

# A instalação em Portugal da primeira experiência de fusão nuclear: O Tokamak IST-TOK <sup>(1)</sup>

C. A. F. VARANDAS, J. T. MENDONÇA, J. A. C. CABRAL, M. P. ALONSO,  
P. AMORIM, B. B. CARVALHO, M. L. CARVALHO, H. FERNANDES, A. MALAQUIAS,  
M. E. MANSO, J. P. MATIAS, A. MOREIRA, J. L. PINTO, A. PRAXEDES, F. SERRA,  
A. SILVA, P. VARELA, S. VERGAMOTA, R. VIGÁRIO, C. J. FREITAS, A. MATEUS,  
V. PREGO e A. SOARES

Associação EURATOM/IST, Centro de Fusão Nuclear  
Instituto Superior Técnico, 1096 Lisboa Codex, Portugal

## 1. Introdução

O IST-TOK é um pequeno «tokamak» [1], caracterizado pelos seguintes parâmetros:

Raio maior	$R = 4.60 \text{ cm}$
Raio menor	$a \approx 8.0 \text{ cm}$
Raio da coluna de plasma	$a_p = 8.5 \text{ cm}$
Valor máximo do campo magnético toroidal	$(B_T)_{\max} \approx 3.0 \text{ T}$

presentemente em fase de instalação no Instituto Superior Técnico (IST) (Fig. 1), no âmbito do «Projecto IST-TOK» [2]. Este projecto está integrado no Programa Europeu de Fusão <sup>(2)</sup> e serviu de base ao estabelecimento de um Contrato de Associação entre a Comunidade Europeia da Energia Atómica (EURATOM) e o IST.

O IST-TOK foi projectado a partir da estrutura (câmara de vácuo, carapaça de cobre, transformador, bobines do campo magnético toroidal e bancos de condensadores) da antiga experiência «tokamak» TORTUR, da Associação EURATOM-FOM (Rijnhuizen), de Nieuwegein na Holanda, descontinuada em Outubro de 1988. Uma equipa de físicos, engenheiros e técnicos do Centro de Fusão Nuclear fez a desmontagem do TORTUR e está actualmente a proceder à montagem do equipamento transportado para Lisboa e ao projecto, instalação e teste dos restantes com-

ponentes do IST-TOK [3]: sistemas de vácuo, de limpeza da câmara e de injeção de gás, fonte de corrente contínua para criar o campo magnético toroidal (8000 A, 1 MW), fonte de rádio-frequência para a pré-ionização do gás (1.7 MHz, 200 W), unidade de controle de operação e sistema de aquisição de dados [4], sondas magnéticas, interferómetro de micro-ondas [5], reflectómetro de frequência fixa [5], sistema de difusão Thomson [6], diagnósticos de raios-X e analisador de deflexão iónica [7].

Convém salientar que, apesar de uma parte do equipamento do TORTUR ser utilizado no IST-TOK, se trata de uma experiência independente e conceptualmente diferente.

## 2. Objectivos do Projecto IST-TOK

Os objectivos principais do «Projecto IST-TOK» são:

(i) A criação de um pólo de atracção de estudantes e de jovens licenciados para a Física dos Plasmas e, em particular, para a Fusão Nuclear Controlada. Alguns aspectos tecnológicos e científicos do projecto servirão

<sup>(1)</sup> Comunicação apresentada na «7.ª Conferência Nacional de Física - FÍSICA 90».

<sup>(2)</sup> No Programa Europeu de Fusão participam todos os países da Comunidade Económica Europeia e ainda a Suíça e a Suécia.

de temas para a elaboração de dissertações de mestrado (nomeadamente, no mestrado em Física e Engenharia dos Plasmas) e de doutoramento.

(ii) A formação experimental de pessoal técnico e investigador nas áreas tecnológicas associadas à fusão nuclear (tecnologia de vácuo, electrónica de potência, micro-ondas, electrónica rápida, óptica aplicada, espectroscopia, materiais, controle, aquisição de dados e processamento de sinais) e nas técnicas utilizadas no diagnóstico do plasma.

(iii) O desenvolvimento de novas técnicas de diagnóstico. A título de exemplo podemos referir a construção de um analisador da deflexão de um feixe iónico, duplamente ionizado, obtido a partir das colisões dos electrões do plasma com um feixe de iões metálicos (sódio<sup>+</sup>, potássio<sup>+</sup> ou cézio<sup>+</sup>) que incide no plasma [7]. Este diagnóstico permite determinar a densidade do plasma (a partir do número de iões recolhidos), o campo magnético poloidal (a partir do desvio toroidal do feixe) e o potencial do plasma (através da

variação da energia do feixe). Estas medidas podem ser resolvidas no tempo e no espaço (variando o ângulo de incidência e a energia do feixe iónico).

(iv) A execução de um programa científico, autónomo, com interesse para o Programa Europeu de Fusão e adaptado às características do IST-TOK e às limitações no valor do campo magnético toroidal ( $0.3 \leq B_T \leq 0.6$  T) resultantes da energia que a EDP-Electricidade de Portugal pode, neste momento, disponibilizar para o projecto.

### 3. Programa Científico

A execução do programa científico pode ser dividida em duas fases correspondentes à operação do IST-TOK em regime óhmico puro (1.<sup>a</sup> fase) ou em regime não indutivo com geração de corrente por ondas electrociclónicas (2.<sup>a</sup> fase). Na primeira fase procederemos à montagem do «tokamak», à reprodução dos resultados experimentais obtidos por investigadores portugueses na Holanda, ope-

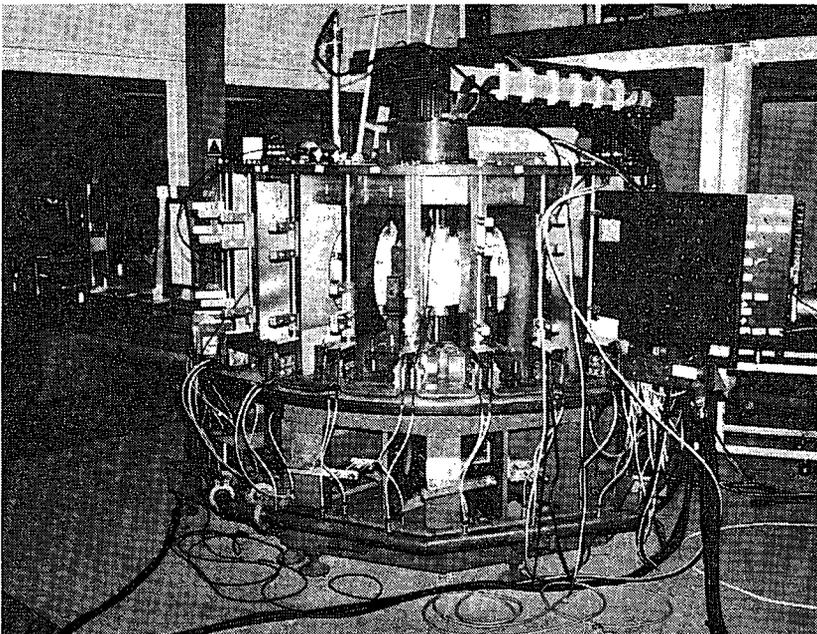


Fig. 1 — Vista parcial do tokamak IST-TOK.

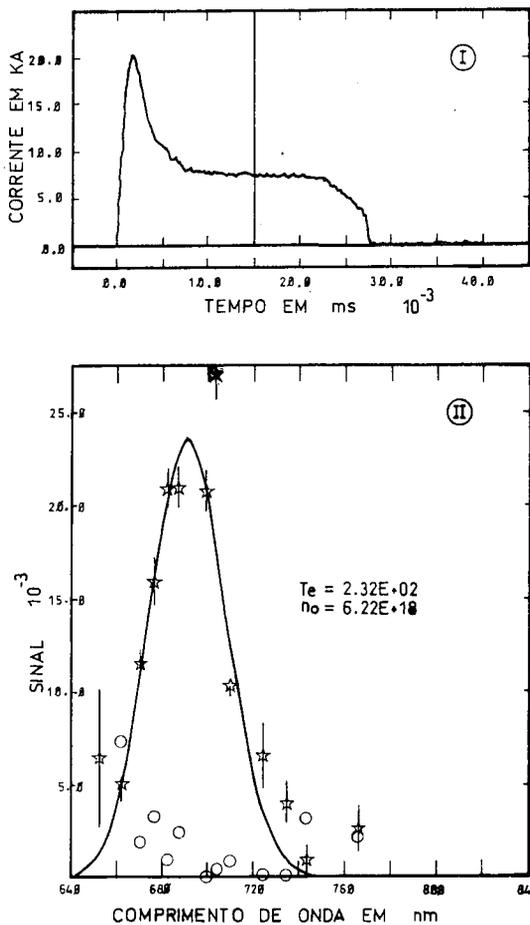


Fig. 2 — Variação no tempo da corrente do plasma (I) e espectros dos sinais obtidos com o diagnóstico de Thomson scattering (II) para determinação, em  $r = 15$  mm e  $t = 15$  ms, da densidade do plasma e da temperatura electrónica.

rando o TORTUR em condições semelhantes às do IST-TOK ( $B_T \approx 0.45$  T) (Fig. 2),

Densidade do plasma	$n_0 \approx 6 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$
Temperatura electrónica	$T_e \approx 230 \text{ eV}$
Duração da descarga	$\tau \approx 20 \text{ ms}$

à optimização dos parâmetros da descarga (variando, nomeadamente, o campo magnético vertical e as condições de injeção do gás durante a descarga), ao estudo da resposta do plasma a perturbações magnéticas do tipo  $m = 2, n = 1$ , geradas por uma bobine exterior percorrida por uma corrente da ordem

de 10 % da corrente do plasma [8], e ao desenvolvimento do diagnóstico de deflexão iónica descrito anteriormente. Na segunda fase procederemos à geração de corrente por ondas electrociclótónicas [9], com frequência (28 GHz) aproximadamente igual ao dobro da frequência electrociclótónica ( $B_T \approx 0.6$  T), injectadas do lado exterior da câmara de vácuo. Experiências feitas em «tokamaks» com parâmetros semelhantes aos do IST-TOK permitem prever uma eficiência da ordem de  $10^{-3}$ , o que significa que obteremos uma corrente do plasma de cerca de 3 kA com uma potência injectada de 100 kW. Os valores da potência a injectar e da duração da descarga estão limitados pelas condições de dissipação de energia pelas paredes da câmara de vácuo. Um estudo calorimétrico simples permitiu concluir que a temperatura das paredes aumenta  $0.5^\circ\text{C}$  por segundo e por cada kW de potência injectada. Considerando que a temperatura máxima admissível pelas paredes da câmara é da ordem de 150 a  $200^\circ\text{C}$  concluimos que injectando 100 kW não podemos, nas condições actuais, obter descargas com durações superiores a 3 a 4 s. Nesta fase do projecto estudaremos ainda os efeitos sinérgicos entre a geração de corrente não indutiva e a estabilização da actividade magneto-hidrodinâmica em  $m = 2, n = 1$ , as condições para o aumento da duração da descarga (através, nomeadamente, da instalação de um circuito de arrefecimento a água na carapaça de cobre ou do projecto de uma nova câmara de vácuo), a influência do perfil de corrente no valor do  $\beta_{\text{limite}}$  [10] e os mecanismos de transporte iónico em plasmas de fusão, usando técnicas de espectroscopia e de fluorescência induzida por laser.

#### 4. Execução do Projecto

A equipa responsável pela execução do «Projecto IST-TOK» integra vinte e um doutorados, dezoito estudantes de doutoramento, nove estudantes, dois engenheiros, quatro técnicos e três funcionárias administrativas, pertencentes ao Instituto Superior Técnico,

ao Centro de Electrodinâmica, à Universidade de Aveiro, à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

A duração de cada fase do projecto é de três anos, com início em 1 de Janeiro de 1990. A obtenção dos primeiros resultados experimentais está prevista para Outubro de 1991.

O «Projecto IST-TOK» é financiado pelo Instituto Superior Técnico, pela Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica e pela EURATOM.

#### REFERÊNCIAS

- [1] WESSON, J. (1987) — «Tokamaks», Clarendon Press, Oxford.
- [2] VARANDAS, C. A. F., *et al.* (1989) — «The IST-TOK Project», Relatório interno do Centro de Fusão Nuclear.
- [3] VARANDAS, C. A. F., *et al.* (1990) — «Aspectos operacionais do funcionamento do tokamak IST-TOK», «7.<sup>a</sup> Conferência Nacional de Física - Física 90», pág. 505.
- [4] FERNANDES, H., *et al.* (1990) — «Controle de operação e aquisição de dados do tokamak IST-TOK», «7.<sup>a</sup> Conferência Nacional de Física - Física 90», pág. 135.
- [5] SILVA, A., *et al.* (1990) — «Diagnóstico de micro-ondas para o tokamak IST-TOK», «7.<sup>a</sup> Conferência Nacional de Física - Física 90», pág. 133.
- [6] VIGÁRIO, R. A., *et al.* (1990) — «Thomson scattering no tokamak IST-TOK», «7.<sup>a</sup> Conferência Nacional de Física - Física 90», pág. 137.
- [7] MENDANHA DIAS, J. A., *et al.* (1990) — «Colisões feixe-plasma/Diagnóstico IST-TOK», «7.<sup>a</sup> Conferência Nacional de Física - Física 90», pág. 141.
- [8] VANNUCI, A., NASCIMENTO, I. C. e CALDAS, I. L. (1988) — «Disruptive instabilities in the discharges of the TBR-1 small tokamaks», IFUSP/P-736, São Paulo, Brasil.
- [9] N. J. FISCH, N. J. e BOOZER, A. M. (1980) — Phys. Rev. Letters 5,4 720.
- [10] TROYON, F., *et al.* (1984) — Plasma Physics and Controlled Fusion 26, 209.

## FÍSICA 92 — 8.<sup>a</sup> Conferência Nacional de Física

### 2.<sup>o</sup> Encontro Ibérico para o Ensino de Física

A Delegação Regional Norte da Sociedade Portuguesa de Física vai organizar a 8.<sup>a</sup> Conferência Nacional de Física - Física 92, a realizar de 15 a 18 de Setembro de 1992, na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real. A Física-92 terá como Conferência Satélite o 2.<sup>o</sup> Encontro Ibérico para o Ensino de Física, numa organização conjunta da Real Sociedad Española de Física (R.S.E.F.) e da Sociedade Portuguesa de Física (S.P.F.).

Brevemente será enviada para as diferentes instituições de Ensino do nosso país, e para todos os sócios da S.P.F., a 1.<sup>a</sup> circular de Física 92, juntamente com um boletim de pré-inscrição para a referida Conferência.

*Até 31 de Março 1992:*

Recepção de resumos das comunicações para a Física 92 (máximo 2 páginas A4)

*Enviar para:*

Comissão Executiva - Física 92  
Laboratório de Física - Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, P-4000 Porto

*Informações:*

Sociedade Portuguesa de Física  
Delegação Regional do Norte  
Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, P-4000 Porto  
Tel. 02 - 310290 ext. 232, Fax. (02) 319267