

A Investigação e o Ensino da Física de Plasmas em Portugal

C. A. F. VARANDAS

Departamento de Física do Instituto Superior Técnico
Centro de Electrodinâmica da Universidade Técnica de Lisboa

O início do ensino da Física de Plasmas no Instituto Superior Técnico e a recente adesão de Portugal aos programas comunitários de fusão nuclear controlada vieram chamar a atenção para a importância da Física de Plasmas na investigação fundamental em física moderna e no desenvolvimento de novas tecnologias. Neste trabalho enunciamos algumas das aplicações da Física de Plasmas e fazemos referência à sua investigação e ao seu ensino em Portugal.

1. Introdução

O interesse no estudo sistemático da Física de Plasmas iniciou-se no princípio da década de 50 com a apresentação dos primeiros projectos que previam a construção de reactores de fusão nuclear controlada [1] e com o advento da Física Espacial (pensa-se hoje que mais de 99 % da matéria do Universo está no estado de plasma, isto é, na forma de um gás ionizado, electricamente neutro à escala macroscópica, com comportamento colectivo [2, 3]).

A Física de Plasmas desempenha actualmente um papel importante em numerosos sectores da física moderna, nomeadamente, em Física do Estado Sólido, Astrofísica, Geofísica e Cosmologia (estudo da ionosfera, magnetosfera e atmosfera terrestres, do vento solar, do interior e da atmosfera das estrelas, das cinturas de radiação de Van Allen, do gás interestelar) e tem igualmente várias aplicações tecnológicas importantes, como por exemplo:

- Fusão nuclear controlada.
- Electrónica dos gases.
- Conversão magnetohidrodinâmica e termoiónica de energia.
- Motores para a propulsão e controlo de altitude de satélites.
- Comunicações em onda-curta via ionosfera.

- Síntese de compostos químicos.
- Laser de gás.
- Aceleradores e geradores a plasma (clitrons, magnetrons, orbitrons e girotrons).
- Soldadura, disjuntor e centrifugadora a plasma.
- Tratamento e processamento de materiais e superfícies.
- Écrans para terminais de computador.

2. A investigação em Física de Plasmas em Portugal

A investigação em Física de Plasmas em Portugal reduz-se ao Centro de Electrodinâmica da Universidade Técnica de Lisboa (CEL) e ao Laboratório Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial (LNETI).

No LNETI existe um único grupo, com um doutorado, trabalhando em espectroscopia de descargas luminescentes, e anuncia-se a constituição de um novo grupo vocacionado para o estudo de aspectos tecnológicos ligados à fusão nuclear controlada [4].

O Centro de Electrodinâmica [5] foi criado em 1975 na sequência de projectos da extinta Comissão de Estudos de Energia Nuclear do Instituto de Alta Cultura, está localizado no Complexo Interdisciplinar e tem sido subsidiado

pelo Instituto Nacional de Investigação Científica (INIC) e pelo Instituto Superior Técnico (IST). Neste Centro trabalham actualmente doze investigadores doutorados, nove investigadores não doutorados, três alunos bolseiros, três técnicos de laboratório e um técnico administrativo. Os investigadores do CEL são contratados pelo INIC (dois) e pelo IST através dos Departamentos de Engenharia Electrotécnica e de Computadores (nove), Física (oito) e Matemática (dois). Os graus académicos de Doutor foram obtidos em Inglaterra (três), França (dois), Estados Unidos da América do Norte (um), Holanda (um) e Portugal (cinco). O Centro de Electrodinâmica dispõe actualmente de seis instalações experimentais, de três micro-computadores, de dois terminais gráficos ligados à rede de cálculo do Centro de Informática do IST, de uma biblioteca com cerca de 1200 obras e de uma pequena oficina. A actividade experimental do CEL tem vindo a ser descrita no «World Survey of Major Facilities in Controlled Fusion Research» [6], publicado pela Agência Internacional de Energia Atómica, enquanto que o trabalho teórico tem sido divulgado no «Theoretical Work in European Plasma Physics Laboratories» [7], editado pela Comissão Económica Europeia.

Apresentamos, em seguida, um breve resumo da actividade científica em curso no Centro de Electrodinâmica, a qual está organizada em cinco Linhas de Acção e no Grupo de Fusão Nuclear Controlada.

2.1. Turbulência em plasmas

Esta Linha de Acção é dirigida pelo Doutor Tito Mendonça e engloba os seguintes projectos:

- Teorias da turbulência plasma.
- Experiências de aceleração e caos.
- Experiências em descargas; solitões e instabilidades.

O primeiro projecto é de índole teórica e pretende alcançar uma visão global dos fenómenos turbulentos.

O objecto do segundo projecto é o estudo experimental de plasmas turbulentos que possam ser interpretados com a ajuda de sistemas

dinâmicos não integráveis. Em particular, pretende-se estudar a transição de regime numa experiência de interacção feixe-plasma e pôr em evidência experimental um mecanismo de aceleração dos raios cósmicos, já estudado do ponto de vista teórico.

O objectivo do terceiro projecto é o estudo experimental de plasmas turbulentos que possam ser interpretados com modelos analíticos integráveis. Foi já possível estudar uma instabilidade de banda lateral numa configuração experimental do tipo condensador plano. Actualmente estuda-se a propagação de uma perturbação que evolui como um solitão electrónico, com velocidade de propagação próxima da velocidade térmica electrónica, num plasma ($n_0 \approx 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, $T_e \approx 5 \text{ eV}$) de Argon ($p_{\text{Ar}} \approx 10^{-1} \text{ Torr}$) criado num tubo de vidro ($L = 120 \text{ cm}$, $\phi = 3.5 \text{ cm}$, $p_0 \approx 10^{-4} \text{ Torr}$) por uma descarga entre dois eléctrodos (Fig. 1). A descarga

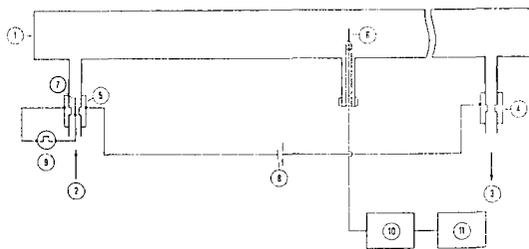


Fig. 1—Descarga luminiscente: 1—Tubo de vidro; 2—Entrada de gás; 3—Sistema de vácuo; 4—Ânodo; 5—Cátodo; 6—Sonda; 7—Electrodo auxiliar; 8—Fonte de alimentação; 9—Gerador de impulsos; 10—Osciloscópio; 11—Micro-computador.

arranca com uma tensão típica de 3 kV e funciona em regime estacionário com tensões da ordem de 700 a 800 V e correntes de 10 a 40 mA. Este projecto dispõe ainda de uma segunda instalação experimental (Fig. 2), constituída por um tubo de vidro ($L = 45 \text{ cm}$, $\phi = 33 \text{ cm}$, $p_0 \approx 10^{-5} \text{ Torr}$) no qual um plasma de Argon ($p_{\text{Ar}} \approx 10^{-4} \text{ Torr}$) é criado por uma descarga entre um filamento e os suportes metálicos dos ímans magnéticos, situados longitudinalmente na parede do tubo. Estes ímans têm os polos do mesmo nome orientados

na mesma direcção em cada suporte e em direcções opostas em suportes adjacentes. O campo magnético assim obtido apenas tem valores significativos na periferia ($B_0 \approx 140$ Gauss), diminuindo rapidamente para valores

- Evolução não linear da interacção ciclo-trónica entre silvos e electrões.
- Ondas não lineares em plasmas e outros meios dispersivos.

O primeiro projecto visa a interpretação teórica dos dados recolhidos pelos três satélites colocados em orbita no âmbito do projecto AMPTE («Active Magnetospheric Particle Tracer Explorers») e tem como objectivos principais:

- a) Caracterização da turbulência da bainha geomagnética.
- b) Modelização numérica do efeito da turbulência no transporte de iões pesados.
- c) Estudo do trânsito dos iões pesados através da magnetosfera.

O segundo projecto desenvolve-se em colaboração com o laboratório STAR da Universidade de Stanford, que faculta o acesso aos resultados experimentais obtidos com a estação polar de Siple, e pretende interpretar a fenomenologia resultante da acção simultânea de várias ondas sobre os electrões energéticos das cinturas de radiação de Van Allen.

No terceiro projecto estuda-se o equilíbrio, a estabilidade e a interacção de ondas superluminosas de grande amplitude.

2.3. Criação, diagnóstico e utilização de plasmas de laboratório

Esta Linha de Acção é dirigida pelo Doutor José Cabral e engloba os seguintes projectos:

- Ondas e instabilidades na experiência de interacção feixe-plasma.
- Ondas e instabilidades num plasma de radio-freqüência.
- Ondas e instabilidades na chamada «Q-machine».
- Instabilidades iónicas associadas a potenciais electrostáticos em plasmas.
- Ondas e instabilidades em meios inhomogéneos.

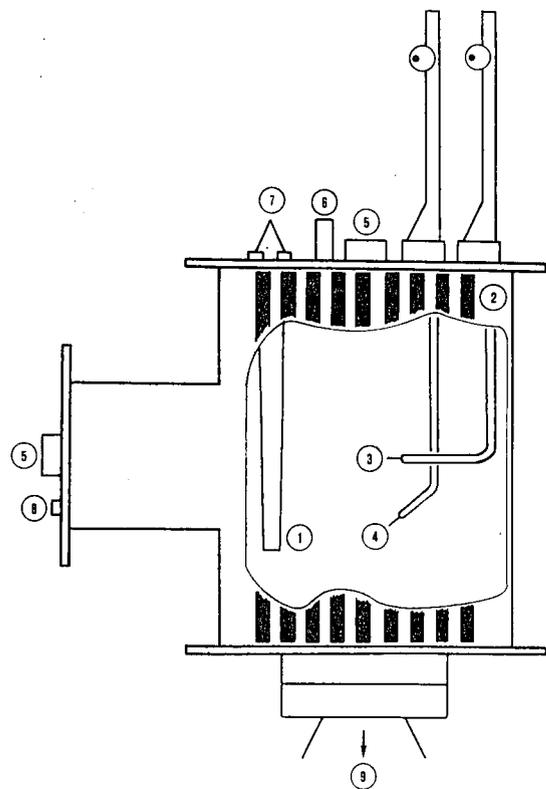


Fig. 2—Descarga multipolar: 1—Filamento; 2—Suporte dos ímans; 3—Sonda móvel; 4—Sonda fixa; 5—Janela; 6—Manómetro; 7—Fonte de alimentação; 8—Entrada de gás; 9—Sistema de vácuo.

menores de r . Deste modo a experiência permite obter um plasma ($n_0 \approx 10^9$ cm⁻³, $T_e \approx 8$ eV) confinado em volume numa região onde o campo magnético é praticamente nulo.

2.2. Propagação em meios activos

Esta Linha de Acção é dirigida pelo Doutor Armando Brinca e engloba os seguintes projectos:

- Transporte de iões pesados no sistema vento solar-magnetosfera.

O primeiro projecto desenvolve-se numa máquina de interacção feixe-plasma (Fig. 3), constituída por um guia cilíndrico ($L=75$ cm, $\phi=8$ cm, $p_0 \approx 10^{-6}$ Torr), no qual um plasma de baixa densidade ($n_0 \approx 10^9$ cm $^{-3}$) e de pequena temperatura ($T_e = 4$ a 8 eV) é criado pelas colisões inelásticas dos electrões de um feixe ($U_b=2$ keV; $i_b=0$ a 20 mA) com os átomos de um gás raro (normalmente Hélio,

O segundo projecto desenvolve-se num guia cilíndrico ($L=100$ cm, $\phi=10$ cm, $p_0 \approx 10^{-6}$ Torr), imerso num campo magnético axial ($B_0 \approx 150$ a 300 Gauss), onde um plasma ($n_0 \approx 0.2$ a 8×10^9 cm $^{-3}$, $T_e=4$ a 6 eV) é criado por ionização de radio-frequência dos átomos de Argon ($p_{Ar}=6 \times 10^{-4}$ a 4×10^{-3} Torr) através de uma pequena bobina ($L=5$ cm, $\phi=2.5$ cm) alimentada a 15 MHz com uma

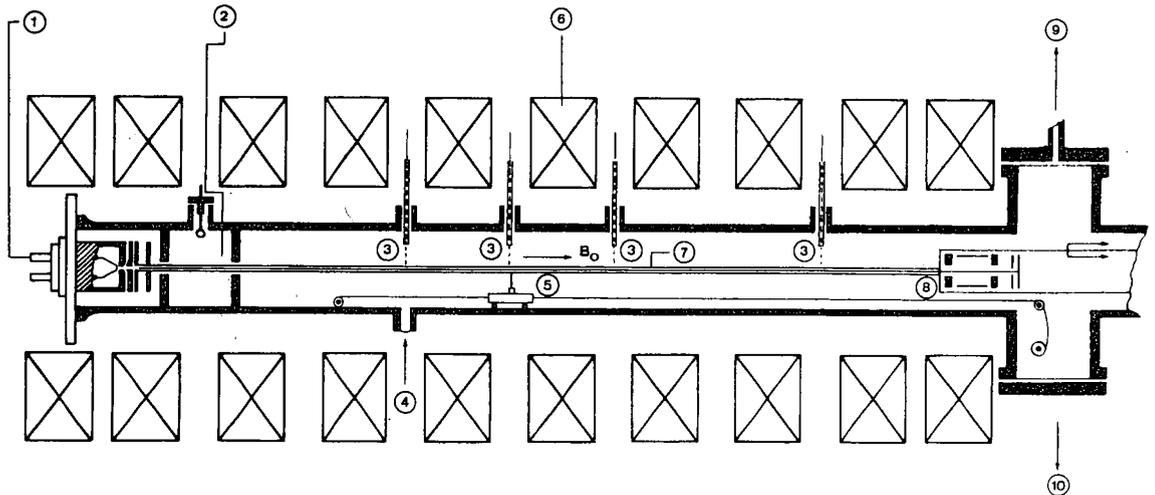


Fig. 3—Sistema de interacção feixe-plasma: 1—Canhão electrónico; 2—Cavidade ressonante electromagnética; 3—Sonda móvel em r ; 4—Entrada de gás; 5—Sonda móvel em z ; 6—Bobina de criação do campo magnético; 7—Feixe electrónico; 8—Analisador electrostático de energia; 9—Manómetro de ionização; 10—Sistema de vácuo.

a pressões da ordem de 10^{-3} Torr), num campo magnético axial e praticamente homogéneo ($B_0=50$ a 300 Gauss). As áreas científicas a estudar são:

- a) Desenvolvimento não linear da instabilidade electrociclónica.
- b) Estatísticas de amplitude e de intervalos de tempo dos sinais recolhidos por uma sonda.
- c) Regimes turbulentos da interacção feixe-plasma.
- d) Modificações dos espectros das instabilidades em sistemas feixe-plasma com duas espécies de iões.
- e) Modificações dos espectros e das funções de distribuição de velocidades dos electrões e dos iões por aplicação continuada ou pulsada de potenciais electrostáticos ao plasma.

potência típica de 10 W. Deste modo obtemos colunas de plasma magnetizado e confinado, com fortes gradientes longitudinais de densidade. As áreas científicas a considerar são:

- a) Características de propagação e mecanismos não lineares de interacção entre ondas electrónicas e iónicas.
- b) Transformação linear e não linear de modos.
- c) Propagação de ondas electrostáticas e sua transformação em ondas electromagnéticas perto das ressonâncias do sistema.
- d) Características de propagação de ondas superficiais com frequências muito menores que a frequência de corte do guia.
- e) Compensação do gradiente axial de densidade através de uma estrutura de campo magnético adequada.

O terceiro projecto desenvolve-se na chamada «Q-machine», constituída por um guia cilíndrico ($L=100$ cm, $\phi=10$ cm, $p_0 \approx 10^{-8}$ Torr) imerso num campo magnético axial ($B_0 \approx 1500$ a 2000 Gauss) no qual um plasma ($n_0 \approx 10^9$ cm $^{-3}$, $T_e=T_i \approx 0.1$ eV) é criado por ionização de contacto dos vapores de potássio numa placa de tântalo aquecida uniformemente pelo seu bombardeamento por um feixe de electrões. As áreas científicas a considerar são:

a) Características de propagação das diversas ondas, electrónicas e iónicas, em plasmas quiescentes.

b) Regimes transientes associados à súbita injeção de ondas.

c) Colisão entre um plasma quiescente de potássio e um outro criado em regime pulsado por uma descarga de radio-frequência em Argon.

O quarto projecto desenvolve-se nas experiências atrás descritas e tem como objectivos o estudo da formação de potenciais electrostáticos em plasmas e das instabilidades iónicas excitadas por estes potenciais. As áreas científicas a considerar são:

a) Condições de formação de potenciais electrostáticos.

b) Controlo das distribuições de potencial através das funções de distribuição das velocidades dos iões e dos electrões.

c) Criação de duplas camadas e células convectivas.

d) Identificação das instabilidades iónicas e estudo dos efeitos não lineares associados à sua propagação.

O último projecto é de índole essencialmente experimental e tem por objectivo o estudo da interacção feixe-plasma em configurações magnéticas com interesse para as máquinas de fusão nuclear controlada (espelhos e praias magnéticas). As áreas científicas a considerar são:

- Identificação e mecanismos de excitação das instabilidades electrónicas e iónicas.
- Processos de transferência de energia do feixe para o plasma.

Os resultados experimentais são interpretados, na aproximação de WKB, através de códigos numéricos que simulam o desenvolvimento linear da interacção feixe-plasma.

2.4. Propagação e radiação de ondas electromagnéticas. Aspectos fundamentais. Aplicações

Esta Linha de Acção é dirigida pelo Professor Abreu Faro e engloba um único projecto no âmbito da Física de Plasmas:

- Magnetosfera de pulsares e mecanismos de radiação associados.

O objectivo fundamental deste projecto, feito em colaboração com a Universidade de Manchester, é a investigação da estrutura da magnetosfera duma estrela neutrónica em rotação rápida visando a explicação das observações efectuadas em vários domínios do espectro de frequência das ondas electromagnéticas recebidas.

2.5. Descargas em gases. Electrónica dos gases

Esta Linha de Acção é dirigida pelo Doutor Matos Ferreira e engloba os seguintes projectos:

- Modelização de descargas luminescentes em gases moleculares.
- Plasmas produzidos por campos RF, HF e micro-ondas.
- Descargas de arco de cátodo oco.

O primeiro projecto tem por objectivo o estudo teórico da cinética das descargas estacionárias de gases moleculares, tendo em consideração o forte acoplamento entre os modos de vibração do estado electrónico fundamental do gás e a distribuição de energia dos electrões.

O segundo projecto insere-se no âmbito duma colaboração internacional em que participam equipas experimentais em Orsay (França) e Montreal (Canadá) e pretende estudar os mecanismos de manutenção e as propriedades dos plasmas produzidos por campos alternados, tendo em vista as suas aplicações nos domínios dos Lasers, do tratamento de materiais e de superfícies e da gravura a plasma para a microelectrónica.

O terceiro projecto visa o estudo experimental e teórico de uma descarga de cátodo oco, de corrente elevada (até 200 A), confinada por um campo magnético, tendo em vista caracterizar as propriedades do plasma produzido (densidade do plasma, temperaturas electrónica e iónica e espécies excitadas) e os mecanismos de funcionamento do arco ao nível da zona catódica. Este projecto dispõe de uma montagem experimental (Fig. 4), totalmente construída em Portugal, constituída por um tubo de vácuo em aço ($L=500$ cm, $\phi=30$ cm, $p_0 \approx 10^{-5}$ Torr) no qual se cria um plasma de Argon ($p_{Ar} \approx 10^{-3}$ Torr) de elevada densi-

(ii) Colaborar na elaboração de um programa nacional de investigação dos problemas relacionados com os futuros reactores.

(iii) Estabelecer projectos de colaboração com laboratórios europeus no âmbito do programa de investigação da European Atomic Energy Community (EURATOM).

Este Grupo é dirigido pelo Doutor Tito Mendonça e engloba os seguintes projectos:

- Reactores em regime contínuo.
- Descarga toroidal.
- Geradores de alta frequência e de elevada potência.

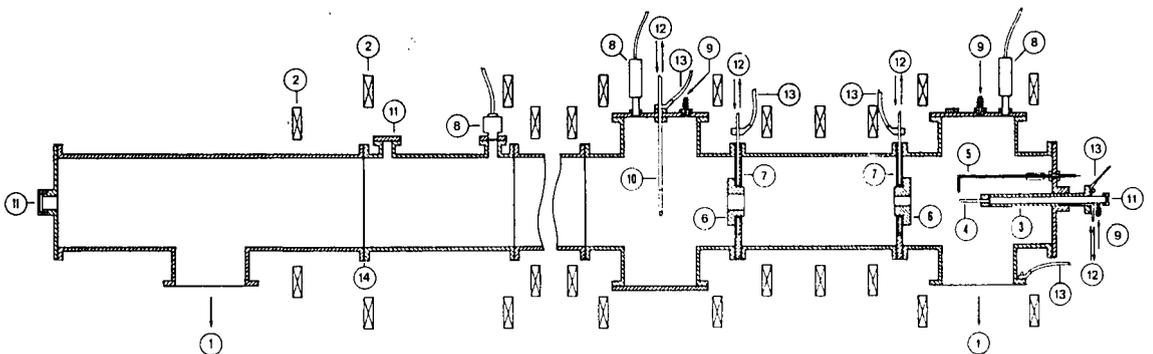


Fig. 4—Descarga de cátodo oco: 1—Sistema de vácuo; 2—Bobina de criação do campo magnético; 3—Suporte do cátodo; 4—Cátodo; 5—Sonda rotativa; 6—Estrangulamento; 7—Suporte; 8—Manómetro; 9—Entrada de gás; 10—Ânodo; 11—Janela; 12—Circuito de água de refrigeração; 13—Ligações eléctricas; 14—Junta.

dade ($n_0 \approx 10^{14}$ cm $^{-3}$) e de baixa temperatura ($T_e \approx 5$ eV) através de uma descarga entre um ânodo e um cátodo oco, num campo magnético axial e uniforme de 200 Gauss. Esta descarga arranca com tensões típicas de 1 kV e trabalha em regime contínuo com tensões da ordem de 80 a 100 V e correntes da ordem de 200 A.

2.6. Fusão Nuclear Controlada

O Grupo de Fusão Nuclear Controlada [8] foi recentemente criado com os seguintes objectivos:

(i) Sistematizar os trabalhos relacionados com a fusão nuclear que vinham a ser realizados nas diversas Linhas de Acção.

O primeiro projecto é de índole essencialmente teórica e destina-se a aprofundar o conhecimento dos vários mecanismos de geração de correntes em Tokamaks, através de feixes electromagnéticos na gama das radio-freqüências. Em particular, pretende-se estudar um novo mecanismo em que a corrente é originada por um modo electrostático ou electromagnético resultante do batimento não linear de duas ondas electromagnéticas. Após a elaboração de códigos numéricos que permitam testar as várias situações experimentais, a eficiência deste mecanismo será testada numa máquina linear (a chamada «Q-machine») e numa descarga toroidal.

O segundo projecto é de índole experimental, com uma forte componente tecnológica, e o seu objectivo é a construção de uma

Tabela 1 — Disciplinas de Física de Plasmas dos currícula das licenciaturas de Engenharia Física Tecnológica (EFT) e Engenharia Electrotécnica e de Computadores (EEC) e do mestrado em Física (MF).

	NOME DA DISCIPLINA	S	T
EFT	Introdução à Física de Plasmas	8	Ob
	Física Experimental IV	8	Ob
	Ondas e Instabilidade em Plasmas	9	AE
	Descargas em Gases	9	AE
	Física Atómica e Molecular dos Plasmas	10	AE
	Fusão Termonuclear	10	AE
	Projecto	9 e 10	AE
EEC	Propagação em Meios Ionizados	9	Op
MF	Ondas e Turbulência em Plasmas	3	AE
	Electrónica nos Gases	3	AE
	Técnicas de Diagnóstico de Plasmas	3	AE
	Seminários sobre os seguintes temas:	4	AE
	Descargas em Gases		
	Interacção Plasmas-Superfície		
	Lasers de Plasmas		
	Fusão Termonuclear		
	Plasmas Geofísicos		
	Propagação de Ondas em Plasmas Inhomogéneos		

S...Semestre; T...Tipo de aula

Ob...Obrigatória; AE...Área de Especialização; Op...Opção

pequena experiência toroidal. Nesta máquina pretendem-se estudar alguns problemas relacionados com os reactores deste tipo, nomeadamente a estabilidade magnetohidrodinâmica e o aquecimento de radio-frequência, e testar novos métodos de diagnóstico de plasmas de fusão.

O terceiro projecto tem igualmente uma forte componente tecnológica já que o seu objectivo principal é a concepção e a construção de um gerador de potência (1 KW) na gama das ondas milimétricas (35 a 70 GHz).

3. O ensino da Física de Plasmas em Portugal

O ensino da Física de Plasmas em Portugal reduz-se ao Instituto Superior Técnico, nas licenciaturas de Engenharia Electrónica e de Computadores e Engenharia Física Tecnológica e no mestrado em Física. Este ensino iniciou-se, de uma forma sistemática, no ano

lectivo de 1985-86 com os currícula indicados na Tabela 1.

REFERÊNCIAS

- [1] A. S. BISHOP—«Project Sherwood», Addison-Wesley, Reading, Mass (1958).
- [2] F. F. CHEN—«Introduction to Plasma Physics», Plenum Press, New York (1974).
- [3] C. M. FERREIRA—Técnica, 464, 39 (1983).
- [4] J. C. OLIVEIRA—«Contribuição para a Formulação de um Plano Nacional de I & D em Fusão Nuclear», Nota Técnica do Instituto de Ciências e Engenharia Nucleares do LNETI (1986).
- [5] Os dados relativos ao Centro de Electrodinâmica foram recolhidos dos programas de acção enviados ao INIC.
- [6] «World Survey of Major Facilities in Controlled Fusion Research», International Atomic Energy Agency, Viena de Áustria (1976).
- [7] «Theoretical Work in European Plasma Physics Laboratories», Commission of the European Directorate-General XII, Fusion Programme, Brussels (1985).
- [8] J. T. MENDONÇA—«Grupo de Fusão Nuclear Controlada», Relatório interno do CEL (1986).