

Universidade de São Paulo
Instituto de Física

Diagnóstico Bolométrico no TCABR

Valdemar Bellintani Júnior

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Ricardo M. Osório Galvão - IFUSP
Prof. Dr. Alvaro Vannuci - IFUSP
Prof. Dr. Munemasa Machida - UNICAMP
Prof. Dr. Mario Ueda - INPE
Profa. Dra. Marisa Roberto - ITA

SBI-IFUSP



305M810T4391

Orientador: Prof. Dr. Ricardo M. O. Galvão

Tese de doutorado apresentada ao Instituto de Física
para a obtenção do título de Doutor em Ciências

São Paulo
2005



Torres 4/2005

Prof. Armando Corbani Ferraz
Presidente da Comissão de Pós Graduação

11/2005

53044
8444d

S45NO 1470815

FICHA CATALOGRÁFICA
Preparada pelo Serviço de Biblioteca e
Informação
do Instituto de Física da Universidade de São
Paulo

Bellintani Jr, Valdemar

Diagnóstico Bolométrico no TCABR.
São Paulo 2005.

Tese (Doutoramento) - Universidade de São Paulo
Instituto de Física – Depto. de Física Geral

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Magnus Osório Galvão
Área de Concentração: Física

Unitermos:

1. Tokamaks;
2. Radiação (Energia Radiante);
3. Sensores Óticos.

USP/IF/SBI-067/2005

Índice

Índice 2

Resumo 4

Summary 5

Agradecimentos 6

Capítulo 1 7

- 1.1 Introdução 7
- 1.2 Referências..... 10

Capítulo 2 11

- 2.1 Radiação em Plasmas 11
- 2.2 Introdução 11
- 2.3 Processos Radiativos e Taxas de Emissão Radiativa 11
- 2.4 Referências..... 16

Capítulo 3 17

- 3.1 Teoria Geral do Bolômetro 17
- 3.2 Geometria 18
- 3.3 A Inversão de Abel..... 21
- 3.4 Referências..... 23

Capítulo 4 25

- 4.1 Detectores 25
- 4.2 Bolômetro Resistivo 26
 - 4.2.1 Princípio de Operação..... 26
 - 4.2.2 O Bolômetro utilizado no TCABR..... 29
- 4.3 Fotodiodos 30
 - 4.3.1 Princípio de Operação..... 30
 - 4.3.2 Circuito Equivalente 32
 - 4.3.3 Característica Corrente x Voltagem 35
 - 4.3.4 O Sistema de Fotodiodos utilizado no TCABR 39
- 4.4 Referências..... 40

Capítulo 5 41

- 5.1 Sistema Bolométrico do TCABR..... 41
- 5.2 Eletrônica de Aquisição do Sinal Bolométrico 44
- 5.3 Arquitetura do Sistema de Aquisição 45
- 5.4 O sinal bolométrico 47
- 5.5 Parâmetros Geométricos dos Bolômetros..... 48
- 5.6 Calibração 51

Capítulo 6 55

- 6.1 Resultados Experimentais..... 55
- 6.2 Introdução 55
- 6.3 Método para obtenção do perfil da potência irradiada 56
- 6.4 Análise dos Dados Bolométricos 59
- 6.5 Impurezas..... 63

6.6 Dependência da Potência Total Emitida com a Densidade Eletrônica	66
6.7 O bolômetro em Descargas com Aquecimento Adicional por Ondas de Alfvén.	69
6.8 O Bolômetro em Descargas em Regime <i>Runaway</i>	72
6.9 O Bolômetro em Descargas com Eletrodo.....	74
6.10 Referências.....	76
Capítulo 7	78
7.1 Discussão dos Resultados.....	78
7.2 Conclusões.....	80
7.3 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	81
7.4 Referências.....	82
Apêndice A	83
O bolômetro resistivo	83
Apêndice B	85
Sistema Bolométrico do TCABR - Parâmetros Geométricos	85
Apêndice C	87
Circuitos Eletrônicos.....	87
Apêndice D	90
Fotos do Sistema Bolométrico.....	90

Resumo

Foi projetado, construído e instalado um sistema bolométrico para a análise das descargas de plasma do TCABR. Este sistema possibilita a observação da coluna de plasma através de cordas caracterizadas por diferentes direções e ângulos. Os bolômetros utilizados são fotodiodos especiais, acondicionados em câmeras dotadas de colimadores para observação do plasma. A faixa espectral da sensibilidade dos fotodiodos abrange desde o visível até a região de raios-X moles, energia de fótons desde 7 eV até 6.000 eV. Para este diagnóstico, foi construída uma eletrônica específica para amplificação dos sinais bolométricos. A resolução temporal do diagnóstico é de 3 ms devido a interferência gerada pelo tokamak.

Com este sistema, foi obtido pela primeira vez no TCABR, o perfil da potência emitida pela coluna de plasma, sendo este o principal resultado deste trabalho. Para isto, foi desenvolvido um programa destinado a inverter os dados bolométricos utilizando como princípio o método de Abel.

Uma série de descargas ôhmicas ($0,9 \times 10^{19} < n_e < 2,0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ e $67 < I_p < 100 \text{ kA}$) foram estudadas com o diagnóstico. Obteve-se para o volume da coluna uma fração P_{rad}/P_{oh} não maior que 30%, valor semelhante ao obtido para o tokamak TCA.

Observou-se também diferenças acentuadas para o perfil de potência emitido por descargas com baixos e altos valores da corrente de plasma. Estas diferenças são atribuídas principalmente ao aumento da temperatura eletrônica. A concentração de impurezas metálicas foi calculada no eixo da coluna, obtendo-se valores entre $0,9-1,2 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$.

Summary

In this work, a bolometric diagnostic system was projected, built and installed in the TCABR tokamak, in order to measure the total power radiation loss from the plasma. The system allows plasma observation through 27 lines of sight with different directions and angles. The detector used was a silicon p-n junction photodiode array, for applications in the vacuum ultraviolet, extreme ultraviolet and the soft x-ray (XUV, energy range 7 eV to 6 keV) spectral region.

An electronic system for amplification of the bolometer signal was also projected and built. This system was projected taking into account the strong electromagnetic noise due to the tokamak operation.

Using this bolometric system, the shape of the emitted power was obtained for the first time in the TCABR, and this is the main result of this work.

To deal with the bolometric data, we developed a program based on the Abel inversion. A serie of ôhmic discharges were studied with this diagnostic. The value of the Prad/Poh obtained for this serie was below 30%, in agreement with old TCA data.

The shape for discharges with high and low plasma current were also analyzed. We find a big difference in the two cases, showing the effect of electron temperature change.

The metallic impurity density on axis were calculated using the value of Prad(0) experimentally obtained. For the serie of discharges analyzed, this value remained between $0.9-1.2 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer aqueles que contribuíram para a execução deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Ricardo M. O. Galvão, pela orientação, como também pelo apoio e incentivo.

Ao Prof. Dr. Ivan Cunha Nascimento pela simpática acolhida ao grupo de Física de Plasmas do IFUSP e pelo interesse demonstrado neste trabalho.

Aos Profs. Drs. Leonid Ruchko, Ruy Peppe da Silva, José Henrique Vuolo, Alvaro Vannucci, Aluísio Fagundes e Artur Elfimov pelas discussões e colaborações das mais diversas formas.

Aos técnicos de nível superior Wandeley Pires de Sá, Juan e Edson Kenzo pela amizade e estimada ajuda em suas áreas de trabalho.

Ao engenheiro Nelson Cuevas, grande amigo e sempre prestativo.

Aos técnicos de eletrônica, Nélio, Rogério, Ablicio e Ivan pela colaboração na parte eletrônica. Ao Antonio, pelo competente trabalho de usinagem e solda, sem o qual este trabalho não seria possível.

Aos companheiros de trabalho, Helder, Antonio, André, Edson Ozono, José Antonio Sevidanes e Eric, pela amizade e cooperação.

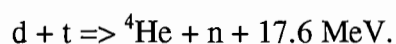
Enfim, a todas as pessoas que, trabalhando no grupo de Plasmas, fizeram parte do meu dia-a-dia.

A minha mãe, Maria Aparecida e minha namorada Adriana, pelo grande apoio. Ao meu pai, Waldemar Bellintani.

Capítulo 1

1.1 Introdução

O objetivo das pesquisas em fusão é a produção controlada de energia a partir de reações nucleares entre núcleos leves, em particular as reações entre os isótopos mais pesados do hidrogênio,

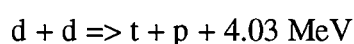
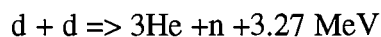


Reações de fusão só ocorrem se os núcleos reagentes estiverem suficientemente próximos. Para isto, os gases reagentes devem ser aquecidos a uma temperatura bastante alta, para que uma quantidade significativa de núcleos possuam energia suficiente para vencer a enorme repulsão Coulombiana. A reação entre o deutério e o trítio requer energia térmica entre 10 e 20 keV, correspondentes a valores de temperatura superiores às do centro solar.

Ao atingir tais temperaturas, a mistura é denominada plasma totalmente ionizado, e deve estar termicamente isolado de paredes materiais da câmara que contém o plasma. A eficiência de isolamento térmico é expressa pelo tempo de confinamento global de energia τ_E , que representa o tempo característico de decaimento da energia cinética do plasma quanto são removidas todas as fontes responsáveis pelo seu aquecimento. No início, uma fonte externa de aquecimento é necessária para atingir a temperatura de reação. Contudo, a energia liberada neste processo cresce com o aumento da temperatura. Um quinto desta energia se apresenta sob a forma de partículas alfa (${}^4\text{He}$), as quais são re-utilizadas para aquecer o plasma. Em uma mistura contendo partes iguais de deutério e trítio, o aquecimento devido às partículas alfa irá equilibrar as perdas energéticas, tornando a reação auto-sustentada quando o produto da densidade iônica, do tempo de confinamento de energia e da temperatura iônica, $n_i \tau_E T_i \approx 5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ s keV}$.

Existem duas rotas alternativas para obtenção da relação necessária entre a temperatura, densidade e tempo de confinamento. Uma delas é o denominado *confinamento inercial*, onde uma pastilha de combustível é aquecida e comprimida por lasers ou feixe de partículas, até atingir alta densidade ($n_i \approx 10^{31} \text{ m}^{-3}$) em um curto período de confinamento ($\tau_E \approx 10^{-11} \text{ s}$). A outra forma é chamada *confinamento magnético*, onde um plasma de baixa densidade ($n_i \approx 10^{20} \text{ m}^{-3}$) é confinado por períodos mais longos ($\tau_E > 1 \text{ s}$), pela aplicação de campos magnéticos intensos. Os sistemas de confinamento mais promissores são os de geometria toroidal e, dentre eles, os mais avançados em termos de pesquisa são os *tokamaks* [1]. Este dispositivo combina um intenso campo magnético toroidal produzido por bobinas externas, com um campo magnético poloidal moderado, produzido por uma corrente elétrica que circula pelo plasma. Outros sistemas toroidais diferem em detalhes relacionados aos campos magnéticos confinantes. Existem os *stellarators*, onde o campo poloidal é produzido por bobinas externas, e os *pinches*, onde o campo poloidal é bem mais intenso que o campo toroidal.

Atualmente, os experimentos de confinamento magnético são realizados com plasmas de hidrogênio ou deutério. As reações de fusão para o deutério (existem dois caminhos com igual probabilidade),



necessitam de temperaturas ainda mais altas que a reação *d - t*. Estas reações produzem um fluxo de nêutrons bem menor que a mistura de deutério e trítio na mesma temperatura, e portanto são convenientes na investigação de regimes de confinamento sem as dificuldades adicionais introduzidas pelo enorme fluxo destas partículas.

As perdas por radiação em um plasma irão sempre existir, principalmente devido a aceleração dos elétrons. Esta aceleração é produzida de duas maneiras: por colisões (*bremstrahlung*), ou movimento ciclotrônico.

Na presença de impurezas, a emissão via *bremstrahlung* sofre um acréscimo, bem como aparecem perdas devido aos processos atômicos de radiação de linha e recombinação. O aumento da emissão de *bremstrahlung* é consequência da maior carga iônica característica das impurezas. Portanto, o controle da concentração de impurezas é essencial para atingir temperaturas termonucleares.

O diagnóstico bolométrico fornece informações importantes sobre a potência emitida pelo plasma de tokamak, auxiliando no estudo do balanço energético. Em geral, as medidas são feitas por um sensor térmico, porém recentes avanços tecnológicos permitiram a fabricação de fotodiodos especiais que atualmente vem sendo utilizados como bolômetros.

Neste trabalho, medidas bolométricas utilizando estes dois tipos de bolômetros foram feitas para as descargas do tokamak TCABR, instalado no Laboratório de Física de Plasmas da Universidade de São Paulo. O estudo vem se somar ao trabalho desenvolvido no mestrado, ocasião em que um sensor resistivo foi calibrado absolutamente no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (Campinas-SP) e utilizado na obtenção de dados.

O TCABR corresponde ao antigo tokamak TCA, instalado em Lausanne até o início da década de 90. Trata-se de uma máquina de médio porte ($R = 0,61$ m; $a = 0,18$ m; $B_T = 1$ T), dedicada principalmente ao estudo do aquecimento adicional via ondas de Alfvén. Após sua transferência para o Brasil, sua montagem em nosso laboratório teve início, sendo que a primeira descarga foi realizada em 1998. Seguiram-se experimentos destinados a caracterizar o plasma produzido sob as novas condições de operação. Aproximadamente 17.000 descargas já foram realizadas desde o início dos trabalhos em nosso laboratório.

O que torna este trabalho atual é a obtenção do perfil da potência emitida para o TCABR em sua nova fase de operação. O estudo permite comparar as atuais condições da máquina com as do TCA.

No capítulo 2, apresentamos a teoria referente à radiação emitida por plasmas de tokamak. Princípios de radiometria são discutidos no capítulo 3. No capítulo 4 são descritas as características dos bolômetros utilizados neste trabalho. O sistema bolométrico projetado e instalado no TCABR é mostrado no capítulo 5. No capítulo 6 mostramos e discutimos os

Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

