

Modernização do Experimento Tokamak Esférico – ETE

SEMINÁRIO SOBRE FUSÃO NUCLEAR

Júlio G. Ferreira – INPE

12 de Agosto de 2021

Histórico do Experimento Tokamak Esférico ETE

Histórico do ETE

- 1987 – IUPAP Energy Independence Conference on Fusion Energy and Plasma Physics, Rio de Janeiro
MCT anuncia a proposta de criação do Laboratório Nacional de Plasma – LNP
Principal experimento: ETA – Experimento Toroidal Avançado, com corrente de plasma $I_p \approx 1\text{MA}$
Teria sido o **primeiro tokamak esférico no mundo**, aposta que depois se revelou muito acertada
- Não concretização destas propostas → soluções alternativas (Proto-ETA, TBR-E), também não efetivadas
→ concepção mínima de tokamak esférico, ajustado às restrições de orçamento e espaço do INPE
- 1993 – CONCEPÇÃO do ETE – Experimento Tokamak Esférico
- 1995 – Início de sua CONSTRUÇÃO
- Dez / 2000 – Início da OPERAÇÃO do ETE em regime tokamak, embora com implementação apenas parcial de diversos subsistemas
- Início da década 2000-2010: retomadas as gestões no âmbito do governo federal para criação no Brasil de um laboratório de fusão nuclear de caráter nacional, tendo o ETE e sua equipe como núcleo
- 2003 – Primeiro passo, com a aprovação de rubrica específica, no orçamento da União direcionado ao INPE, para financiar as atividades de fusão nuclear desenvolvidas em torno do ETE

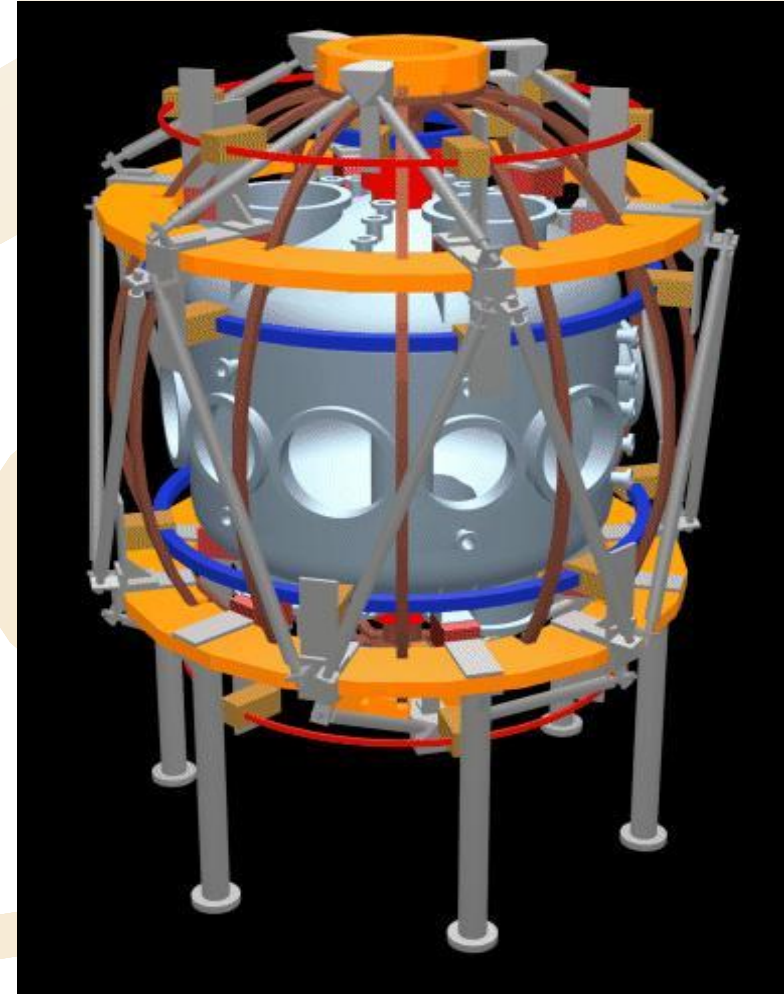
Histórico do ETE

Concepção
Artística do
ETE

Concebido por
Gerson Ludwig
na primeira metade
da década de 1990

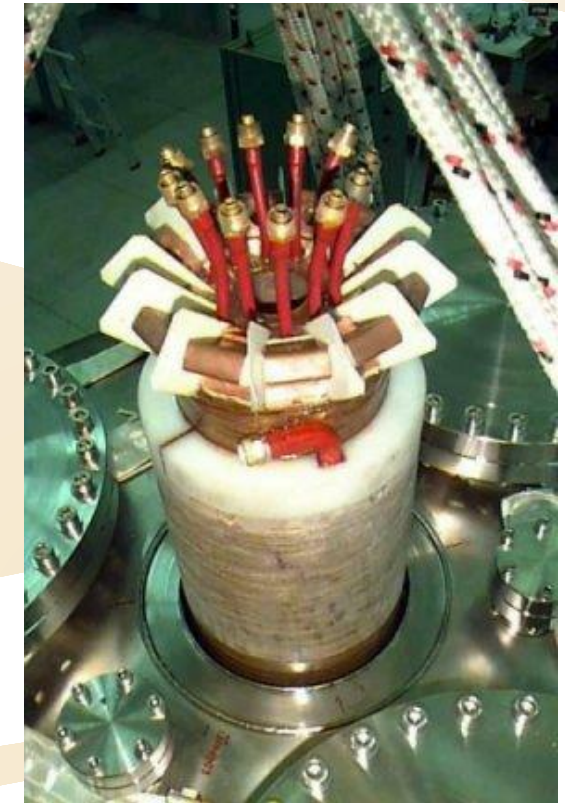
2,5m

2,0m

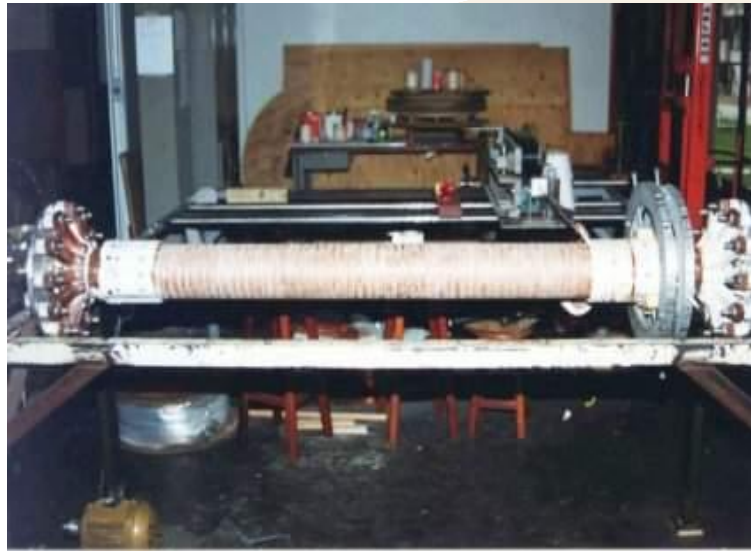


Histórico do ETE

Etapas da construção



Histórico do ETE



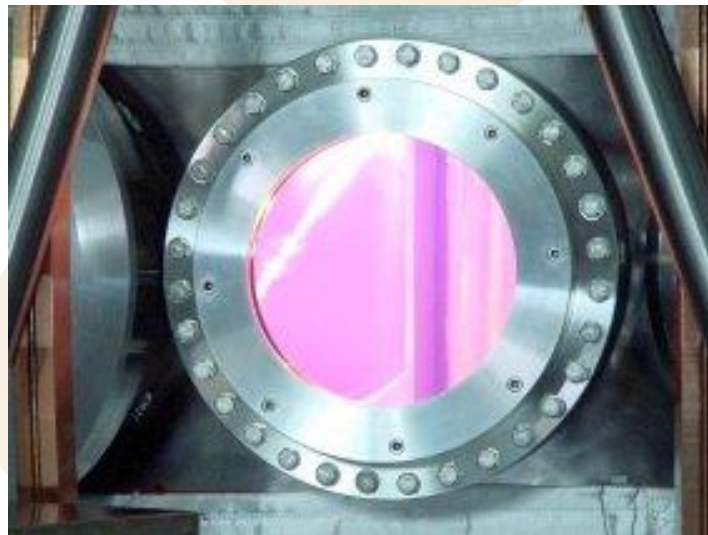
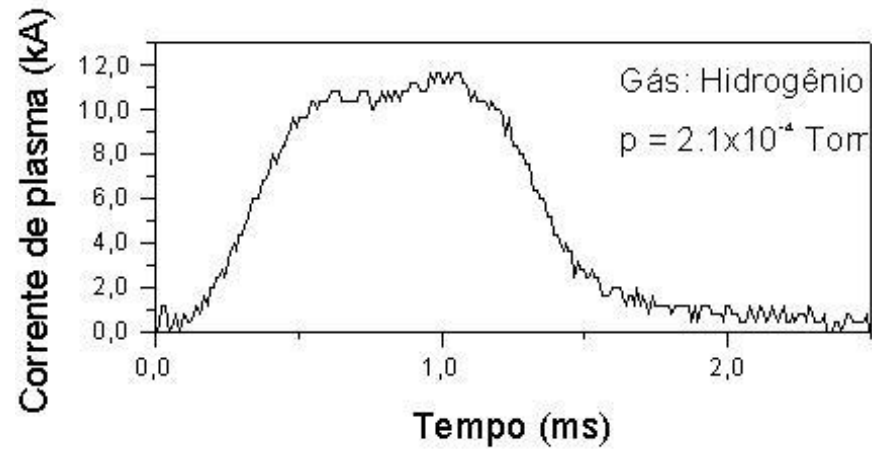
Histórico do ETE



Histórico do ETE

- Final da década 2000-2010:
Rede Nacional de Fusão – RNF
Acordo de Cooperação com a Euratom
CNEN se torna responsável pela criação do Laboratório de Fusão Nuclear – LFN e pelas atividades de fusão nuclear conduzidas no INPE / ETE (sede provisória do LFN)
 - 2011-2016 – tratativas conduzem à assinatura de um Termo de Cooperação entre CNEN e INPE
 - 2012 – Definição do local de implantação do LFN, na mesma área destinada ao RMB, em Iperó/SP
 - Dez / 2013 – Convênio Finep / CNEN / INPE com previsão de recursos para:
Providências iniciais relativas à implantação do LFN
Manutenção das atividades do ETE
- Bolsas**
- Bolsas indispensáveis para recomposição da equipe do ETE, extremamente afetada pela perda de pessoal em anos anteriores
 - Tais bolsas ainda não liberadas até a presente data, inviabilizando as atividades do ETE
 - Dez / 2014 – operação do ETE suspensa por carecer da equipe mínima necessária para operá-lo com segurança e eficiência

Histórico do ETE



Primeiro plasma
do ETE em
regime tokamak

28nov/2000

Histórico do ETE

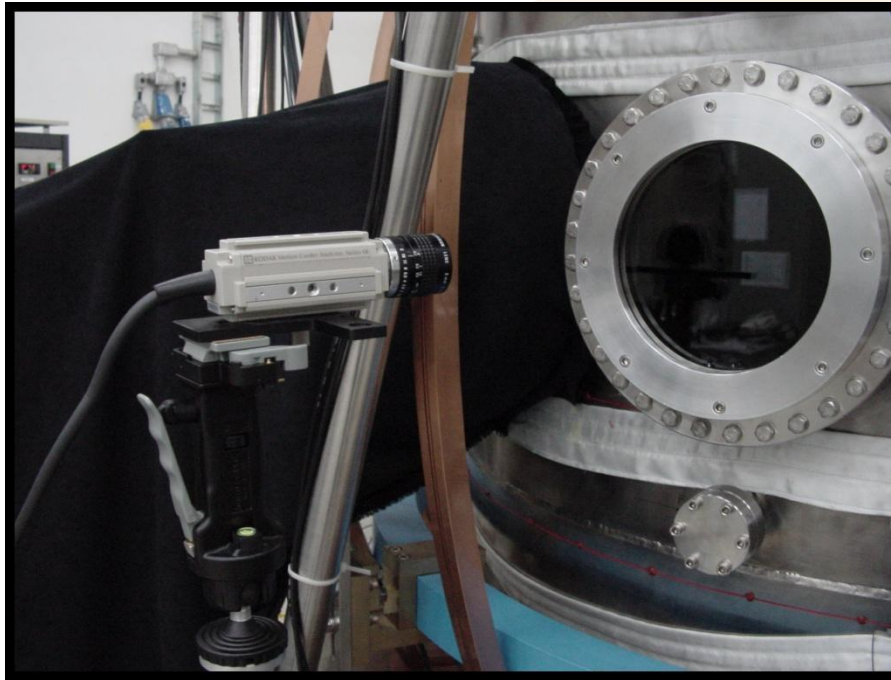
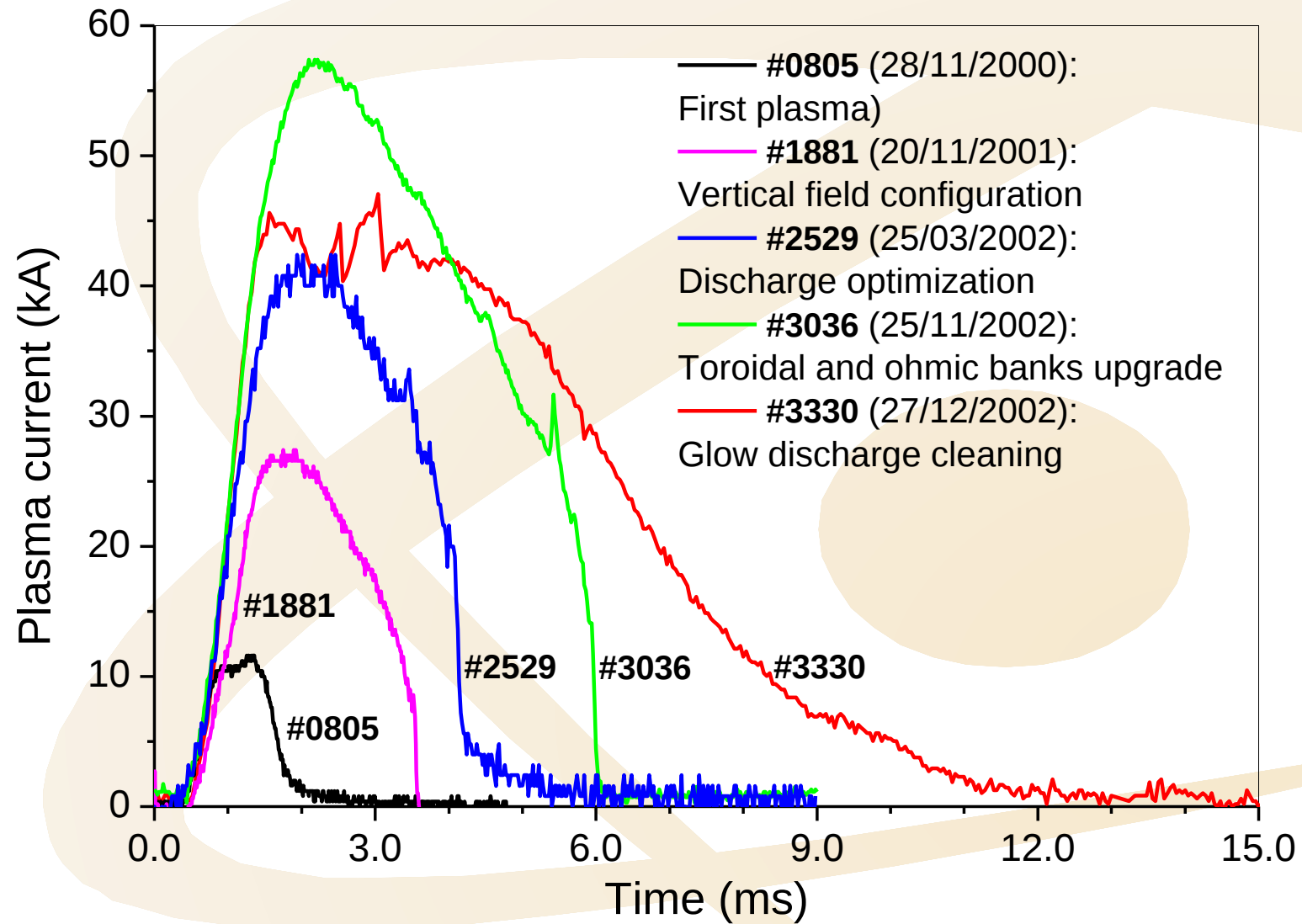


Imagem do plasma obtida inicialmente

com câmera CCD rápida
emprestada por CEA/INPE

Histórico do ETE



Histórico do ETE

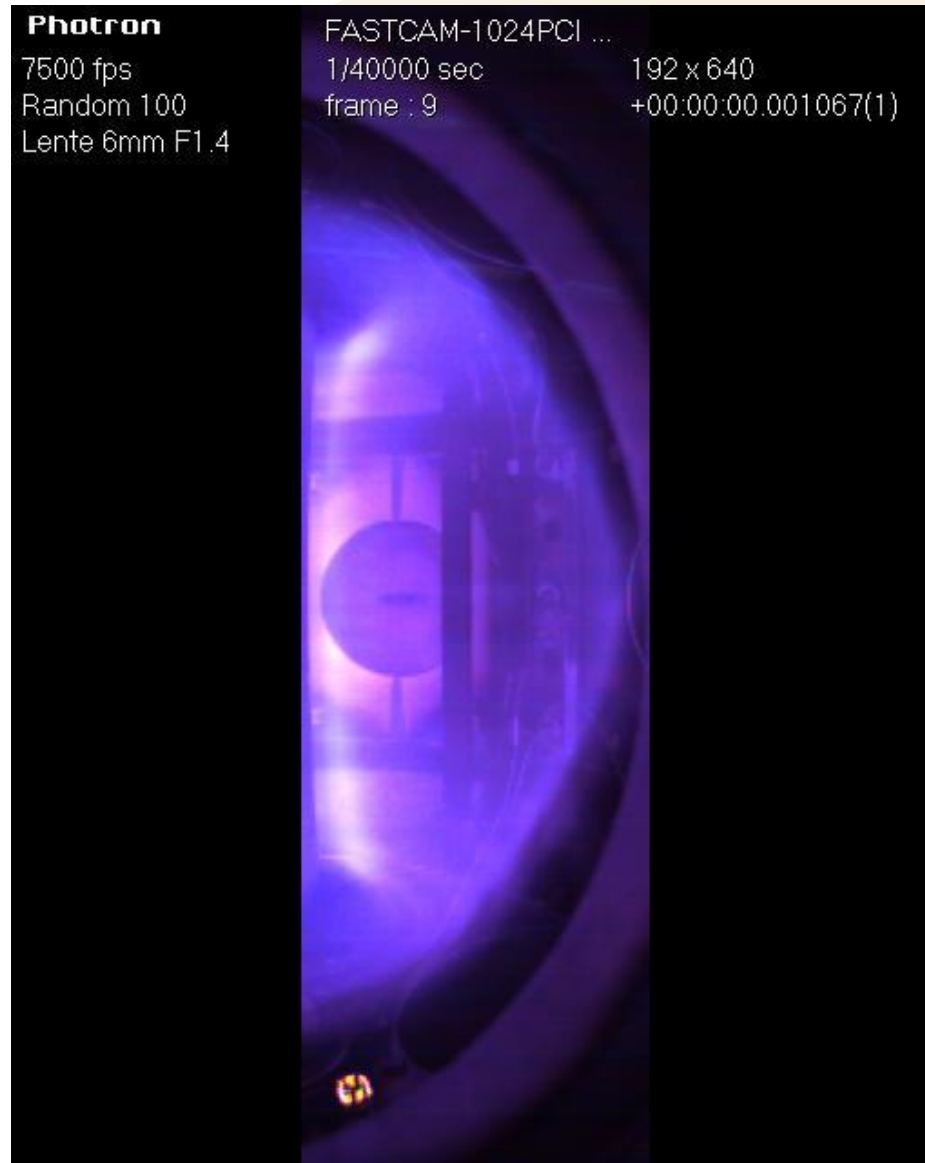
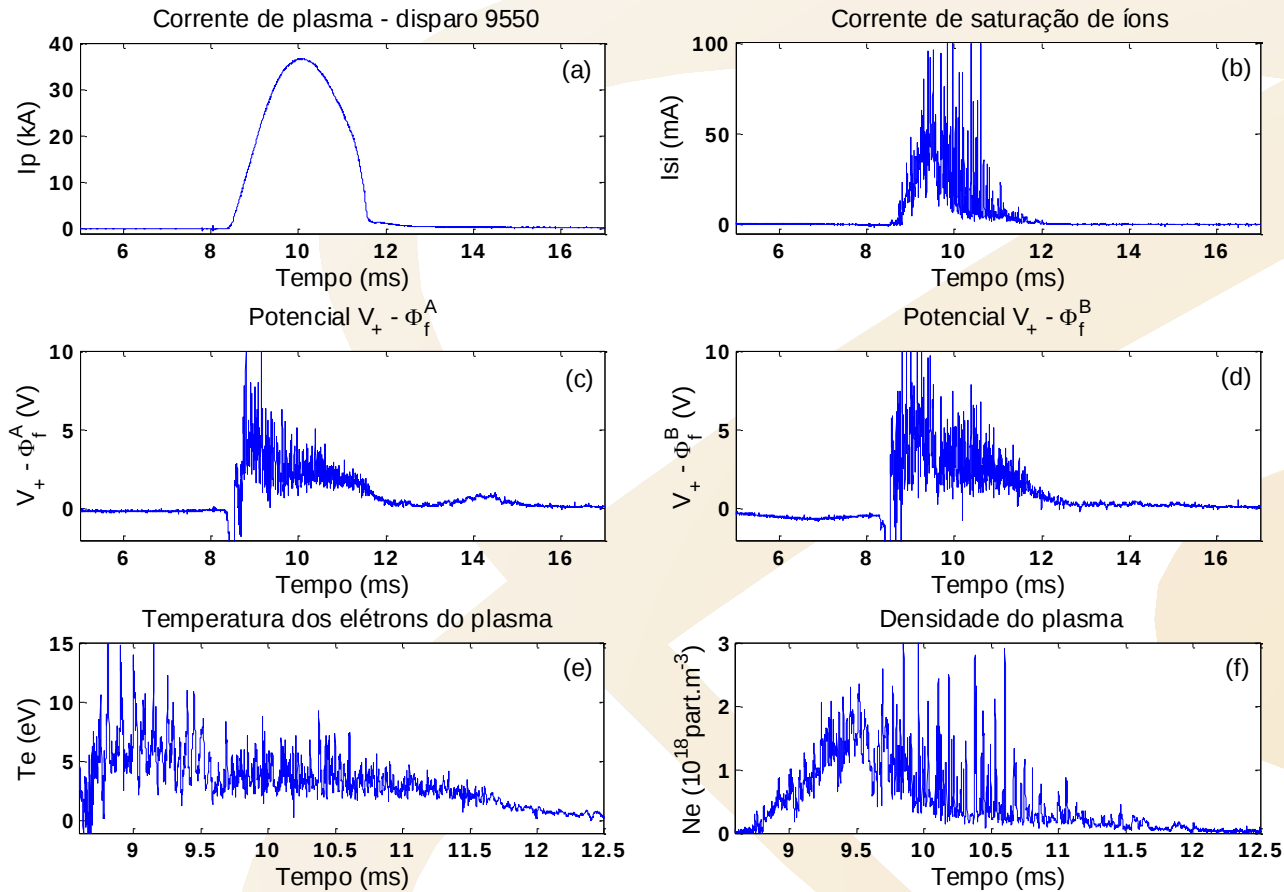


Imagem do plasma
do ETE

obtida com
câmera CMOS
Photron FastCam
própria

Disparo 8889

Histórico do ETE



Últimos estudos

(antes de ser
interrompida a
operação)

Dez / 2014

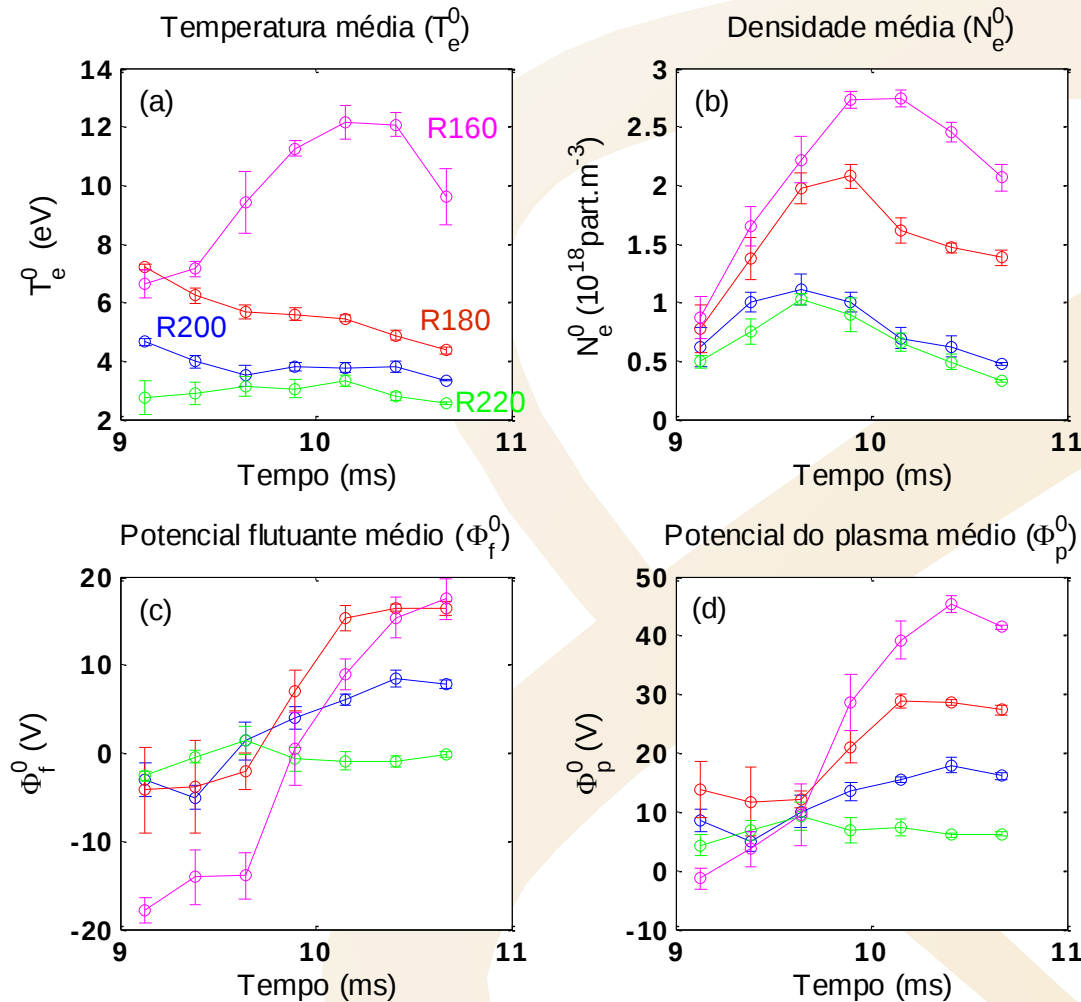
Perfis da corrente de plasma (a)
Sinais medidos com sonda eletrostática tripla (b, c, d)
Parâmetros de plasma obtidos a partir destes sinais (e, f).

Histórico do ETE

Últimos estudos

(antes de ser
interrompida a
operação)

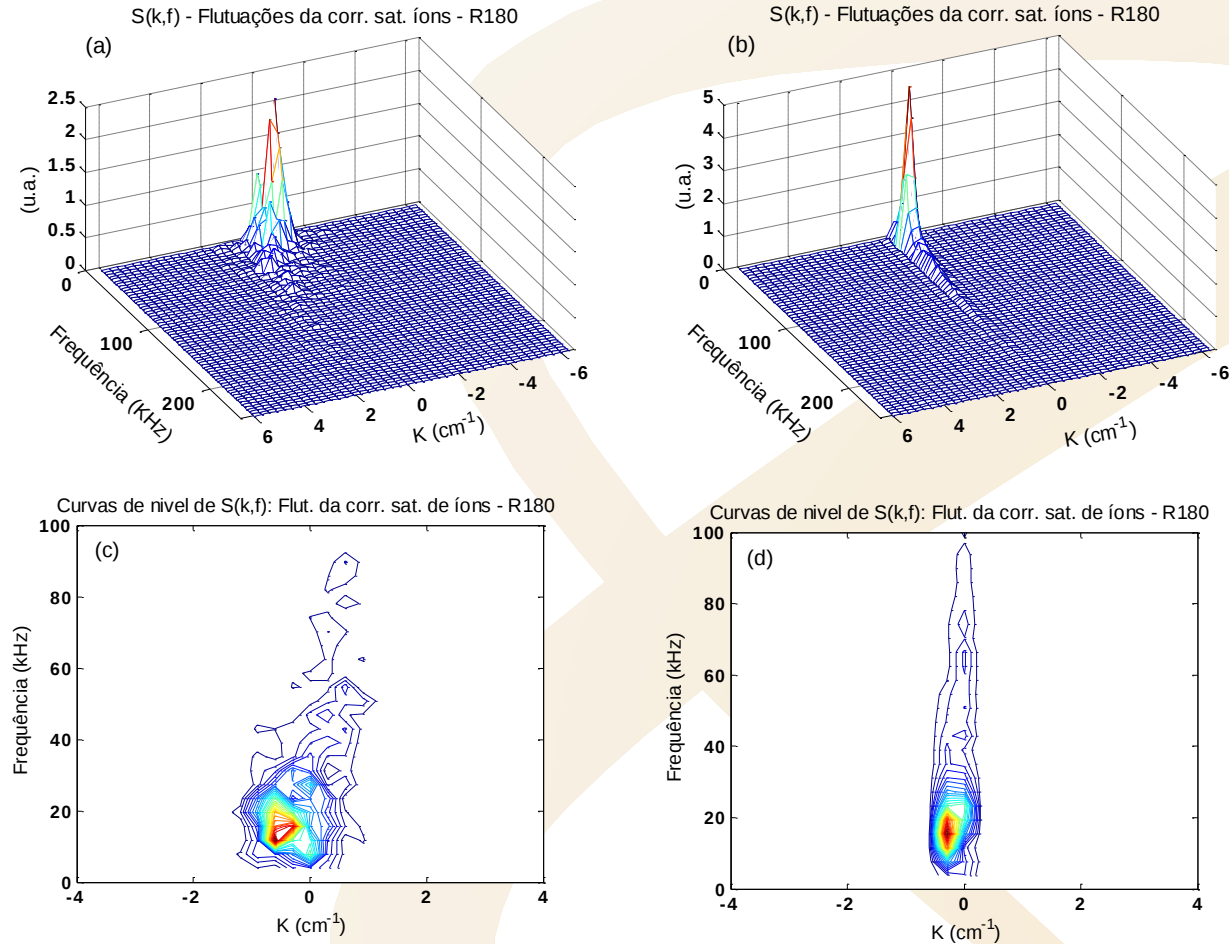
Dez / 2014



Temperatura dos elétrons, densidade, potencial flutuante e potencial do plasma medidos com sondas eletrostáticas na borda do ETE.

Histórico do ETE

Últimos estudos
(antes de ser
interrompida a
operação)
Dez / 2014



Espectros das flutuações da corrente de saturação de íons medidas por duas sondas em diferentes direções poloidais (a) e toroidais (b) e suas respectivas curvas de nível (c) e (d).

Características do Experimento Tokamak Esférico ETE

ETE – salão experimental principal



Ponte
rolante
2Ton

Recorte na laje

ETE – sala de controle



SALA DE CONTROLE
Vista a partir da porta
de entrada desta sala

Janela com vista para o salão principal
a partir da sala de controle

Porta de acesso entre a sala
de controle e o salão principal

**Salão principal, visto
da sala de controle**



ETE – subsolo sob o salão principal

**Banco ôhmico
(capac. a óleo)**



**Banco toroidal
(capac. eletrol.)**

**Bloco de sustentação do tokamak através do
recorte na laje**

ETE – sala de reuniões, subsolo adicional



Sala para reuniões técnicas, ao lado da sala de controle

Janela com vista para o salão principal a partir da sala de reuniões

Porta de acesso externo ao subsolo



Espaço adicional no subsolo sob as salas de controle e reunião, com pé direito mais elevado

Instalações do ETE – Informações Principais

■ Dispositivo Experimental:

- Dimensões principais, em metros: 2,0 x 2,0 x 2,7 (L x C x A)
- Área de trabalho: raio 5m
- Fontes de alimentação de alta potência com bancos de capacitores

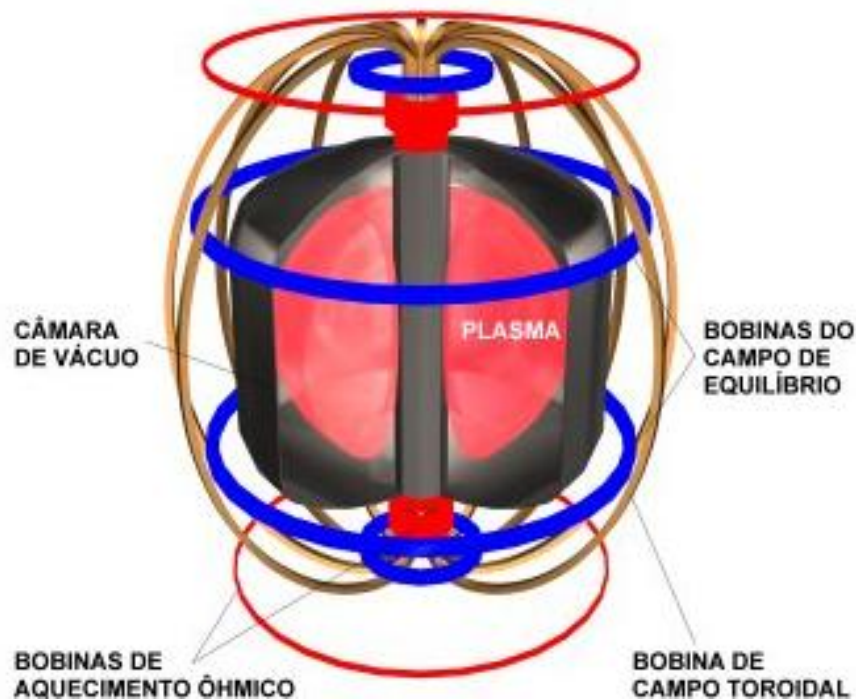
■ Laboratório, dimensões em metros:

- Salão principal : 9,9 x 14,9 x 5,5 (L x C x A)
- Recorte na laje: 2,0 x 2,0
- Subsolo: 9,9 x 14,4 x 3,8 + 9,9 x 7,6 x 5,0 (L x C x A)
- Área total (salão principal, subsolo, salas adjacentes): 500m²

■ Ponte Rolante:

- Tipo: univiga
- Capacidade: 2 toneladas
- Altura útil sob o gancho: 4,4m

ETE – Parâmetros e Objetivos Principais



Raio maior $R_0 = 0,3 \text{ m}$

Raio menor $a = 0,2 \text{ m}$

Elongação $\kappa = 1,6 - 1,8$

Triangularidade $\delta = 0,3$

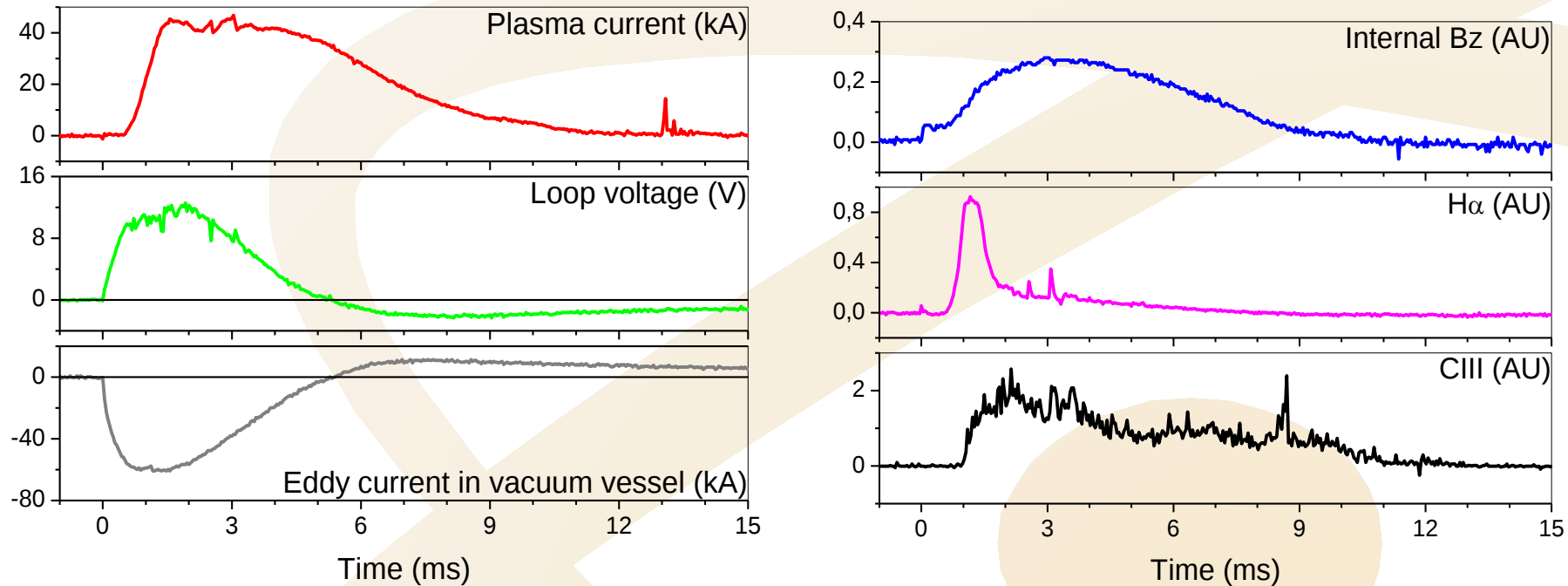
Campo magnético $B_0 = 0,4 - 0,6 \text{ T}$

Corrente de plasma $I_p = 0,2 - 0,4 \text{ MA}$

Duração do pulso $t = 30 - 100 \text{ ms}$
 1^a fase $\uparrow$ $\uparrow$ 2^a fase

- Explorar a física dos plasmas de baixa razão de aspecto ($R_0/a=1,5$)
- Desenvolver diagnósticos compatíveis com dispositivos de sua classe
- Investigar as condições da borda do plasma
- Estudar métodos de aquecimento do plasma por radiofrequência
- Acompanhar os avanços internacionais na área
- **Agregar uma equipe com vistas à criação de um laboratório nacional**

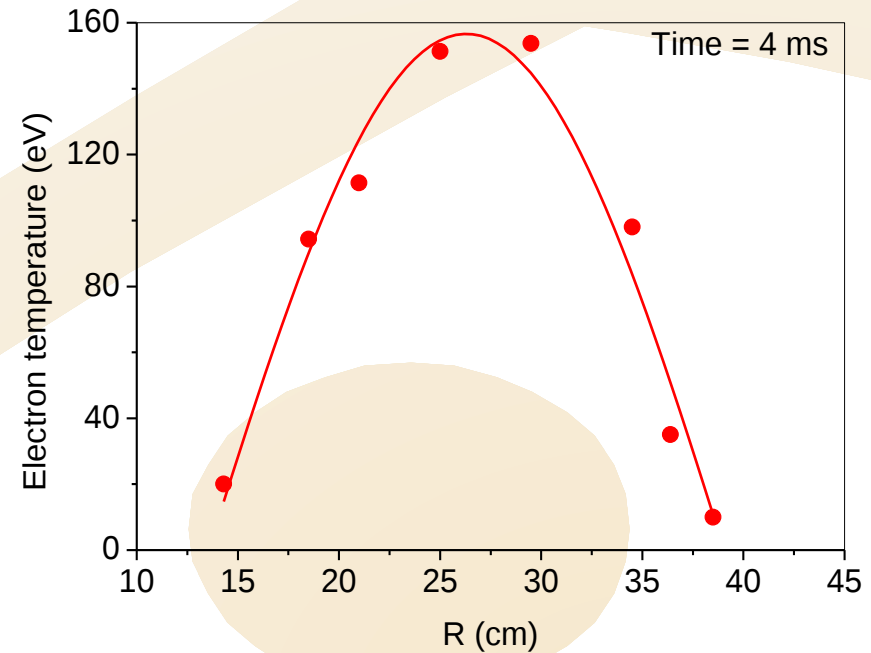
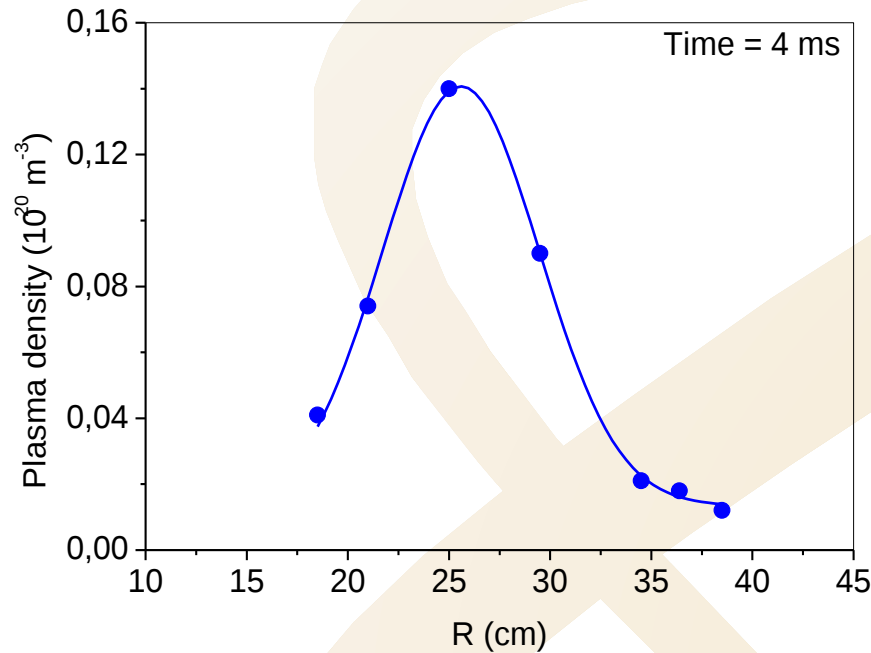
Disparo típico no ETE



- Corrente de plasma: 40~60 kA
- Duração do pulso: 8~5 ms
(duração >12 ms após condicionamento de vácuo com descarga luminosa)
- Corrente induzida na câmara de vácuo ~60 kA
- Parâmetros cerca de 1/3 do previsto na primeira fase (compatível com fontes atuais)

Parâmetros Principais do Plasma do ETE

Obtidos com sua Configuração Atual



- Corrente $\leq 60 \text{ kA}$ – Pulse duration $\leq 12 \text{ ms}$.

Resultados obtidos com espalhamento Thomson:

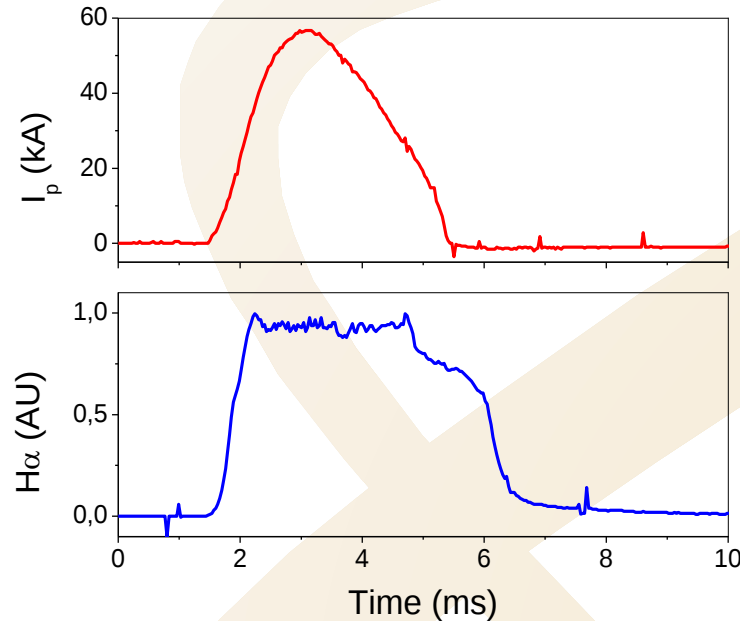
- Densidade $\leq 3.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$
- Temperatura $\leq 160 \text{ eV}$.
- Posição do pico $\sim 26 \text{ cm}$

Parâmetros Principais do Plasma do ETE

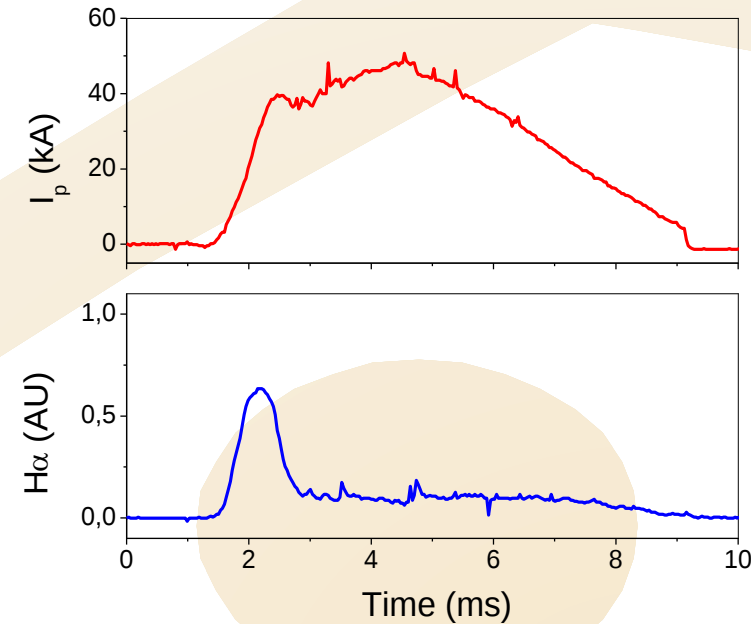
Obtidos com sua Configuração Atual

Comparação de descargas antes e depois de efetuar **CONDICIONAMENTO DE VÁCUO**

ANTES

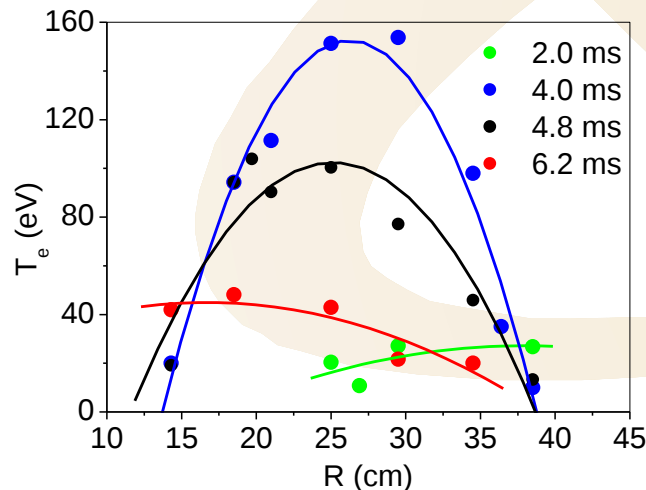


DEPOIS



Perfis Radiais de T_e

Evolução durante a descarga



Condicionamento de vácuo atual → apenas redução na reciclagem, com remoção parcial de água/hidrogênio das paredes

Melhor condicionamento → otimizar a remoção de oxigênio, para superar a barreira de radiação → descargas melhores

Preparação do ETE
para uso como
Dispositivo Inaugural do LFN
1ª Fase

Preparação do ETE

Metas:

- ◆ *Atingir parâmetros de projeto das fontes de potência*
- ◆ *Implantar / aprimorar sistemas auxiliares*
- ◆ *Aprimorar o conjunto de diagnósticos de plasma*
- ◆ *Atingir os parâmetros de plasma esperados*
- ◆ *Programa de pesquisa com foco em geração de corrente*

Pré-requisito:

Recomposição de uma equipe mínima indispensável para se operar um tokamak do porte do ETE

Preparação do ETE – Fontes

Aspectos gerais:

- ◆ *De modo geral, estão disponíveis os componentes principais (capacitores, estruturas de suporte, tiristores, ignitrons, fontes de carregamento) para atingir os parâmetros de projeto da primeira fase*
- ◆ *Carência principal é dispor de equipe técnica (engenheiro + técnico) com experiência em eletroeletrônica de potência para desenvolvimento e manutenção destes subsistemas*
- ◆ *≈ 1/3 dos sistemas concebidos está implementada*
- ◆ *Pode ser boa ideia repensar as soluções em curso, conforme o cenário (equipe vs recursos financeiros)*

Preparação do ETE – Fontes



Banco ôhmico
(capac. a óleo)

Banco toroidal
(capac. eletrol.)

Fontes de carregamento dos bancos



Preparação do ETE – Fontes Circ. Ôhmico



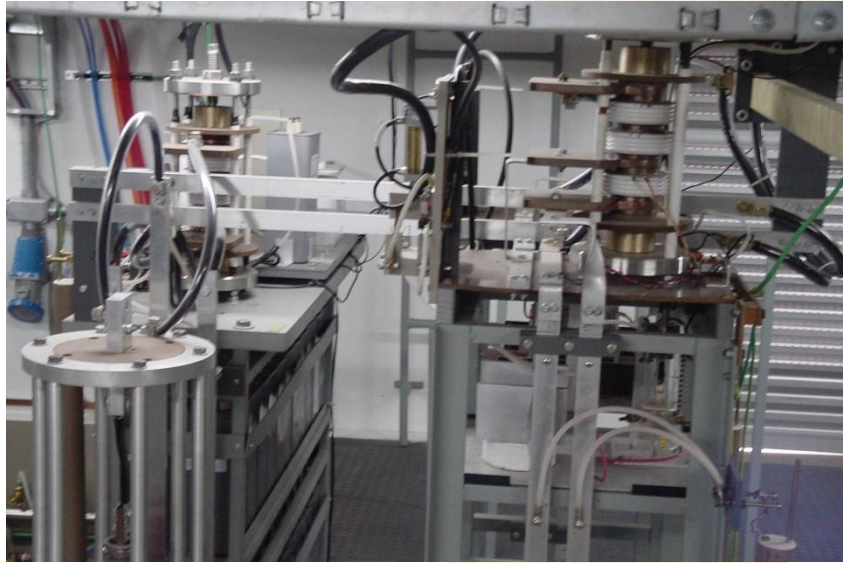
- Bancos de capacitores a óleo; cerca de 1/3 do previsto para a fase inicial já está em uso mas requer troca parcial de estrutura
- Componentes doados por Culham (38 μ F, 78 μ F/8kV – 0,8MJ)
- Capacitores novos (20 μ F / 7,5KV – 0,3MJ)
- Projeto requer aperfeiçoamentos
- Próximas etapas: aumentar energia instalada $\Rightarrow I_p \sim 200$ kA
- Há capacitores e estruturas de suporte suficientes para isso
- Faltam chaves, barramentos, conexões, proteções etc

Preparação do ETE – Fontes Circ. Toroidal



- Bancos com capacitores eletrolíticos; cerca de 1/3 do previsto para a fase inicial já instalado
- Componentes doados por Culham (2250 μ F, 4500 μ F/250V – 0,3MJ + 2200 μ F/360V – 1,3MJ)
- Capacitores novos (10mF / 250V – 1,25MJ), ainda não usados
- Projeto mais amadurecido
- Próximas etapas: aumentar energia instalada $\Rightarrow B = 0.6\text{ T}$
- Há capacitores e parte das estruturas de suporte para isso
- Faltam chaves, barramentos, conexões, proteções etc

Preparação do ETE – Fontes Circ. Equilíbrio



- Energia envolvida é bem menor
- Solução com maior probabilidade de ser modernizada
- Usa capacitores a óleo novos ($20\mu\text{F}$ / $7,5\text{KV}$ – $0,3\text{MJ}$) e eletrolíticos doados por Culham ($2250\mu\text{F}/250\text{V}$)
- **Próximas etapas:** revisão de conceito, com estudos para implementação de fonte plenamente controlável, com vistas a implantação de controle realimentado a partir de sinais do plasma

Preparação do ETE – Sistemas Auxiliares

Engloba diversos subsistemas:

- ◆ ***Aquisição e cópia de segurança dos dados***
- ◆ ***Controle e segurança da operação***
- ◆ ***Condicionamento de vácuo***
- ◆ ***Pré-ionização***
- ◆ ***Injeção de helicidade (possível colaboração com TCABR)***

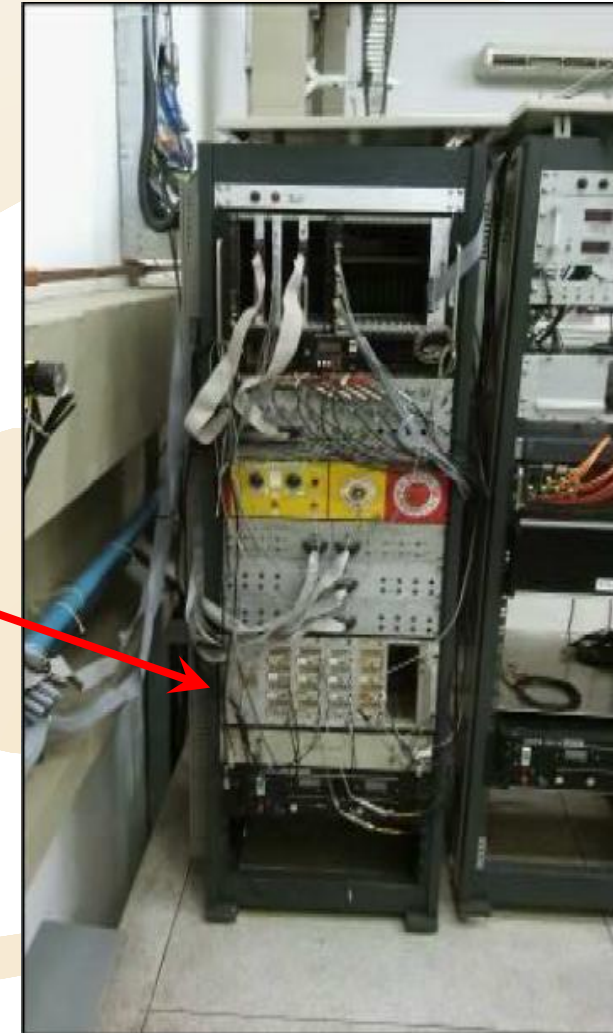
Sistemas Auxiliares – Aquisição de Dados

- Sistema **fornecido** pelo Centro de Fusão Nuclear do Instituto Superior Técnico – **CFN/IST, de Lisboa**
- Baseia-se em **placas inseridas em CPUs** instaladas nos gabinetes de instrumentação (19") distribuídos no ambiente experimental, **conectadas em rede via fibra óptica**
- Placas especialmente projetadas para aquisição de dados em experimentos de fusão, com **barramento padrão PCI**
- Apenas parte dos canais disponíveis está implementada
- Requer envolvimento de **profissionais de TI e de eletrônica**
- **Próximas etapas:** complementação do sistema e/ou revisão de conceito, com avaliação de prós e contras da implantação de soluções mais modernas

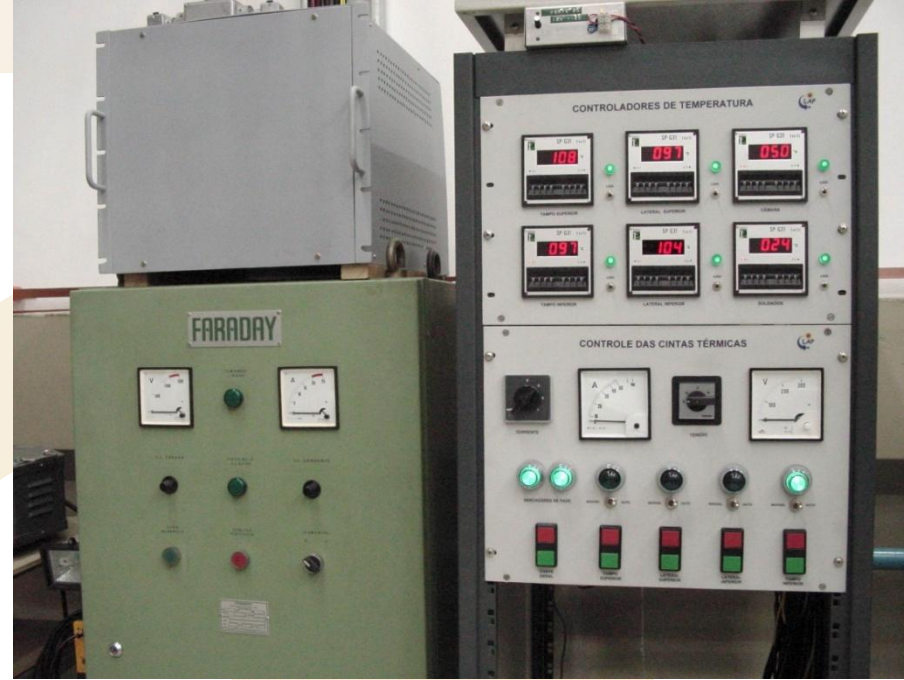
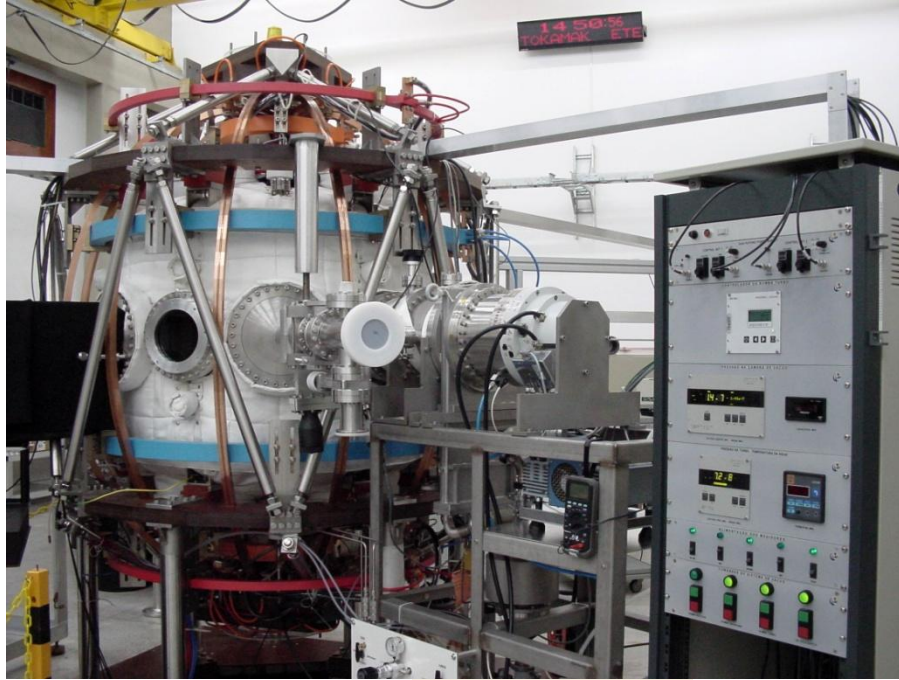


Sistemas Auxiliares – Controle e segurança

- Sistema eletropneumático de intertravamento e segurança, com algumas chaves mecânicas desenvolvidas in loco
- Sistema de comando das fontes e chaves de potência **operado a partir da sala de controle remotamente**, via rede local com fibra óptica
- Utiliza módulos **temporizadores muito antigos doados** pelo Lab. de Culham / UKAEA (atual CCFE)
 -
- Requer envolvimento de **profissionais de TI e de eletrônica**
- **Próximas etapas:** complementação e modernização do sistema

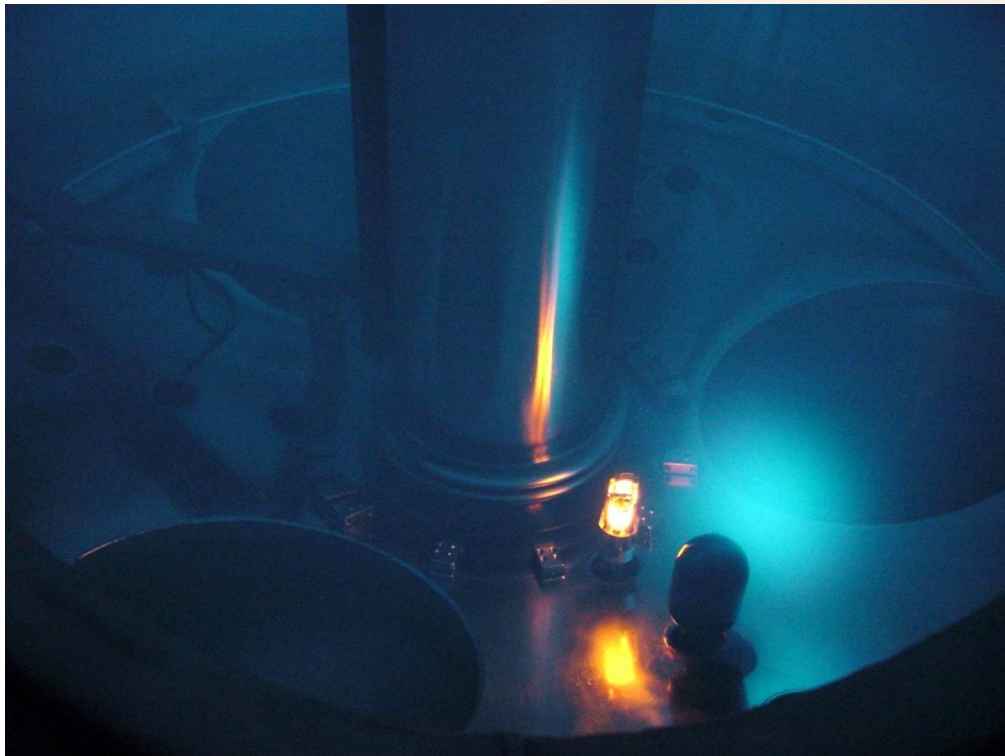


Sistemas Auxiliares – Condicionamento de vácuo

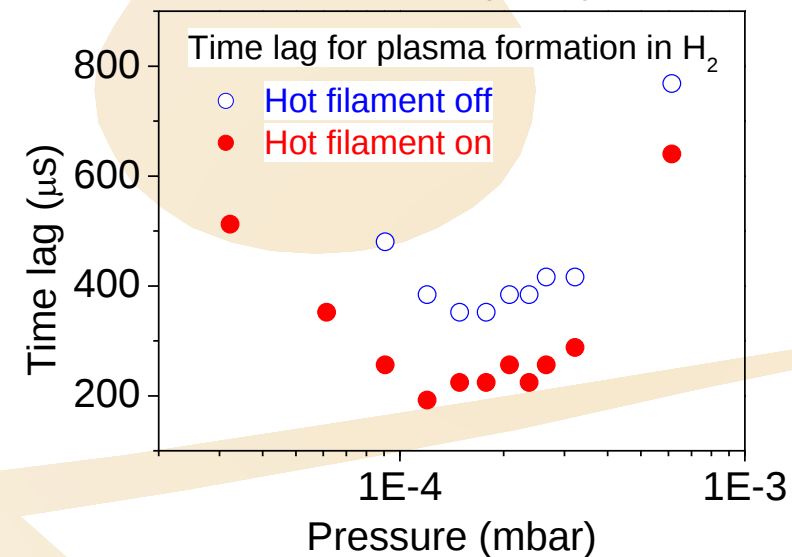
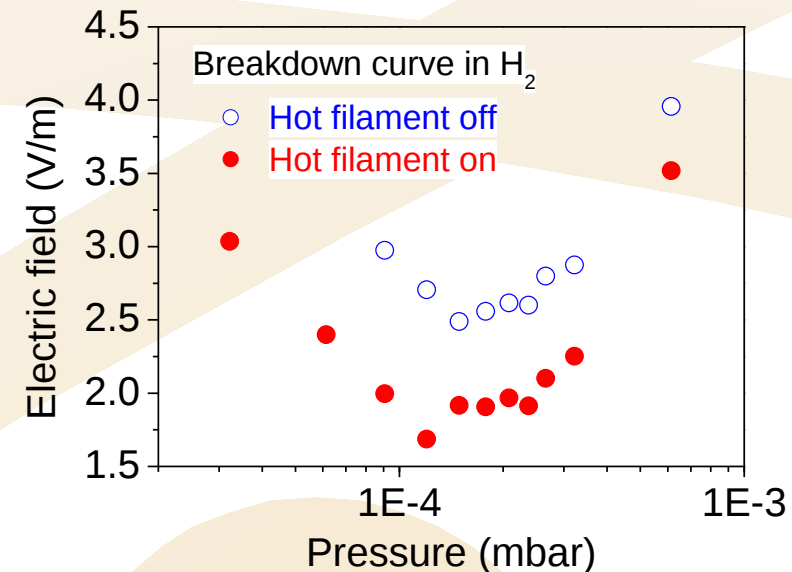


- **Limpeza por Aquecimento e Descarga Luminosa**
- Câmara de vácuo coberta com cintas térmicas (11 kW) e manta de isolamento térmica.
- Já aquecida até 120°C (limitado por vedações de viton) mas no futuro até 200°C.
- Descarga luminosa (500 V/0.5 A, anodo refrigerado) em He a 2.4×10^{-3} mbar.
- Pressão de base $< 8 \times 10^{-8}$ mbar após aquecimento (2-3 dias) e descarga (~48 hours).

Sistemas Auxiliares – Pré-ionização

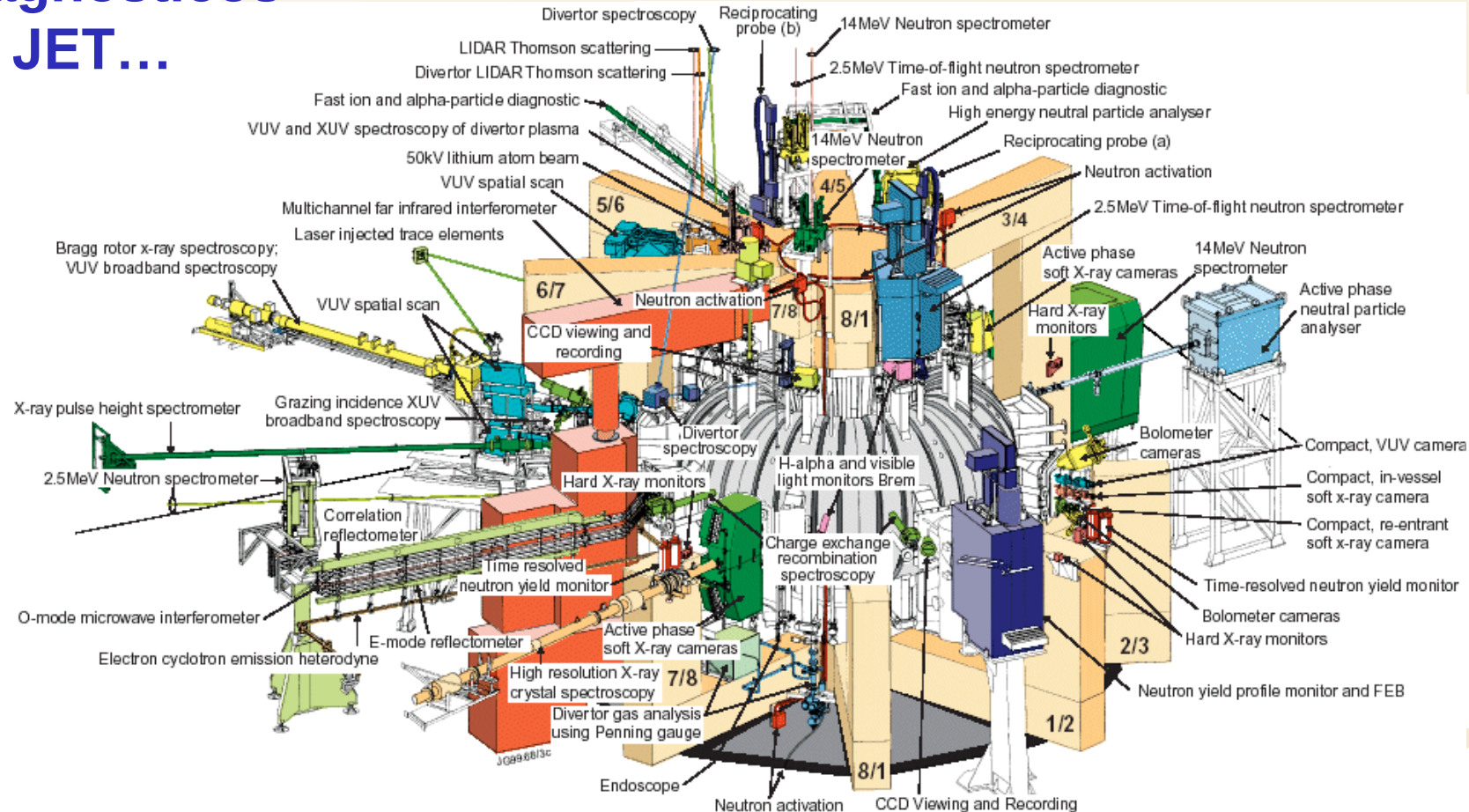


- Descarga luminosa em operação, com filamento de pré-ionização ativado (4 A/75 V)
- Sistema de pré-ionização mais eficiente contribuirá para obtenção de melhores parâmetros de plasma em regime tokamak



Preparação do ETE – Diagnósticos

Diagnósticos no JET...



... apenas para dar uma ideia de até onde se pode chegar, neste quesito!

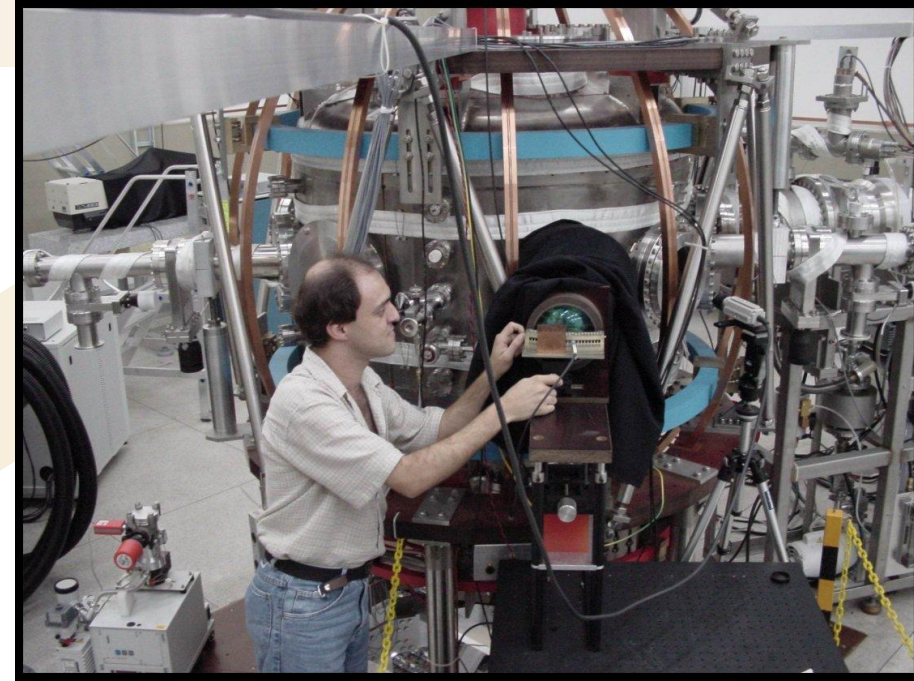
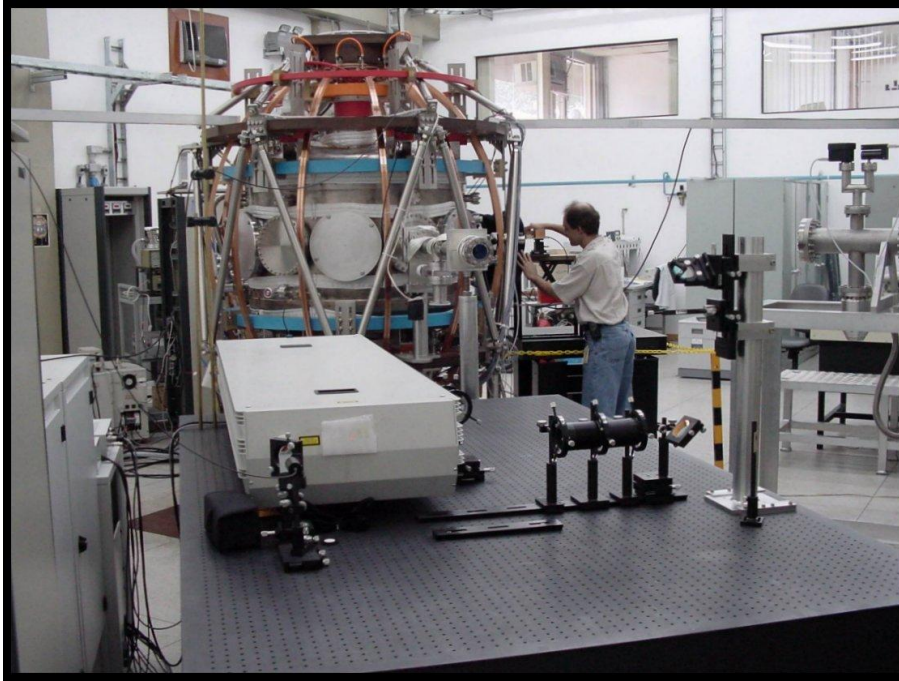
Preparação do ETE – Diagnósticos

Principais diagnósticos implementados / em implementação:

- Conjunto de bobinas magnéticas de diversos tipos (bobina de Rogowski, bobinas de Mirnov, bobinas de fluxo etc)
- Sondas eletrostáticas (simples, dupla, tripla)
- Espalhamento Thomson (laser de rubi 10J)
- Interferometria de microondas (170GHz)
- Tomografia de raios-x de alta (duros) / baixa energia (moles)
- Espectroscopia no visível
- Feixe de lítio neutro
- Câmera de vídeo de alta velocidade

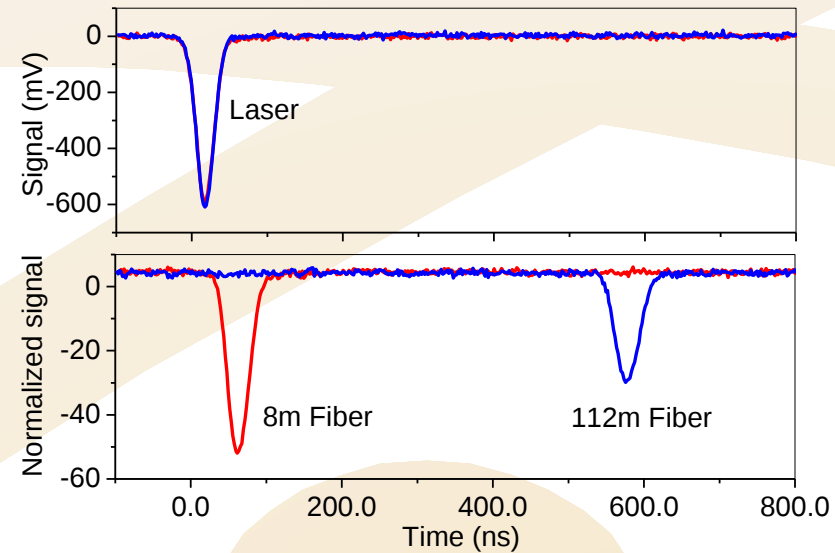
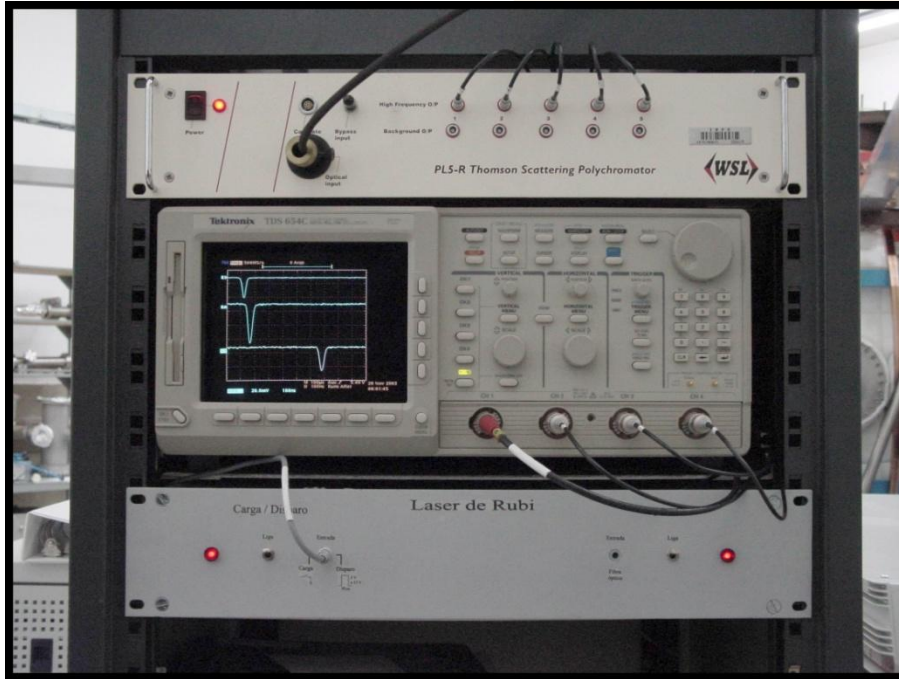
Regra geral: quase todos os diagnósticos carecem de especialista dedicado que responda por sua operação / complementação / modernização.

Diagnósticos – sistema de espalhamento Thomson



- Laser de rubi chaveado (Q-switch), 10 J, 20 ns.
- Lente f/6.3 projeta a luz espalhada em cabos de monofibra óptica de 0.8 mm
- Policromador com filtro de 5 canais, com fotodiodos de avalanche.
- Técnica de retardo temporal usada para medição em várias posições do plasma, num mesmo disparo, com um único policromador
- Temperaturas medidas no ETE entre 20 e 160 eV – densidades $\leq 3.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$.

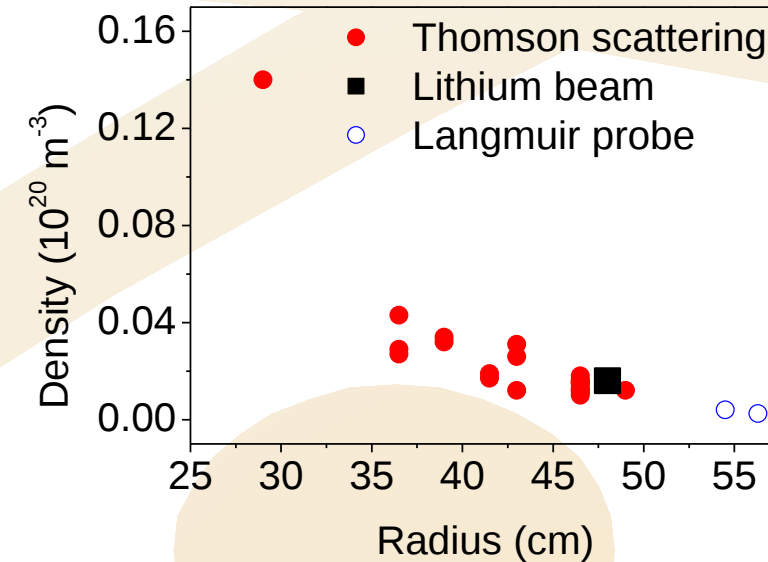
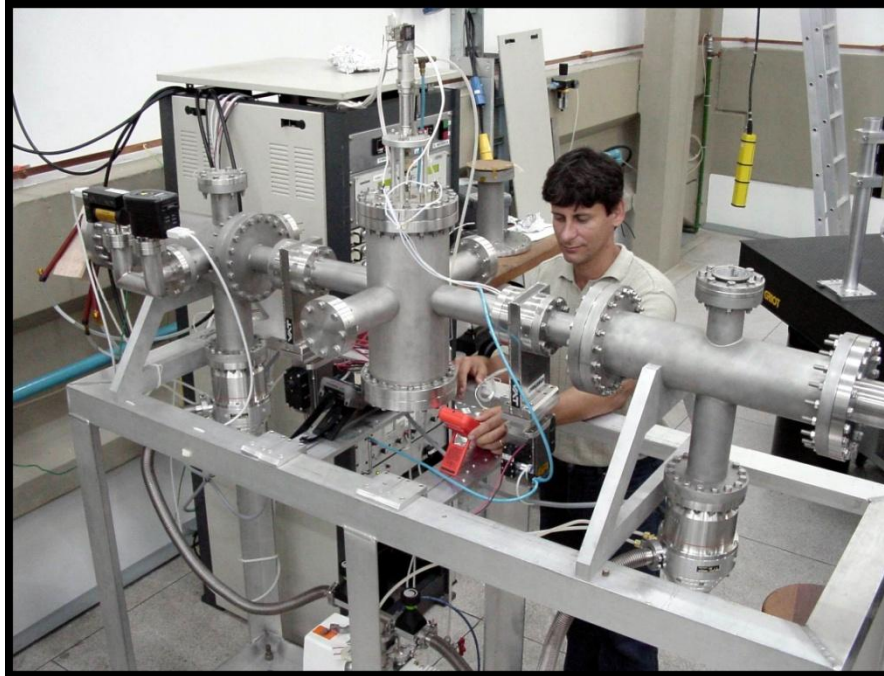
Diagnósticos – sistema de espalhamento Thomson



Medição da atenuação de sinais com diferentes tempos de retardo

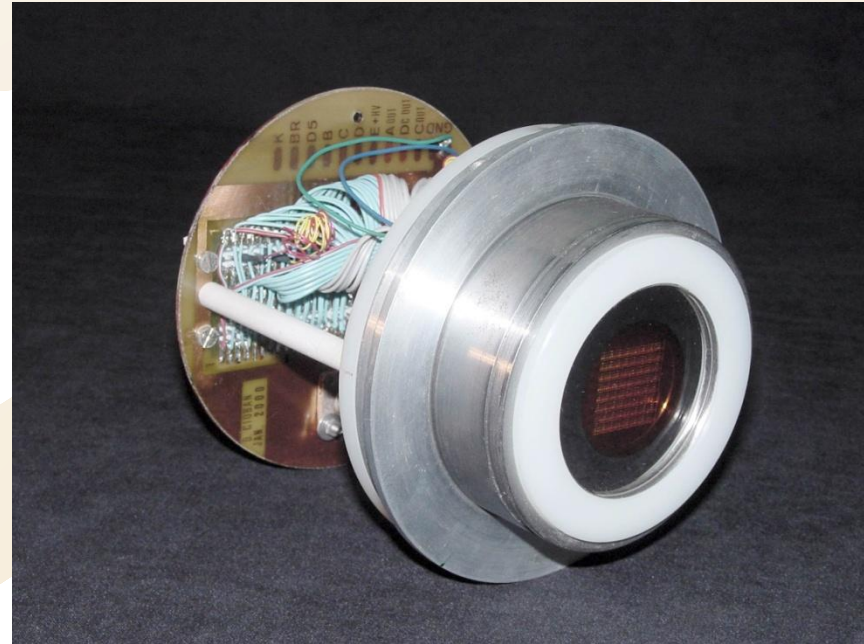
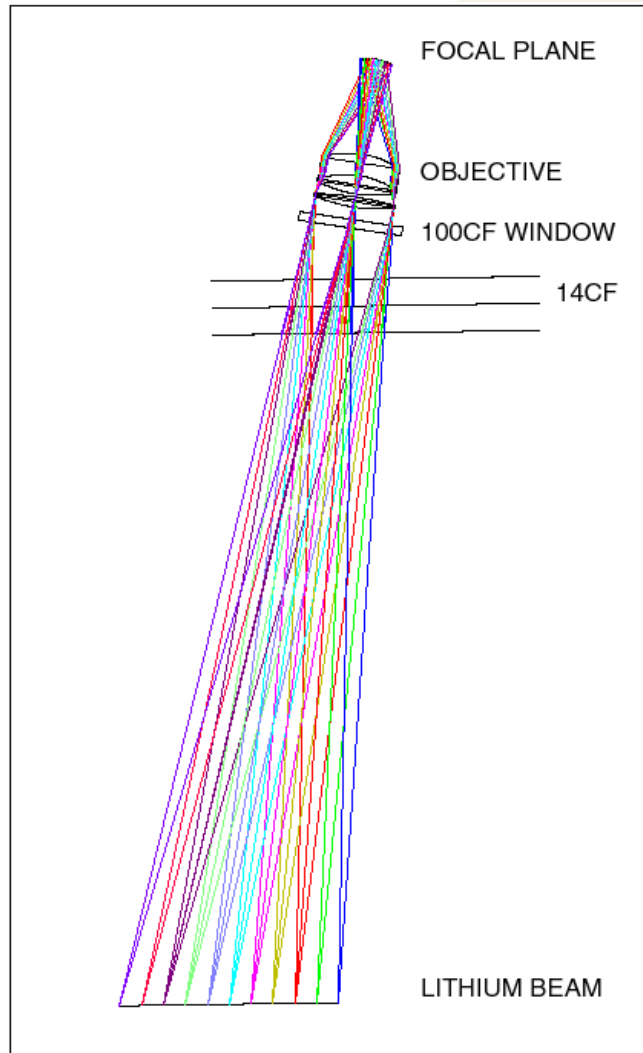
- Técnica multiponto baseada em retardo temporal obtido com a propagação da luz em fibras de diferentes comprimentos
- Permite medição simultânea de perfis de temperatura e densidade
- 10 posições espaciais por policromador

Diagnósticos – sondagem por feixe neutro rápido de Li



- Usa feixe neutro de lítio (10 kV, 350 μA) para medir a densidade do plasma na borda e suas flutuações.
- Medições na borda do plasma do ETE usando espalhamento Thomson, feixe neutro de lítio e sonda de Langmuir mostram boa concordância.

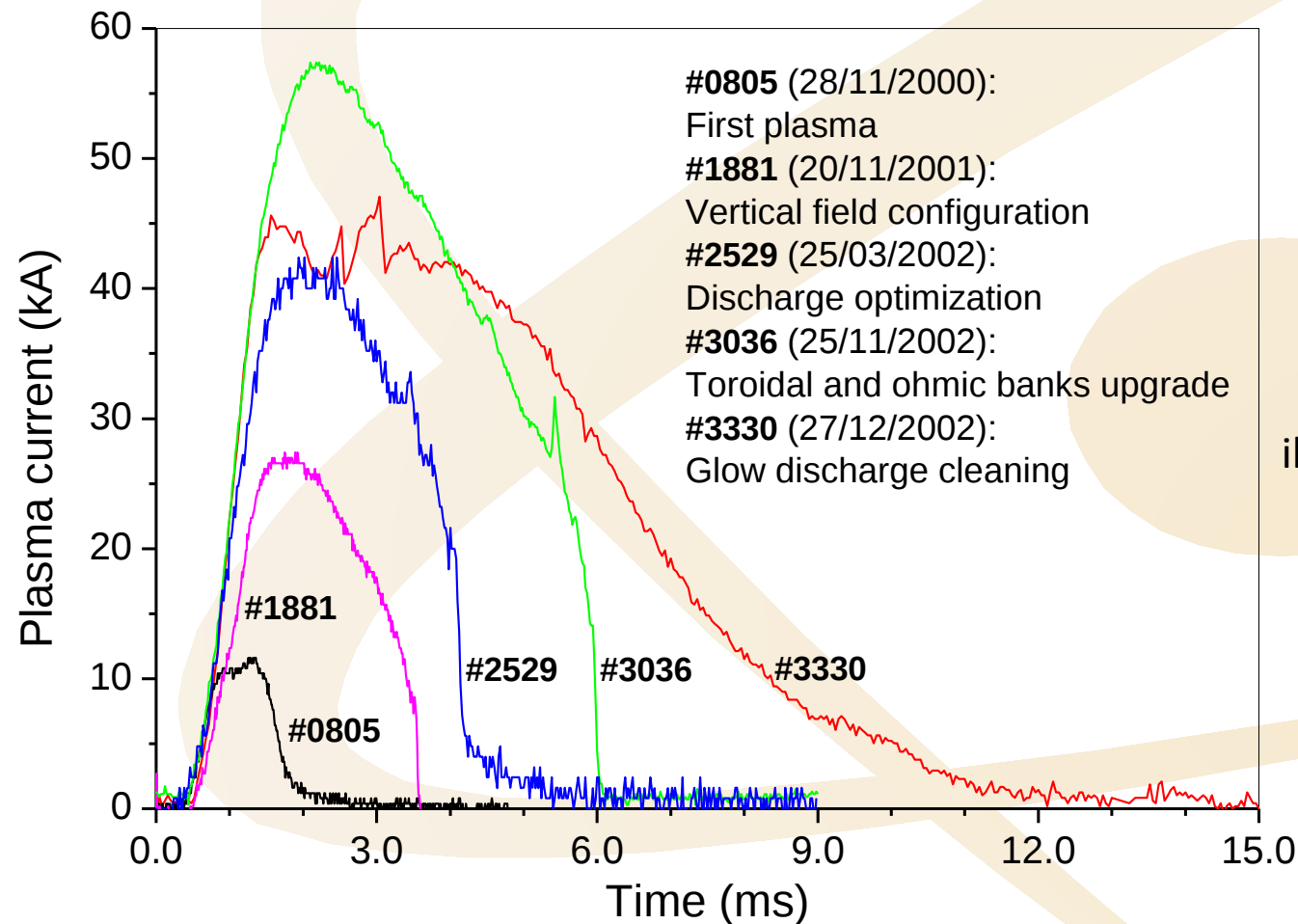
Diagnósticos – sondagem por feixe neutro rápido de Li



- Sistema concebido para medição em 8 posições radiais
- Óptica já desenvolvida
- Fotomultiplicadora multicanal (8 x 8) disponível
- **Requer finalização**

Preparação do ETE – Otimização do Plasma

Objetivo: durante a implementação das melhorias descritas é preciso manter uma rotina de operação constante da máquina para validá-las, verificando seu efeito na formação ou caracterização do plasma, além da condução de pesquisas em física de tokamaks.



Evolução da corrente de plasma durante os primeiros anos de operação do ETE, que ilustra bem o processo de otimização da descarga

Preparação do ETE – Otimização do Plasma

Parameters esperados no ETE com
300 kW de aquecimento auxiliar
(2ª fase)

Major radius $R_0 = 0.3$ m
Minor radius $a = 0.2$ m
Aspect ratio $A = 1.5$
Elongation $\kappa = 1.8$
Triangularity $\delta = 0.3$
Magnetic field $B_0 = 0.6$ T
Plasma current $I_p = 0.4$ MA
Auxiliary power $W_{aux} = 0.3$ MW
$0.1 < n_e < 0.7 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$
$800 > T_e > 150 \text{ eV}$

Para produzir boa pesquisa,
o trabalho experimental de
operação da máquina precisa
estar lastreado em um
suporte robusto nas áreas de
análise dos resultados
experimentais e estudos
teóricos

Teoria e Análise de Dados

Áreas:

- ◆ *Física de tokamaks de pequena razão de aspecto*
- ◆ *Reconstrução do equilíbrio e controle do plasma*
- ◆ *Estudos conceituais de reatores de fusão*

Teoria – Física de Tokamaks Esféricos

Estudos experimentais e teóricos da física dos plasmas de tokamaks, em particular, nas áreas de:

- ◆ ***Oscilações MHD e turbulência***
- ◆ ***Transporte de partículas na borda do plasma***
- ◆ ***Descargas em regime de elétrons fugitivos***
- ◆ ***Regimes de operação***
- ◆ ***Efeitos neoclássicos***
- ◆ ***Aquecimento por radiofrequência***

Teoria – Códigos de Simulação / Reconstrução

Desenvolvimento e utilização de códigos para modelagem de equilíbrio e simulação do plasma:

- ◆ ***Integração à geometria e características do ETE***
- ◆ ***Consideração de todas as fontes de fluxo magnético e respectivas correntes induzidas***
- ◆ ***Reconstrução do equilíbrio do plasma a partir de medidas dos campos magnéticos gerados pelo plasma e circuitos externos***
- ◆ ***Utilização no desenvolvimento de sistemas de controle da descarga***

Teoria – Estudos Conceituais de Reatores

Investigações conceituais voltados a:

- ◆ ***Estudar a viabilidade de reatores de baixa potência, com tecnologia já existente de materiais e de termo-hidráulica***
- ◆ ***Explorar sua eventual utilização como uma fonte de nêutrons (possível aplicação na produção de radioisótopos)***
- ◆ ***Utilização de pacotes de simulação de plasma tais como o CRONOS ou equivalentes (ASTRA etc)***

Preparação do ETE
para uso como
Dispositivo Inaugural do LFN
2ª Fase
(após a transferência)

Foco em Tecnologias Relevantes para a Fusão Nuclear

Áreas de interesse:

- ◆ *Bobinas magnéticas para campos intensos*
- ◆ *RF de alta potência*
- ◆ *Novos materiais estruturais e de interface com o plasma*
- ◆ *Limitadores de lítio*
- ◆ *Feixes de partículas neutras de alta energia*

Parameters esperados no ETE com
300 kW de aquecimento auxiliar
(2ª fase)

Major radius $R_0 = 0.3$ m

Minor radius $a = 0.2$ m

Aspect ratio $A = 1.5$

Elongation $\kappa = 1.8$

Triangularity $\delta = 0.3$

Magnetic field $B_0 = 0.6$ T

Plasma current $I_p = 0.4$ MA

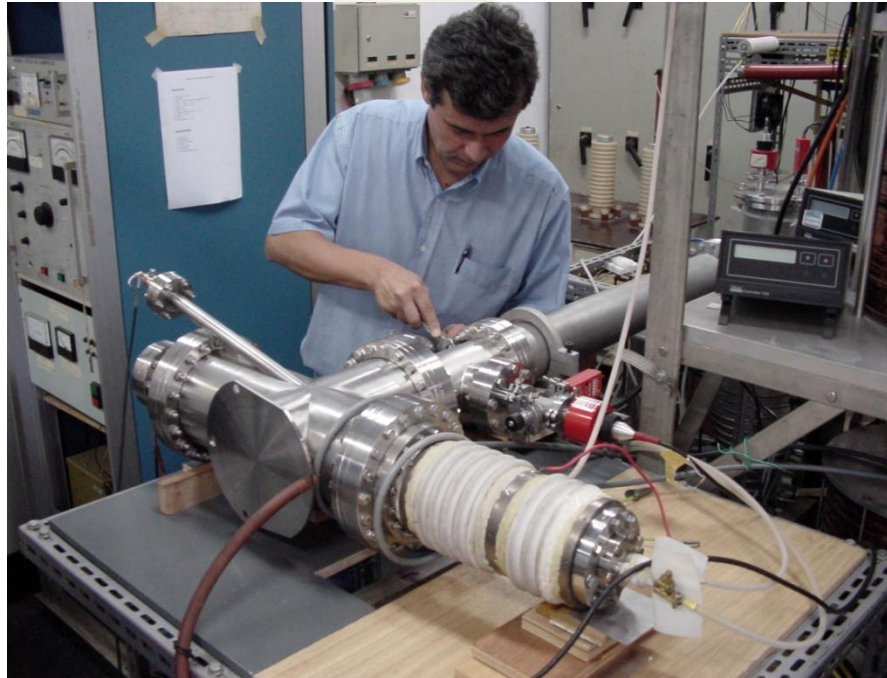
Auxiliary power $W_{aux} = 0.3$
MW

$0.1 < n_e < 0.7 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$

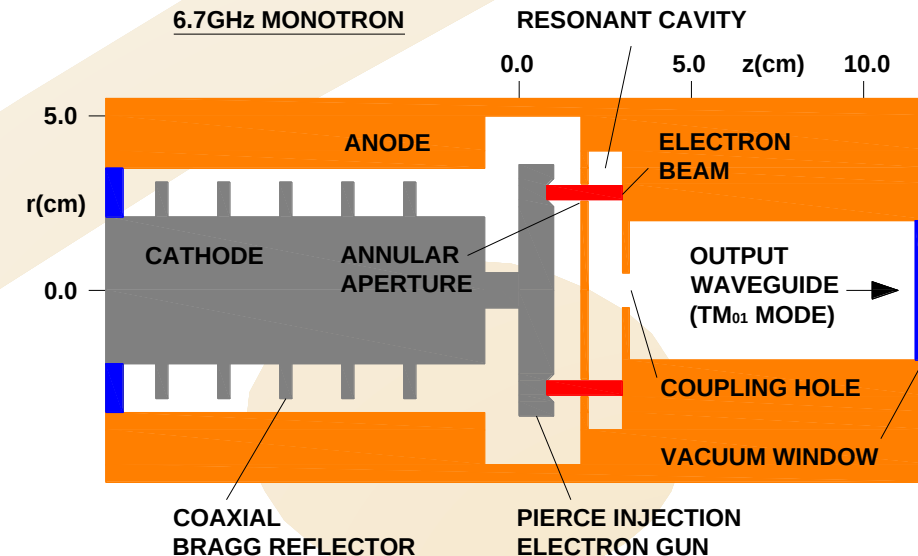
$800 > T_e > 150$ eV

Tecnologias – RF de Potência

Monotrons para pré-ionização e aquecimento de plasma no ETE



6.7 GHz, 10 kV, 10 A



Tubo de microondas simples, baseado no fenômeno de agrupamento de um feixe de elétrons cilíndrico oco (efeito de tempo de trânsito) em uma cavidade cilíndrica

Não requer campo magnético – apropriado para potências elevadas

Obrigado pela atenção!