



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 2008

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. A partir de uma curva característica, é possível calcular alguns parâmetros importantes do plasma, tais como: temperatura de elétrons (T_e), potencial do plasma (V_s), corrente de saturação de íons (I_s) e densidade de elétrons (n_e). Para o cálculo desses parâmetros é necessário utilizar um modelo matemático adequado. Em linhas gerais, o procedimento baseia-se no ajuste de uma função à curva característica experimental de onde são extraídas as grandezas físicas de interesse. Inicialmente foi feita a análise de sinais obtidos com uma sonda simples colocada na região da borda do plasma do tokamak ETE utilizando duas técnicas de ajuste. Na primeira técnica faz-se o ajuste, por mínimos quadrados, de uma função com três parâmetros independentes que se desejam obter: I_{s+} (corrente de saturação de íons em Ampères), V_f (potencial de plasma em Volts) e T_e (temperatura de elétrons em Elétron-Volts), utilizando os pontos experimentais pertencentes à parte de coleta de corrente de íons e início da parte de coleta de corrente de elétrons. Na segunda técnica faz-se o ajuste linear do logaritmo dos pontos experimentais pertencentes à região onde os elétrons alcançam a sonda devido ao movimento térmicos dos mesmos (parte exponencial). Ambas as técnicas apresentaram resultados semelhantes e satisfatórios, entretanto, para a implementação do programa de automatização foi utilizada a primeira técnica, tendo em vista sua simplicidade de execução. O programa foi desenvolvido inicialmente na janela Script Window do aplicativo Origin para ler e analisar os dados obtidos em formato ASCII por um osciloscópio conectado à internet. Posteriormente, o programa foi adaptado para permitir a leitura dos dados em um novo sistema de aquisição, baseado no padrão PCI, implementado no tokamak ETE. Para a continuidade dos trabalhos, pretende-se utilizar outros aplicativos mais apropriados tais como MatLab e IDL para a leitura e análise dos dados das sondas, assim como, pretende-se concluir os procedimentos para a análise dos dados obtidos com a sonda dupla.

SUMÁRIO

Lista de figuras	Pg. 4
Capítulo 1 – Introdução	5
Capítulo 2 – Fundamentação teórica	8
2.1 Tokamak	8
2.1.1 Tokamak ETE	9
2.2 Sonda eletrostática	11
2.2.1 Sonda simples	13
2.2.1.1 Curva característica de uma sonda simples	14
2.2.2 Sonda dupla	15
2.2.2.1 Curva característica de uma sonda dupla	16
Capítulo 3 – Metodologia utilizada	19
3.1 Equação de ajuste para sonda simples	19
3.1.1 Técnica 1 – “Função”	19
3.1.2 Técnica 2 – “Logaritmo”	21
3.2 Densidade de elétrons (n_e) para sonda simples	22
3.3 Equação da sonda dupla	23
3.4 Aquisição de dados	25
3.4.1 Aquisição de dados via osciloscópio	26
3.4.2 Aquisição de dados via sistema de armazenamento de transientes padrão PCI	27
Capítulo 4 – Resultados e análises	29
4.1 Análise pela técnica 1	29
4.1.1 Critério para a análise dos dados	29
4.1.2 Curva característica típica de ajuste para técnica 1	30
4.2 Análise pela técnica 2	31
4.2.1 Curva característica típica de ajuste para técnica 2	31
4.3 Programa para a automatização do ajuste	32
Capítulo 5 – Conclusão e trabalhos futuros	34
Referências	36
Apêndice A	37

LISTA DE FIGURAS

	Pg.
1. Esquema geral de um tokamak	9
2. Ilustração com os vários estágios da montagem do tokamak ETE	10
3. Vista geral do tokamak ETE	10
4. Esquema de uma sonda eletrostática inserida em um plasma neutro	12
5. Circuito elétrico genérico de uma sonda simples	13
6. Curva característica I-V de uma sonda simples	14
7. Curva característica I-V de uma sonda dupla	16
8. Circuito básico de uma sonda dupla	17
9. Diagrama de V_d	17
10. Circuito esquematizado para uma sonda simples	25
11. Sistema de movimentação das sondas	26
12. Sinal típico de uma sonda simples, (a) corrente de plasma, (b) tensão na sonda e (c) corrente coletada pela sonda Circuito esquematizado para uma sonda simples	26
13. Osciloscópio conectado ao gerador de varredura	27
14. Sistema de aquisição e armazenamento – Padrão PCI	28
15. Curva característica experimental utilizada para o ajuste (disparo 6275)	30
16. Curva ajustada sobre os dados experimentais – técnica 1 (disparo 6275)	30
17. Curva de ajuste sobre os dados experimentais – técnica 2 (disparo 6275)	31
18. Tela inicial do programa	32
19. Tela final do programa	33
20. Programa desenvolvido no software “Origin”	37

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 4/07/2008.

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) [7].

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].

As máquinas tipo Tokamak e o Experimento Tokamak Esférico (ETE) são apresentadas 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.

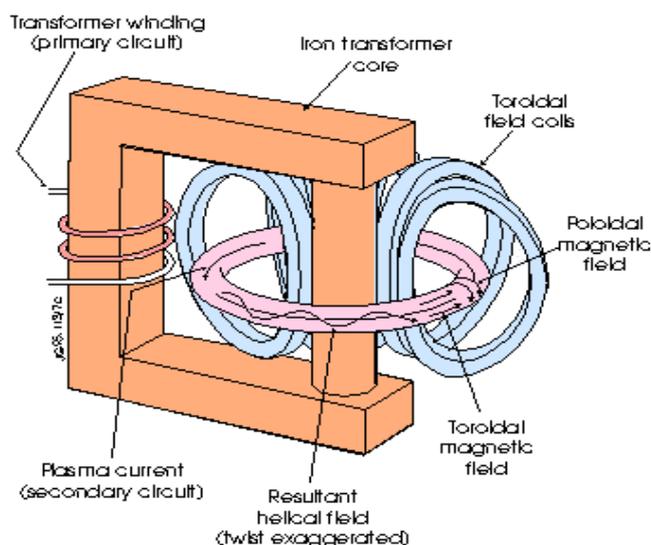


Figura 1.1 - Esquema geral de um Tokamak
 Fonte: Adaptada do site www-fusion-magnetique-cea.fr.

2.1.1 Tokamak 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].

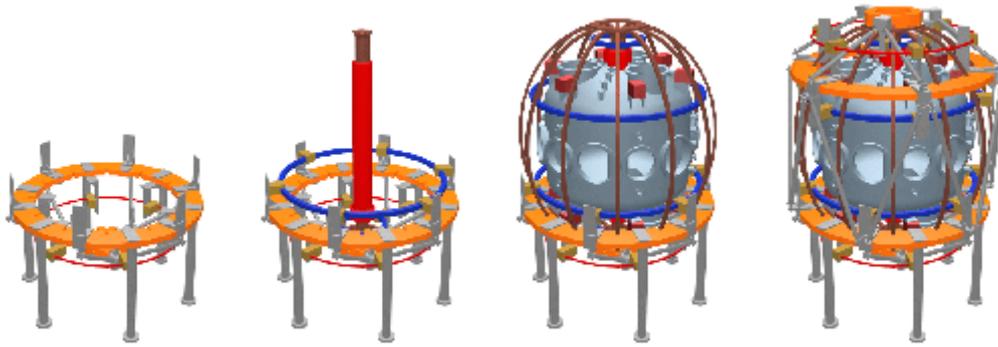


Figura 1.2 - Ilustração com os vários estágios da montagem do tokamak ETE
Fonte: Adaptada do site <www.plasma.inpe.br>



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 $\frac{R}{\lambda_D} \geq 1$.

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.

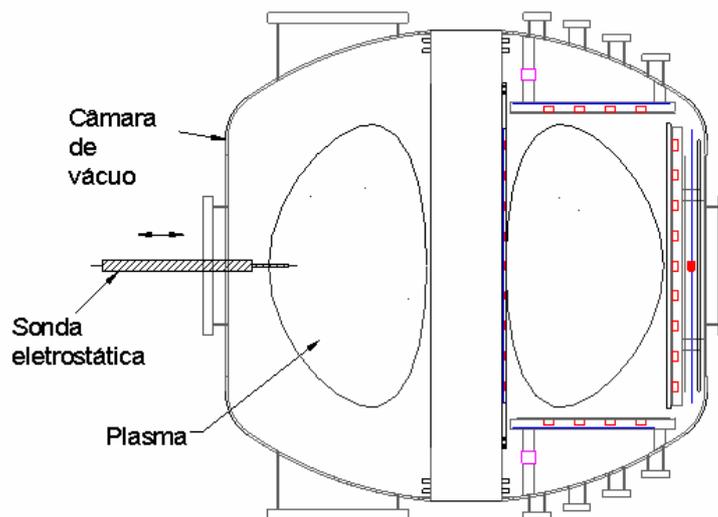


Figura 2.1 - Esquema de uma sonda eletrostática inserida em um plasma neutro

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 e duplas.

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 genérico utilizado para medições com as sondas simples.

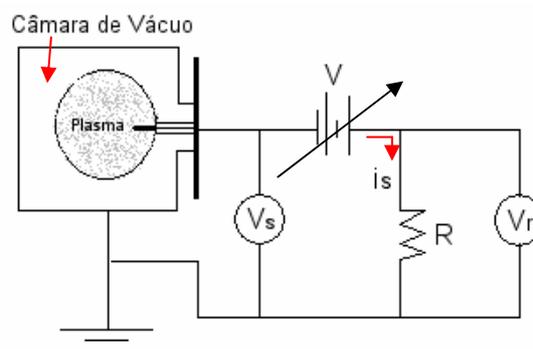


Figura 2.2 Circuito elétrico genérico de uma sonda simples

2.2.1.1 Curva característica de uma sonda simples

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

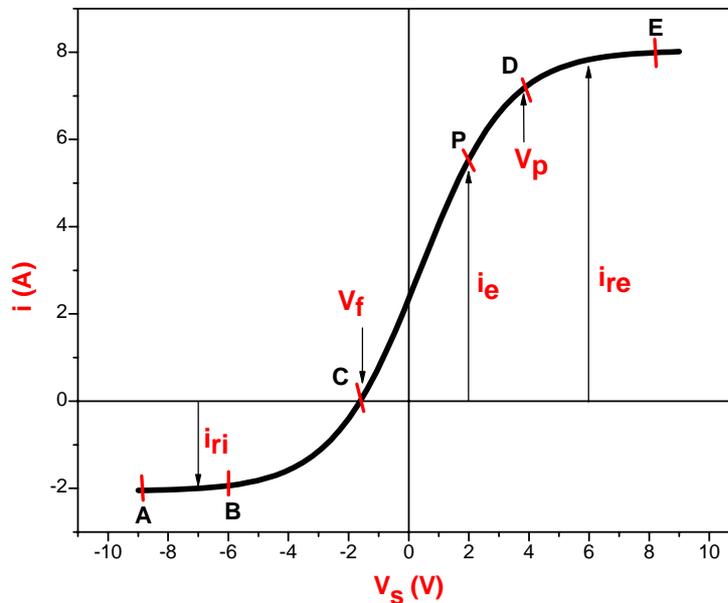


Figura 2.3 Curva característica I-V de uma sonda simples

onde, i : corrente drenada pela sonda;

V_s : tensão aplicada na sonda em relação ao “vaso” ou outro metal com área » área da sonda;

$i_{ri} = i_{si} = i_s^+$: corrente aleatória de íons que chega a sonda. Esta corrente depende apenas da densidade de partículas (íons) do plasma que atinge a sonda devido ao movimento aleatório.

Pode-se identificar quatro regiões distintas (AB, BC, CD e DE) 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:

Região AB – para um potencial bastante negativo, os elétrons são totalmente repelidos. A corrente na sonda é formada apenas pelos íons, que chegam à superfície da sonda e não depende do valor do potencial. A corrente fica saturada no valor $i_{ri} \rightarrow (i_e = 0)$

Região BC – quando o potencial da sonda vai se tornando menos negativo (eventualmente até positivo), alguns elétrons, começam a passar pela barreira de potencial e atingem a sonda → a corrente “líquida” da sonda diminui. Nesta região $i_e \neq 0$ (mais ainda íons predominam). Então temos que $i = i_e - |i_{ri}|$.

Nota: assume-se $i_e > 0$ e $i_{ri} < 0$.

Vf – é o potencial flutuante. Neste ponto a corrente de íons coletada é igual à de elétrons sendo então $I_s = 0 \rightarrow (i_e = |i_{ri}|)$.

Quando o potencial da sonda se torna mais positivo, a corrente de elétrons aumenta e torna-se predominante: $i_e > |i_{ri}| \rightarrow$ a corrente reverte a direção, isto ocorre a partir do ponto C da curva característica.

Região CD - 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.

No ponto **D**, eventual, a corrente de elétrons, atinge o valor máximo, que depende da densidade de elétrons no plasma e torna-se independente do potencial aplicado.

Região DE – é onde a corrente de elétrons atinge a saturação, $i_e = i_{re} = i_{se}$. Nas curvas características reais, esta região não é bem definida.

Vp – 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.

2.2.2 Sonda dupla

A sonda dupla consiste em duas sondas simples situadas próximas uma da outra (a ponto de desconsiderar-se qualquer variação do potencial de plasma no espaçamento entre as duas sondas), conectadas a um circuito externo semelhante ao utilizado com sonda simples.

Uma sonda simples apresenta o problema de drenar uma corrente relativamente grande do plasma, “perturbando” o mesmo. Quando a sonda esta polarizada positivamente em relação ao plasma.

Na sonda dupla a corrente drenada do plasma nunca é maior que a corrente de saturação de íons, portanto ela é intrinsecamente menos invasiva.

O plasma age apenas como um condutor de corrente entre as duas pontas da sonda dupla. Sendo uma das sondas polarizadas em relação à outra, mas ambas isoladas, então as duas sondas ficam “flutuando” em relação ao plasma e, portanto, seguem as variações do potencial de plasma.

2.2.2.1 Curva característica de uma sonda dupla

A figura 2.4 mostra a curva característica típica de uma sonda dupla.

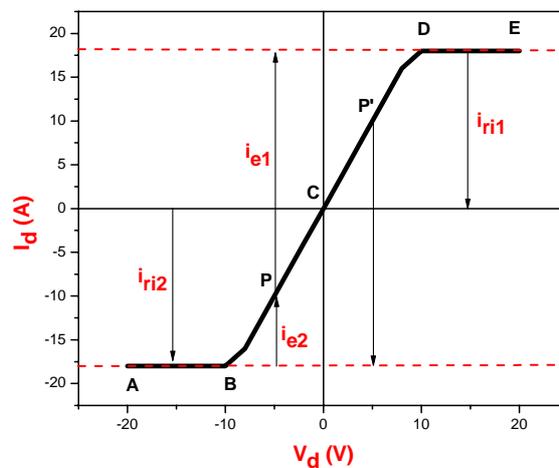


Figura 2.4 Curva Característica I-V de uma sonda dupla

NOTA: Se as duas sondas forem idênticas (áreas iguais), a curva característica I-V é simétrica, mas o fato de não serem iguais não é impedimento para o funcionamento da sonda.

A hipótese básica da teoria da sonda dupla é que as duas sondas sempre estão negativas (flutuando) em relação ao potencial do plasma, assim, estão sempre coletando

a corrente de saturação de íons, qualquer que seja a diferença de potencial aplicada entre as duas sondas.

A figura 2.5 mostra esquematicamente um circuito básico de uma sonda dupla e a figura 2.6 mostra o diagrama com a distribuição de potenciais presentes no sistema desta sonda.

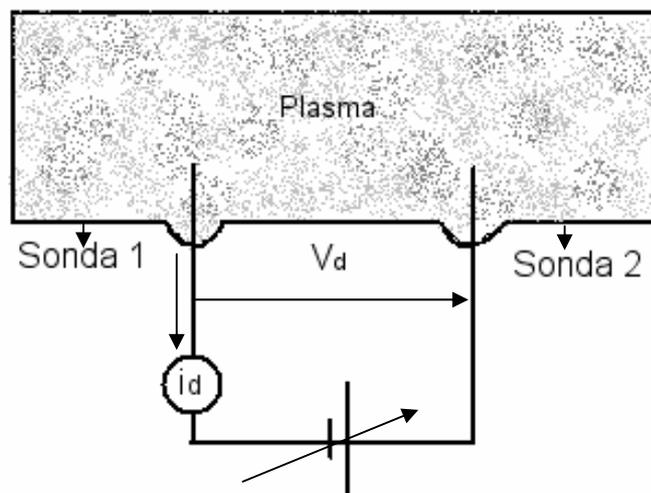


Figura 2.5 Circuito básico de uma sonda dupla

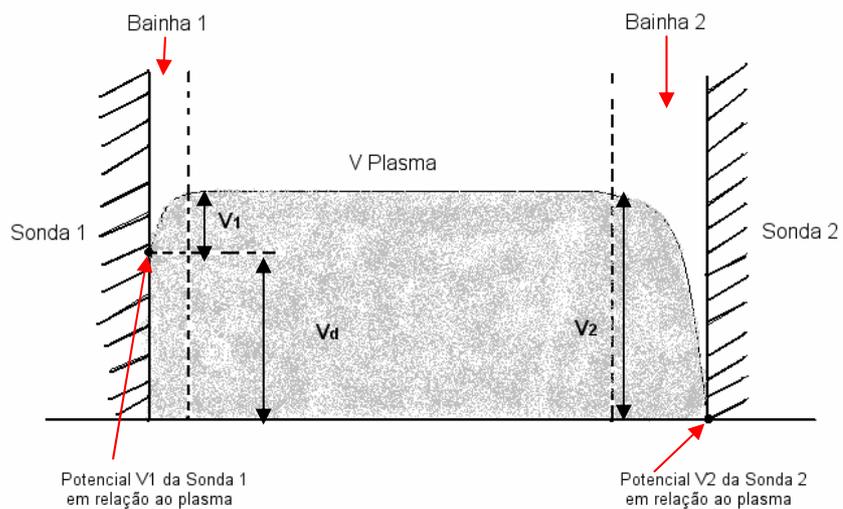


Figura 2.6 Diagrama de V_d

NOTA: Supor inicialmente que $V_d = V_1 - V_2 > 0$, ou seja, que V_1 é positivo em relação à V_2 , então numa corrente i_d positiva, a mesma circula da sonda 1 para a sonda 2. (Ver figura 2.5).

No **ponto C** da curva ($V_d = 0 \rightarrow V_1 = V_2$) as duas sondas estão no potencial flutuante e a corrente total líquida é zero ($i_d = 0$), ou seja, as correntes de elétrons e de íons se anulam.

Fazendo V_d ligeiramente positiva, ou seja, V_1 menos negativa e V_2 mais negativa, então mais elétrons alcançaram a sonda 1 menos elétrons atingiram a sonda 2, resultando numa corrente i_d positiva da sonda 2 para a sonda 1.

Sendo V_d bastante positiva, então a sonda 2 ficará muito negativa e coletará apenas a corrente de saturação de íons, i_{ri2} , ($i_{e2} = 0$) (**Parte DE** da curva V-I). Nesta situação a sonda 1 ainda se encontra negativa, mas perto do potencial de plasma, coletando uma corrente de elétrons suficientemente grande para cancelar a corrente de íons na sonda 2. ($i_{e1} = i_{ri2} + i_{ri1}$).

Fazendo $V_d < 0$, a corrente i_d tem o sentido revertido, $i_d < 0$, fluindo da sonda 1 para a sonda 2, até atingir a corrente de saturação de íons na sonda 1, i_{ri1} , para V_s bastante negativo. Nesta situação a sonda 2 coleta uma corrente de elétrons suficiente para cancelar a corrente de íons, na sonda 1 ($i_{e2} = i_{ri2} + i_{ri1}$).

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA UTILIZADA

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.

3.1 Equação de ajuste para sonda simples

Para este trabalho foram utilizadas duas técnicas de ajuste para os sinais obtidos com uma sonda simples. Estas técnicas são apresentadas a seguir.

3.1.1 Técnica 1 - “Função”

Para esta técnica utilizou-se uma função de ajuste denominada Non-Linear Fit. Para o ajuste foram utilizados os pontos experimentais pertencentes à parte de coleta de corrente de íons e início da parte de coleta de corrente de elétrons. A curva ajustada é uma função dos três parâmetros que se deseja obter: I_s^+ (corrente de saturação de íons em Ampères), V_f (potencial de plasma em Volts) e T_e (temperatura de elétrons em Elétron-Volts).

Partindo da expressão para a corrente de elétrons coletada pela sonda na região CD da corrente I-V (equação 4) [10]:

$$i_e = i_{re} \exp [e (V_s - V_p) / K_b T_e] \quad \text{Equação 8}$$

onde i_e corrente total de elétrons, i_{re} corrente de saturação de elétrons, V_p é o potencial do plasma e V_s é o potencial da sonda

No ponto C da curva I-C, tem-se que:

$$V_s = V_f \text{ e } i = 0 \rightarrow i_e = | i_{ri} | \rightarrow i_e = - i_{ri}$$

Onde V_f é o potencial flutuante, i_e é a corrente total de elétron e i_{ri} é a corrente de saturação de íons.

Substituindo $i_e = -i_{ri}$ e $V_s = V_f$, na equação 8, tem-se:

$$-i_e = i_{er} \exp [e (V_f - V_p) / K_b T_e] \quad \text{Equação 9}$$

Isolando i_{er} da equação 8, tem-se:

$$i_{re} = i_e \exp [e (V_p - V_s) / K_b T_e] \quad \text{Equação 10}$$

A corrente total medida pela sonda é dada por:

$$i = i_e + i_i = i_e + i_{ri} \quad \text{Equação 11}$$

Isolando i_e na equação 11, tem-se:

$$i_e = i - i_{ri}$$

Substituindo a expressão dada acima na equação 10, tem-se:

$$i_{re} = (i - i_{ri}) \exp [e (V_p - V_s) / K_b T_e] \quad \text{Equação 12}$$

Substituindo i_{re} da equação 12 na equação 9, tem-se:

$$i = i_{ri} \{ 1 - \exp [e (V_s - V_f) / K_b T_e] \} \quad \text{Equação 13}$$

onde, i é a corrente total medida pela sonda, i_{ri} é a corrente de saturação de íons, V_s potencial aplicado na sonda, V_f potencial flutuante, e é a carga do elétron, K_b é a constante de Boltzmann e T_e é a temperatura de elétron.

A função da equação 13 também pode ser escrita da forma:

$$y = A \{ 1 - \exp [1 / B (x - C)] \} \quad \text{Equação 14}$$

onde A é a corrente de saturação de íon, que é dada em Ampères (A), B é a expressão $K_b T_e / e$, que é dada em Kelvin (K) ou Elétron-Volt (eV) e C é o potencial flutuante, que é dado em volts (V).

Os valores dos parâmetros A, B e C são obtidos pelo ajuste da função $y(x)$ aos pontos experimentais da curva característica I-V, pertencentes à região **A-D**. Para o ajuste utilizando o método dos mínimos quadrados se faz necessário especificar valores iniciais para A, B e C.

3.1.2 Técnica 2 – “Logaritmo”

Para esta técnica utilizou-se uma função de ajuste linear do logaritmo da corrente de elétrons dos pontos pertencentes à região onde os elétrons chegam à sonda (região exponencial). Nesta região o acúmulo de elétrons, ao redor da sonda começa a formar uma região de repulsão para os demais elétrons e somente elétrons com energia suficiente conseguem atingir a sonda (movimento térmico).

Assumindo que os elétrons possuem uma distribuição de velocidade Maxwelliana, a corrente de elétrons que atinge a sonda na região CD é dada por [2, 3, 11]:

$$i_e = i_{re} \exp(-eV / K_b T_e) \quad \text{Equação 1}$$

onde, i_e é a corrente total de elétrons, i_{re} é a corrente de saturação ou aleatória de elétron, V o potencial, K_b é a constante de Boltzmann e e a carga do elétron.

Nota: no ponto D o potencial na bacia é $V = 0 \rightarrow i_e = i_{re}$ e a diferença de potencial entre o plasma e a superfície da sonda, ou seja, a sonda está no potencial do plasma é dada por:

$$V = V_p - V_s = 0 \rightarrow V_s = V_p \quad \text{Equação 2}$$

Todo o elétron que atinge a bacia devido ao seu movimento térmico consegue penetrar e atingir a sonda.

Substituindo (2) \rightarrow (1), tem-se:

$$i_e = i_{er} \exp[-e(V_p - V_s) / K_b T_e] \quad \text{Equação 3}$$

onde, V_p é o potencial do plasma e V_s é o potencial da sonda

Ajustando a equação, tem-se:

$$I_e = i_{er} \exp[e(V_s - V_p) / K_b T_e] \quad \text{Equação 4}$$

Tomando \ln da equação (4), tem-se:

$$\ln i_e = \underbrace{\ln i_{er} - (e V_p / K_b T_e)}_{\text{Constante}} + (e V_s / K_b T_e)$$

Logo tem-se que:

$$\ln i_e = A + (e / K_b T_e) V_s \quad \text{Equação 5}$$

Um gráfico de $\ln i_e$ versus V_s , será uma reta com inclinação $e / K_b T_e$.

Fazendo \ln como y , V_s como x e $(e / K_b T_e)$ como B , temos a seguinte equação:

$$y = A + B x$$

Logo, se $B = e / K_b T_e$ tem-se que $T_e = e / K_b B$

Substituindo e (carga do elétron) e K_b (constante de Boltzmann), tem-se:

$$T_e (K) = 11.600 / B \rightarrow \text{temperatura dada em Kelvin} \quad \text{Equação 6}$$

$$T_e (eV) = T_e (K) / 11.600 = 1 / B \rightarrow \text{temperatura dada em elétron-volts} \quad \text{Equação 7}$$

3.2 Densidade de elétrons (n_e) para sonda simples

Considerando uma distribuição Maxwelliana de velocidade e para o caso em que $V = 0$ (ponto D) ou $V_p = V_s$, ou seja, não há campo elétrico entre a sonda e o plasma então [3]:

$$i_{re} = A e n_e (K_b T_e / 2 \pi m_e) \quad \text{Equação 13}$$

onde A é a área da sonda,

Medindo-se i_{re} quando possível da curva I-V, pode-se determinar n_e pela equação 13. Esta equação é válida para o caso em que $B = 0$, ou seja, plasma não magnetizado.

Como i_{re} é difícil de obter as curva I-V, então, utiliza-se a expressão aproximada para i_{ri} (saturação de íons):

$$i_{ri} \sim 0,4 A e n_i (2 K_b T_e / m_i)^{1/2} \quad \text{Equação 14}$$

De onde se pode determinar n_i conhecendo T_e e a área da sonda.

Para um plasma de hidrogênio, temos que $n_e = n_i$, logo a equação 14 ficará assim:

$$i_{ri} \approx 0,4 A \text{ e } n_e (2 K_b T_e / m_i)^{1/2} \quad \text{Equação 15d}$$

De onde se mede n_e conhecendo-se i_{ri} diretamente da curva I-V e T_e .

3.3 Equação da sonda dupla

A condição para que o sistema de sonda dupla esteja sempre flutuando é de que para qualquer V_d a soma das correntes de íons e elétrons seja nula [2, 11].

$$i_{ri1} + i_{ri2} - i_{e1} - i_{e2} = 0 \quad \text{Equação 16}$$

Verifica-se da curva V-I que nos pontos:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_d = i_{ri2} - i_{e2} \quad \text{Equação 17} \\ i_d = i_{ri1} - i_{e1} \quad \text{Equação 18} \end{array} \right.$$

A corrente de elétrons, baseada nos postulados da distribuição de Maxwell-Boltzman (idem a sonda simples) é dada por (**região BD** da curva V-I) (não saturada):

$$i_{e1} = i_{ri1} \exp (-e V_1 / K_b T_e) \quad \text{Equação 19}$$

$$i_{e2} = i_{ri2} \exp (-e V_2 / K_b T_e) \quad \text{Equação 20}$$

onde, i_{ri1} e i_{ri2} , são as correntes aleatórias de elétrons na sonda 1 e 2, respectivamente.

Da equação 16, tem-se que:

$$i_{ri1} + i_{ri2} = i_{e1} + i_{e2}$$

$$i_{ri1} + i_{ri2} = i_{e2} [(i_{e1} / i_{e2}) + 1]$$

$$(i_{ri1} + i_{ri2}) / i_{e2} = (i_{e1} / i_{e2}) + 1 \quad \text{Equação 21}$$

Substituindo i_{e1} e i_{e2} na equação 19 e 20, no lado direito da equação 21, tem-se:

$$\begin{aligned} (i_{ri1} + i_{ri2}) / i_{e2} &= [i_{e1} \exp e (-e V_1 / K_b T_e) / i_{e2} \exp e (-e V_2 / K_b T_e)] + 1 \\ (i_{ri1} + i_{ri2}) / i_{e2} - 1 &= \underbrace{(i_{e1} / i_{e2})}_{A} \exp e [(-e V_1 / K_b T_e) - (-e V_2 / K_b T_e)] \end{aligned}$$

$$(i_{ri1} + i_{ri2}) / i_{e2} - 1 = A \exp e [(-e V_1 / K_b T_e) + (e V_2 / K_b T_e)]$$

$$(i_{ri1} + i_{ri2}) / i_{e2} - 1 = A \exp e [-e (V_1 - V_2) / K_b T_e]$$

Sendo $V_d = V_1 - V_2$, tem-se:

$$(i_{ri1} + i_{ri2}) / i_{e2} - 1 = A \exp e [-e V_d / K_b T_e] \quad \text{Equação 22}$$

Tomando-se \ln da equação 22, tem-se:

$$\ln [(i_{ri1} + i_{ri2}) / i_{e2} - 1] = \ln A + \ln \exp e [-e V_d / K_b T_e]$$

$$\ln [(i_{ri1} + i_{ri2}) / i_{e2} - 1] = \ln A - \underbrace{(e V_d / K_b T_e)}_{\text{constante}} \quad \text{Equação 23}$$

Um gráfico de $\ln [(i_{ri1} + i_{ri2}) / i_{e2} - 1]$ versus V_d , será uma reta com inclinação $e / K_b T_e$.

Fazendo-se $\ln [(i_{ri1} + i_{ri2}) / i_{e2} - 1]$ como y , V_d como x e $(e / K_b T_e)$ como B , tem-se a seguinte equação:

$$y = A + B x$$

Logo se, $B = e / K_b T_e$ tem-se que $T_e = e / K_b B$

Substituindo e (carga do elétron) e K_b (constante de Boltzmann), tem-se:

$$T_e (K) = 11.600 / B \rightarrow \text{temperatura dada em Kelvin} \quad \text{Equação 24}$$

$$T_e (eV) = T_e (K) / 11.600 = 1 / B \rightarrow \text{temperatura dada em elétron-volts} \quad \text{Equação 25}$$

3.4 Aquisição de dados

A figura 3.1 apresenta o arranjo esquemático do circuito utilizado para medições com a sonda simples.

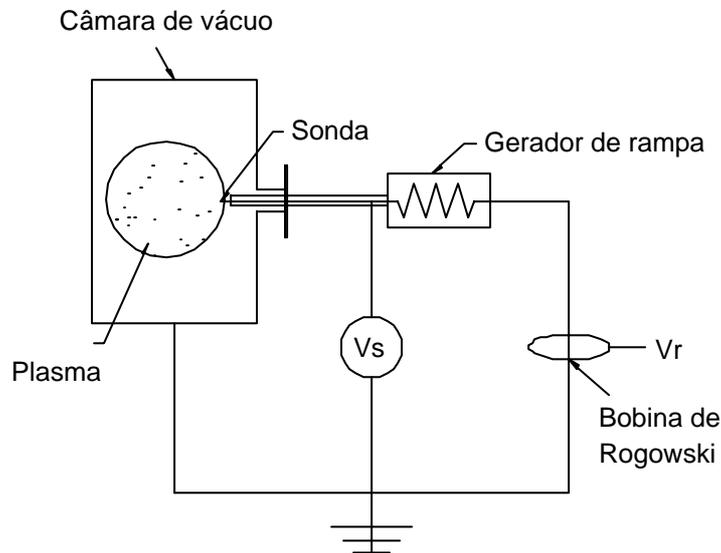


Figura 3.1 Circuito esquematizado para uma sonda simples

A sonda simples é inserida no plasma via um sistema de movimentação linear com selagem para alto vácuo. A sonda é polarizada por um gerador de rampa com tensão (V_s) de -150 a +150V e controle da frequência. A corrente coletada pela sonda simples (I_s) é medida por uma bobina de Rogowski que faz parte do circuito gerador de rampa.

A figura 3.2 apresenta o sistema de movimentação das sondas simples e duplas inseridas na câmara do Tokamak ETE e a figura 3.3 mostra um sinal típico obtido com uma sonda simples: (a) perfil temporal da corrente de plasma, (b) tensão aplicada na sonda pela fonte do circuito de varredura e (c) corrente coletada pela sonda.



Figura 3.2 Sistema de movimentação das sondas

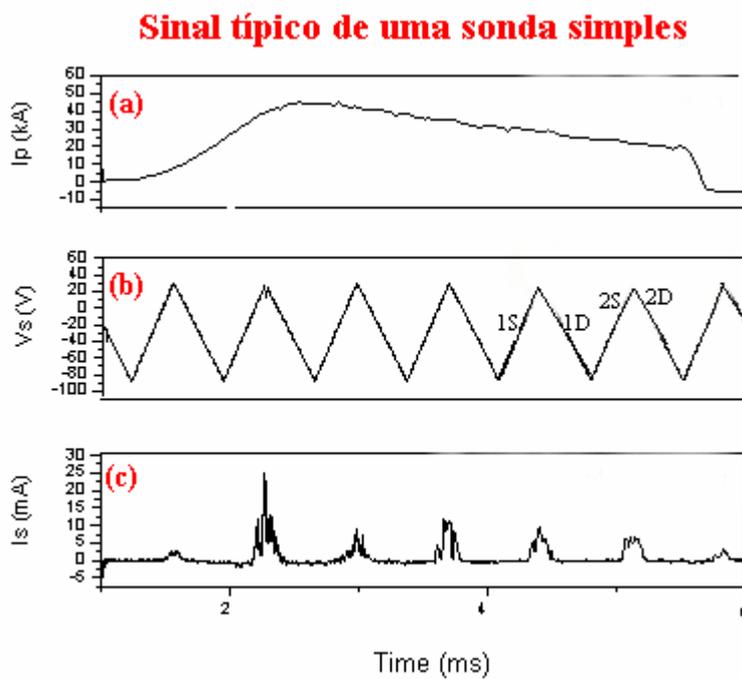


Figura 3.3 Sinal típico de uma sonda simples, (a) corrente de plasma, (b) tensão na sonda e (c) corrente coletada pela sonda

Para a aquisição de dados com sondas simples utilizou-se dois tipos de sistemas conforme apresentado a seguir.

3.4.1 Aquisição de dados via osciloscópio

Utiliza-se um osciloscópio digital modelo TDS 3014B da Tektronix, com as seguintes características principais:

- Taxa de amostragem de 2MSPS;
- 4 canais;
- Possibilidade de gravação dos sinais adquiridos em disquete;
- Possibilidade de operação via Internet;
- Gatilho externo para sincronização com a máquina.

A figura 3.4 mostra uma fotografia do arranjo experimental utilizado (osciloscópio e gerador de varredura). O gerador de varredura é um circuito especialmente projetado para polarizar a sonda eletrostática com tensões de -150 a 150V e medir a corrente coletada pela sonda.

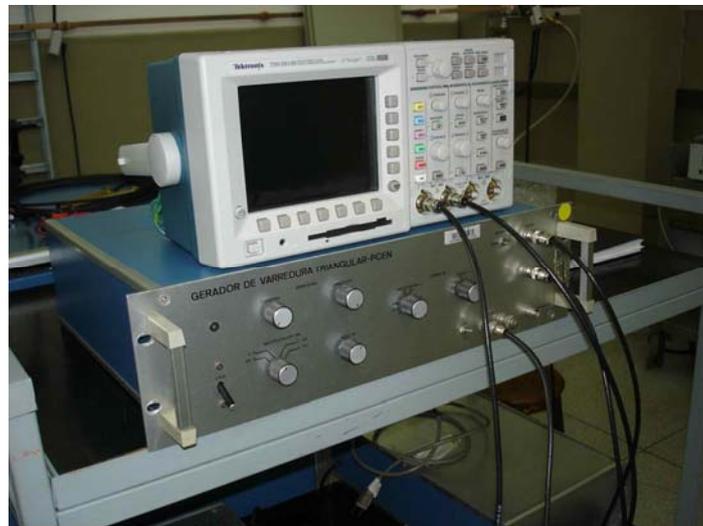


Figura 3.4 Osciloscópio conectado ao gerador de varredura

3.4.2 Aquisição de dados via sistema de armazenamento de transientes padrão PCI

O sistema de aquisição e armazenamento de dados (pulsados) padrão PCI tem as seguintes características principais:

- 4 módulos com 8 canais cada, perfazendo um total de 64 canais
- Taxa de amostragem de 2MSPS
- Entrada de sinais com isolamento de fibra óptica de 1kV
- Resolução de 14bits
- Controlado por aplicativo próprio “fire signal”

- Banco de dados para análise posterior dos dados.

A figura 3.5 apresenta uma fotografia do sistema de aquisição padrão PCI implementado no Tokamak ETE.

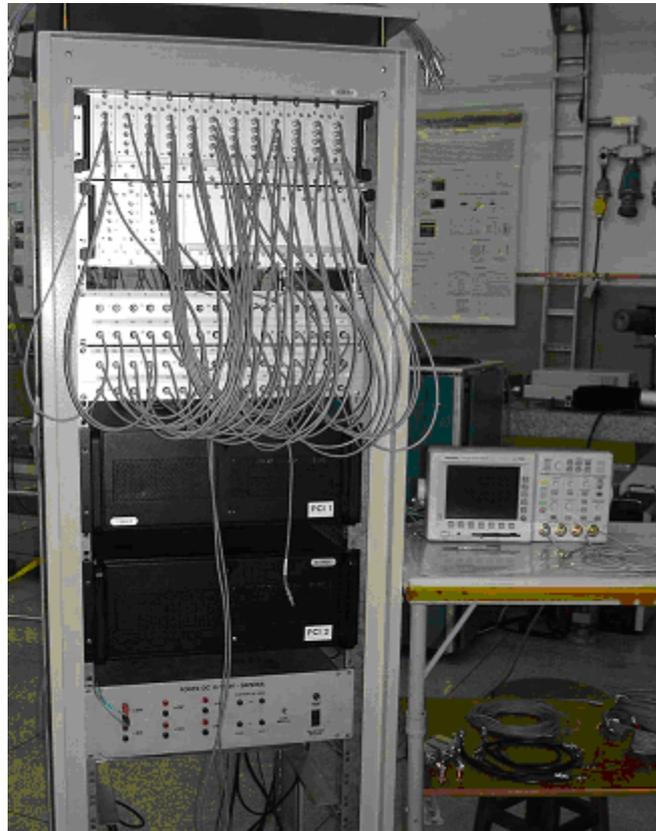


Figura 3.5 Sistema de aquisição e armazenamento – Padrão PCI

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E ANÁLISES

A seguir são apresentados os resultados obtidos a partir da curva característica gerada pela sonda simples através das duas técnicas de ajuste utilizadas durante o trabalho, bem como os critérios para a análise dos dados e as respectivas curvas ajustadas.

Foi escolhida uma frequência no gerador de varredura de tal forma que, para cada disparo da máquina (pulso de plasma) obtêm-se pelo menos cinco curvas características.

Vários disparos foram analisados para testar ambas as técnicas, mas para este trabalho serão apresentados somente os resultados obtidos para um disparo, o de número 6275 e para apenas uma curva característica.

4.1 Análise pela Técnica 1

4.1.1 Critério para a análise dos dados

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.
- Para T_e o máximo valor esperado seria da ordem de 10 eV.

Definido esses critérios iniciou-se o ajuste das curvas. Foram analisados os valores encontrados e como eles não foram satisfatórios, pois não se enquadravam em nas expectativas, foi necessário que definir outros critérios. Verificou-se que as curvas apresentavam muitas flutuações então se optou por utilizar os pontos que vão até a

primeira flutuação descartando os demais. Os resultados então obtidos foram satisfatórios.

4.1.2 Curva característica típica de ajuste para a técnica 1

A figura 4.1 mostra a curva característica gerada a partir dos pontos experimentais escolhidos para o ajuste e a figura 4.2 mostra esta curva já ajustada.

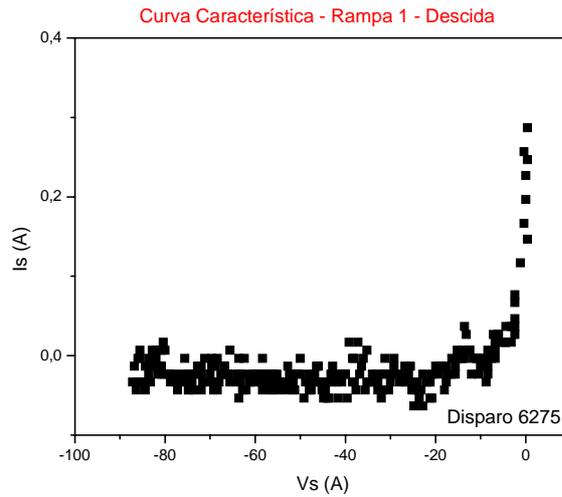


Figura 4.1 Curva característica experimental utilizada para o ajuste (disparo 6275)

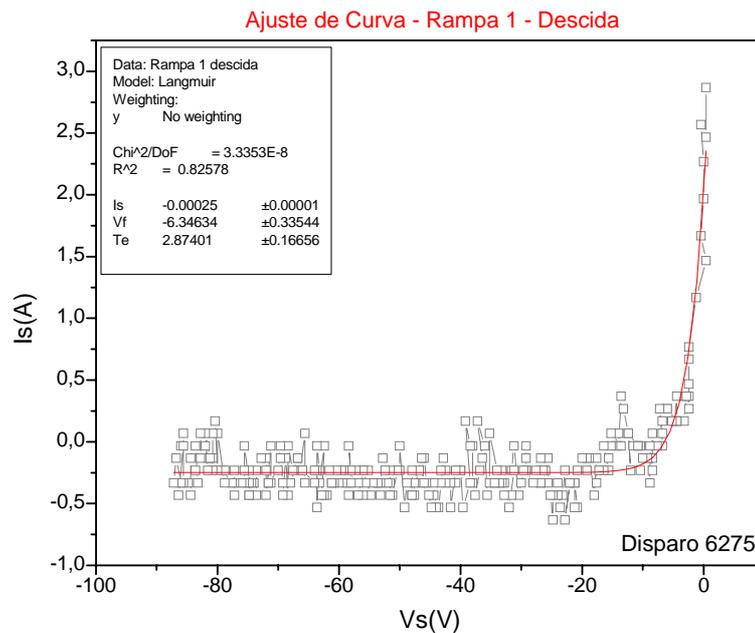


Figura 4.2 Curva ajustada sobre os dados experimentais –técnica 1 (disparo 6275)

4.2 Análise pela Técnica 2

Para a análise dos dados usando a técnica do logaritmo utilizaram-se somente os pontos experimentais pertencentes à região onde os elétrons alcançam a sonda devido ao movimento térmico dos mesmos (parte exponencial da curva característica I-V (Figura 2.3)). Para o ajuste da função, foi feito um gráfico da Corrente de elétrons (I_e) em função Potencial da sonda (V_s), onde a Corrente de elétrons é dada somando a Corrente de saturação de íons (I_{sat}) e Corrente da sonda (I_s).

4.2.2 Curva característica típica de ajuste para a técnica 2

A figura 4.3 mostra a curva característica ajustada utilizando a segunda técnica de ajuste.

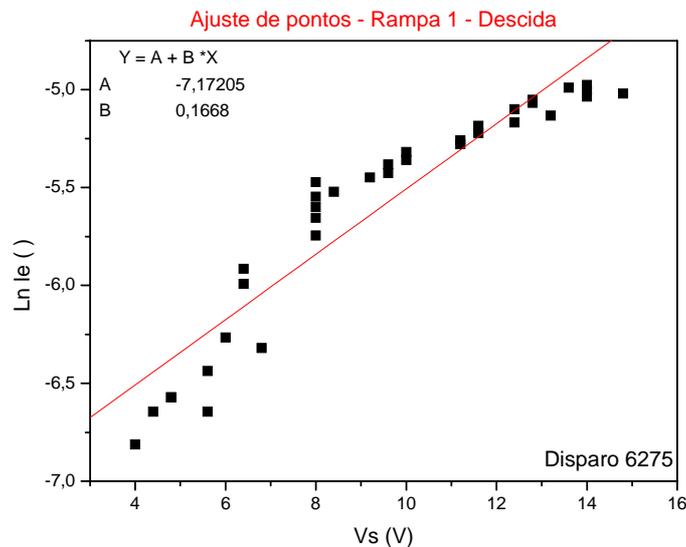


Figura 4.3 Curva de ajuste sobre os dados experimentais – técnica 2 (disparo 6275)

Comparando os resultados apresentados nas duas técnicas utilizadas verificou-se que ambas apresentam valores semelhantes. Tomando como referência a curva ajustada para a rampa 1 - descida (conforme apresentada nas figuras 4.2 e 4.3), verifica-se que os seus resultados são bem semelhantes, de tal modo que para a técnica 1 o valor encontrado para T_e é de 2.48 e para a técnica 2 é de 2.60.

Ademais, pode-se concluir que ambas as técnicas podem ser utilizadas para o ajuste das curvas, tendo em vista seus resultados satisfatórios e em conformidade com o esperado para a borda do plasma.

4.3 Programa para a automatização do ajuste

O programa de ajuste foi desenvolvido inicialmente na janela *Script Window* do software “Origin”, e para sua implementação utilizou-se a Técnica de mínimos Quadrados, tendo em vista sua simplicidade de execução. O programa foi desenvolvido com uma linguagem própria do aplicativo, porém similar à linguagem C.

O programa lê os dados em formato ASCII (osciloscópio), armazenado em uma memória do computador e realiza os procedimentos básicos de manipulação de dados, como por exemplo, cálculo e subtração do offset dos sinais medidos, e multiplicação pelas respectivas constantes de calibração. Em seguida apresenta os gráficos desejados e realiza o ajuste da função. No final o programa mostra na tela os gráficos ajustados com os respectivos valores encontrados para T_e , I_s e V_f . A tela inicial do programa é mostrada na figura 4.4 e a tela final mostrada na figura 4.5, apresenta a curva característica ajustada para uma rampa bem como os valores de T_e , I_s e V_f obtidos neste ajuste.

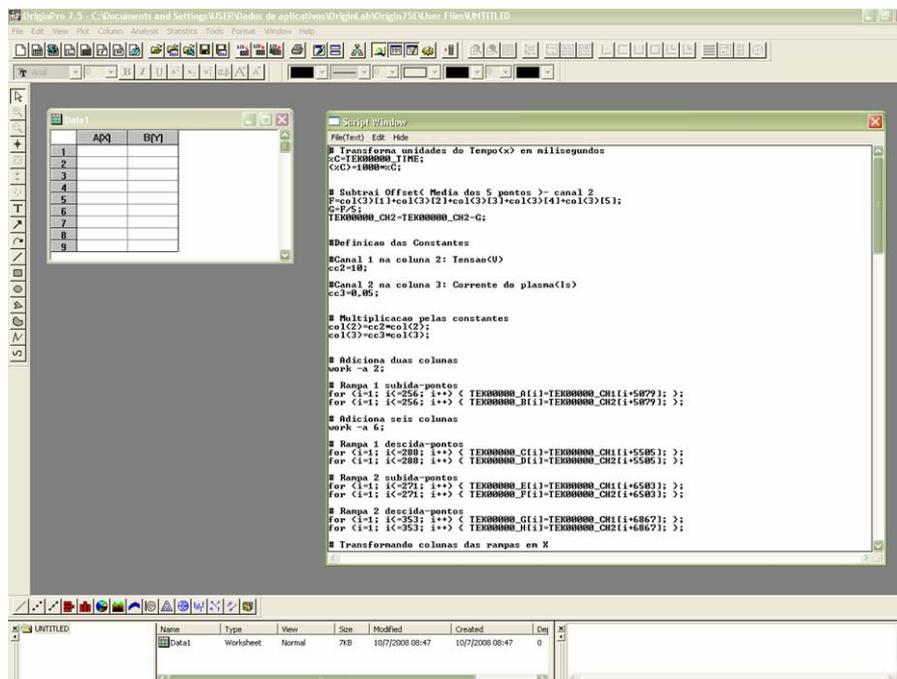


Figura 4.4 Tela inicial do programa

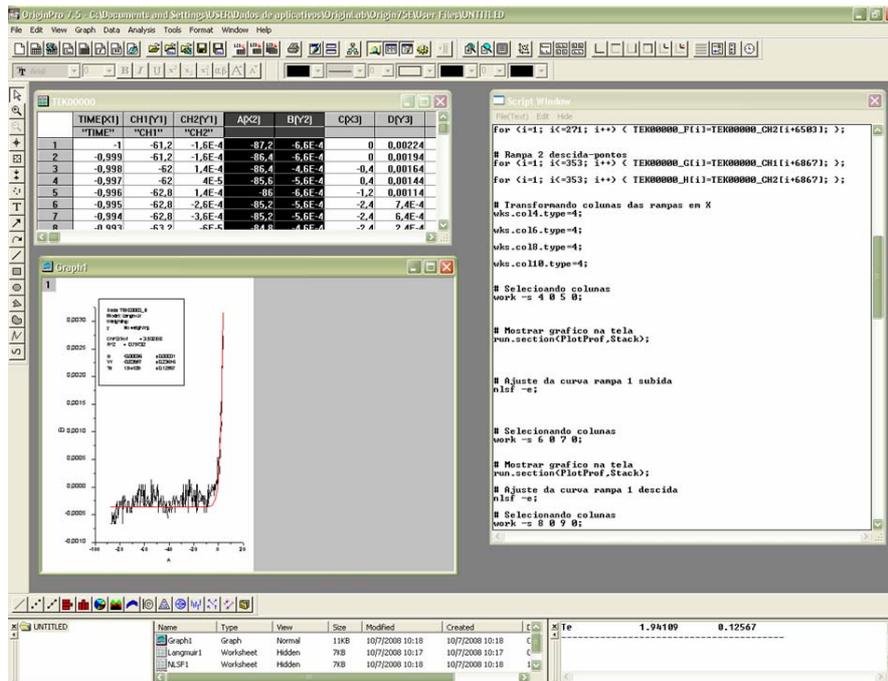


Figura 4.5 Tela final do programa

O programa desenvolvido é apresentado no Apêndice A deste trabalho.

Para o ajuste das curvas utilizando os dados provenientes do novo programa de aquisição dos dados (padrão PCI) está sendo desenvolvido um outro programa utilizando o software “IDL” para assim conseguir ler os dados deste sistema e em seguida realizar os ajustes necessários. Além disso, para o ajuste das curvas será necessário utilizar a técnica de Logaritmo já que para o ajuste dos mínimos quadrados se faz necessário editar a função no aplicativo, porém com “IDL” ainda não foi possível editar esta função.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Nesse relatório foram apresentados os progressos obtidos em aproximadamente um ano e meio 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.

Comparando os resultados obtidos nas duas técnicas utilizadas no trabalho, pode-se concluir que ambas podem ser usadas para obter os parâmetros do plasma, além disso, a temperatura obtida com ambas as aproximações estão de acordo com valores esperados para a borda de plasma.

Para a implementação do programa de automatização utilizando o software “Origin” utilizou-se o método dos Mínimos Quadrados tendo em vista sua simplicidade de execução. O programa foi desenvolvido na janela Script Window, para ler dados em formato de ASCII (osciloscópio conectado à rede).

Um gatilho foi acrescentado ao gerador de varredura para sincronizar a rampa de voltagem à corrente de plasma sonda.

Foi implementado um novo sistema de aquisição e armazenamento de dados e desta forma iniciou-se o desenvolvimento de um outro programa de automatização utilizando o software “IDL” que irá ler os dados deste sistema e ajustar as curvas características escolhidas para análise.

Os resultados parciais obtidos neste trabalho foram apresentados no 9º Encontro Brasileiro de Física de Plasmas, pôster P025, p. 37, realizado em São Pedro, SP, no período de 25 a 28 de novembro de 2007 [12].

Novas sondas simples e duplas foram construídas e para a continuidade desse trabalho serão utilizadas para a obtenção de novas medidas utilizando o sistema de aquisição de dados implementado este ano no ETE.

Também iremos utilizar o programa desenvolvido na linguagem IDL para a análise dos dados obtidos com as sondas simples e posteriormente duplas, a partir de uma metodologia desenvolvida utilizando a linguagem IDL para a determinação da temperatura e demais parâmetros, com os dados experimentais da sonda eletrostática dupla.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] HUTCHINSON, I.H. “Principles of plasma diagnostics”, Cambridge (1992).
- [2] HUDLESTONE, H.R. and LEONARD, S.L. “Plasma diagnostic techniques” Cap. 4 “Electric Probe”, Academic Press (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”, Open University Press (1970).
- [5] KAW, P.K et al. “Status report on fusion research” Nuclear Fusion 45 (10), 1-28 (2005).
- [6] WESSON, J. “Tokamaks”, Clarendon Press (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.giuseppecirino.com/Dissertacao.pdf>. Acesso em: 02 Julho 2007.
- [10] STANGEBY, P.C. and McCracken, G.M., Nuclear Fusion 30 (7), 1225-1379, (1990).
- [11] S. GLASSTONE and R.H. LOVBERG “Controlled thermonuclear reactions”, D. Van Nostrand Company (1962).
- [12] GRECO, A.F.G.; DEL BOSCO, E. “Electrostatic probe analyses for definition of procedures to automatically perform measurements of ETE edge plasma” 9th Brazilian Meeting on Plasma Physics, São Pedro, SP, 25-28 Novembro, 2007, poster P025, p. 37, 2007.

APÊNDICE A

A figura A1 apresenta o programa que foi desenvolvido no software “Origin”.

```
#Programa de automatização
# Transforma unidades do Tempo(x) em milisegundos
%C=TEK00000_TIME;
(%C)=1000*%C;

# Subtrai Offset( Media dos 5 pontos )- canal 2
F=col(3)[1]+col(3)[2]+col(3)[3]+col(3)[4]+col(3)[5];
G=F/5;
TEK00000_CH2=TEK00000_CH2-G;

#Definicao das Constantes
#Canal 1 na coluna 2: Tensao(V)
cc2=10;

#Canal 2 na coluna 3: Corrente do plasma(Is)
cc3=0,05;

# Multiplicacao pelas constantes
col(2)=cc2*col(2);
col(3)=cc3*col(3);

# Adiciona duas colunas
work -a 2;

# Rampa 1 subida-pontos
for (i=1; i<=256; i++) { TEK00000_A[i]=TEK00000_CH1[i+5079]; };
for (i=1; i<=256; i++) { TEK00000_B[i]=TEK00000_CH2[i+5079]; };

# Adiciona seis colunas
work -a 6;

# Rampa 1 descida-pontos
for (i=1; i<=288; i++) { TEK00000_C[i]=TEK00000_CH1[i+5505]; };
for (i=1; i<=288; i++) { TEK00000_D[i]=TEK00000_CH2[i+5505]; };

# Rampa 2 subida-pontos
for (i=1; i<=271; i++) { TEK00000_E[i]=TEK00000_CH1[i+6503]; };
for (i=1; i<=271; i++) { TEK00000_F[i]=TEK00000_CH2[i+6503]; };

# Rampa 2 descida-pontos
for (i=1; i<=353; i++) { TEK00000_G[i]=TEK00000_CH1[i+6867]; };
for (i=1; i<=353; i++) { TEK00000_H[i]=TEK00000_CH2[i+6867]; };

# Transformando colunas das rampas em X
wks.col4.type=4;
wks.col6.type=4;
wks.col8.type=4;
wks.col10.type=4;

# Selecionando colunas
work -s 4 0 5 0;

# Mostrar grafico na tela
run.section(PlotProf,Stack);

# Ajuste da curva rampa 1 subida
nlsf -e;

# Selecionando colunas
work -s 6 0 7 0;

# Mostrar grafico na tela

run.section(PlotProf,Stack);

# Ajuste da curva rampa 1 descida
nlsf -e;

# Selecionando colunas
work -s 8 0 9 0;

# Mostrar grafico na tela
run.section(PlotProf,Stack);

# Ajuste da curva rampa 1 descida
nlsf -e;

# Selecionando colunas
work -s 10 0 11 0;

# Mostrar grafico na tela
run.section(PlotProf,Stack);

# Ajuste da curva rampa 1 descida
nlsf -e;

# Define intervalo de tempo
ti=-100;
tf=30;

# Mostra o grafico na tela toda
plot -screen;
```

Figura A1 – Programa desenvolvido no software “Origin”