



Flávia

Grecco



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO
COMPUTACIONAL PARA AUTOMATIZAÇÃO DA
ANÁLISE DE DADOS DE SONDAS ELETROSTÁTICAS
UTILIZADAS PARA MEDIDAS DE TEMPERATURA E
DENSIDADE DE PLASMAS QUENTES**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Ana Flávia Guedes Greco (Etep Faculdades, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: ana-greco@bol.com.br

Dr. Edson Del Bosco (LAP/CTE/INPE, Orientador)
E-mail: bosco@plasma.inpe.br

Julho de 2007

RESUMO

Este trabalho, iniciado em março de 2007, tem como objetivo o desenvolvimento de ferramentas computacionais para a automatização da análise das curvas características de tensão versus corrente, obtidas com sondas eletrostáticas (Sondas de Langmuir) simples e duplas, em plasmas de alta temperatura gerados no Tokamak ETE do Laboratório Associado de Plasma. Inicialmente foi feita a análise de sinais obtidos com uma sonda simples colocada na região da borda do plasma do tokamak ETE. Os principais parâmetros obtidos com as sondas eletrostáticas são: temperatura de elétrons (T_e), corrente de saturação de íons (densidade do plasma) (I_s) e potencial flutuante do plasma (V_f). Escolhemos para esta análise inicial a técnica do ajuste de uma curva aos pontos experimentais na parte de coleta de corrente de íons e início da corrente de elétrons da curva característica da sonda. A curva ajustada aos pontos experimentais é função dos três parâmetros que desejamos obter (T_e , I_s e V_f). Estes parâmetros são determinados a partir do ajuste por mínimos quadrados realizado no aplicativo "Origin". A sonda é polarizada com um gerador de rampa com tensão variando de -20V a 80V com período de 1ms. Na descarga do tokamak ETE de duração ~12ms, temos no mínimo seis rampas (subida e descida) e, portanto, temos no mínimo 12 curvas características. Para o ajuste utilizamos alguns critérios, tais como: utilização de todos os pontos pertencentes a uma determinada rampa (subida ou descida) e cálculo da média dos parâmetros obtidos na subida e na descida de cada rampa. Com o ajuste feito, verificamos que não seria conveniente utilizar todos os pontos da rampa, pois existiam muitas flutuações nos sinais alterando assim os valores de temperatura, corrente e potencial flutuante. Desta forma foi necessário utilizar outro critério mais conveniente, optamos por utilizar apenas os pontos que vão até a primeira flutuação, descartando os demais. Os resultados foram melhores quando comparados com os anteriores. Com este procedimento, determinamos os parâmetros T_e , I_s e V_f para dois instantes diferentes da descarga de plasma (meio e fim) e para diferentes posições radiais da borda do plasma. Para a continuidade do trabalho utilizaremos um aplicativo mais apropriado (Matlab ou Mathematica) e testaremos outras técnicas de obtenção dos parâmetros físicos, tanto para as sondas simples como para as sondas duplas.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| LISTA DE FIGURAS | Pg. 04 |
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO | 05 |
| CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 07 |
| 2.1 Tokamak | 07 |
| 2.1.1 Experimento Tokamak Esférico – ETE | 08 |
| 2.2 Sonda eletrostática | 10 |
| 2.2.1 Sonda simples | 12 |
| 2.2.2 Curva característica | 13 |
| 2.3 Metodologia | 14 |
| 2.3.1 Equação de ajuste | 14 |
| CAPÍTULO 3 - RESULTADOS E ANÁLISE | 15 |
| 3.1 Critério para análise | 15 |
| 3.2 Perfis Radiais | 16 |
| 3.3 Perfis Temporais | 19 |
| CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS | 22 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 24 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pg. |
|---|-----|
| 1. Esquema Geral de um Tokamak | 08 |
| 2. Ilustração com os vários estágios de montagem do toróide esférico ETE | 09 |
| 3. Vista geral do Tokamak ETE | 09 |
| 4. Esquema de uma sonda eletrostática inserida em um plasma neutro | 11 |
| 5. Arranjo esquemático utilizado em sondas simples | 12 |
| 6. Curva Característica | 13 |
| 7. Temperatura de elétrons (T_e) em função do raio para rampa 1 com subida e descida | 16 |
| 8. Temperatura de elétrons (T_e) em função do raio para rampa 2 com subida e descida. | 16 |
| 9. Potencial flutuante (V_f) em função do raio para rampa 1 com subida e descida. | 17 |
| 10. Potencial flutuante (V_f) em função do raio para rampa 2 com subida e descida | 17 |
| 11. Corrente de saturação de íons (I_s) em função do raio para rampa 1 com subida e descida | 18 |
| 12. Corrente de saturação de íons (I_s) em função do raio para rampa 2 com subida e descida | 18 |
| 13. Temperatura de elétrons (T_e) em função do tempo para um disparo | 19 |
| 14. Potencial flutuante (V_f) em função do tempo para um disparo | 19 |
| 15. Corrente de saturação de íons (I_s) em função do tempo para um disparo | 20 |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Nesse relatório são apresentadas as atividades referentes à bolsa de iniciação científica intitulada “Desenvolvimento de Aplicativo computacional para automatização da análise de dados de sondas eletrostáticas utilizadas para medidas de temperatura e densidade de plasmas quentes”. O conteúdo deste relatório compreende os trabalhos realizados no período de 01/03/2007 até 10/07/2007.

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de diagnósticos por sondas eletrostáticas (simples e duplas), com ênfase ao desenvolvimento de aplicativos computacionais para a análise dos dados obtidos com sondas. Propõe-se projetar, instalar e operar um sistema de sondas eletrostáticas para se determinar, entre outros parâmetros a temperatura, a densidade e o potencial de plasma de forma automatizada. O conhecimento destes parâmetros na borda do plasma é importante para o estudo do confinamento da parte central onde se encontram as partículas confinadas para a obtenção da fusão termonuclear [1, 2, 3, 4].

A fusão termonuclear de núcleos leves (deutério e trítio) tem enorme potencial para torna-se uma fonte de energia limpa e segura, não agressiva ao meio ambiente, e praticamente inesgotável, entretanto, demanda ainda desenvolvimento tecnológicos substanciais para tornar-se uma fonte de geração de energia economicamente viável [5].

O sistema mais avançado para o confinamento magnético de plasmas é o tokamak [6]. Este dispositivo foi inventado no início da década de sessenta por cientistas soviéticos e, já na década seguinte, foi adotado por todos os grandes laboratórios de fusão. Num tokamak, o plasma é produzido dentro de uma câmara de vácuo com forma toroidal. O campo magnético de confinamento é produzido por uma corrente que circula no próprio plasma. Um outro campo, denominado campo toroidal e usualmente bem mais intenso que o gerado pela corrente de plasma, é produzido por bobinas externas e superposto ao anel de plasma para mantê-lo estável. O funcionamento de um tokamak fundamenta-se no princípio de um transformador onde a corrente de plasma seria o “enrolamento” secundário. Verifica-se, portanto, que tokamaks são máquinas pulsadas que envolvem altas correntes e tensões, tornando-as relativamente custosas, tanto para a construção como para o diagnóstico do plasma. A

temperatura atingida no plasma devido ao efeito Joule não é suficiente, em princípio, para se obter a fusão nuclear, desta forma, sistemas de aquecimento auxiliar são sempre empregados para elevar a temperatura do plasma nos tokamaks.

O LAP/INPE desenvolve desde os meados da década de 1990 o projeto “Experimento Tokamak Esférico” (ETE). Os parâmetros principais de projeto do ETE, na primeira fase de operação estão descritos na tabela a seguir:

Tabela 1.1 – Parâmetros do Tokamak ETE

| Parâmetros | Valores | Unidades |
|------------------------------------|---------|----------|
| Raio maior (R_0) | 0.3 | m |
| Raio menor (a) | 0.2 | m |
| Campo magnético toroidal (B_0) | 0.4 | T |
| Corrente de plasma (I_p) | 200 | kA |

Fonte: Baseada em LUDWIG, G.O.; DEL BOSCO, E.; FERREIRA, J.G.; BERNI, L.A.; OLIVEIRA, R.M.; ANDRADE, M.C.R.; SHIBATA, C.S.; UEDA, M. 7p, (2003).

A principal característica da máquina, como todos os toróides esféricos, é a baixa razão de aspecto $A = R_0/a = 1,5$. Apesar das pequenas dimensões do ETE, os parâmetros do experimento são relevantes para se explorar as características atrativas das configurações de baixa razão de aspecto, na consecução de futuros reatores de fusão compactos. O tokamak esférico ETE oferece a possibilidade de o Brasil acompanhar o desenvolvimento internacional na área de dispositivos compactos de confinamento para fusão, reunindo as atividades de diversos especialistas, sejam físicos, engenheiros ou técnicos, nas áreas de engenharia elétrica, mecânica, térmica e de controle. O ETE entrou em operação em fins do ano 2000 e encontra-se em funcionamento desde então, com atividades relacionadas à otimização do espaço de operação, instalação de diagnósticos e aumento da energia dos bancos para se atingir os parâmetros de projeto [7].

O Tokamak e o Tokamak ETE – Experimento são apresentados no capítulo 2, assim como as equações básicas para o estudo com sonda Eletrostática (simples). Também é apresentado neste capítulo o modo pelos quais os parâmetros do plasma podem ser obtidos da curva característica. Os critérios para análises dos dados obtidos com as sondas assim como seus resultados são apresentados no capítulo 3.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O plasma, também conhecido como o quarto estágio da matéria, é um gás ionizado que se forma quando um gás é superaquecido e os elétrons se rompem, deixando partículas eletricamente carregadas [8]. Existem diversas aplicações de grande importância nas indústrias eletrônica, aeroespacial, metalúrgica, biomédica, e de tratamento de resíduos e detritos. Algumas tecnologias comuns hoje em dia só são viáveis pela utilização do plasma.

A aplicação mais promissora do plasma é a utilização do mesmo na fusão termonuclear para obtenção de energia. O Tokamak é o engenho mais promissor, até o momento, para a obtenção da fusão termonuclear.

2.1 Tokamak

A palavra Tokamak é uma abreviação russa para “Câmara Magnética Toroidal”. O Tokamak é constituído de uma câmara de vácuo toroidal – onde é formado o plasma – e um conjunto de bobinas, regularmente espaçadas em torno da câmara toroidal. Esse conjunto de bobinas gera um forte campo magnético na direção toroidal, enquanto que uma corrente no plasma cria um campo mais fraco na direção poloidal. O campo magnético resultante tem linhas de força helicoidais semelhantes a uma mola em hélice que se fecha sobre si própria, o efeito deste campo faz com que o plasma fique confinado dentro da câmara. O confinamento é essencial para evitar que o plasma tenha contato com as paredes da câmara, isso faria com que metais pesados fossem liberados na mesma e evita também o contato com os componentes que se localizam dentro da câmara (como as sondas magnéticas) e não são resistentes as altas temperaturas do plasma [8]. A Figura 1.1 mostra um esquema geral de um Tokamak.

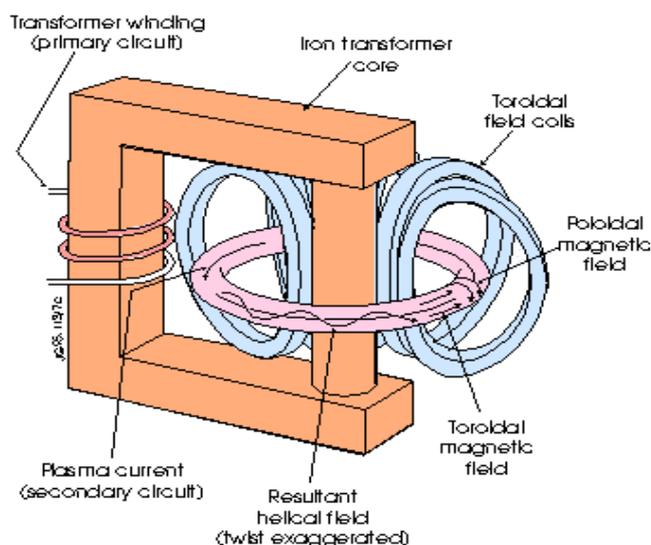


Figura 1.1 - Esquema de um Tokamak

Fonte: Adaptada do site www-fusion-magnetique-cea.fr.

2.1.1 Experimento Tokamak Esférico - ETE

O ETE (Experimento Tokamak Esférico) é uma máquina dedicada ao estudo de plasma em tokamaks de baixa razão de aspecto. O ETE foi inteiramente projetado e construído no Laboratório Associado de Plasma do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Os principais parâmetros do ETE são mostrados na Tabela 1.1. A corrente de plasma pode atingir $\sim 0,4$ MA, dependendo do aumento da capacidade das fontes de potência atualmente disponíveis, e de um possível aumento do campo magnético para níveis em torno de 0,6 T. A razão de aspecto pode ser reduzida para até 1,3 se o solenóide de aquecimento ôhmico for removido, mas isto depende dos desenvolvimentos futuros na área de geração de corrente não indutiva (sem usar o efeito transformador).

A configuração de baixa razão de aspecto requer um projeto cuidadoso das bobinas toroidal e poloidais, da câmara de vácuo, da estrutura mecânica e das peças que defrontam o plasma, que se devem adaptar ao volume central limitado do toróide. A Figura 1.2 ilustra os vários estágios da montagem do toróide esférico ETE e a Figura 1.3 mostra uma vista geral do Tokamak [7].

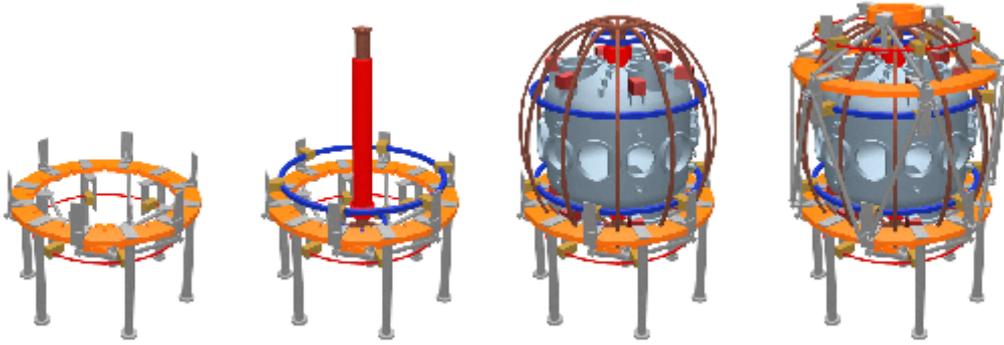


Figura 1.2 - Ilustração de vários estágios de montagem do toróide esférico ETE.
Fonte: Adaptada do site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/Laboratório Associado de plasma



Figura 1.3 - Vista geral do Tokamak ETE

Objetivos gerais do experimento ETE [7]:

- Explorar as propriedades dos tokamaks de baixa razão de aspecto.
- Desenvolver diagnósticos de plasma (instrumentos para medidas em plasmas apropriados para tokamaks esféricos.
- Treinar pessoal na operação de tokamaks (O ETE está aberto para colaboração com outros laboratórios e universidades).

- Explorar novas idéias no que diz respeito à geração de corrente durante a fase de iniciação do plasma e operação em estado estacionário.
- Realizar estudos para melhorar o confinamento do plasma (dependendo da implementação de métodos de aquecimento auxiliar).

2.2 Sonda Eletrostática

Dentre as técnicas de diagnósticos de plasmas, a sonda eletrostática ou de Langmuir é provavelmente a técnica mais antiga para se medir propriedades elétricas de plasmas. Esta técnica tem as seguintes características [9]:

- possibilita obter parâmetros elétricos do plasma tais como densidade de partículas carregadas, temperatura média de elétrons, potencial flutuante e potencial do plasma;
- fornece resolução espacial, ou seja, permite medir propriedades do plasma localmente;
- é de construção e arranjo experimental relativamente simples e de baixo custo, quando comparado com outras técnicas de caracterização de plasmas tais como espectroscopia de emissão. No entanto, a interpretação dos dados é tão complexa quanto essas técnicas, de modo que elas devem ser encaradas como técnicas complementares.

Os primeiros estudos com sondas eletrostáticas foram feitos por Irving Langmuir e H. Mott-Smith Jr. em 1926, sendo esta teoria hoje conhecida como OML (“Orbital Motion Limited”). Esta teoria se aplica ao intervalo em que $\frac{R}{\lambda_D} \leq 1$ (R raio da sonda e λ_D é o comprimento Debye).

Normalmente os plasmas que se encaixam neste intervalo têm $n < 10^9 \text{ cm}^{-3}$ principalmente a partir de 1950 houve a necessidade de estender a teoria de sondas eletrostáticas para cobrir o intervalo $\frac{R}{\lambda_D} \geq 1$.

As principais contribuições (teóricas) para este intervalo foram dadas por Bohm (1949), Allen-Boynolds (ABR) (1957), Bernstein-Rabinowitz (1959) e Laframboise (1966).

A teoria de Bernstein-Rabinowitz e Laframboise (BRL) é a teoria mais completa existente para sondas no regime sem colisão [3].

A técnica de sonda eletrostática consiste em se aplicar, através de um circuito externo, um sinal de excitação (tensão) a um pequeno eletrodo (ou sonda), imerso na região neutra do plasma. A Figura 2.1 mostra um esquema desta técnica.

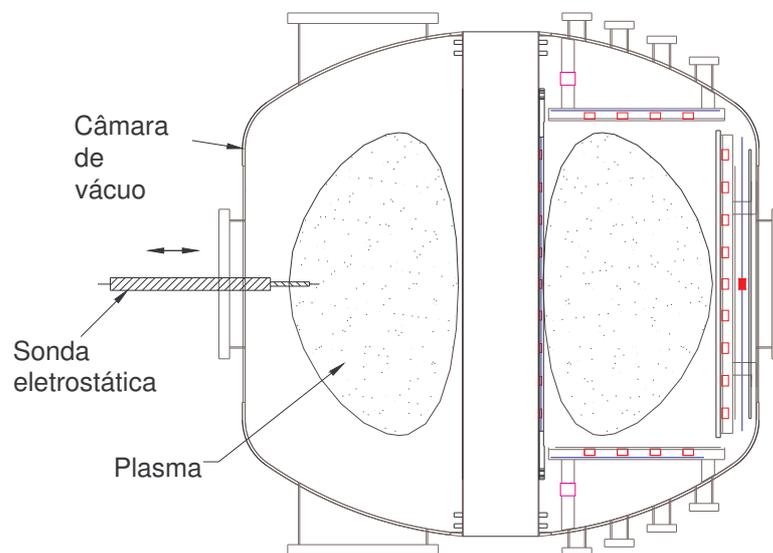


Figura 2.1 - Esquema de uma sonda eletrostática inserida em um plasma neutro

Como resposta a tal excitação, há a passagem de corrente que circula no circuito externo (e através do plasma). Esta corrente flui através de um elemento sensor.

A sonda funciona basicamente como um selecionador de energia. Para amostrar-se toda a faixa de energia das partículas, o sinal de tensão aplicado à sonda pode ser um sinal de varredura, tipo rampa, com período apropriado.

Pode-se, assim, obter uma curva de corrente *versus* tensão, também chamada curva característica, a qual possibilita a extração dos parâmetros de plasma.

A sonda deve ter forma geométrica que proporcione simetria (cilíndrica, esférica ou plana) para facilitar a matemática envolvida na determinação dos parâmetros

elétricos do plasma a partir da curva característica obtida e deve ser tão pequena quanto possível para minimizar perturbações no plasma [9].

As sondas podem operar tanto coletando quanto emitindo cargas. Neste estudo usou - se apenas sondas coletoras de carga. Há vários tipos de sondas coletoras tais como sonda simples, sonda dupla e sonda tripla, em nosso estudo nos limitaremos às sondas simples.

2.2.1 Sonda Simples

Uma sonda eletrostática simples ou sonda de Langmuir é basicamente constituída por uma ponta metálica imersa na região do plasma. Polarizando esta ponta metálica com tensões de valores negativos e positivos em relação ao plasma, obtém-se a denominada curva característica da sonda. Esta variação de tensão é feita com um circuito de varredura onde durante um pulso do plasma do ETE, de duração de 10 a 15ms, a sonda é polarizada várias vezes de -100 a +100V, obtendo-se, assim, diversas curvas características ao longo da descarga. Estas medidas são armazenadas na memória de um osciloscópio ou outro sistema de aquisição de dados. Na Figura 2.2 é apresentado um arranjo esquemático do circuito utilizado para medições com as sondas simples.

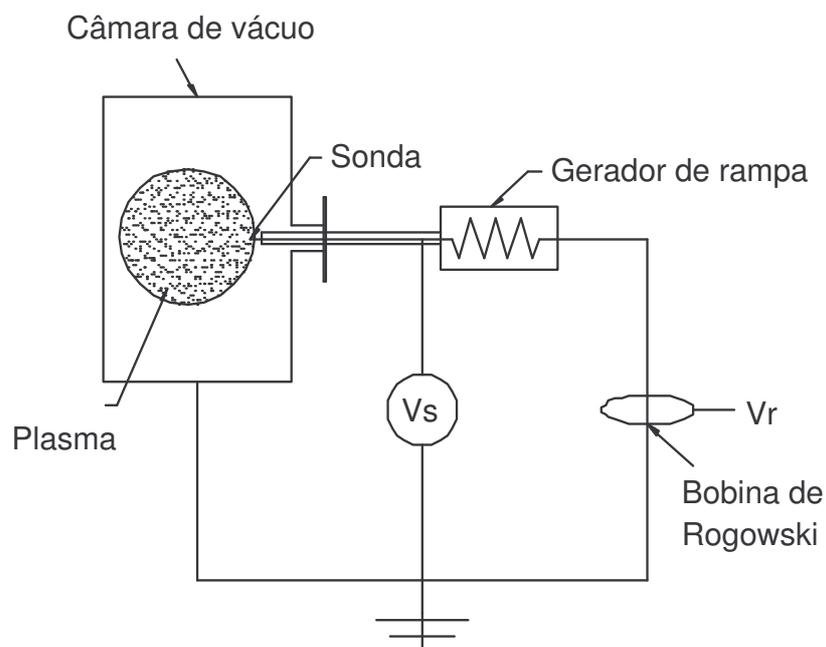


Figura 2.2 - Arranjo esquemático utilizado em sondas simples

2.2.2 Curva Característica da Sonda Simples

A curva característica (regime não colisional) de uma sonda cilíndrica imersa num campo magnético é dada na Figura 2.3.

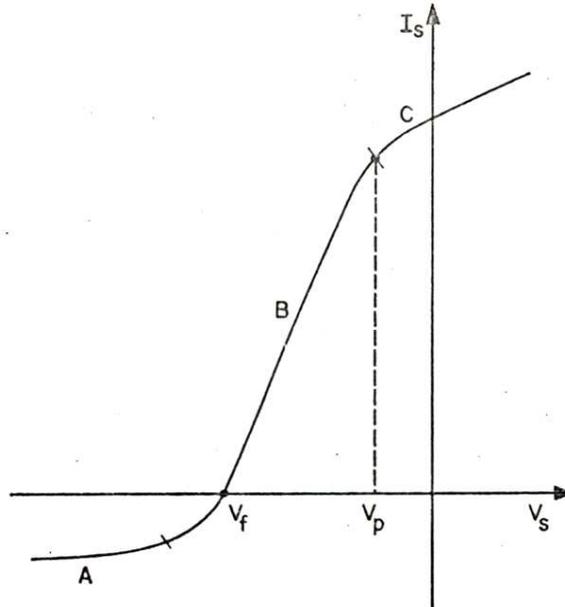


Figura 2.3 Curva Característica

Fonte: Adaptada de **DALLAQUA, R.S.** Dissertação de mestrado – IFUSP, (1982).

Pode - se identificar três regiões distintas (A, B e C) e dois pontos característicos (V_f e V_p) na curva característica da sonda simples. A partir dessas regiões pode-se determinar parâmetros importantes, as quantidades mostradas nesta figura bem como suas regiões são assim definidas [3]:

Parte A – é a corrente de “saturação” de íons I_{sati} .

V_f – é o potencial flutuante. Neste ponto a corrente de íons coletada é igual à de elétrons sendo então $I_s = 0$.

Parte B – é a parte em que há o predomínio da corrente de elétrons. Se a distribuição de elétrons for Maxwelliana esta parte deverá ser exponencial independente da forma da sonda.

V_p – é o potencial de plasma. Neste ponto a sonda está no mesmo potencial que o plasma, isto é, o campo elétrico sobre as partículas é zero e elas atingem a sonda devido ao movimento térmico.

Parte C – é a “saturação” da corrente de elétrons I_{sate} . Na ausência de campo magnético

$$\frac{I_{sate}}{I_{sati}} \sim \sqrt{\frac{m_i T_e}{m_e T_i}} \text{ sendo que esta razão dá } \frac{I_{sate}}{I_{sati}} > 40.$$

2.3 Metodologia

Como foi dito anteriormente as curvas características obtidas com sondas eletrostáticas fornecem parâmetros importantes do plasma, tais como: temperatura de elétrons, potencial do plasma e corrente de saturação de íons, porém estas informações não estão explicitadas nas curvas e por isso devem ser obtidas com a ajuda de um modelo matemático.

2.3.1 Equação de Ajuste

Para este trabalho escolhemos para esta análise inicial a técnica do ajuste de uma curva aos pontos experimentais na parte de coleta de corrente de íons e início da corrente de elétrons da curva característica da sonda. A curva ajustada aos pontos experimentais é função dos três parâmetros que desejamos obter (T_e , I_s e V_f). Essa função é apresentada a seguir [10]:

$$y = I_s \cdot e^{\left[1 - \left\{\left(\frac{x - V_f}{T_e}\right)\right\}\right]}, \quad \text{Equação (1.1)}$$

onde, I_s é a corrente de saturação de íons dada em Ampère (A)

V_f é o potencial flutuante dado em volts (V)

T_e é a temperatura de elétrons dada em elétron-volt (eV)

Estes parâmetros são determinados a partir do ajuste por mínimos quadrados realizado no aplicativo “Origin”.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS E ANÁLISES

A seguir serão apresentados os resultados obtidos a partir da curva característica gerada pela sonda através dos gráficos de perfis radiais e temporais e serão também explicados os critérios para as análises das curvas.

3.1 Critério para Análise

Para a análise dos dados foi necessário definir alguns critérios importantes, tais como:

- Para cada intervalo do disparo de plasma seriam utilizados duas rampas (subida e descida) com variação de tensão -20V a +80V e tirada a média dos valores encontrados para os parâmetros;
- Inicialmente analisamos dois intervalos da descarga de plasma: meio e o final;
- Para o ajuste da curva seriam utilizados todos os pontos da rampa.

Os valores encontrados para os parâmetros a partir da função de ajuste também deveriam ser considerados. Para T_e o máximo valor esperado seria da ordem de 10 eV. Com relação à variação temporal esperavam-se que os valores de T_e deveriam ser maiores no meio da descarga e menores na parte final da mesma. Definido esses critérios partimos para o ajuste das curvas. Analisamos os valores encontrados e como eles não foram satisfatórios, pois não se enquadravam em nossas expectativas, tivemos que definir outros critérios. Verificamos que as curvas apresentavam muitas flutuações então optamos por utilizar os pontos que vão até a primeira flutuação descartando os demais. Os resultados então obtidos foram satisfatórios.

3.2 Perfis Radiais

Feito o ajuste das curvas características para todos os disparos, tiramos à média dos valores encontrados de T_e , V_f e I_s para cada rampa e construímos um gráfico T_e versus raio, V_f versus raio e I_s versus raio. Incluímos ao gráfico uma barra de erro que em nosso trabalho é o desvio encontrado para cada valor de T_e , V_f e I_s . Para o desvio também foi feito uma média, e a fórmula que utilizamos para calcular esse desvio é dada na Equação 1.2:

$$y = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\sigma_1 + \sigma_2} \quad \text{Equação (1.2)}$$

onde, σ_1 é o desvio dos parâmetros que queremos encontrar para subida das rampas 1 e 2.

σ_2 é o desvio dos parâmetros que queremos encontrar para descida das rampas 1 e 2.

A seguir serão apresentadas as Figuras 3.1 e 3.2 que mostram os valores de T_e em função do raio respectivamente, para as rampas 1 e 2, ambas com subida e descida.

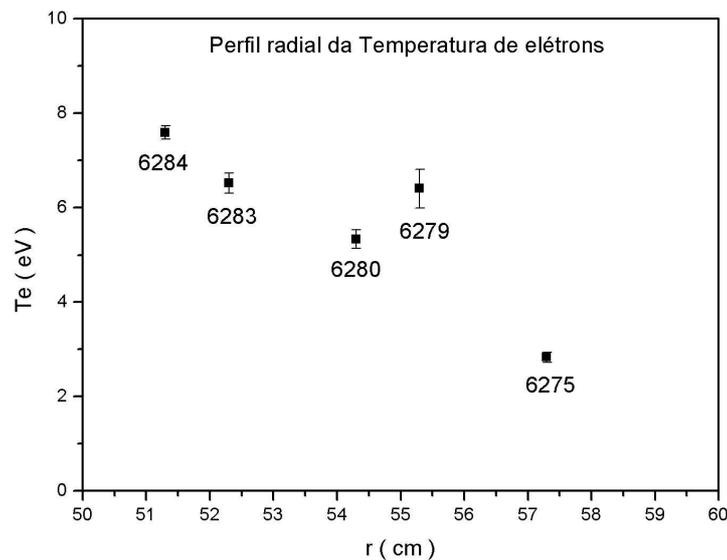


Figura 3.1 - Temperatura de elétrons (T_e) em função do raio para rampa 1 com subida e descida

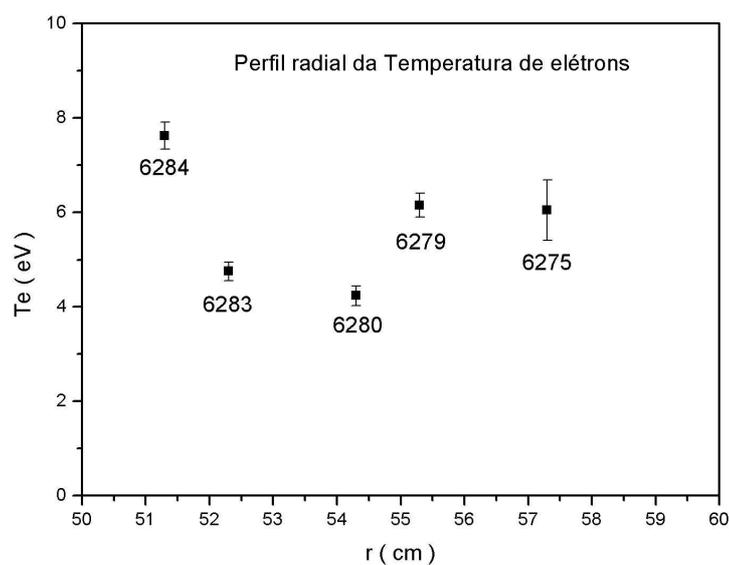


Figura 3.2 - Temperatura de elétrons (T_e) em função do raio para rampa 2 com subida e descida

As Figuras 3.3 e 3.4 mostram os valores de V_f em função do raio respectivamente, para as rampas 1 e 2, ambas com subida e descida.

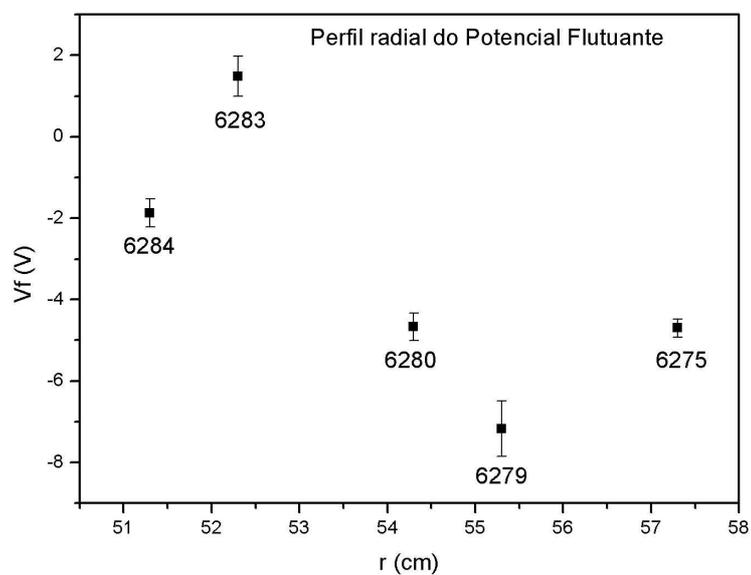


Figura 3.3 – Potencial flutuante (V_f) em função do raio para rampa 1 com subida e descida

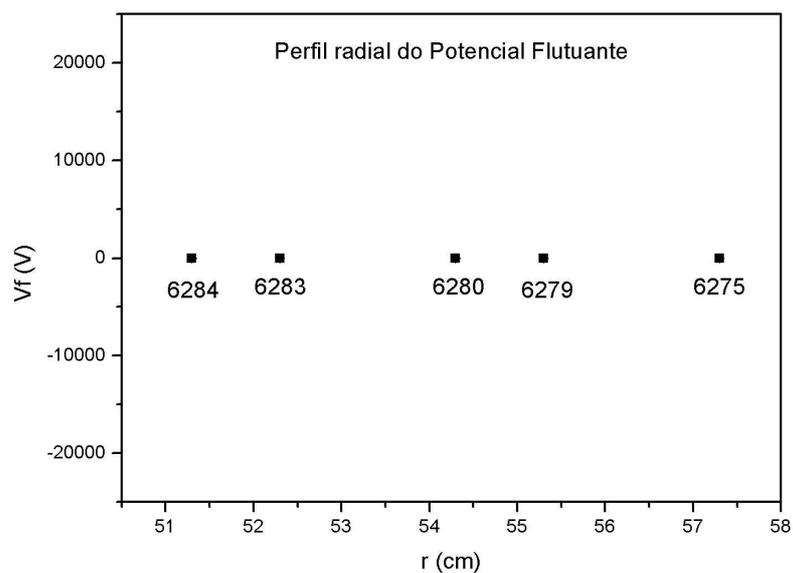


Figura 3.4 - Potencial flutuante (V_f) em função do raio para rampa 2 com subida e descida

As Figuras 3.5 e 3.6 mostram os valores de I_s em função do raio respectivamente, para as rampas 1 e 2, ambas com subida e descida.

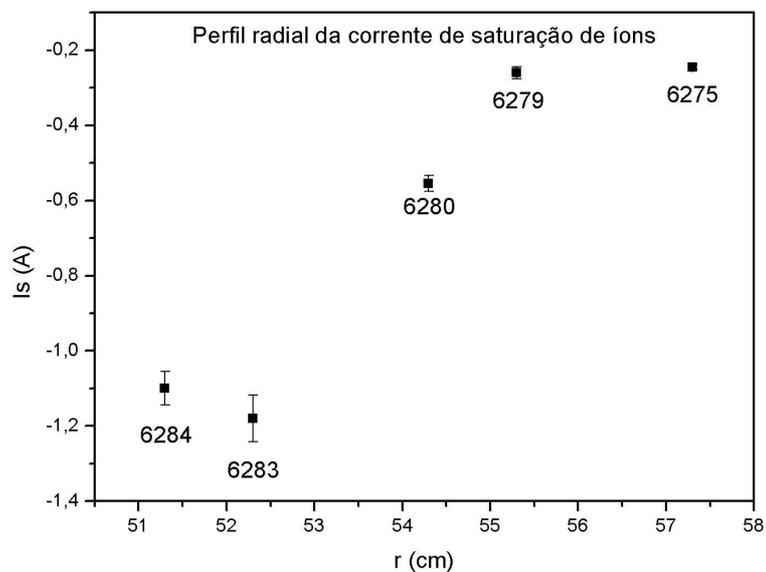


Figura 3.5 – Corrente de saturação de íons (I_s) em função do raio para rampa 2 com subida e descida

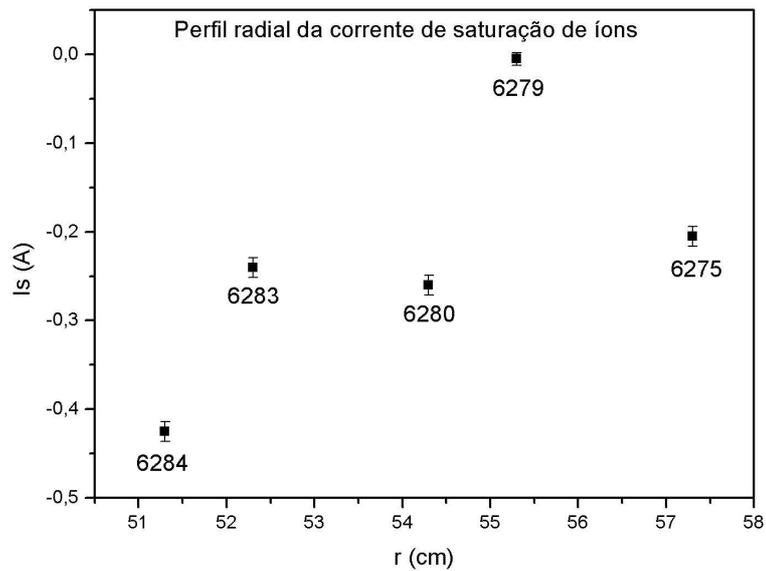


Figura 3.6 – Corrente de saturação de íons (I_s) em função do raio para rampa 2 com subida e descida

3.2 Perfis Temporais

Além dos gráficos de perfis radiais também construímos os gráficos de T_e , V_f e I_s em função do tempo, porém, para estes gráficos foi utilizado somente um disparo, este disparo foi escolhido após ser analisado anteriormente seus valores encontrados.

Nas Figuras 3.7 a 3.9 são mostrados os gráficos de perfis temporais para T_e , V_f e I_s , respectivamente, para o disparo #6275.

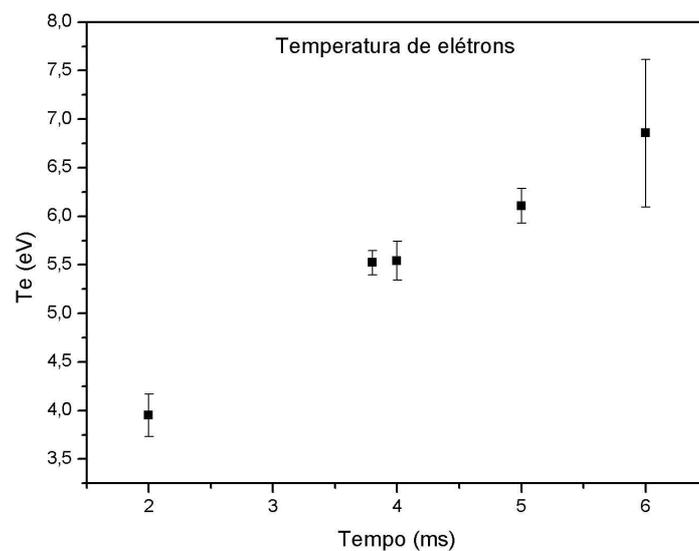


Figura 3.7 - Temperatura de elétrons (T_e) em função do tempo para um disparo

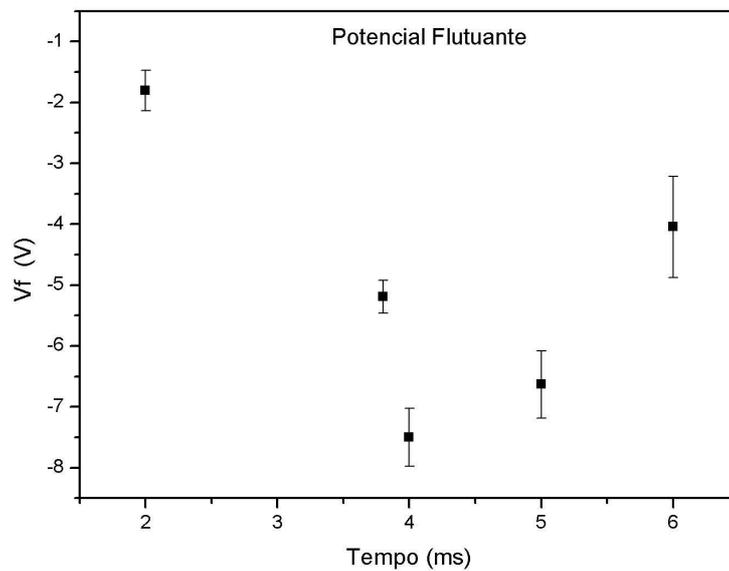


Figura 3.8 - Potencial flutuante (V_f) em função do tempo para um disparo

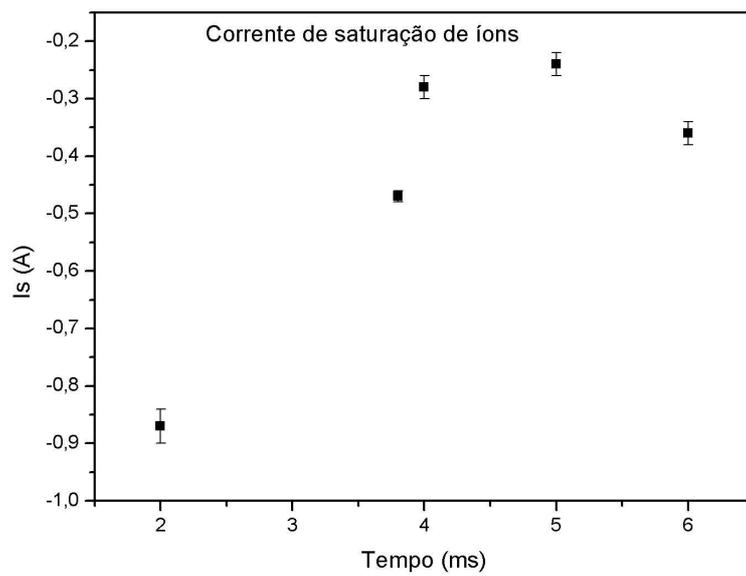


Figura 3.9 - Corrente de saturação de íons (I_s) em função do tempo para um disparo

CAPÍTULO 4

CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Apresentamos nesse relatório os progressos obtidos em aproximadamente 5 meses de trabalho desse projeto de iniciação científica, que visa o desenvolvimento de ferramentas computacionais para a automatização da análise das curvas características de tensão versus corrente, obtidas com sondas eletrostáticas (Sondas de Langmuir) simples e duplas, em plasmas de alta temperatura gerados no Tokamak ETE do Laboratório Associado de Plasma.

Boa parte desse trabalho inicial foi concentrada em determinar a melhor metodologia para a obtenção dos parâmetros que queríamos encontrar. São vários os métodos para o cálculo de temperatura de elétrons, potencial flutuante e corrente de saturação, porém, optamos por utilizar a técnica do ajuste de uma curva aos pontos experimentais na parte de coleta de corrente de íons e início da corrente de elétrons da curva característica da sonda. A curva ajustada aos pontos experimentais é função dos três parâmetros que desejamos obter (T_e , I_s e V_f) e a essa função demos o nome de “Função Langmuir”.

Os primeiros resultados que encontramos com o ajuste da curva não foi satisfatório, mesmo utilizando todos os critérios mencionados no capítulo 3. Os valores encontrados principalmente de T_e estavam muito elevados passando de 10 eV, o que não era o desejado. Tivemos então, que encontrar outro critério mais conveniente. Optamos então por utilizar os pontos que iam até a primeira flutuação, descartando os demais, ao contrário do critério que foi utilizado anteriormente onde seriam utilizados todos os pontos da rampa. Chegamos a essa conclusão observando as rampas analisadas onde verificamos que todas elas apresentavam pequenas e grandes flutuações o que altera os valores dos parâmetros estudados. Feito o ajuste novamente, só que agora utilizando o segundo critério, observamos que os valores encontrados eram melhores que os anteriores.

Com os dados existentes determinamos os perfis radiais e temporais da temperatura de elétrons, do potencial flutuante e da corrente de saturação. Para os gráficos de perfis radiais, analisamos o comportamento de T_e , V_f e I_s , onde para

cada valor do raio correspondia a uma descarga. Para os gráficos de perfis temporais, analisamos um disparo e para diferentes tempos da descarga. Os dados experimentais existentes apresentavam alto nível de ruído (flutuação) o que explica as barras de erros grandes para alguns pontos, assim como, pode explicar alguns pontos fora da região esperada. Uma análise mais detalhada será feita no próximo período da bolsa.

Contudo o que foi dito anteriormente acreditamos que o trabalho auxiliou muito para determinarmos a melhor metodologia para o ajuste da curva. Para a continuidade desse trabalho vamos utilizar outro método para o ajuste da curva característica em sondas eletrostáticas simples e posteriormente duplas. Também iremos trabalhar com outros aplicativos computacionais não se restringindo somente ao “Origin” como trabalhamos inicialmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] HUTCHINSON, I.H. “Principles of plasma diagnostics” Editora Cambridge (1992)
- [2] HUDLESTONE, H.R. and LEONARD, S.L. “Plasma diagnostic techniques” Cap. 4 “Electric Probe” Editora Academic Press, NY 1965
- [3] DALLAQUA, R.S. “Sondas de Langmuir em regime não colisional” Dissertação de mestrado – IFUSP, 1982.
- [4] SCIENCE FOUNDATION TEAM “The handling of experimental data” Editora Open University Press (1970)
- [5] KAM, P.K et al. “Status report on fusion research” Nuclear Fusion 45 (10), 1-28 (2005)
- [6] WESSON, J. “Tokamaks” Editora Clarendon Press, Oxford (1987)
- [7] LUDWIG, G.O.; DEL BOSCO, E.; FERREIRA, J.G.; BERNI, L.A.; OLIVEIRA, R.M.; ANDRADE, M.C.R.; SHIBATA, C.S.; UEDA, M. “Spherical tokamak development in Brazil” Brazilian Journal of Physics, 33 (4), 848-859 (2003)
- [8] INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE) / LABORATÓRIO ASSOCIADO DE PLASMA (LAP). São José dos Campos - SP. 2007. Disponível em: <<http://www.plasma.inpe.br/>>. Acesso em: 02 Julho 2007.
- [9] CIRINO, G.A. “Caracterização de plasmas empregando a técnica de sonda eletrostática” Dissertação de mestrado – USP, 1998. Disponível em: <www.giuseppcirino.com/Dissertacao.pdf>. Acesso em: 02 Julho 2007.
- [10] STANGEBY, P.C. and McCracken, G.M., Nuclear Fusion 30 (7), 1225-1379, 1990.