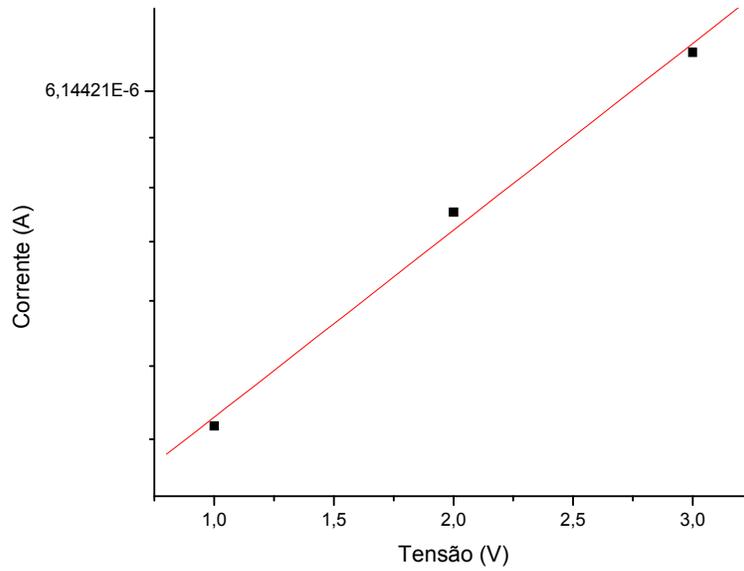


Figura 10 – Gráfico obtido utilizando ar atmosférico com $d = 3,5\text{cm}$

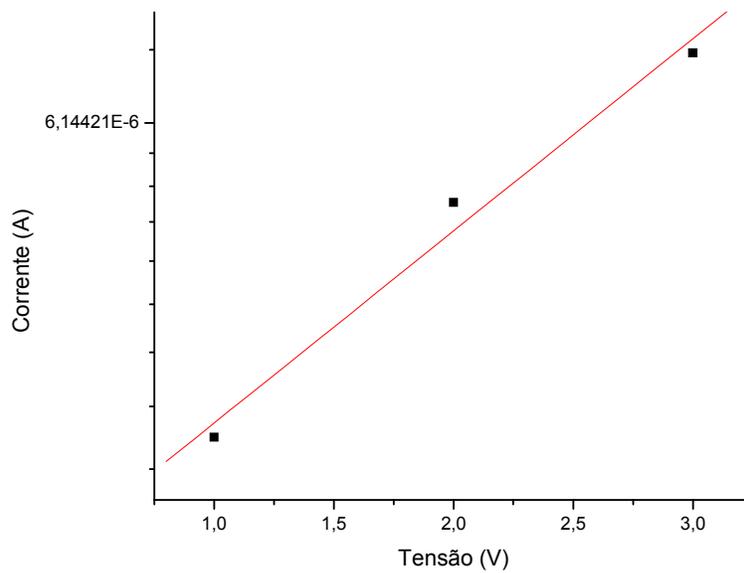


Figura 11 – Gráfico obtido utilizando ar atmosférico com $d = 4\text{cm}$

Através do coeficiente angular desses gráficos e da equação 10 (vide apêndice), podemos obter a temperatura do plasma.

Os valores obtidos para a temperatura para o ar atmosférico estão organizados na tabela abaixo:

Tabela 1 – Temperatura do plasma utilizando ar atmosférico

Distância (cm)	Temperatura (eV)
2,5	4,74
3	3,4
3,5	3,13
4	2,18

Podemos visualizar melhor na forma de gráficos:

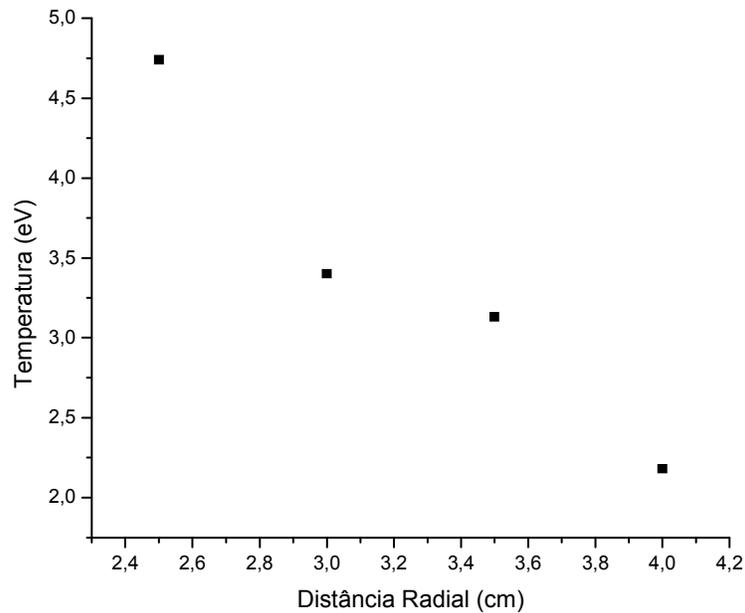


Figura 8 – Gráfico da temperatura em função da distância radial utilizando ar atmosférico

Através das figuras 8 podemos perceber que a temperatura diminui à medida que afastamos do centro do plasma.

Realizamos o mesmo procedimento com utilizando desta vez o gás Hélio, os resultados obtidos estão organizados na tabela abaixo:

Tabela 2 – Temperatura do plasma utilizando gás Hélio

Distância (cm)	Temperatura (eV)
2,5	9,91
3	5,37
3,5	2,55

Colocando esses dados na forma de gráficos obtemos:

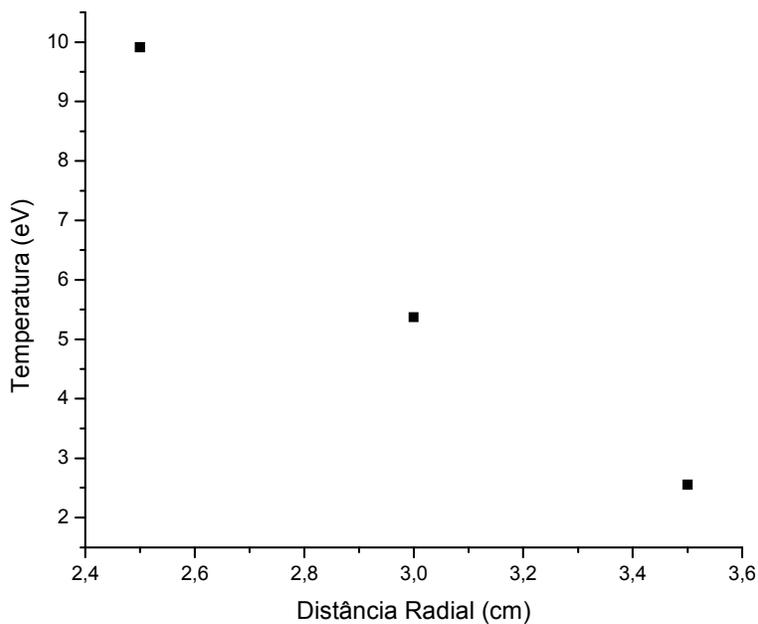


Figura 10 – Gráfico da temperatura em função da distância radial utilizando gás Hélio

Podemos perceber através das figuras 10, a semelhança no comportamento da temperatura do Hélio com o ar atmosférico tal como o decaimento dessas grandezas em função da distância radial.

Fazendo o mesmo procedimento agora utilizando o Nitrogênio obtemos os seguintes resultados:

Tabela 3 – Temperatura do plasma utilizando gás Nitrogênio

Distância (cm)	Temperatura (eV)
2,5	13,1
3,5	5,36
4	4,47

E na forma de gráficos temos:

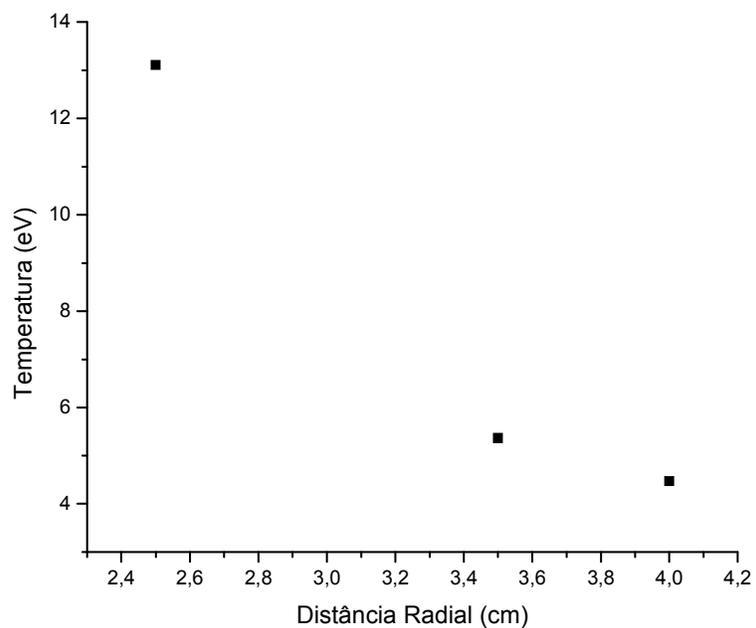


Figura 12 – Gráfico da temperatura em função da distância radial utilizando gás Nitrogênio

Da mesma forma, obtemos um decréscimo da temperatura à medida que aproximamos da borda do plasma.

Para o Argônio obtemos os seguintes resultados:

Tabela 4 – Temperatura do plasma utilizando gás Argônio

Distância (cm)	Temperatura (eV)
1,5	4,24
2	3,03
2,5	2,06
3,5	1,86

Em forma de gráfico temos:

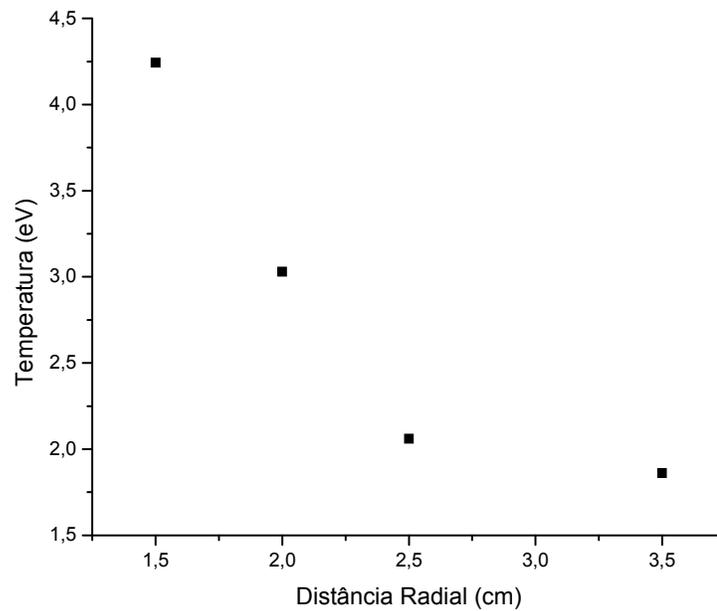


Figura 14 – Gráfico da temperatura em função da distância radial utilizando gás Argônio

Da mesma forma, obtemos um decréscimo da temperatura à medida que aproximamos da borda do plasma.

Podemos agora fazer um comparativo com os diferentes gases utilizados, ilustramos essas diferenças nos gráficos seguintes, onde comparamos as temperaturas de diferentes gases em diferentes pontos radiais.

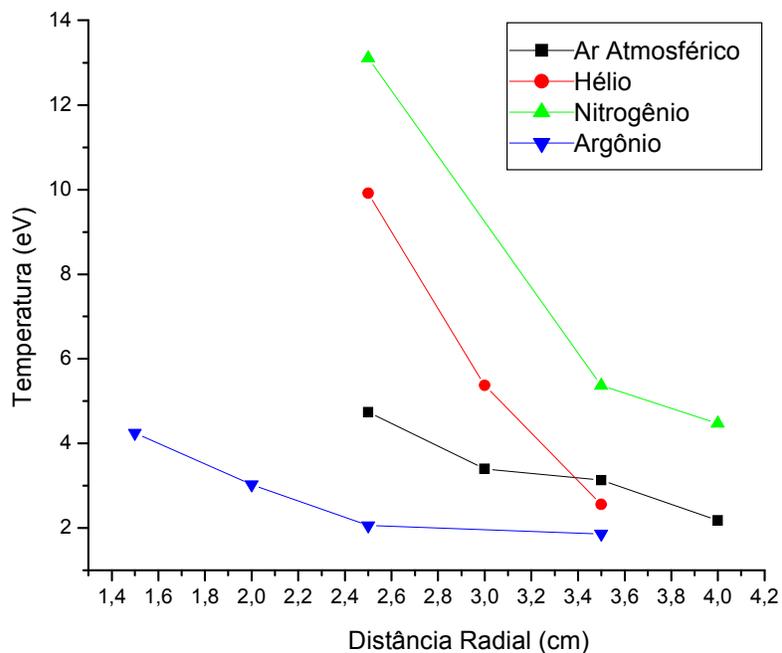


Figura 16 – Comparação da temperatura do plasma para os diferentes gases utilizados

5 - Conclusão

Percebemos claramente que todos os gases se comportam de forma coerente, ou seja, possuem temperaturas mais altas no centro do plasma, e para uma distância fixa, por exemplo, na distância de 3cm distante do centro de plasma, a temperatura é inversamente proporcional a massa da espécie. Nesta análise devemos desconsiderar os dados relativos ao nitrogênio que por razões ainda incertas apresentou resultados incoerentes, devendo, portanto, ser corrigidos este problema, tal problema pode estar relacionado com a dimensão da área de sonda utilizada interferindo no plasma devendo, portanto, existir um valor adequado para cada gás. Neste experimento utilizamos a mesma sonda cilíndrica de área $0,412\text{cm}^2$ para todos os gases em todas as medidas.

O próximo passo será estudar a densidade eletrônica fazendo a mesma analogia com os mesmos gases e verificar o comportamento da densidade ao longo da distância radial.

6 - Referências Bibliográficas

[1] - *Kaminishikawahara, Celso Ossamu*, Determinação da temperatura e densidade Eletrônica do plasma no Tokamak Nova-UNICAMP / Campinas, SP : [s.n.], 2004.

[2] - F. F. Chen; "Introduction to plasma physics", New York, Plenum Press, 1970.

[3] - Huddleston, Richard H., Leonard, Stanley L.; "Plasma Diagnostic Techniques", New T York, Academic Press, 1965.

Apêndice

Algumas equações do relatório parcial já entregue em fevereiro de 2006 fundamentais para a obtenção das grandezas informadas neste relatório.

$$I_p = e \cdot A_s \cdot n_e \cdot \sqrt{\frac{k \cdot T_e}{2 \cdot \pi \cdot m}} \quad \text{para } V_s = V_p \quad (8)$$

onde k é a constante de Boltzman, n_e é a densidade de elétrons, V_s é o potencial aplicado na sonda, A_s é a área da sonda, m é a massa do elétron, T_e é a temperatura eletrônica, I_p é a corrente na sonda quando submetida a um valor igual à do potencial de plasma V_p .

O potencial de plasma V_p é dado por:

$$V_p \equiv \frac{kT_e}{e} \quad (12)$$

onde e é a carga do elétron.

$$\ln \left[-\frac{I_s + I_{si}}{I_{se}} \right] = \left(\frac{e}{kT_e} \right) V_s - \frac{eV_p}{kT_e} \quad (10)$$

onde T_e é a temperatura eletrônica, I_{se} é a corrente de saturação eletrônica e I_{si} é a corrente de saturação iônica.

Comentários do Orientador

Utilizações de sondas de Langmuir para os estudos dos parâmetros básicos do plasma, como temperatura, densidade e potencial de plasma, embora pareçam simples envolvem várias dificuldades técnicas e teóricas – experimentais.

As dificuldades técnicas são construção e obtenção do plasma, desenvolvimento do circuito apropriado para as medidas, eliminação dos ruídos eletromagnéticos, definição de voltagem e corrente para obtenção dos dados experimentais.

As dificuldades teóricas – experimentais são desenvolvimento e obtenção das equações pertinentes que envolvem a interação sonda plasma, definição da região “limpa” para análise de dados de acordo com a teoria proposta, e processamento dos dados experimentais para obtenção final dos parâmetros do plasma.

Ao aluno Célio M. Nakamoto foi oferecido uma máquina de plasma contínuo e os estudos teóricos e experimentais já realizados como tese de mestrado em uma máquina pulsada do tipo tokamak. Foram, portanto executados partes como, desenvolvimento do circuito apropriado para as medidas, eliminação dos ruídos eletromagnéticos, definição de voltagem e corrente para obtenção dos dados experimentais, definição da região “limpa” para análise de dados de acordo com a teoria proposta, e processamento dos dados experimentais para obtenção final dos parâmetros do plasma.

Os resultados obtidos com estudos de temperatura em vários tipos de gases diferentes foram muito bom. Naturalmente, de acordo com os resultados apresentados, ainda tem muito a fazer, desenvolver e entender. Porém, acredito que o aluno neste período, teve um bom aprendizado com este trabalho de iniciação científica e contribuiu para aprimorar este trabalho de base que queremos tornar um futuro curso básico de experimentos em física de plasmas.

Prof. Dr. Munemasa Machida.