

**Relatório de Atividades de 2003 da Linha de Pesquisa e Desenvolvimento em
Fusão Termonuclear Controlada – FUSÃO
Laboratório Associado de Plasma – LAP**

Descrição

O objetivo geral desta linha é pesquisar plasmas em confinamento magnético, através do desenvolvimento de tokamaks esféricos e sistemas de diagnóstico e aquecimento auxiliar de plasma, visando à geração futura de energia por fusão. Os objetivos específicos são:

- Investigar sistemas toroidais compactos de confinamento magnético de plasma, acompanhando os avanços internacionais na área.
- Desenvolver o tokamak esférico ETE (Experimento Tokamak Esférico), explorando as propriedades desta configuração e seu potencial como um reator de fusão de geometria compacta, alta eficiência e operação contínua.
- Desenvolver sistemas de aquecimento de plasma e geração de corrente, notadamente por injeção de ondas de radiofrequência, e sistemas de diagnóstico de plasma de alta temperatura adequados aos tokamaks esféricos.

Os parâmetros principais de projeto do ETE, na primeira fase de operação, são: raio maior $R_0 = 0,3$ m, raio menor $a = 0,2$ m, alongação $\kappa = 1,6$, campo magnético toroidal $B_0 = 0,4$ T, e corrente de plasma $I_p = 0,2$ MA. A principal característica da máquina, como todos os toróides esféricos, é a pequena razão de aspecto $A = R_0/a = 1,5$. O programa experimental do ETE está direcionado ao estudo das vantagens da configuração de pequena razão de aspecto visando à aplicação em reatores de fusão. Uma vista geral do tokamak ETE em meados de 2003 é mostrada na Fig.1.



Figura 1. Vista geral do tokamak esférico ETE em julho de 2003.

Pessoal Envolvido

A linha de pesquisa em fusão termonuclear controlada contou em 2003 com a participação, em muitos casos parcial, de oito pesquisadores com envolvimento direto no projeto tokamak esférico ETE, mais dois pesquisadores no grupo de fontes de microondas de alta potência. O pessoal da equipe de apoio técnico teve, em sua maior parte, dedicação em tempo parcial ao projeto.

• Equipe Permanente e Atribuições

Dr. Gerson Otto Ludwig (Responsável pela linha de pesquisa, Teoria e Engenharia)

Dr. Edson Del Bosco (Operação da máquina, Diagnósticos, Chefe do LAP – Tempo parcial)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro (Fontes de microondas – Tempo parcial)

Dr. Luiz Ângelo Berni (Diagnósticos)

Dra. Maria Célia Ramos de Andrade (Teoria)

Dr. Mário Ueda (Diagnósticos – Tempo parcial)

Dr. Pedro José de Castro (Medidas eletromagnéticas – Tempo parcial)

Ms. Carlos Shinya Shibata (Tratamento de dados – Tempo parcial)

Ms. Júlio Guimarães Ferreira (Fontes de potência, Diagnósticos)

Ms. Rogério de Moraes Oliveira (Controle e aquisição de dados, Diagnósticos)

Alberto Barbosa da Silva (Técnico Mecânico – Tempo parcial)

Alice Hitomi Nakahara Ueda (Técnica Química)

Francisco Eugênio Donatelli de Figueiredo Costa (Técnico Eletrônico – Tempo parcial)

David Carlos de Jesus (Auxiliar Técnico)

Márcia Veiga Vicente de Moraes (Secretária do LAP – Tempo parcial, até 30/11/2003)

• Equipe Temporária

Ms. Luis Filipe de Faria Pereira Wiltgem Barbosa (Controle por redes neurais – Doutorado ITA de 01/10/1998 a 07/11/2003)

Artur Faria de Oliveira (Técnico Mecânico – Tempo parcial – Bolsista DTI MCT/PCI de 01/04/2000 a 31/03/2002, e a partir de 01/08/2002)

Celso Luiz Terzetti (Técnico Mecânico – Tempo parcial – Bolsista DTI a partir de 01/09/2002)

Néliton Gonçalves de Oliveira (Técnico de Informática – Bolsista DTI MCT/PCI a partir de 01/09/2002)

Resultados

O desenvolvimento experimental em anos anteriores pode ser resumido da seguinte forma. Alguns componentes do ETE foram fabricados no Laboratório Associado de Plasma do INPE a partir de meados de 1995, com recursos financeiros e humanos extremamente limitados. A fabricação efetiva de componentes foi iniciada em 1997 e a montagem do ETE começou em junho de 1998, após construção do novo laboratório. A montagem foi realizada em conformidade com as especificações detalhadas e restritivas de projeto, e concluída no final de 1999, quando teve início a fase de testes da máquina. O primeiro plasma de tokamak no ETE foi obtido em 28 de novembro de 2000 com hidrogênio à pressão de $2,4 \times 10^{-4}$ mbar. A corrente de plasma atingiu 12 kA e a duração do pulso 1,2 ms. A partir daí, a campanha experimental de 2001 teve como objetivo melhorar as condições de vácuo e de formação do

plasma, enquanto procedia a montagem dos bancos de capacitores. No final de 2001, com 15% do total de capacitores instalado nos bancos e apenas 5% da capacidade de armazenamento de energia utilizada, a corrente de plasma no ETE atingiu valores que variaram entre 30 e 40 kA com durações de pulso entre 4 e 3 ms, respectivamente. A densidade máxima de plasma atingiu $0,2 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ e a temperatura eletrônica 160 eV. Um progresso razoável na instalação do experimento ocorreu durante o ano de 2002, quando foram adquiridos os componentes então necessários para colocar os sistemas auxiliares do ETE em operação plena. Estes sistemas compreendem: limpeza da câmara de vácuo por fitas de aquecimento (11 kW) e isolamento térmico até 200°C , injeção de gases através de uma tubulação em aço inoxidável e de válvulas piezelétricas com controle de fluxo e duração de pulso, pré-ionização utilizando um chuveiro de elétrons produzidos por emissão termiônica, remoção de impurezas da parede interna da câmara de vácuo por descarga luminescente (500 V/0,5 A, anodo refrigerado a água, gás He a $2,4 \times 10^{-3}$ mbar), análise de gases residuais, e operação por computador dos circuitos eletropneumáticos de segurança e de disparo com isolamento galvânica. Até o final de 2002 cerca de 30% dos capacitores haviam sido instalados e o fator de utilização de energia atingiu 10%. Nestas condições, a corrente de plasma situou-se tipicamente na faixa entre 40 e 60 kA com duração de pulso entre 8 e 5 ms, respectivamente. O aumento na duração de pulso, que chegou até 12 ms em várias descargas, deveu-se em parte às melhorias nas condições de vácuo após limpeza por descarga luminescente. Em alguns disparos, durante o ano de 2002, a densidade de plasma atingiu $0,35 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$, mas o valor típico de operação manteve-se em $0,2 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ ou um pouco abaixo. A temperatura eletrônica permaneceu no nível de 160 eV, porém apresentou uma melhor distribuição, mais espalhada e com pico mais próximo do raio maior de projeto. As distribuições de densidade e temperatura do plasma são ilustradas nas Figs. 2 e 3, respectivamente, que mostram um plasma centrado na posição radial $R \cong 26 \text{ cm}$ com razão de aspecto $A \cong 2,2$.

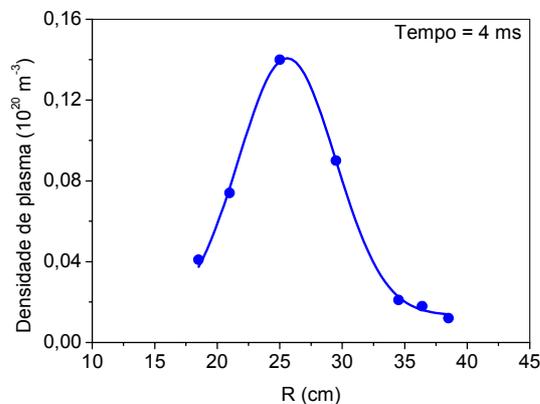


Figura 2. Distribuição radial da densidade de plasma 4 ms após o início da descarga.

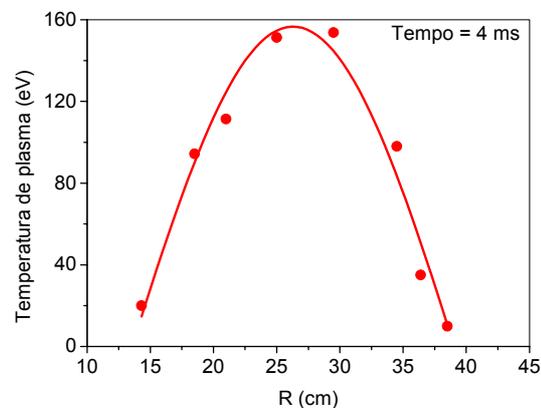


Figura 3. Distribuição radial da temperatura eletrônica 4 ms após o início da descarga.

Durante o ano de 2003 cerca de 150 capacitores a óleo de $38 \mu\text{F}/8\text{kV}$ para uso no banco ôhmico foram testados e reparados. Foram também preparados os capacitores, bandejas e barramentos para duplicação da energia do banco toroidal, com montagem prevista para o primeiro trimestre de 2004. Entretanto, até o final de 2003 apenas 35% do total de capacitores se encontravam instalados e o fator de utilização de energia atingiu cerca de 12%. Espera-se, durante o ano de 2004, adicionar vários módulos de capacitores e aumentar a tensão de carregamento, visando atingir os parâmetros listados na descrição acima para a primeira fase de operação da máquina. Os parâmetros de operação encontram-se a cerca de um terço dos valores da primeira fase, em compatibilidade com os bancos de capacitores instalados.

Dois modos básicos de operação do tokamak foram identificados em 2003. Antes de se aplicar limpeza por descarga luminescente a corrente de plasma atingiu um valor máximo próximo de 60 kA, porém com plasmas de curta duração, em torno de 5 ms, e baixa temperatura evidenciada pelo nível elevado do sinal de radiação H_α mostrado na Fig. 4. Após a limpeza, a corrente de plasma situa-se num patamar típico de 45 kA com pulsos de 8 ms de duração. Neste caso a temperatura atinge o nível de 160 eV, com baixos níveis de radiação H_α tais como mostrados na Fig. 5.

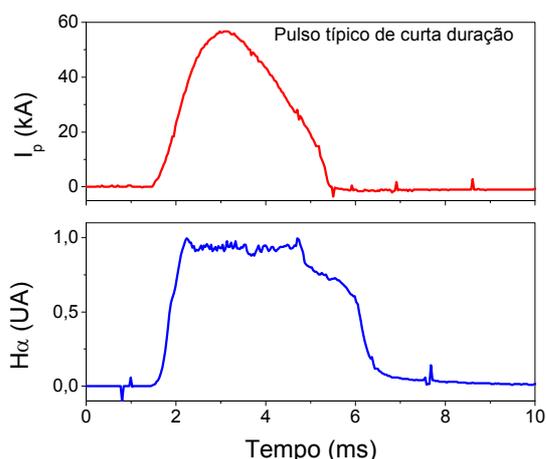


Figura 4. Pulso típico de curta duração antes da limpeza por descarga luminescente.

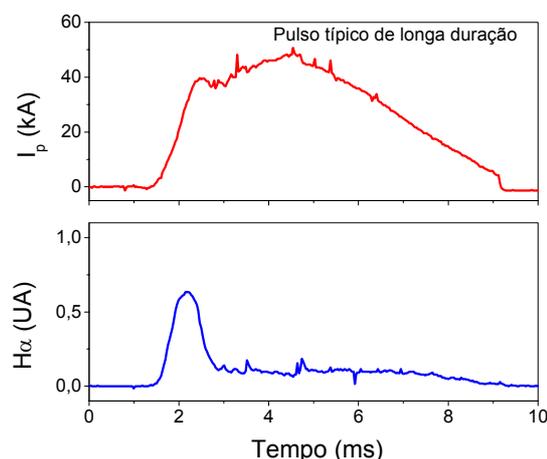


Figura 5. Pulso típico de longa duração após limpeza por descarga luminescente.

O processo de condicionamento do vácuo para descargas tokamak envolve aquecimento da câmara de vácuo durante 2~3 dias e limpeza por descarga luminescente durante ~50 horas, até ser atingida uma pressão de base inferior a 8×10^{-8} mbar. A Fig. 6 mostra o ETE e seu sistema de vácuo, cujo painel de comando foi reconfigurado em 2003. O sistema de aquecimento da câmara de vácuo, cujo controlador foi implementado em 2003, é mostrado na Fig. 7.

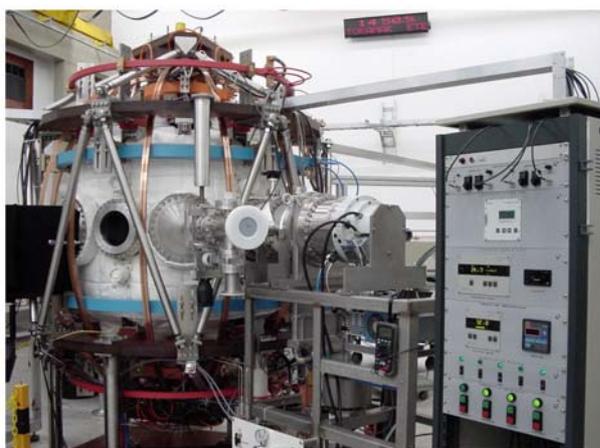


Figura 6. Sistema de bombeamento e controlador das condições de vácuo do ETE.



Figura 7. Sistema de aquecimento da câmara de vácuo do ETE com controle de temperatura.

Verificou-se, pela análise do espectro de gases residuais, que o processo de condicionamento utilizado remove a maior parte do vapor de água e do gás hidrogênio retidos

nas paredes, reduzindo a reciclagem e, portanto, aumentando os valores da temperatura eletrônica e do tempo de duração do pulso. Espera-se, com o aumento da temperatura de aquecimento da câmara de vácuo até 200°C, reduzir substancialmente os níveis de oxigênio ainda presentes, possibilitando ultrapassar a barreira de radiação e atingir temperaturas eletrônicas acima de 200 eV. A Fig. 8 mostra uma imagem do filamento termiônico utilizado para pré-ionizar o gás na descarga tokamak e do anodo refrigerado utilizado para produzir as descargas luminescentes de limpeza da câmara de vácuo. Os dois processos não são realizados simultaneamente, tendo a imagem apenas caráter ilustrativo. A Fig. 9 mostra a evolução da temperatura eletrônica durante um pulso do tipo ilustrado na Fig. 5.

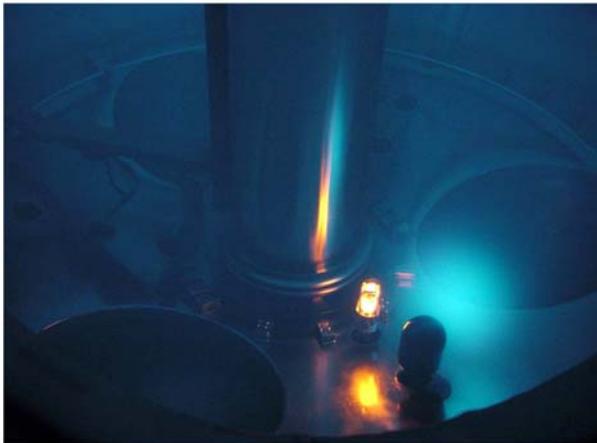


Figura 8. Imagem do filamento termiônico, utilizado para pré-ionização do gás, e do anodo refrigerado durante descarga luminescente.

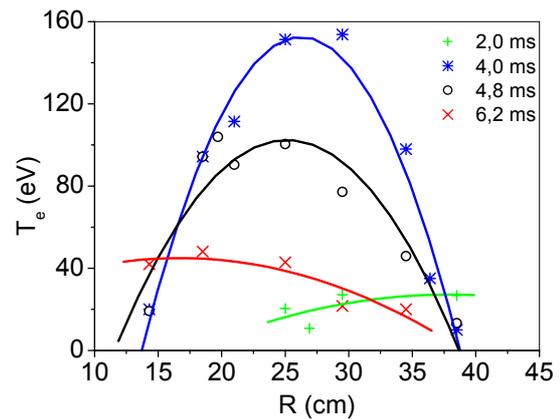


Figura 9. Evolução da temperatura eletrônica durante um pulso de duração prolongada.

Com a implementação da técnica de condicionamento do vácuo, realizou-se um estudo sistemático do processo de ruptura do gás hidrogênio em descargas tokamak. As Figs. 10 e 11 mostram, respectivamente, o valor do campo elétrico e do tempo de retardo para ruptura do hidrogênio em função da pressão na câmara de vácuo, confirmando a eficácia do filamento no processo de pré-ionização e indicando um valor ideal da pressão de operação entre 10^{-4} e 2×10^{-4} mbar. Após o condicionamento, verifica-se que a ruptura é menos sensível aos valores do campo magnético de erro. Espera-se, com a introdução no futuro de métodos de pré-ionização por aquecimento ciclotrônico dos elétrons, obter disparos mais precisos com valores ainda menores do campo elétrico induzido.

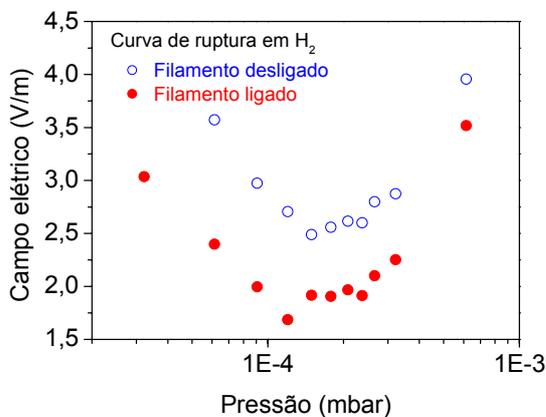


Figura 10. Curva de ruptura do gás hidrogênio.

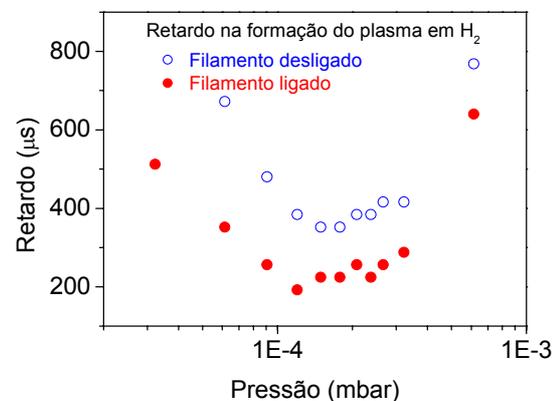


Figura 11. Retardo na formação do plasma.

Os campos magnéticos de erro, que têm um papel importante durante as fases de ruptura do gás e formação do plasma, foram novamente medidos, em continuação a um procedimento iniciado no ano de 2002, em várias posições no interior da câmara de vácuo e em diversos instantes durante o acionamento das bobinas de campos toroidal e poloidal. A Fig. 12 mostra um dos sistemas de sondas magnéticas móveis utilizados nestas medidas, e a Fig. 13 mostra o perfil radial do componente vertical do campo magnético no vácuo no instante aproximado em que ocorre a ruptura do gás na descarga tokamak.

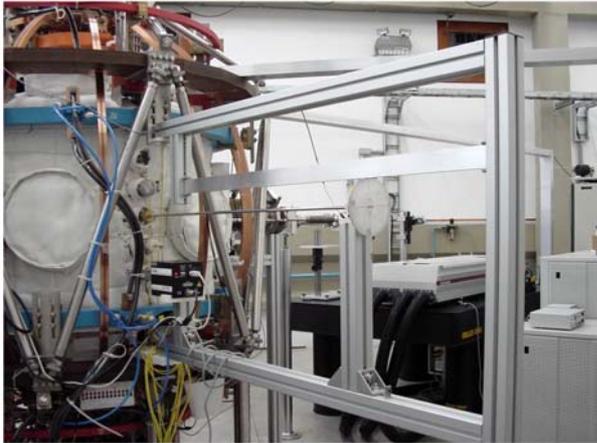


Figura 12. Sonda magnética móvel.

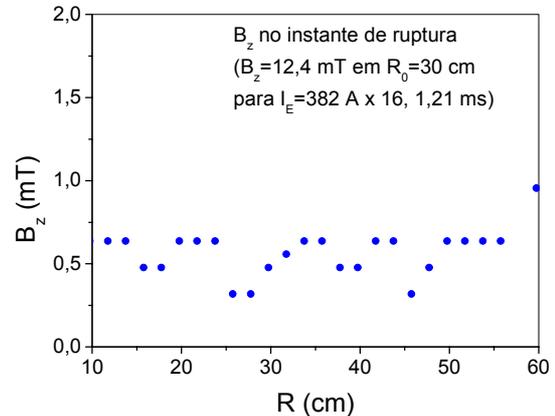


Figura 13. Componente vertical do campo magnético de erro no instante aproximado em que ocorre a ruptura do gás em descargas tokamak.

A distribuição das correntes parasitas induzidas na câmara de vácuo foi medida utilizando-se as flanges de acesso e dividindo a parede em seis setores indicados na Fig. 14.

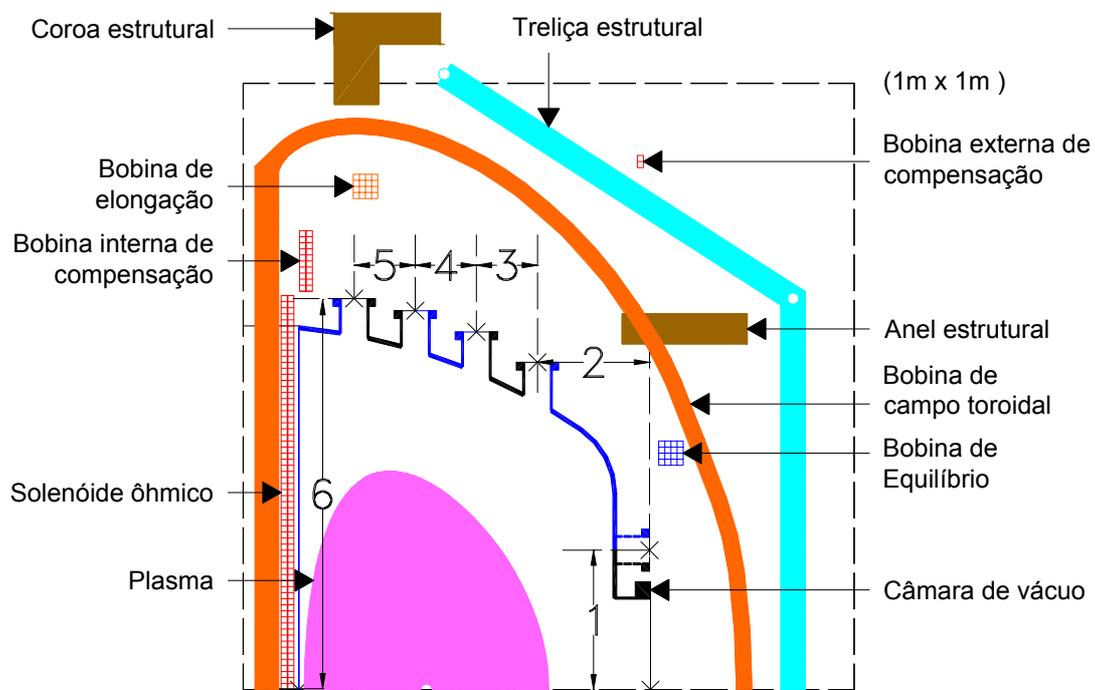


Figura 14. Divisão da seção poloidal da câmara de vácuo em seis setores para efeito de medida das correntes induzidas na parede.

A Fig. 15 mostra, por exemplo, a distribuição de correntes parasitas medida na câmara de vácuo do ETE durante o acionamento da bobina do campo de equilíbrio. Estes resultados experimentais estão sendo comparados com cálculos teóricos tanto das correntes parasitas induzidas na câmara como dos campos de erro resultantes.

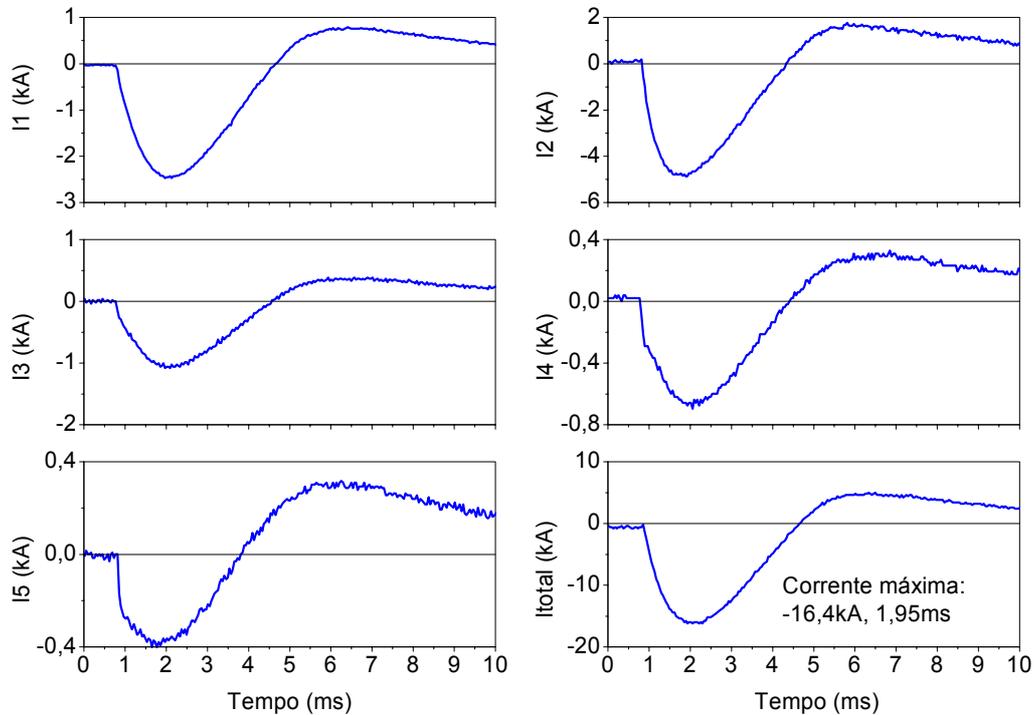


Figura 15. Distribuição de correntes induzidas nos setores da câmara de vácuo durante o acionamento da bobina de campo de equilíbrio.

O conjunto básico de diagnósticos, compreendendo sinais de controle da máquina, bobinas de Rogowski, bobinas de fluxo, sondas magnéticas, sonda eletrostática, detectores de radiação luminosa H_{α} e de raios-X duros, que já se encontrava em condição operacional no ano de 2002, foi melhorado em 2003. Foram preparados os dispositivos físicos e lógicos para adaptar um novo módulo CAMAC ao sistema de controle. O novo módulo possui oito canais com limite de frequência de amostragem ampliado para 1 MHz, em relação ao limite de 250 kHz dos módulos anteriores, além de apresentar o recurso adicional de ajuste programado do ganho. Foi também desenvolvida, em 2003, uma nova versão do programa de controle do ETE que possibilita acesso remoto via rede, com o operador utilizando interface acionada por meio de programas de acesso à Internet (Netscape, Internet Explorer etc.). Utilizando este programa espera-se, após resolver pequenas pendências envolvendo dispositivos de interface dos sistemas de controle e elétrico, transferir o console de operação do ETE para seu local definitivo na sala de controle.

As Figs. 16 e 17, a seguir, mostram o sistema de diagnóstico por espalhamento Thomson, que vem sendo utilizado desde 2002 para medir os perfis de densidade e temperatura do plasma no tokamak ETE. O laser chaveado de rubi do sistema fornece uma energia máxima de 10 J em pulsos com 20 ns de duração. A lente coletora $f/6,3$, mostrada na Fig. 17, produz uma imagem da luz espalhada pelo plasma sobre feixes de fibras ópticas cujas dimensões correspondem a um retângulo de 4,5 mm por 1,5 mm. O fixador das fibras permite visar vinte e duas posições ao longo de 50 cm da trajetória do feixe laser, permitindo medir um perfil radial completo dos parâmetros de plasma com uma resolução espacial de 15 mm. O

sinal coletado pelo feixe de fibras ópticas é processado por um policromador com cinco canais constituídos por filtros de interferência e fotodiodos de avalanche para detecção.

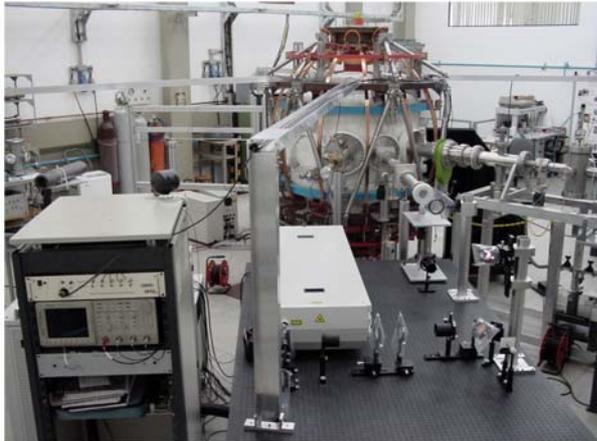


Figura 16. Mesa óptica do sistema de espalhamento Thomson do tokamak ETE.



Figura 17. Lente coletora do sistema de espalhamento Thomson.

Durante o ano de 2003 foram realizados os testes para expandir o número de canais espaciais do diagnóstico por espalhamento Thomson utilizando o atraso introduzido por fibras ópticas de comprimentos diferentes. As Figs. 18 e 19 ilustram esta técnica para fibras com 8 m e 112 m de comprimento, correspondentes ao primeiro e oitavo canais espaciais. A amplitude do sinal na fibra de 112 m sofre uma atenuação para 61% do valor inicial, com um fator de 84% devido às perdas e um fator de 73% devido à dispersão. Com esta técnica pretende-se implementar em 2004 um sistema de diagnóstico multiponto capaz de determinar simultaneamente a temperatura e a densidade eletrônicas em dez posições radiais do plasma utilizando um único policromador. Este trabalho está sendo realizado em colaboração com pesquisadores do Centro de Fusão Nuclear do Instituto Superior Técnico de Lisboa.

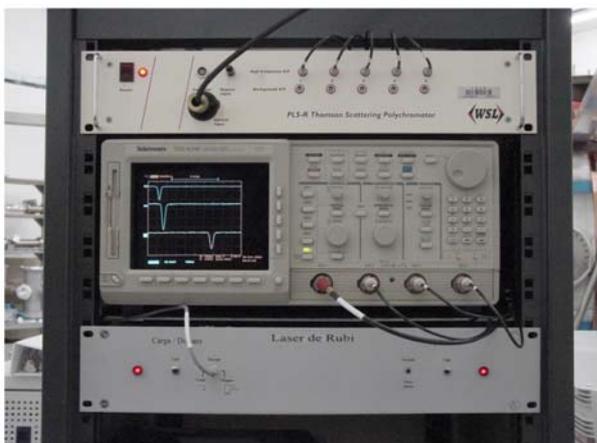


Figura 18. Policromador e osciloscópio de amostragem rápida utilizados no sistema de diagnóstico por espalhamento Thomson.

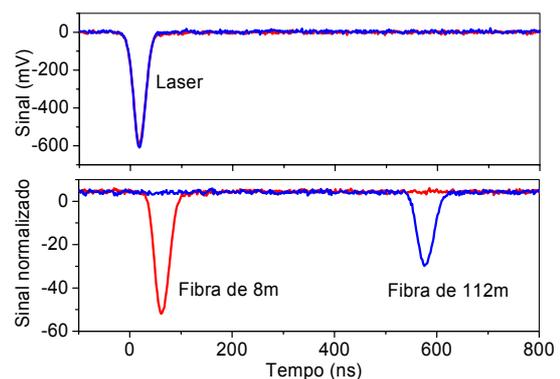


Figura 19. Superposição dos sinais apresentados na tela do osciloscópio à esquerda, mostrando o atraso introduzido por fibras ópticas de comprimentos diferentes.

A sonda por feixe de lítio neutro mostrada na Fig. 20 (10 kV, densidade de corrente até 1 mA/cm^2) foi acoplada à câmara de vácuo do ETE em 2003, dando início aos procedimentos de alinhamento do sistema de óptica eletrônica, eliminação de perturbações magnéticas, otimização dos parâmetros de operação do feixe, e testes de injeção no plasma.

Utilizando o analisador de gases residuais avaliou-se o grau de contaminação do vácuo no ETE por vapor de sódio emitido a partir da câmara de neutralização do feixe. A contaminação foi então reduzida a níveis aceitáveis pela otimização do sistema de fendas e bombeamento diferencial da seção de acoplamento.



Figura 20. Sonda por feixe de lítio neutro acoplada ao tokamak ETE.

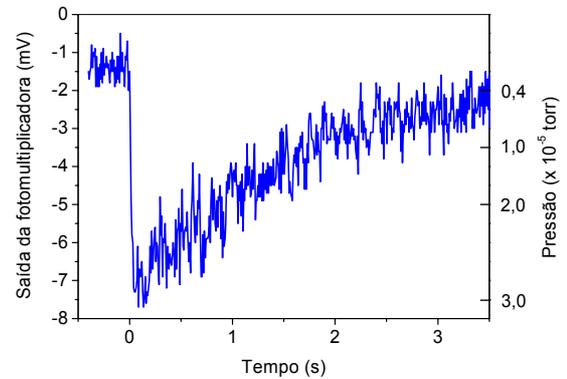


Figura 21. Evolução temporal, durante a fase de bombeamento, da pressão de gás injetado por válvula rápida na câmara de vácuo do ETE.

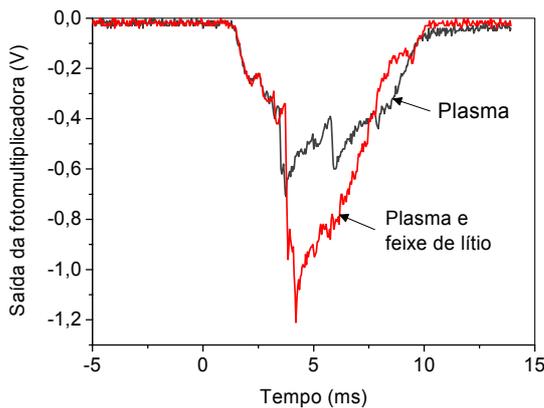


Figura 22. Luz emitida em 670,8 nm pelo plasma a partir da posição R=0,48 em descargas com corrente de plasma $I_p=50$ kA.

O sistema de detecção da sonda foi calibrado medindo-se a radiação emitida pelo feixe em interação com gases neutros (hidrogênio – Fig. 21, hélio). Foi também medida a densidade eletrônica numa descarga luminescente em He à pressão de $4,4 \times 10^{-4}$ mbar, obtendo-se $n_e = 2 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$. Finalmente, foram iniciados os testes de medição da densidade de plasma em descargas tokamak. A Fig. 22 mostra a luz emitida pelo plasma, e pelo feixe de lítio somado ao plasma, em descargas com $I_p = 50$ kA. A partir destes sinais pode-se estimar o valor da densidade de plasma na posição $R = 0,48$ m e no instante $t = 5$ ms em $n_e = 1,2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$.

No ano de 2003 a análise teórica dos efeitos neoclássicos no plasma teve continuidade, dando particular ênfase ao estudo do desaprisionamento de partículas pelo campo elétrico externo em tokamaks e às possíveis modificações que este efeito pode imprimir à resistividade neoclássica. De acordo com a teoria neoclássica usual, a fração de partículas aprisionadas num tokamak tende a zero no eixo magnético de acordo com $f_i \approx (2\varepsilon)^{1/2}$, levando a um comportamento singular do perfil da densidade de corrente no eixo. Neste trabalho analisou-se o efeito de desaprisionamento pelo campo elétrico sobre toda a seção poloidal do plasma e, em especial, nas proximidades do eixo magnético, verificando-se a eliminação do gradiente infinito da densidade de corrente. Além disso, efeitos colisionais, que competem com os efeitos decorrentes do campo elétrico, foram também introduzidos no modelo para ilustrar, de forma mais ampla, a modificação do perfil da densidade de corrente na região próxima ao eixo magnético. Deu-se também continuidade aos estudos de modelagem tanto do

circuito de potência como do transporte zero-dimensional de plasma na presença de correntes parasitas induzidas na câmara de vácuo do ETE. Finalmente, foram realizados estudos preliminares da aplicação de redes neurais no controle de equilíbrio vertical do ETE.

No decorrer de 2003 foram realizados os testes de um canhão eletrônico para geração de feixes de elétrons de 10 keV e 5 A visando, numa primeira fase, a produção de microondas no monotron de 6,7 GHz com 5 kW de potência. O monotron, mostrado na Fig. 23, constitui uma fonte simples de geração de microondas de alta potência que está sendo desenvolvido para experimentos de pré-ionização do plasma no ETE. A Fig. 24 mostra o resultado de uma simulação por partículas que ilustra os processos de agrupamento instável do feixe eletrônico, excitação da oscilação eletromagnética na cavidade cilíndrica do monotron, e acoplamento da radiação através de um íris circular para o guia de microondas de saída.



Figura 23. Bancada de testes do monotron.

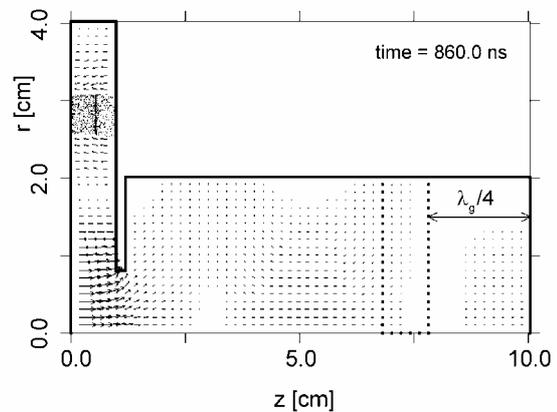


Figura 24. Simulação da produção de radiação no monotron de cavidade simples.

O protótipo do canhão mostrado na Fig. 25 foi testado mantendo-se a tensão de aceleração fixada em 10 kV e ajustando a corrente pela variação da temperatura no catodo emissor. O catodo é formado por um anel de níquel coberto por filme de (Ba, Sr, Ca)O capaz de fornecer até 3 A/cm^2 a 800 K. Infelizmente, para uma corrente total de 4,0 A no feixe de elétrons mediu-se uma corrente de 3,1 A no coletor, isto é, uma fração excessiva da corrente (0,9 A) é interceptada nesta configuração pelas fendas anelares de entrada na cavidade.



Figura 25. Canhão eletrônico protótipo.



Figura 26. Canhão eletrônico melhorado.

Uma versão melhorada do canhão eletrônico, mostrada na Fig. 26, foi então desenvolvida e está sendo preparada para caracterização. A principal modificação conceitual deu-se na óptica eletrônica. O desenho original, mostrado na Fig. 27, utiliza o ângulo de Pierce de $67,5^\circ$, que produz um feixe paraxial com elevada fração de interceptação pelas fendas de entrada. O novo desenho, mostrado na Fig. 28, utiliza um ângulo de 45° que restringe o feixe de elétrons na entrada da cavidade. O suporte do filamento também foi melhorado no novo canhão. Ainda na primeira fase de testes do monotron, pretende-se alcançar o nível de potência de 20 kW com a geração de feixes de elétrons até 20 A. Para isso, será necessário aumentar a capacidade da fonte moduladora de pulsos de alta tensão, presentemente limitada em 8 A.

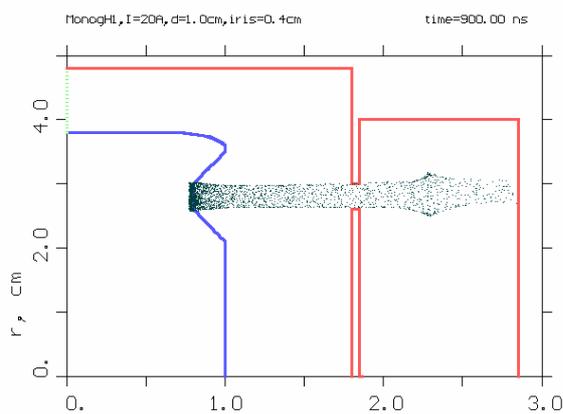


Figura 27. Óptica eletrônica paraxial.

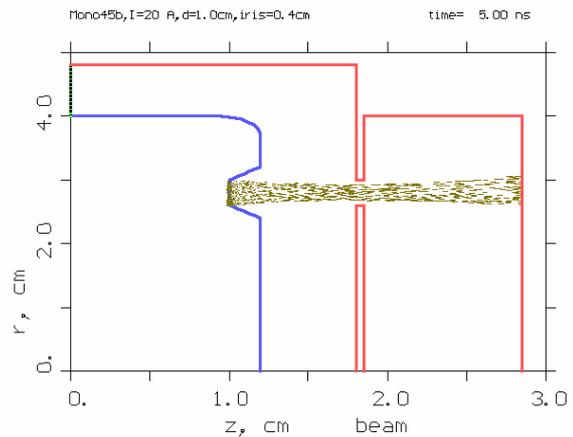


Figura 28. Óptica eletrônica convergente.

As atividades de projeto, construção e testes do monotron são complementadas por estudos analíticos, simulação eletromagnética, fabricação, e testes de elementos passivos em microondas, tais como cavidades, diafragmas íris, guias corrugados, acopladores, e filtros, necessários ao desenvolvimento das fontes de microondas de alta potência. Finalmente, durante o ano de 2003 desenvolveu-se um novo conceito de monotron com cavidades gêmeas, capaz de atingir até 40% de eficiência eletrônica, comparável à eficiência dos girotrons.

Metas para 2004

Muitas das atividades descritas acima deverão prosseguir durante o ano de 2004. Espera-se que a energia disponível nos bancos de capacitores seja finalmente incrementada até o ponto de se atingir o patamar de 150 – 200 kA da corrente de plasma e 0,3 – 0,4 T do campo magnético toroidal. Neste aspecto, a falta de pessoal técnico é o principal limitante. As técnicas de condicionamento do vácuo e de operação do ETE serão progressivamente otimizadas dando continuidade ao levantamento do espaço de operação do engenho. Será implementado o sistema multiponto de diagnóstico por espalhamento Thomson, que permitirá a medida simultânea da temperatura e da densidade eletrônicas em dez posições radiais da seção poloidal do plasma. A sonda por feixe de lítio encontra-se em condições operacionais, faltando implementar-se técnicas de melhoria da relação entre sinal e ruído para dar início aos estudos dos parâmetros de plasma na borda do ETE. O sistema de aquisição de dados será expandido e o número de sondas magnéticas aumentado de modo a possibilitar estudos iniciais de reconstrução magnética. Espera-se instalar um conjunto adicional de limitadores de grafite na câmara de vácuo e realizar o projeto de um sistema de formação de imagens de raios-X moles. Novamente, a falta de pesquisadores experimentais é um fator limitante.

Espera-se, também, completar os testes em bancada do novo canhão de elétrons e do protótipo do monotron, dispositivo gerador de microondas que será posteriormente utilizado em experimentos de pré-ionização e aquecimento do plasma. Embora a equipe de fontes de microondas de alta potência detenha conhecimentos e tecnologia em eletrônica pulsada de alta tensão, a escassez de pessoal constitui o fator de atraso na construção de fontes de alimentação apropriadas para o monotron. Os trabalhos na área de modelagem zero-dimensional da partida do plasma, incluindo efeitos neoclássicos e de correntes parasitas, deverão prosseguir durante o ano de 2004. Os estudos nas áreas de simulação dos fenômenos da borda do plasma e de controle do equilíbrio vertical do plasma deverão ser postergados em vista da redução na força de trabalho dos pesquisadores teóricos. Finalmente, no início de 2004 deverá ser submetida uma nova proposta de financiamento para implementar no ETE um interferômetro Michelson de múltiplas passagens operando no infravermelho longínquo. Esta proposta irá também contemplar a expansão das fontes de potência e a instalação dos sistemas de diagnóstico de plasma e de aquisição de dados, necessários para transformar o ETE num experimento de padrão internacional.

Comentários

O ETE continua sendo um dos poucos tokamaks esféricos em operação no mundo, sendo o LAP uma das instituições pioneiras no desenvolvimento deste conceito, a partir de 1986. Atualmente, só existem outras máquinas deste tipo em operação na Inglaterra, nos Estados Unidos, na Rússia e no Japão, em testes na China e em proposição na Itália. O LAP mantém até recentemente contato e colaboração com praticamente todos os grupos internacionais que atuam no desenvolvimento de toróides esféricos. Esta colaboração entre grupos de pesquisa foi em grande parte promovida pela Agência Internacional de Energia Atômica – IAEA, e através de acordos específicos de colaboração mantidos pelo LAP até meados de 2002 com o Centro de Ciências de Culham, Inglaterra, e com o Instituto Superior Técnico de Lisboa, Portugal. Novas propostas de acordos internacionais na área de tokamaks esféricos, em colaboração com os Estados Unidos e a Inglaterra, sob a égide da Agência Internacional de Energia – IEA, e de participação no projeto ITER, em colaboração com Portugal, foram enviadas ao Ministério da Ciência e Tecnologia durante os anos de 2002 e 2003. Estas propostas, infelizmente, não receberam uma resposta definitiva do MCT em tempo para assegurar uma participação efetiva do Brasil nos projetos internacionais mais significativos na área de energia.

Um evento altamente positivo ocorrido em 2003 correspondeu à inclusão de uma ação no Plano Plurianual 2004-2007 intitulada *Funcionamento do Laboratório de Plasma para Fusão Termonuclear Controlada*, a ser executada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, dentro do Programa *Promoção da Pesquisa e do Desenvolvimento Científico e Tecnológico* do Ministério da Ciência e Tecnologia. Esta ação dá legitimidade aos esforços na área de fusão realizados pelo LAP dentro do INPE. Infelizmente, devido a restrições orçamentárias, os recursos previstos no PPA 2004-2007 foram reduzidos a menos que 10% do valor originalmente solicitado no período. Desta forma, a realização das metas mencionadas na seção anterior irá depender de recursos adicionais obtidos junto às agências de fomento.

Em 2003 foi dada forma final ao Programa Nacional de Energia por Fusão, elaborado e encaminhado ao MCT pelo LAP em conjunto com o Laboratório de Plasma do Instituto de Física da Universidade de São Paulo, em que se propõe uma série de ações visando colocar o País numa situação de maior participação no panorama internacional de desenvolvimento da energia por fusão. Este Programa fundamenta-se na retomada do plano de implantação do Laboratório Nacional de Plasma para Fusão, com utilização da infra-estrutura já existente nos grupos atuantes, no encetamento das negociações para definição do papel brasileiro em

acordos internacionais, e na formulação de um plano urgente de pesquisa de curto prazo. O primeiro passo para a efetivação do Programa foi dado com a aprovação de uma ação específica dentro do PPA 2004-2007, já mencionada no parágrafo anterior. O objetivo estratégico do Programa é buscar a capacitação para o desenvolvimento, e futuro domínio, da tecnologia de geração de energia por fusão termonuclear controlada

Dificuldades

As maiores dificuldades na execução do projeto já foram diversas vezes apontadas nos relatórios anteriores: 1) indefinição na liberação dos recursos aprovados, geralmente acompanhada de cortes substanciais; 2) empecilhos burocráticos e administrativos, que praticamente inviabilizam a pesquisa; 3) falta de continuidade, principalmente no que se refere à transferência de conhecimento para as futuras gerações e de tecnologia para o setor produtivo. A falta de uma política de reposição de pessoal e de novas contratações em número mínimo, aliada aos cortes nas bolsas PCI, que causaram o desmantelamento da equipe de apoio técnico do laboratório do tokamak ETE nos últimos anos, impede o consecução de metas e a expansão das atividades. Outro motivo para a rápida obsolescência e isolamento crescente do LAP, em relação aos progressos internacionais, tem sido a impossibilidade de participação em eventos no exterior, restringida por cotas impostas de maneira imprevisível pelo governo desde 2002. Finalmente, observa-se uma tendência cada vez maior, tanto das agências de fomento como dos próprios órgãos ministeriais, em financiar somente projetos individuais de pesquisa ou grupos com resultados meramente acadêmicos. As atividades de pesquisa e desenvolvimento em grupos orientados para uma missão, como é o caso dos programas espaciais ou de energia, estão relegadas e tendem ao desaparecimento.

O ETE ainda oferece a possibilidade do Brasil acompanhar o desenvolvimento internacional na área de dispositivos compactos de confinamento magnético para fusão. Entretanto, para assegurar este papel, e impedir que o experimento se torne rapidamente obsoleto, é necessário haver um aporte substancial e contínuo de recursos. É também essencial que haja contratação de novos pesquisadores para atuar, principalmente, nas áreas de desenvolvimento de diagnósticos e interpretação de dados experimentais, controle e aquisição de dados, desenvolvimento e utilização de equipamentos para aquecimento de plasma, e desenvolvimento teórico e computacional. Além disso, a atualização e a manutenção do experimento dependem da contratação de engenheiros eletro-eletrônicos, bem como técnicos experientes em mecânica, eletrônica e de laboratório.

Publicações e Participações em Congressos

- **Artigos Publicados em Periódicos**

J. J. Barroso, J. P. Leite Neto, and K. G. Kostov. “Examining by the Rayleigh-Fourier method the cylindrical waveguide with axially rippled wall”. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **31**, 752-764 (2003).

L. A. Berni, M. Ueda, E. Del Bosco, J. G. Ferreira, and R. M. Oliveira. “Thomson scattering system for the diagnosis of the ETE spherical tokamak plasma”. *Rev. Sci. Instrum.* **74**, 1200-1204 (2003).

G. O. Ludwig, E. Del Bosco, J. G. Ferreira, L. A. Berni, R. M. Oliveira, M. C. R. Andrade, C. S. Shibata, M. Ueda, L. F. W. Barbosa, J. J. Barroso, P. J. Castro, and H. Patire Jr. “Spherical tokamak development in Brazil”. *Braz. J. Phys.* **33**, 848-859 (2003).

K. Nakamura, H. Iguchi, M. Ueda, T. Morisaki, M. Isobe, K. Ida, C. Takahashi, S. Okamura, and K. Matsuoka. “Two-dimensional diagnostics of edge and divertor region of toroidal helical plasma using a lithium beam probe”. *J. Nucl. Mater.* **313-316**, 725-728 (2003).

- **Publicações em Congressos Internacionais**

M. P. Alonso, L. A. Berni, and E. Del Bosco. “The fiber optic multiplexed Thomson scattering diagnostics for the ETE tokamak”. In *30th EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, St. Petersburg, Russia, 2003* (Europhys. Conf. Abstr. **27A**, 2003), P-1.50.

M. P. Alonso and L. A. Berni. “The fiber optic multiplexed upgraded Thomson scattering diagnostic for the ISTTOK tokamak”. In *11th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics, Les Houches, France, 2003*.

G. O. Ludwig. “Calculation of eddy currents in the ETE spherical torus”. In *Plasma Physics: Proceedings of the 11th International Congress on Plasma Physics, Sydney, Australia, 2002*, edited by I. S. Falconer, R. L. Dewar, and J. Khachan (AIP Conf. Proc. **669**, 2003), pp. 573-576.

- **Resumos em Congressos Internacionais**

M. C. R. Andrade, G. O. Ludwig, J. G. Ferreira, and T. N. Todd. “Neoclassical resistivity modified by the driven electric field in tokamak plasmas”. In *X Latin American Workshop on Plasma Physics combined with the 7th Brazilian Meeting on Plasma Physics, São Pedro, SP, Brazil, 2003* (SBF, São Paulo, 2003), Poster P007, p. 74.

L. F. W. Barbosa, G. O. Ludwig, and C. L. Nascimento Jr. “Intelligent control based on neural controller for application in the ETE spherical tokamak”. In *X Latin American Workshop on Plasma Physics combined with the 7th Brazilian Meeting on Plasma Physics, São Pedro, SP, Brazil, 2003* (SBF, São Paulo, 2003), Poster P031, p. 85.

J. J. Barroso. “The monotron as a gridded microwave tube”. In *X Latin American Workshop on Plasma Physics combined with the 7th Brazilian Meeting on Plasma Physics, São Pedro, SP, Brazil, 2003* (SBF, São Paulo, 2003), Poster P018, p. 101.

J. J. Barroso, P. J. Castro, J. O. Rossi, J. A. N. Gonçalves, and H. Patire Jr. “Generation of a 5A, 10kV hollow electron beam by a Pierce gun”. In *X Latin American Workshop on Plasma Physics combined with the 7th Brazilian Meeting on Plasma Physics, São Pedro, SP, Brazil, 2003* (SBF, São Paulo, 2003), Poster P017, p. 101.

L. A. Berni, E. Del Bosco, J. G. Ferreira, R. M. Oliveira, and M. P. Alonso. “Thomson scattering diagnostic on the ETE tokamak: status and progress”. In *X Latin American Workshop on Plasma Physics combined with the 7th Brazilian Meeting on Plasma Physics, São Pedro, SP, Brazil, 2003* (SBF, São Paulo, 2003), Poster P001, p. 72.

E. Del Bosco, L. A. Berni, J. G. Ferreira, R. M. Oliveira, G. O. Ludwig, and C. S. Shibata. “Operational scenarios of the ETE spherical tokamak”. In *X Latin American Workshop on Plasma Physics combined with the 7th Brazilian Meeting on Plasma Physics, São Pedro, SP, Brazil, 2003* (SBF, São Paulo, 2003), Poster P005, p. 73.

J. G. Ferreira, E. Del Bosco, L. A. Berni, W. A. Vilela, and H. Patire Jr. “Baking system for improvement of vacuum conditioning of the ETE vacuum vessel”. In *X Latin American Workshop on Plasma Physics combined with the 7th Brazilian Meeting on Plasma Physics, São Pedro, SP, Brazil, 2003* (SBF, São Paulo, 2003), Poster P009, p. 75.

J. P. Leite Neto and J. J. Barroso. “The sinusoid as the longitudinal profile in backward-wave oscillators of large cross sectional area”. In *X Latin American Workshop on Plasma Physics combined with the 7th Brazilian Meeting on Plasma Physics, São Pedro, SP, Brazil, 2003* (SBF, São Paulo, 2003), Poster P009, p. 27.

G. O. Ludwig, E. Del Bosco, L. A. Berni, J. G. Ferreira, R. M. Oliveira, M. C. R. Andrade, C. S. Shibata, J. J. Barroso, P. J. Castro, and L. F. W. Barbosa. “Progress on the ETE Spherical Tokamak”. In *X Latin American Workshop on Plasma Physics combined with the 7th Brazilian Meeting on Plasma Physics, São Pedro, SP, Brazil, 2003* (SBF, São Paulo, 2003), Invited Talk, p. 66.

R. M. Oliveira, M. Ueda, and L. A. Berni. “First results of the fast neutral lithium beam diagnostics probing the edge plasma of the ETE tokamak”. In *X Latin American Workshop on Plasma Physics combined with the 7th Brazilian Meeting on Plasma Physics, São Pedro, SP, Brazil, 2003* (SBF, São Paulo, 2003), Poster P013, p. 77.

C. S. Shibata, E. Del Bosco, J. G. Ferreira, and L. A. Berni. “Stray magnetic fields on the ETE spherical tokamak”. In *X Latin American Workshop on Plasma Physics combined with the 7th Brazilian Meeting on Plasma Physics, São Pedro, SP, Brazil, 2003* (SBF, São Paulo, 2003), Poster P010, p. 75.

- **Relatórios Técnicos**

P. J. Castro. “Monotron e cavidades azimutalmente corrugadas: aplicação à geração de microondas de alta potência”. INPE-9777-PRP/239 (2003).

G. O. Ludwig and U. Schneider (editors). *Proceedings of the Joint Meeting of the Second International Atomic Energy Agency Technical Committee Meeting on Spherical Tori and the Seventh International Spherical Torus Workshop, São José dos Campos, SP, Brazil, 2001* (INPE, São José dos Campos, 2003).

G. O. Ludwig. “Relatório de Atividades de 2002 da Linha de Pesquisa e Desenvolvimento em Fusão Termonuclear Controlada”. INPE-9613-NTC/353 (2003).

T. N. Todd, M. C. R. Andrade, G. O. Ludwig, and J. G. Ferreira. “Neoclassical resistivity revisited”. INPE-9784-RPQ/245 (2003).

- **Outros Trabalhos – Notas Técnicas**

L. A. Berni. “Características da objetiva utilizada no diagnóstico de espalhamento Thomson do tokamak ETE”. LAP/NT-002/03 (2003).

J. P. Leite Neto e J. J. Barroso. “Influência da corrugação nas bandas de passagem e proibida de ondas TM propagando-se em guias cilíndricos axialmente corrugados”. LAP/NT-007/03 (2003).

J. P. Leite Neto e J. J. Barroso. “Cálculo da frequência de operação do monotron do LAP usando o XFDTD”. LAP/NT-008/03 (2003).

J. P. Leite Neto, J. J. Barroso, e P. J. Castro. “Implementação do código de cálculo de campo eletromagnético XFDTD”. LAP/NT-009/03 (2003).