

1. Publicação nº <i>INPE-2962-PPr/107</i>	2. Versão	3. Data <i>Novembro, 1983</i>	5. Distribuição ☐ Interna ☐ Externa ☒ Restrita
4. Origem <i>DIR/DSI</i>			Programa
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>ATIVIDADES ESPACIAIS</i> <i>PROPOSTA FINEP, 1984</i> <i>PNAE</i>			
7. C.D.U.:			
8. Título <i>INPE-2962-PPr/107</i> <i>PROPOSTA DE FINANCIAMENTO PARA O PROJETO</i> <i>"PLASMAS"</i> <i>DO CNPq/INPE</i> <i>(VERSÃO REVISADA)</i>		10. Páginas: <i>76</i>	
		11. Última página: <i>76</i>	
		12. Revisada por	
9. Autoria <i>Elaboração: Grupo de Pesquisa e Desenvolvimento envolvido.</i> <i>Assessoria: Departamento de Sistemas Gerenciais</i> <i>Coordenação: Nelson de Jesus Parada</i> Assinatura responsável		13. Autorizada por <i>Nelson de Jesus Parada</i> Diretor Geral	
14. Resumo/Notas <i>Este documento constitui a proposta de financiamento apresentada à Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP para as atividades a serem desenvolvidas no período de janeiro a dezembro de 1984, no projeto "Plasmas" do CNPq/INPE.</i>			
15. Observações <i>O projeto se enquadra no PNAE - Programa Nacional de Atividades Espaciais. (Versão revisada em novembro de 1983)</i>			

TÍTULO DO PROJETO

PLASMAS

ÁREA DE ATUAÇÃO DO PROJETO - Indicar o campo de conhecimento ou setor econômico a que o projeto está vinculado.

ATIVIDADES ESPACIAIS

POSICIONAMENTO DO PROJETO NO CONTEXTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO - Discutir a importância do projeto, sua motivação e a oportunidade de sua execução.

O Programa de Física dos Plasmas no INPE teve início em 1978 com a proposta de criação de um grupo de pesquisa e montagem de um laboratório de plasmas. Hoje o Instituto atua intensamente no desenvolvimento desta linha de pesquisa, através da execução de diversas atividades de caráter fundamental e aplicado.

Na área de pesquisa fundamental o projeto visa, de uma maneira geral, o estudo da propagação de ondas em plasmas e a evolução de instabilidades. Estas pesquisas, relevantes para o entendimento dos fenômenos que ocorrem em vários tipos de plasmas no espaço, vem sendo executadas desde 1981, na máquina de plasma duplo. Mais especificamente, os diversos estudos realizados procuram um entendimento dos mecanismos de formação e propagação de ondas e sólitons ion-acústicos, em plasmas quiescentes com várias espécies de íons. Atualmente, está sendo montada uma máquina de plasma triplo, que permitirá a ampliação do campo de experimentos realizáveis.

Ao examinar a área de aplicações tecnológicas, destaca-se a pesquisa em plasmas term nucleares, que objetiva a obtenção, em laboratório, de plasmas quentes magnética ou inercialmente confinados. A grande motivação nesta área de pesquisa é a possibilidade de obtenção de energia abundante através da fusão controlada. Devem-se também destacar, dentre as aplicações tecnológicas, as que tratam da separação de isótopos, do desenvolvimento de fontes intensas de radiação e partículas e da propulsão iônica. Além disso, os processos experimentais utilizados nas pesquisas em Física dos Plasmas trazem, como subproduto, o desenvolvimento das técnicas de alta energia e de geração de campos magnéticos intensos, entre outras.

Na área da pesquisa aplicada, três experimentos estão em andamento no Instituto, dentro do projeto Plasmas: o primeiro é a centrífuga de plasmas, que deverá entrar em operação no primeiro semestre de 1984 e visa estudar descargas em arco elétrico magnetizado e sua utilização na separação de isótopos; o segundo trata de estudos da geração de radiação coerente por feixes de elétrons relativísticos e está sendo iniciado com o desenvolvimento do girotron (este dispositivo é uma fonte de ondas milimétricas de alta potência que será inicialmente utilizada no aquecimento de plasmas, e pode também

continua ...

TÍTULO DO PROJETO

PLASMAS

ÁREA DE ATUAÇÃO DO PROJETO - Indicar o campo de conhecimento ou setor econômico a que o projeto está vinculado.

ATIVIDADES ESPACIAIS

POSICIONAMENTO DO PROJETO NO CONTEXTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO - Discutir a importância do projeto, sua motivação e a oportunidade de sua execução.

continuação.

ser utilizado no desenvolvimento de radares e sistemas de comunicação avançados); o terceiro se insere no programa de desenvolvimento de satélites e trata da construção de um protótipo de propulsor iônico (cujos testes serão iniciados em 1984), destinado ao controle de atitude e correção de órbita de satélites geoestacionários.

Somente a parte relativa a plasmas quiescentes é objeto desta solicitação, embora uma descrição de todas as atividades do Programa seja apresentada.

O projeto visa a realização de pesquisa fundamental e aplicada no campo da Física dos Plasmas. Para a consecução deste objetivo geral, foram iniciadas diversas atividades nas seguintes áreas específicas:

1. Plasmas Quiencentos (PQUI)

Esta atividade se insere na linha de pesquisa fundamental e tem por objetivo o estudo da propagação de ondas em plasmas e a evolução de instabilidades resultantes da interação de campos de radiofrequência e de feixes de partículas com o plasma. Para a realização deste objetivo é preciso construir dispositivos que permitam, em laboratório, a geração, a excitação e o diagnóstico de plasmas. O primeiro dispositivo desenvolvido pela Divisão de Plasmas, para este fim, é uma máquina de plasma duplo (PDUP), que se encontra em operação desde 1981 e na qual vêm sendo realizados estudos de propagação de ondas longitudinais em plasmas homogêneos e não-magnetizados. Também, está em construção uma máquina de plasma triplo, que possibilitará o estudo da formação de camadas duplas em plasmas e do espalhamento de ondas solitárias, além de outros fenômenos. Plasmas quiescentes, tais como gerados nestas máquinas, são apropriados à realização de pesquisa básica em Física dos Plasmas e à simulação de plasmas espaciais. Dado o seu caráter, esta atividade não tem fim previsto, tendo como resultado de sua execução a publicação de relatórios e artigos. Pesquisas já realizadas ou em andamento concentram-se no estudo de: propagação de ondas e solitons íon-acústicos em plasmas de íons negativos; relações de fase para ondas íon-acústicas em plasmas de múltiplos componentes; movimento da camada limite e excitação de ondas íon-acústicas. *O financiamento desta atividade está sendo presentemente solicitado à FINEP/PNAE.*

2- Centrifuga de Plasma (PCEN)

Dentro da linha de pesquisa aplicada, está sendo desenvolvida uma centrifuga de plasma (PCEN), que utiliza as propriedades de arcos magnetoplasmadínamicos no estudo experimental da separação de isótopos. A centrifugação é obtida pela interação da corrente radial, numa descarga de geometria cônica, como campo magnético axial aplicado, o que resulta numa força atuante sobre o plasma que tem a direção azimutal. Posto o plasma isotópico em rotação, há uma concentração maior dos isótopos mais pesados na periferia da coluna de plasma. O objetivo específico inicial é o estudo da otimização desta configuração, para posteriormente investigar-se a viabilidade deste processo de separação de isótopos, em escala competitiva com métodos convencionais. Este programa de pesquisa implicará no estudo detalhado do comportamento de descargas em arco elétrico magnetizado e de plasmas em rotação. É importante lembrar que o estudo de plasmas em rotação tem interesse fundamental em Astrofísica. Além da publicação de relatórios e artigos, um resultado importante na execução desta atividade será a observação do enriquecimento isotópico

continuação

em plasmas metálicos. *O financiamento desta atividade deverá ser feito pela CNEN.*

3. Plasmas e Radiação (PRAD)

Esta atividade envolve pesquisas fundamentais e aplicadas. Trata essencialmente do estudo da interação de radiação com plasmas e está sendo iniciada com o desenvolvimento do girotron. Este dispositivo baseia-se na interação de um feixe de elétrons relativísticos com o campo eletromagnético numa cavidade, para a geração de radiação milimétrica de alta potência. Todo o projeto do canhão injetor e a determinação das condições de otimização da eficiência de conversão da energia, dos elétrons para o campo de radiação, estão sendo realizados, utilizando técnicas de simulação numérica. Também estão sendo desenvolvidos programas de acompanhamento de raios em plasmas magnetizados, que serão utilizados no estudo da acessibilidade e do aquecimento de plasmas por ondas cíclicas de elétrons, em dispositivos do tipo tokamak ou de espelhos magnéticos. Estes estudos teóricos visam à futura aplicação do girotron na área da fusão termonuclear. Uma etapa importante na execução desta atividade será marcada pela operação e testes do protótipo do girotron. O desenvolvimento deste protótipo está inserido no Programa Nacional de Física dos Plasmas e fusão Termonuclear Controlada. *Esta atividade deverá ser financiada pela CNEN.*

4. Propulsão Iônica (PION)

Esta atividade se insere no programa de desenvolvimento de satélites e trata da construção de um protótipo de propulsor iônico, destinado ao controle de atitude e correção de órbita de satélites geoestacionários. Os micropropulsores atualmente sendo qualificados para voo pela NASA são do tipo de bombardeamento eletrônico de mercúrio. Entretanto, prevendo a futura escassez deste elemento como combustível, já se encontram em desenvolvimento os propulsores a gases inertes. Em vista disto, e dado que o Laboratório de Plasmas não possui uma câmara de testes adequada à manipulação de vapores de mercúrio, está sendo feita a modificação do protótipo em construção para a operação com argônio. Esta alteração permitirá que os testes iniciais sejam realizados no interior da câmara de vácuo utilizada na linha de pesquisa em plasmas quiescentes. Este arranjo é provisório e precário e visa apenas impedir a desativação do projeto até que seja construída uma câmara de testes apropriada. *Esta atividade deverá ser financiada pela MECB.*

continuação

5. Teoria de Plasmas (PTEO)

Esta atividade engloba os estudos teóricos de caráter fundamental, visando a aplicação da Física dos Plasmas em pesquisas espaciais e dando ênfase ao relacionamento entre os processos que ocorrem em plasmas de laboratório e plasmas espaciais. Atualmente, a atenção se dirige aos processos de geração de radiação coerente em plasmas de origem planetária, solar ou astrofísica. Está sendo desenvolvida uma teoria que utiliza os conceitos não-lineares de plasma para explicar a modulação temporal das emissões de rádio de pulsares. Outro estudo está sendo iniciado para investigar os efeitos da radiação do cinturão de Van Allen sobre os satélites artificiais. As metas são a formação de pessoal na área de plasmas espaciais e a criação da infra-estrutura necessária, nesta área, para o programa de desenvolvimento de satélites brasileiros. O resultado imediato da execução desta atividade é a publicação de artigos e relatórios.

Metodologia - pesquisar a metodologia adotada, discriminando as atividades necessárias e selecionando aquelas que possam constituir indicadores de acompanhamento da execução física do projeto.

As pesquisas em Física dos Plasmas prosseguirão segundo a seguinte metodologia:

1. Plasmas Quiescentes (PQUI)

- Construção e instalação do sistema de produção e confinamento de plasma na máquina de plasma triplo.
- Montagem e testes de um sistema de diagnóstico por feixe de elétrons de baixa corrente.
- Projeto e construção de um protótipo de espectrômetro magnético de massa que será utilizado no diagnóstico da composição do plasma nas máquinas de plasma quiescente.
- Compra e instalação de um sistema de aquisição e redução de dados em tempo real.
- Utilização dos diagnósticos acima, e outros já instalados, no estudo das relações de fase para ondas ion-acústicas em plasmas de múltiplos componentes e no estudo da formação e estabilidade de estruturas do tipo camada dupla.
- Publicação de relatórios e artigos.

2. Centrífuga de Plasma (PCEN)

- Montagem, calibração e testes do sistema de diagnóstico elétrico, constituído por sondas eletrostáticas, magnéticas e bobinas de Rogowsky.
- Recuperação do laser de rubi que será utilizado como gatilho da descarga em arco.
- Desenho e construção do sistema de vácuo e lentes eletrostáticas para o espectrômetro quadrupolar de massa que permitirá a sua utilização no diagnóstico da abundância isotópica relativa.
- Publicação de relatórios.

3. Plasmas e Radiação (PRAD)

- Projeto detalhado do canhão injetor de elétrons e da cavidade ressonante.
- Desenvolvimento de técnicas de selagem e eletroformação que permitirão o início da construção do protótipo do canhão injetor.

continua...

METODOLOGIA - Detalhar a metodologia adotada, discriminando as atividades necessárias e estabelecendo aquelas que possam constituir indicadores de acompanhamento da execução física do projeto.

- Construção e testes preliminares do circuito de disparo do canhão injetor.
- Continuação dos estudos teóricos da utilização do girotron no aquecimento de plasmas.
- Publicação de relatórios e artigos.

4. Propulsão Iônica (PION)

- Projeto e construção da câmara de testes e compra do sistema de vácuo.
- Modificação do protótipo de propulsor iônico para operação com gases inertes, o que permitirá que seja testado provisoriamente na máquina de plasma triplo.
- Desenvolvimento e construção das fontes de alimentação do propulsor.
- Estudo teórico da descarga e otimização da câmara de ionização.
- Publicação de relatórios.

5. Teoria de Plasmas (PTED)

- Realização de estudos teóricos de fenômenos em plasmas espaciais.
- Publicação de artigos.

CRONOGRAMA - O desenvolvimento do projeto deverá ser esboçado objetivamente, a partir de atividades e de metas a atingir segundo um fluxo temporal que melhor convenha às necessidades do trabalho, e que sirva de base para a elaboração do Plano de Aplicação de recursos, através de utilização de representações visuais auxiliares, como gráficos de barras, diagramas e/ou fluxogramas. Assinalar aqui os indicadores de acompanhamento estabelecidos no item anterior.

Os cronogramas anexos mostram o desenvolvimento previsto para o conjunto de atividades que serão realizadas no INPE com relação às pesquisas em Física dos Plasmas. Entretanto, para efeitos desta proposta e para serem incluídas dentro do PNAE devem ser consideradas apenas aquelas relativas à atividade "PLASMAS QUIESCENTES - PQUI".

CRONOGRAMA FÍSICO DE ATIVIDADES

BENEFICIÁRIO:

PROJETO: PLASMAS

A T I V I D A D E S	1984			
	1º TRIM.	2º TRIM.	3º TRIM.	4º TRIM.
Experimentos em plasmas quiescentes (PQUI)				
Instalação da máquina de plasma triplo (PQUI)				
Montagem do sistema de diagnóstico por feixe eletrônico (PQUI)				
Construção do protótipo do espectrômetro magnético de massa (PQUI)				
Produção de plasma na centrífuga (PCEN)				
Construção e testes dos diagnósticos elétricos (PCEN)				
Montagem do espectrômetro quadrupolar de massa (PCEN)				

OBS:  previsão inicial

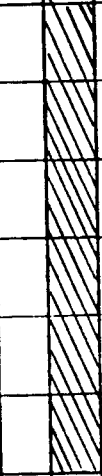
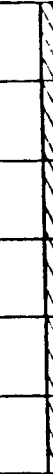
 previsão atualizada

 atividades realizadas

CRONOGRAMA FÍSICO DE ATIVIDADES

BENEFICIÁRIO:

PROJETO: PLASMAS

A T I V I D A D E S	1984			
	1º TRIM.	2º TRIM.	3º TRIM.	4º TRIM.
Construção das fontes de alimentação do propulsor (PION)				
Projeto da câmara de testes (PION)				
Testes do protótipo do propulsor (PION)				
Estudos teóricos de plasmas espaciais (PTEO)				
				
				
				
				
				
				
				

OBS:  previsão inicial  previsão atualizada  atividades realizadas

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - Apresentar e analisar de forma resumida a bibliografia existente sobre o assunto bem como os estudos concluídos ou em andamento realizados pela unidade executora e/ou por outras entidades nacionais e estrangeiras, comentando a existência de alternativas para a abordagem do projeto.

1. Plasmas Quiescentes (PQUI)

TRAN, M.Q., Phys. Scr. 20, 317 (1979); NAKAMURA, Y., IEEE Trans. Plasma Sci. PS-10, 180 (1982) - revisões da teoria e dos experimentos sobre sôltons ion-acústicos em plasmas.

LUDWIG, G.O., FERREIRA, J.L. e NAKAMURA, Y., "Observation of Ion-Acoustic Rarefaction Solitons in a Multi-Component Plasma with Negative Ions", submetido para Phys. Rev. Lett., 1983 (INPE-2804-PRE/364).

2. Centrífuga de Plasma (PCEN)

GEVA, M., "Isotopic Enrichment in a Fully Ionized, Rotating Metal Plasma Column", Ph.D. Thesis, Yale University, 1982 - contém a descrição da construção de uma centrífuga de plasma semelhante à que está sendo desenvolvida no INPE, assim como vários métodos de diagnóstico e sua utilização no estudo do processo de enriquecimento isotópico.

KRISHNAN, M., Bull. Am. Phys. Soc. 27, 964 (1982) - apresenta resultados recentes sobre a separação isotópica de zircônio na centrífuga de plasma.

3. Plasmas e Radiação (PRAD)

Grande parte do trabalho recente realizado no desenvolvimento do girotron é apresentado em dois volumes especiais do Int. J. Electronics (out. 1981 e dez. 1982).

"Heating in Toroidal Plasmas", Proc. 3rd. Joint Varenna - Grenoble Int. Symp., 1982 - contém um apanhado dos resultados mais recentes na área de aquecimento de plasmas e geração de corrente em plasmas confinados magneticamente.

BARROSO, J.J., MONTES, A., "Cálculo da Trajetória de Elétrons em uma Cavidade de Microondas", 1º Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional - SBMAC, INPE, S.J. Campos, 1983 (INPE-2677-PRE/283).

4. Propulsão Iônica (PION)

"Electric Propulsion and its Applications to Space Missions", R.C. Finke (ed.), Progress in Astronautics and Aeronautics, 79, AIAA (1981).

PERCHE, G.E., "Projeto de um Propulsor Iônico", Resumos 35ª Reunião Anual da SBPC, Belém, PA, 1983 (INPE-2803-PRE/363).

(continua)

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - Apresentar e analisar de forma resumida a bibliografia existente sobre o assunto bem como os estudos concluídos ou em andamento realizados pela unidade executora e/ou por outras entidades nacionais e estrangeiras, comentando a existência de alternativas para a abordagem do projeto.

5. Teoria de Plasmas (PTEO)

"Solar System Plasma Physics", L.J. Lanzerotti, C.F. Kennel e E.N. Parker (eds.), North Holland Publishing Co., 1979; PAPADOPOULOS, K. e FREUND, H.P.

"Collective Radio Emission from Plasmas", Space Sci. Rev. 24, 511 (1979) - artigos de revisão.

CHIAN, A.C.-L. "On the Self-consistent Solutions of Pulsar Plasma Waves,"

Astron. Astrophys. 112, 391 (1983); CHIAN, A.C.-L. e KENNEL, C.F. "Self-modulational Formation of Pulsar Microstructures", Astrophys. Space Sci. (1983, no prelo).

UTILIZAÇÃO DOS RESULTADOS DO PROJETO - Na hipótese de sucesso, descreva abaixo a forma imaginada de transferência dos resultados aos possíveis usuários.

Os trabalhos realizados no projeto, além do interesse científico e relevância no entendimento de fenômenos em plasmas espaciais, têm aplicações diretas nas áreas da fusão termonuclear, separação de isótopos e propulsão iônica. O girotron de verá ser utilizado no aquecimento de plasma do futuro tokamak TBR-2 do Programa Nacional de Física dos Plasmas e Fusão Termonuclear Controlada, podendo também ser de interesse para as Forças Armadas para aplicações em radar. A centrífuga de plasma constitui um dos sistemas avançados de separação de isótopos atualmente em desenvolvimento, podendo vir a ser utilizada no enriquecimento de urânio para reatores de fissão nuclear de água leve. O propulsor iônico deverá ser utilizado no desenvolvimento de satélites de telecomunicações.

RECURSOS HUMANOS DO PROJETO (EXISTENTES E A CONTRATAR)

A) PESSOAL CIENTÍFICO

[illegible]

CONSIDERAÇÕES SOBRE O ORÇAMENTO APRESENTADO

Os quadros que se seguem apresentam o orçamento do projeto e os recursos que são solicitados ao FNDCT.

Algumas alterações foram feitas nos formulários originais visando simplificar a apresentação sem, no entanto, acarretar prejuízo das informações solicitadas. As modificações foram as seguintes:

- "RECURSOS HUMANOS DO PROJETO":

Adicionou-se uma coluna em que consta o salário mensal equivalente ao tempo dedicado ao projeto durante o ano.

- "ORÇAMENTO SOLICITADO POR FONTE DE FINANCIAMENTO" e "CRONOGRAMA DE DESEMBOLSO - FNDCT":

Os formulários foram redesenhados para fornecerem informações correspondentes a apenas um ano, que é o período coberto pela proposta.

O formulário "COMPOSIÇÃO DE SALÁRIOS" foi preenchido de maneira simplificada uma vez que as informações foram fornecidas anteriormente no formulário "RECURSOS HUMANOS DO PROJETO". Os cálculos, divididos em duas partes, apresentam as despesas anuais com base nos salários previstos para janeiro de 1984 e um adicional que contempla a transformação de 14 salários em 12 mensalidades e um reajuste (correção monetária) de 50% em abril do mesmo ano.

A *contrapartida explícita* oferecida é bastante significativa. A *contrapartida implícita*, que também deve ser levada em conta, inclui entre 40% a 60% das despesas com pessoal e é constituída principalmente de:

- a) Serviços de Apoio Administrativo e Infra-Estrutura, incluindo assistência médica e seguros; serviços de controle orçamentário e contábil; aquisição de bens e administração de contratos de prestação de serviços; manutenção e conservação de instalações; fornecimento de água e energia elétrica; serviços de comunicações (telex, telefone e malote) e serviços de reprodução gráfica.
- b) Serviços de Apoio Técnico, incluindo conservação e manutenção de aparelhos elétricos e eletrônicos; serviços de processamento de dados - em "batch" e via terminais; serviços de oficina mecânica; serviços de laboratório de circuito impresso; e biblioteca.
- c) Assessoria eventual fornecida a este projeto por outros pesquisadores do Instituto.

Finalmente, vale mencionar que os orçamentos aqui apresentados consideram os seguintes parâmetros:

- a) Inflação prevista para 1984: 90% ao ano;
- b) Valor médio da taxa de câmbio para despesas no exterior:
US\$ 1.00 = Cr\$ 1.500,00

ORÇAMENTO SOLICITADO POR FONTES DE FINANCIAMENTO
PERÍODO DE PROJETO DE JAN/1984 A DEZ/1984

(Cr\$ 1.000,00)

PROJETO: PLASMAS						
CATEGORIA ECONÔMICA		FONTES ESPECIFICAÇÃO DA DESPESA	CONTRAPARTIDA**		FNDCT	TOTAL GERAL DO PROJETO
			PROponente	OUTROS *		
DESPESAS CORRENTES	3100	DESPESA DE CUSTEIO	291.120			291.120
	3110	PESSOAL	257.740			257.740
		a) Científico	185.400			185.400
		b) Técnico	16.440			16.440
		c) Administrativo				
		d) Diárias	1.400			1.400
	3113	e) Obrigações Patronais	54.500			54.500
	3120	MATERIAL DE CONSUMO	27.800			27.800
	3130	SERVIÇOS DE TERC. E ENCARGOS	5.580			5.580
	3131	REMUNERAÇÃO DE SERV. PESSOAIS	4.160			4.160
	3132	OUTROS SERV. E ENCARGOS	1.420			1.420
DESPESAS DE CAPITAL	4100	INVESTIMENTOS	15.050		46.600	61.650
	4110	OBRAS E INSTALAÇÕES				
		a) Obras				
		b) Instalações				
	4120	EQUIPAMENTOS E MAT. PERMANENTE	15.050		46.600	61.650
		a) Equipamentos	9.950		46.600	56.550
		Nacional	9.950			9.950
		Importado			46.600	46.600
		b) Material Permanente	5.100			5.100
		Nacional	5.100			5.100
		Importado				
T O T A L S			306.170		46.600	352.770

* Discriminar por Fonte Financiadora - Preencher um formulário por subprojeto quando for o caso além do consolidado.

* Neste item não está incluída a contrapartida implícita correspondente a 40 - 60% despesas com pessoal, conforme especificado anteriormente nas Considerações sobre o Orçamento Apresentado.

072501:00 DE 20 SOLIDUS

TECNICO

TOTAL DE MESES DE PROJETO NO EXERCÍCIO

21

CY\$ 1.000

THIS ANALYSIS

[illegible]

Cr\$ 1.000

NOME E FINALIDADE	LOCAL	QUANT	CUSTO UNITÁRIO	CUSTO TOTAL	FONTE DE RECURSOS		
					PROPRONTE	OUTROS	FUNCT
<u>Plasmas Quiescentes (PQUI)</u> - Participação em congressos - Contatos técnicos	Rio Campinas	10	56	560			
		30	28	840			
T O T A L					1.400		

MATERIAL DE CONSUMO

Ce\$ 1.000

ESPÉCIE E FINALIDADE	QUANT.	CUSTO UNITAR.	CUSTO TOTAL	FONTE DE RECURSOS	
				PROPRIÉTARIO	ESTADO
Plasmas Quiescentes (PQUI)					
- Imãs permanentes de Alnico V			8.500		
- Malha de tungstênio (IMP)			5.100		
- Cola cerâmica (IMP)			300		
- Componentes, óleos e graxas para alto-vácuo			6.200		
- Material eletrônico			1.000		
- Material eletrônico			3.700		
- Material mecânico			2.500		
- Outros materiais			500		
TOTAL			27.800	27.800	

REMUNERAÇÃO DE SERVIÇOS PESSOAIS

Cr\$ 1.000

PESSOAS/EMPRESAS	ESPECIFICAÇÃO DO SERVIÇO	PERÍODO	CUSTO TOTAL	FONTE DE RECURSOS		
				PROPRIO	OUTROS	F.F.C.F.
- Estagiário do 5º ano do ITA	- Desenvolvimento de circuitos eletrônicos	ABR/NOV	1.200			
- Estagiário do 5º ano do ITA	- Desenvolvimento de circuitos eletrônicos	ABR/NOV	1.200			
- Estagiário do 4º ano do ITA	- Desenvolvimento de circuitos eletrônicos	ABR/NOV	880			
- Estagiário do 4º ano do ITA	- Desenvolvimento de circuitos eletrônicos	ABR/NOV	880			
TOTAL			4.160	4.160		

OUTROS SERVIÇOS E ENCARGOS

.....R01000 12d4

Cr\$ 1.00

ESPECIFICAÇÃO	JUSTIFICATIVA	VALOR	FONTE DE RECURSOS	
			PROPRIO	OUTROS
- Consultores (a serem especificados)	- Ajuda de custos para consultores	1.120		
TOTAL			1.120	1.120

PASSAGENS

Cr\$ 1.000

TRECHO	OBJETIVO	Nº DE VIAGENS	VALOR UNITÁRIO	VALOR TOTAL	FONTE DE RECURSOS		
					PROPRIO	OUTROS	FINE
- SJCAMPOS/RIO/SJCAMPOS	- Participação em congressos	2	90	180			
- SJCAMPOS/CAMPINAS/SJCAMPOS	- Contatos técnicos	15	8	120			
TOTAL					300	300	

Cr\$ 1.000

ESPECIFICAÇÃO E APLICAÇÃO NO PROJETO	MODELO	FABRI- CANTE	CUSTO UNIT.	QUANT	CUSTO TOTAL	FONTE DE RECURSOS	
						PROPRIO	OUTROS
- Plasmas Quiescentes (PQUI)							
- Fonte de alimentação	TCA 120-01	Tectrol	1.100	04	4.400		
- Fonte de alimentação	TCA 30-50	Tectrol	2.550	01	2.550		
- Fonte de alimentação	TCA 30-02-B5	Tectrol	1.500	02	3.000		
TOTAL					9.950	9.950	

EXERCICIO 1304

Cr: 1.00

ESPECIFICAÇÃO E APLICAÇÃO NO PROJETO	PAÍS DE ORIGEM	MODELO	FABRIL CANTÊ	CUSTO UNIT.	QUANT.	CUSTO TOTAL	FONTE DE RECURSOS	
							IMPOSTOS	OUTROS
<u>Plasmas Quiescentes (PQUI)</u> - Registrador gráfico X-Y - Digitalizador programável - Amplificador diferencial - Unidade de alimentação - Gerador de pulsos - Gerador de funções	EUA	7047A	HP	16.000	01	16.000		
	EUA	7D20	Tektronix	17.800	01	17.800		
	EUA	7A22	Tektronix	3.600	01	3.600		
	EUA	TM504	Tektronix	900	01	900		
	EUA	PG505	Tektronix	2.000	01	2.000		
	EUA	FG504	Tektronix	6.300	01	6.300		
						46.600		
TOTAL								

TYTOL

46.600

1504

US\$ 1.000

ESPECIFICAÇÃO	FINALIDADE	CUSTO UNIT.	QUANT.	CUSTO TOTAL	FONTE DE RECURSOS		FNECE
					PROPRIÉTARIO	OUTROS	
- Armário para equipamentos eletrônicos e acessórios	Plasmas Quiescentes	2.500	01	2.500			
- Cilindro com válvula para gás (xenônio)	Plasmas Quiescentes	2.600	01	2.600			
TOTAL				5.100		5.100	

CRONOGRAMA DE DESEMBOLSO - FNDCT

(Cr\$ 1.000,00)

ITENS DE DISPÊNDIO		EXERCÍCIO 1984				TOTAL GERAL
		1º TRIM	2º TRIM	3º TRIM	4º TRIM	
DESPESAS CORRENTES	3100 DESPESAS DE CUSTEIO (1)					
	3110 PESSOAL					
	a) Científico					
	b) Técnico					
	c) Administrativo					
	d) Diárias					
	3113 OBRIGAÇÕES PATRONAIS					
DESPESAS DE CAPITAL	3120 MATERIAL DE CONSUMO					
	3130 SERV. DE TERCEIROS E ENCARGOS					
	3131 REMUNERAÇÃO DE SERV. PESSOAIS					
	3132 OUTROS SERVIÇOS E ENCARGOS					
	4100 INVESTIMENTOS (2)	30.600	16.000			46.600
	4110 OBRAS E INSTALAÇÕES					
DESPESAS DE CAPITAL	a) Obras					
	b) Instalações					
	EQUIPAMENTOS E MAT. PERMANENTE					
	a) Equipamentos	30.600	16.000			46.600
	. Nacional	30.600	16.000			46.600
DESPESAS DE CAPITAL	. Importado					
	b) Material Permanente	30.600	16.000			46.600
	. Nacional					
	. Importado					
	T O T A L (1 + 2)	30.600	16.000			46.600

8. ASSINATURAS

O presente Projeto conta com a aprovação dos abaixo assinados, que se co-responsabilizam pela sua execução.

São José dos Campos, 18 de novembro de 1983

Local e Data



Coordenador do Projeto
NELSON DE JESUS PARADA



Diretor da Unidade Executora
NELSON DE JESUS PARADA

Membros do Conselho Diretor da
Unidade Executora

ANEXO 1

RESULTADOS RECENTES NA ÁREA PLASMAS QUIESCENTES (PQUI)

OBSERVATION OF ION-ACOUSTIC RAREFACTION SOLITONS IN A MULTICOMPONENT
PLASMA WITH NEGATIVE IONS

G.O. Ludwig, J.L. Ferreira

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq
12200 - São José dos Campos, SP, Brasil

and

Y. Nakamura

Institute of Space and Astronautical Science
Komaba, Meguro-ku, Tokyo, Japan

The propagation of ion-acoustic solitons in a plasma with negative ions has been observed. For sufficiently large concentration of negative ions, an initial rarefactive (negative) voltage pulse breaks up into solitons, whereas a compressive pulse evolves into a wave train, with exactly the opposite behaviour as that for a plasma composed only of positive ions. There is a critical value of the negative ion concentration for which a finite amplitude pulse propagates without steepening.

It is well-known from the nonlinear fluid theory of ion-acoustic waves, in a plasma consisting of positive ions, that an initial compressive perturbation breaks up into a number of solitons, whereas a rarefactive perturbation generates a subsonic wave train^{1,2,3}. Theoretically, it has been shown, from the solution of the Korteweg - de Vries (K-dV) equation, that rarefaction solitons can be excited in multicomponent plasmas with negative ions⁴. The rarefaction soliton, which corresponds to a depression in the plasma potential, is actually related to a compression of the negative ions, in such a way that the steepening in the leading edge of the propagating pulse is balanced by the negative dispersive effect in the ion-acoustic regime.

This Letter reports the experimental observation of rarefaction solitons in plasmas produced by a filament - anode 50 V dc discharge in a mixture of argon and sulfur hexafluoride. The experiment was performed in the Institute for Space Research (INPE) double plasma machine. This DP device is 30 cm in diameter and its total length is 75 cm. The plasma is surface confined by a multidipole magnetic field and the discharge current is approximately 200 mA. Typical operating parameters in argon at a pressure of about 3×10^{-4} mbar are $n_e \approx 1.3 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$, $T_e \approx 2.3 \text{ eV}$ (Langmuir probe data) and $T_i \approx 0.3 \text{ eV}$. The dc potential difference between the two plasmas was adjusted so that no ion beam was present, as confirmed by electrostatic ion energy analyzer measurements. Compressive and rarefactive pulses were launched in the target plasma by the application of voltage pulses to the driver plasma.

A plasma with negative ions can be easily produced by the introduction of a gas with a large electron attachment cross section, such as SF_6 , in the discharge chamber. Bombardment of SF_6 molecules by the 50 eV primary electrons leads mainly to the formation of negative F^- ions due to dissociative attachment processes^{5,6}. Negative SF_6^- and SF_5^- ions are also

formed by the capture of very low energy plasma electrons, a simple calculation showing that for an electron temperature of 2.3 eV the production rate of SF_5^- ions is much larger than SF_6^- . Furthermore, the ionization of SF_6 by the primary electrons leads to the formation of SF_5^+ , SF_3^+ , SF_4^+ , etc., where SF_5^+ is the most abundant species according to mass spectrometric studies⁷. These considerations lead us to conclude that the plasma produced is essentially a four-ion species plasma, composed of positive (A^+) ions, positive (SF_5^+) ions, negative (F^-) ions, negative (SF_5^-) ions, and electrons.

The production rate of F^- divided by the production rate of SF_5^- is proportional to the ratio between the primary, n_0 , and plasma, n_e , electron densities. Therefore, for a constant discharge current, the concentration of F^- ions is much smaller than that of SF_5^- ions when the partial pressure of SF_6 in the discharge chamber is low ($n_0/n_e \ll 1$). Introducing a larger fraction of SF_6 gas, the total negative ion concentration increases (n_e decreases), the density of F^- ions relative to SF_5^- ions increases and the lighter ions rapidly dominate the propagation characteristics of ion-acoustic waves. This simplified description of the plasma is justified by the good agreement between experimental and theoretical values for the ion-acoustic speed, as a function of the ion concentrations, as shown in Fig. 1. The ion-acoustic speed for a four-cold-ion-species plasma composed of $A^+ + SF_5^+ + F^- + SF_5^-$, normalized to the ion-acoustic speed for a pure cold argon plasma, is given by

$$\hat{c}_s = \frac{c_s}{(k_B T_e / m_A)^{1/2}} = \left[\frac{1 - (1 - 1/\mu_+) \rho_+ + [(1 - \rho_-) / \mu_- + \rho_- / \mu_-'] r}{1 - r} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

where $r = (n_{F^-} + n_{SF_5^-}) / (n_{A^+} + n_{SF_5^+})$, $\rho_+ = n_{SF_5^+} / (n_{A^+} + n_{SF_5^+})$ and $\rho_- = n_{SF_5^-} / (n_{F^-} + n_{SF_5^-})$. The mass ratios are $\mu_- = m_{F^-} / m_{A^+} = 0.476$,

$\mu_+ = m_{SF_5^+}/m_{A^+} = 3.18$ and $\mu_- = m_{SF_5^-}/m_{A^+} = \mu_+$. Experimentally, the negative ion concentration, r , was determined from the relative changes in the electron and ion saturation currents. It can be shown that

$$r = 1 - (I_{es}/I_{es}^{(0)}) (I_{is}^{(0)}/I_{is}) [1 - (1 - 1/\sqrt{\mu_+}) \rho_+] ,$$

where $I, I^{(0)}$ are the saturation currents with and without SF_6 , for constant partial pressures of argon (there is no appreciable change in the electron temperature). The ratio between the density of contaminating SF_5^+ ions and the total density of positive ions is given by

$$\rho_+ \approx \alpha \sqrt{\mu_+} (P_{SF_6}/P_A) (1 + \alpha \sqrt{\mu_+} P_{SF_6}/P_A)^{-1} ,$$

where P refers to the ion gauge readings of the partial pressures for each gas and α is the pressure reading correction factor which, for a 50 V filament-anode discharge potential and a 200 V potential at the grid of the Bayard - Alpert gauge, becomes⁸

$$\alpha = (\sigma_{SF_5^+}/\sigma_{A^+})_{50eV} / (\sigma_{SF_5^+}/\sigma_{A^+})_{200eV} = 0.601 .$$

The ratio ρ_- between the density of contaminating SF_5^- ions and the total density of negative ions was estimated to vary between 0.95 and 0.65 for the lowest and the highest values, respectively, of the partial pressure of SF_6 used in the experiment. Nevertheless, the experimental results clearly indicate that the effect of SF_5^- ions on the propagation of ion-acoustic waves is much smaller than that of the lighter F^- ions. Figure 2 shows the formation and propagation of a rarefaction soliton excited by a pulsed negative potential difference applied between the plasmas, with distance as a parameter. The soliton velocity was determined from the time of flight between two neighboring positions of

the Langmuir probe. The experimental values of the ion-acoustic speed were deduced from best fits for the soliton propagation velocity with respect to the relative density perturbation, $\delta n/n$. It follows that the extrapolated linear results presented in Fig. 1 correspond to the fast ion-acoustic mode in a plasma with negative ions^{9,10}. The small discrepancy between the theoretical and experimental results might be further reduced if one takes into account finite ion temperature effects.

Plots of velocity versus amplitude allow the determination of the experimental ratio $(\delta n/n)/(M-1)$, where M is the Mach number, as shown in Fig. 3. Below a certain critical value of $r \sim 0.1$ compression solitons are excited in the $(A^+ + SF_5^+ + F^- + SF_5^-)$ plasma, whereas above this critical value only rarefaction solitons can propagate. This property of a plasma with negative ions is correctly described by the K-dV equation for weakly nonlinear ion sound waves:¹¹

$$\frac{\partial \hat{\phi}^{(1)}}{\partial \tau} + \frac{A}{B} \hat{\phi}^{(1)} \frac{\partial \hat{\phi}^{(1)}}{\partial \xi} + \frac{1}{2B} \frac{\partial^3 \hat{\phi}^{(1)}}{\partial \xi^3} = 0 ,$$

where

$$A = \frac{3}{2} \frac{\{1 - (1 - 1/\nu_+^2) \rho_+ - [(1 - \rho_-)/\nu_-^2 + \rho_-/\nu_-'^2]r\} (1-r)}{\{1 - (1 - 1/\nu_+^2) \rho_+ + [(1 - \rho_-)/\nu_-^2 + \rho_-/\nu_-'^2]r\}^2} - \frac{1}{2} ,$$

and $B = 1/\hat{C}_s$ in the cold ion limit. There is a critical concentration of negative ions, equal to 0.102 for an $(A^+ + F^-)$ plasma, for which $A=0$. When r is close to this critical value the nonlinear term in the K-dV equation vanishes; the delicate balance between nonlinearity and dispersion, necessary to the production of a soliton, is broken and it becomes impossible to excite a soliton. In this situation, a finite amplitude pulse can propagate without steepening. For concentrations greater than critical the coefficient A becomes negative. For soliton solutions, the

dimensionless electric potential, $\tilde{\phi} = e\phi/k_B T_e$, must also be negative. Hence, the K-dV equation predicts correctly the existence of rarefaction solitons in a plasma with a sufficiently large fraction of negative ions. However, the theoretical values for the soliton Mach number and width are quite different from those obtained experimentally. This is illustrated in Figs. 3 and 4, where the theoretical and experimental values of $(M-1)/(\delta n/n)$ and $(D/\lambda_e)^2(\delta n/n)$ are compared (D/λ_e is the soliton width normalized to the electron Debye length). The theoretically predicted values are

$$M = 1 + [A/(3B\tilde{C}_s)] (\delta n/n), \quad (2)$$

$$D/\lambda_e = [(6/A)/(\delta n/n)]^{1/2}. \quad (3)$$

As can be seen, the observed values of M are quite larger (and the observed values of D smaller) than predicted by the solution of the K-dV equation. Nevertheless, using the fictitious potential approach in the analysis of time-independent solutions¹², the simple fluid model with cold ions and isothermal electrons predicts the existence of solitons with very large Mach numbers. Indeed, the maximum Mach number for rarefaction solitons has no upper limit when the concentration of negative ions exceeds a critical value, smaller than 0.5. Furthermore, this model predicts a range of values of r and M for which compression and rarefaction solitons exist simultaneously. This aspect was, at least qualitatively, confirmed by experiment.

In summary, the observation and systematic study of rarefaction solitons in plasmas with negative ions has been presented. Large values of the Mach number, larger than predicted by the solution of the K-dV equation, have been observed. The inclusion of finite ion

temperature effects does not improve matters in this respect. Kinetic effects, such as negative ions and electrons reflected by the negative potential well plus trapped positive ions have to be included in the theoretical model. A more complete description of the pertinent theoretical and experimental work will be reported elsewhere.

One of the authors (G.O.L.) acknowledges helpful discussions with A. Montes.

References

- ¹M. Q. Tran, Phys. Scr. 20, 317 (1979).
- ²Y. Nakamura, IEEE Trans. Plasma Sci. PS-10, 180 (1982).
- ³E. Okutsu and Y. Nakamura, Plasma Phys. 21, 1053 (1979).
- ⁴G. C. Das and S. G. Tagare, Plasma Phys. 17, 1025 (1975).
- ⁵R. K. Asundi and J. D. Craggs, Proc. Phys. Soc. 83, 611 (1964).
- ⁶L. E. Kline, D. K. Davies, C. L. Chen, and P. J. Chantry, Proc. Int. Symp. on Gaseous Dielectrics, 1978, p. 258.
- ⁷Collections of Uncertified Mass Spectra, deposited with the GAMS - Groupement pour l'Avancement des Méthodes Spectrographiques, Paris, France.
- ⁸D. Rapp and P. Englander-Golden, J. Chem. Phys. 43, 1464 (1965).
- ⁹N. D'Angelo, S. V. Goeler and T. Ohe, Phys. Fluids 9, 1605 (1966).
- ¹⁰A. Y. Wong, D. L. Mamas, and D. Arnush, Phys. Fluids 18, 1489 (1975).
- ¹¹H. Washimi and T. Taniuti, Phys. Rev. Lett. 19, 996 (1966).
- ¹²R. Z. Sagdeev, Reviews of Plasma Physics. (Consultants Bureau, New York, 1966), vol. 4.

Figure Captions

Fig. 1. Normalized ion-acoustic speed of the fast ion mode in a plasma with negative ions. Solid lines indicate Eq. 1 with heavy lines corresponding to asymptotic behaviour. Curves numbering indicate the pair of values (ρ_+, ρ_-) . Points numbering indicate measured values of ρ_+ .

Fig. 2. Electron density versus time, with distance as parameter, for $r \approx 0.24$ and $\rho_+ \approx 0.38$. The Mach number is $M \approx 1.09$.

Fig. 3. Experimental and theoretical results for the ratio $(M-1)/(\delta n/n)$ as a function of r . Solid lines indicate Eq. 2. Numbering as in Fig. 1.

Fig. 4. Experimental and theoretical results for the product $(D/\lambda_e)^2 (\delta n/n)$ as a function of r . Solid lines indicate Eq. 3. Numbering as in Fig. 1.

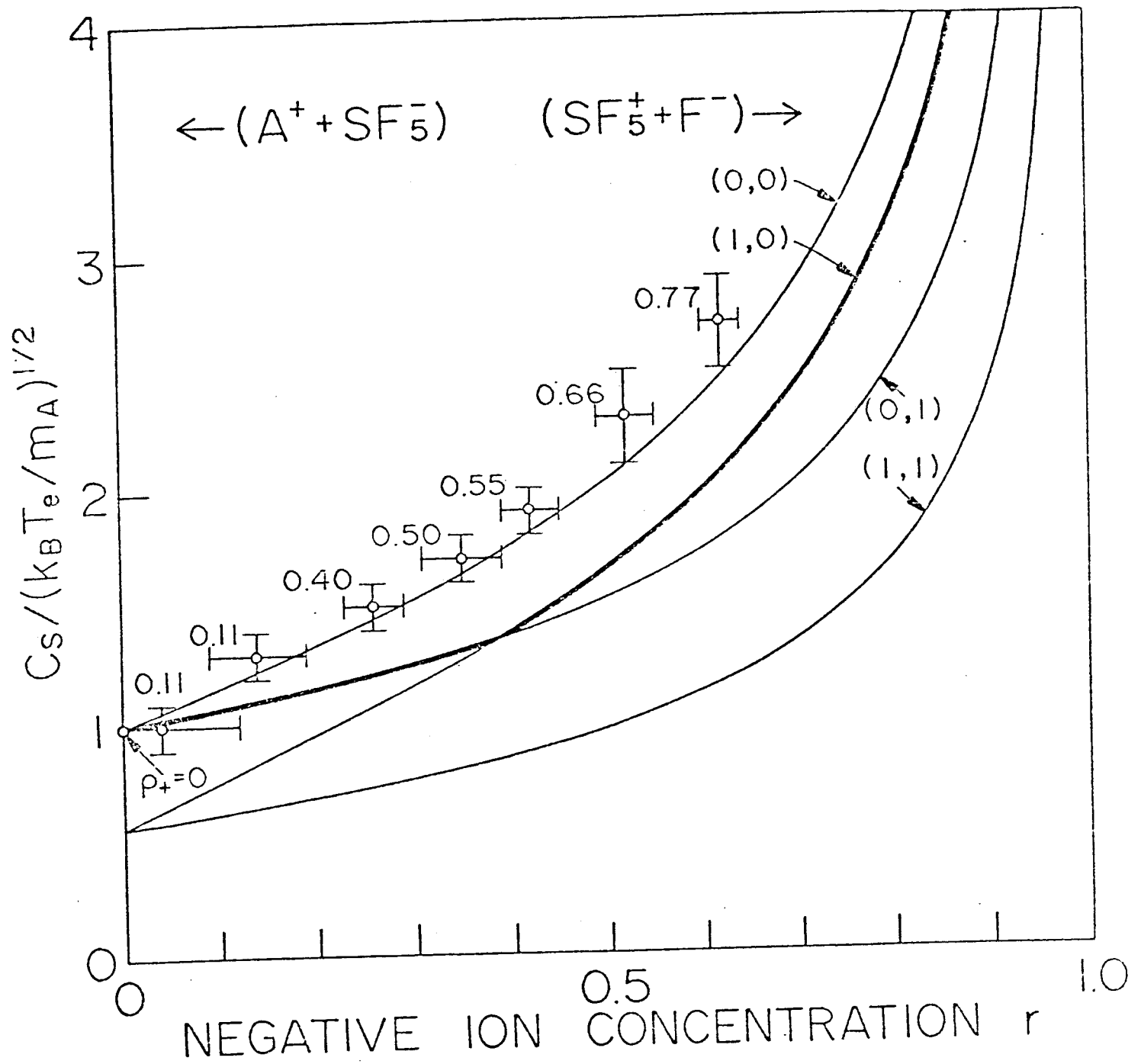


Figure 1

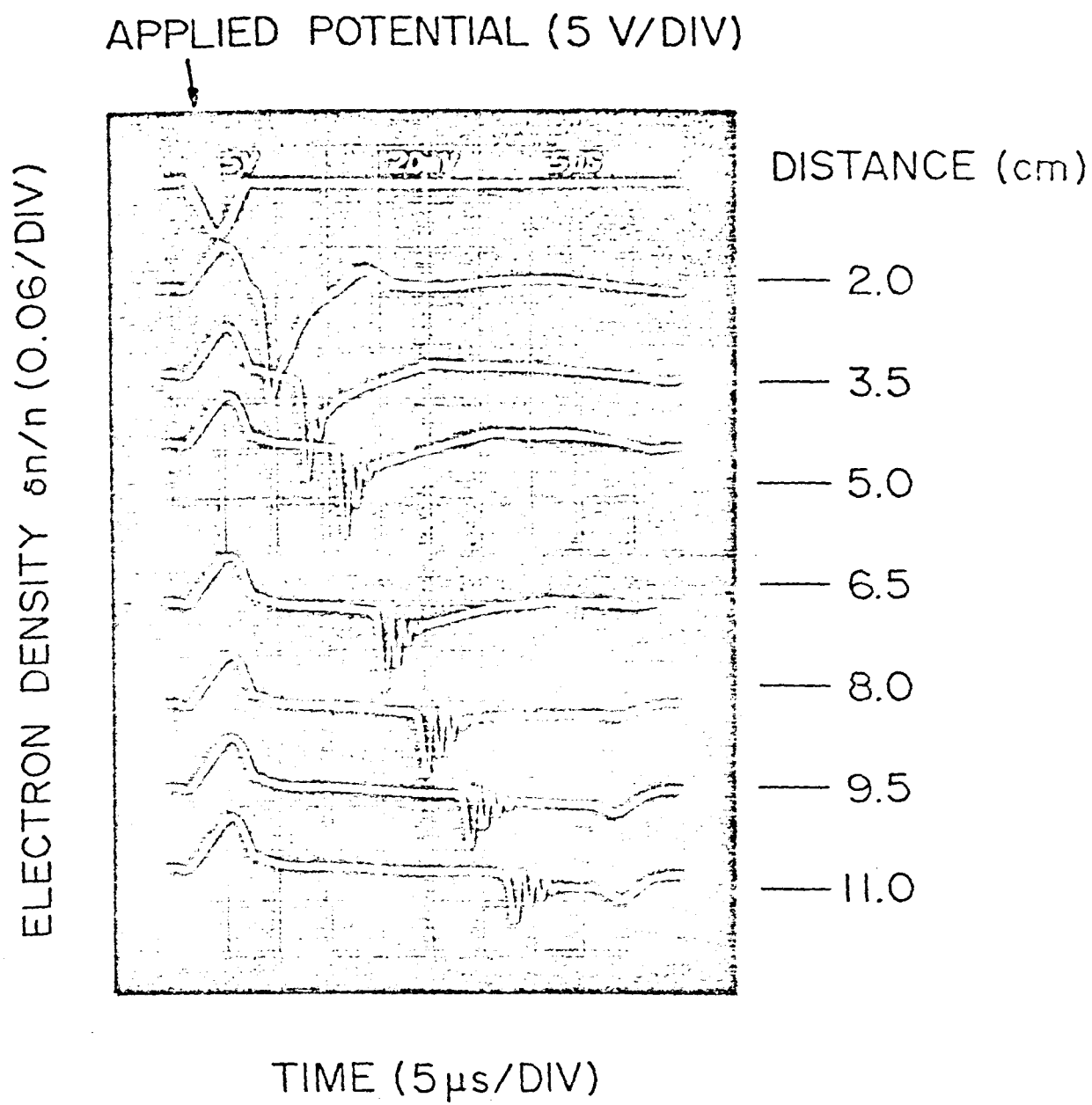


Figure 2

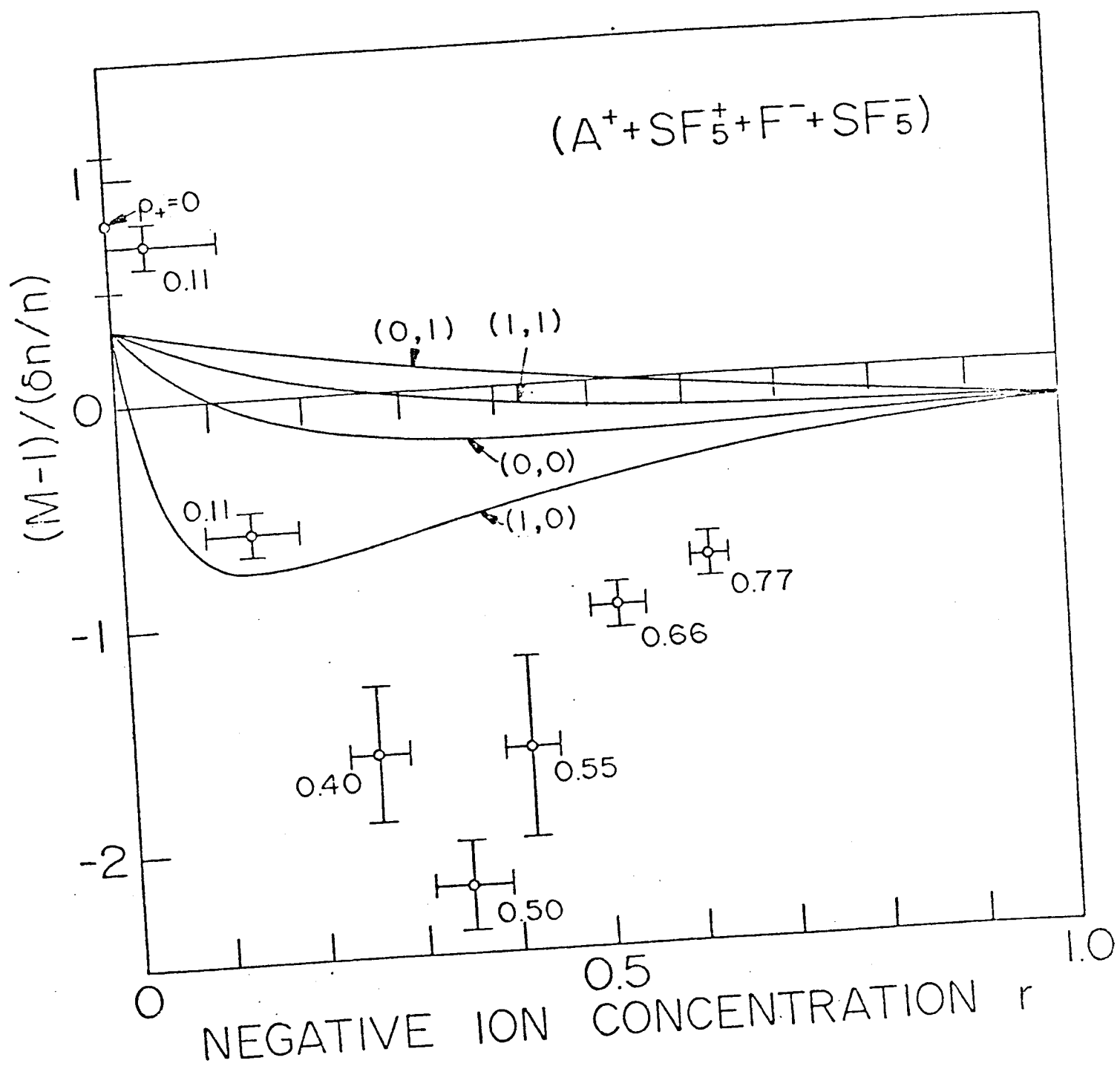


Figure 3

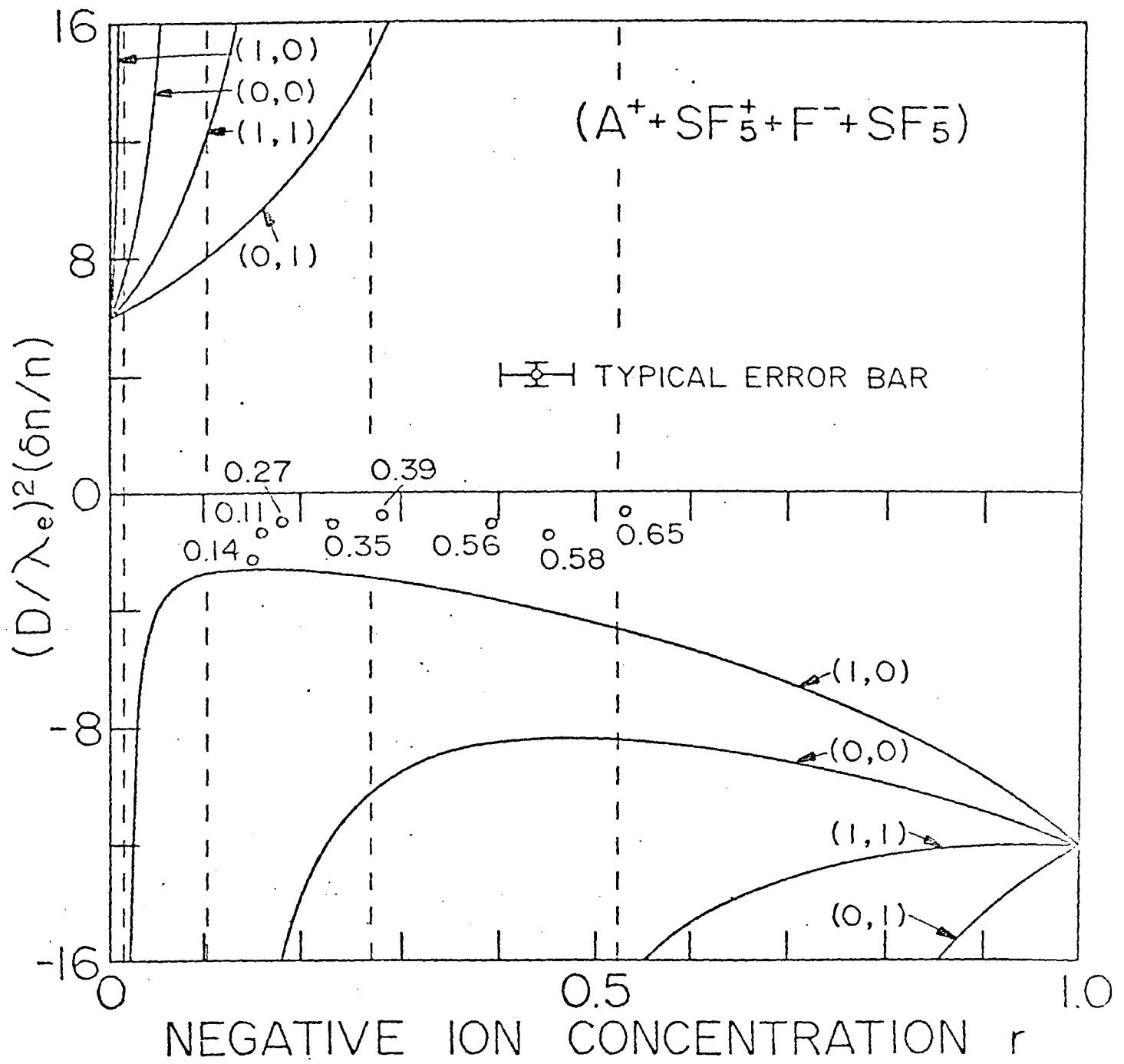


Figure 4

ANEXO 2

INTRODUÇÃO À SEPARAÇÃO DE ISÓTOPOS E À CENTRÍFUGA DE PLASMA

1. Separação Isotópica

A separação de isótopos, ou melhor, o enriquecimento quando do combustível nuclear. Para reatores de fissão nuclear de água leve necessita-se combustível com uma concentração de aproximadamente 3,5% do isótopo físsil U^{235} . Porém, a concentração isotópica (frações de massa) para o urânio natural é a seguinte:

$$U^{238} - 99,2832\%,$$

$$U^{235} - 0,7107\%,$$

$$U^{234} - 0,0061\%.$$

Torna-se necessário, portanto, aumentar a concentração do isótopo leve U^{235} . Neste contexto, pode-se considerar o urânio como constituindo uma mistura isotópica binária, pois é desprezível a quantidade de U^{234} .

De uma maneira geral, existem dois métodos básicos de separação de isótopos:

1. através da energização seletiva de uma espécie isotópica, ou,
2. pela energização diferencial de todas as espécies.

Como exemplo de aplicação do primeiro método têm-se os processos de excitação por laser e por ressonância de ciclotron dos íons; como exemplo do segundo têm-se os processos de ultracentrifugação e de jato centrífugo. Em qualquer caso, o parâmetro básico para a avaliação de uma unidade de separação é o fator de separação α_0 , definido como a razão entre as relações de abundância das frações enriquecida e empobrecida. Assim, sendo n_1 a densidade da espécie de interesse (U^{235}) e n_2 a densidade da espécie rejeitada (U^{238}), o fator de separação para uma mistura binária é dado por:

$$\alpha_0 = \frac{(n_1 / n_2)}{(n_1/n_2)_0},$$

onde o subscrito 0 indica o valor inicial da abundância relativa, isto é, antes de ser realizado o enriquecimento. O fator de separação total, para atingir a concentração de 3,5% de U^{235} , a partir do urânio natural, pode ser calculado conforme:

$$\alpha_{\text{tot}} = \frac{(n_1 / n_2)}{(n_1/n_2)_0} = \frac{n_1/(n_1 + n_2)}{1 - n_1/(n_1 + n_2)} \left[\frac{1 - n_1/(n_1 + n_2)}{n_1/(n_1 + n_2)} \right]_0 = \frac{0,035}{1 - 0,035} \frac{1 - 0,0071}{0,0071}$$
$$= 5,07 .$$

Para unidades que utilizam o processo de difusão gasosa, o fator de separação teórico é dado por $\alpha_0 = (m_2/m_1)^{1/2}$, onde m_2 é a massa do isótopo pesado e m_1 a massa do isótopo leve. No caso do urânio, resulta $\alpha_0 = 1,0064$, sendo necessário mais de 250 estágios para se atingir o grau de enriquecimento desejado (na prática $\alpha_0 \cong 1,002$, o que indica a necessidade de mais de 800 estágios de separação).

A seguir, será feita uma breve discussão da centrífuga mecânica a gás e suas limitações, o que servirá de motivação para a introdução à centrífuga de plasma.

2. Centrífuga mecânica

De maneira muito simplificada, a centrífuga mecânica pode ser descrita como se segue: A mistura isotópica, na forma gasosa, está contida em um cilindro que gira rapidamente em torno do eixo. Forças viscosas transmitem o movimento de rotação ao gás no interior do cilindro. A força centrífuga, por sua vez, desloca preferencialmente a componente pesada para a periferia do cilindro, produzindo uma separação parcial dos isótopos na direção radial.

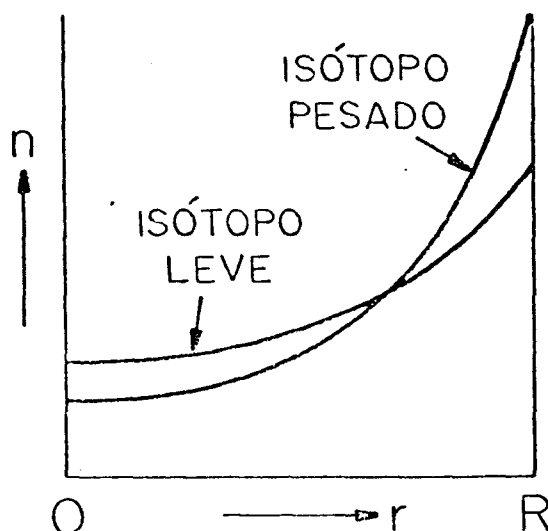


Fig. 1 - Perfil radial da densidade de partículas em uma centrífuga mecânica a gás.

O fator de separação unitário para a centrífuga mecânica é dado por:

$$\alpha_0 = \frac{|n_1/n_2|_R}{|n_1/n_2|_O} = \exp \left(\frac{|m_1 - m_2| R^2 \Omega^2}{2k_B T} \right).$$

Portanto, o fator de separação é determinado pela razão entre energias cinética de rotação e térmica, e depende da diferença entre as massas das espécies, $\Delta m = |m_1 - m_2|$; do quadrado da velocidade azimutal máxima, $v_\theta^2 = R^2 \Omega^2$; e do inverso da temperatura, $1/T$:

$$\alpha_0 = \alpha_0 (\Delta m, v_\theta^2, 1/T).$$

A dependência do fator de separação, da centrífuga mecânica, em Δm , em vez de $\Delta m/m$ (no processo de difusão $\alpha_0 = (m_2/m_1)^{1/2} = ((m_1 + \Delta m)/m_1)^{1/2} \approx 1 + \Delta m/2m_1$), torna-a particularmente interessante na separação de isótopos de elementos pesados. Para uma temperatura típica de 310 K e uma velocidade periférica de 500 m/s, obtém-se $\alpha_0 = 1,16$ ($\Delta m = 3u$, onde $1u = 1,661 \times 10^{-27} \text{ kg}$), de modo que o fator de separação total pode

ser atingido em 11 estágios. Apesar da vantagem apresentada pela baixa temperatura de operação, a limitação na velocidade periférica (da ordem da velocidade acústica) resulta em fatores de separação relativamente baixos para a centrífuga mecânica.

3. Centrífuga de plasma

Fatores de separação maiores podem ser obtidos na centrífuga de plasma, cuja operação não depende do movimento de partes mecânicas, possibilitando, portanto, atingir velocidades de rotação muito mais elevadas. Na sua geometria mais simples, a centrífuga está ilustrada na Figura 2.

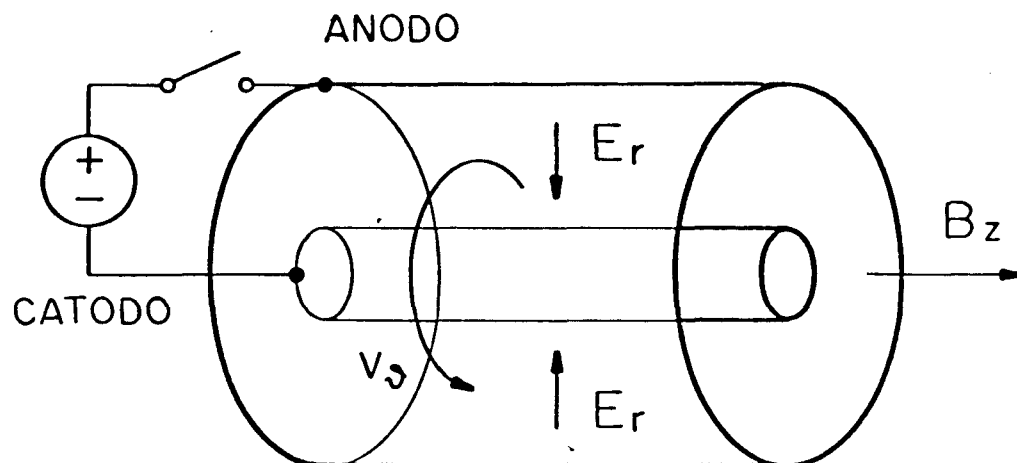


Fig. 2 - Esquema da centrífuga de plasma

O plasma está contido entre dois eletrodos concêntricos. O campo elétrico radial, E_r , e a densidade de fluxo magnético axial, B_z , produzem um movimento azimutal do plasma, através da deriva $\vec{E} \times \vec{B}$. Assim, a rotação é produzida por uma força volumétrica de origem eletromagnética, que atua diretamente sobre as partículas. A força centrífuga provoca uma separação parcial, na direção radial, de forma análoga à centrífuga mecânica. A Figura 3 ilustra esquematicamente os perfis radiais de densidade para partículas de massas diferentes.

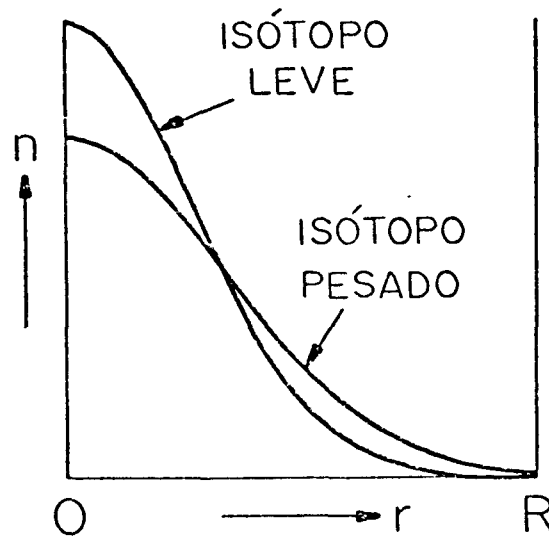


Fig. 3 - Perfil radial da densidade de partículas em uma centrífuga de plasma.

O plasma em rotação apresenta um gradiente radial de pressão dirigido para fora, cuja atuação se soma à da força centrífuga. No equilíbrio, os elétrons se encontram fortemente ligados às linhas do campo magnético, sofrendo uma ação desprezível da força centrífuga em comparação com os íons. O movimento dos íons está em equilíbrio dinâmico, de tal modo que as forças radiais dirigidas para fora, que são: o gradiente de pressão, dp_i/dr ; a força centrífuga por unidade de volume, $n_i m_i r \Omega^2$ (rotor rígido); e a força diamagnética por unidade de volume, $n_i Z_i e r \Omega B_z$; são equilibradas pela força eletrostática por unidade de volume, $n_i Z_i e E_r$, que está dirigida para dentro. A grandeza Z_i fornece o número de carga das partículas, de forma que $Z = -1$ para os elétrons. O campo elétrico radial, $E_r = -d\phi/dr$, é produzido por uma pequena separação de cargas na coluna de plasma. De acordo com o exposto, a equação de conservação da quantidade de movimento por unidade de volume é escrita como:

$$\frac{dp_i}{dr} = n_i m_i r \Omega^2 + n_i Z_i e r \Omega B_z + n_i Z_i e E_r.$$

A equação de estado para o equilíbrio isotérmico ($T = T_i = T_e = \text{constante}$) é:

De acordo com esta expressão, o fator de separação, em um sistema com várias espécies em graus diferentes de ionização, depende de $\Delta m/Z$, e não de Δm , como na centrífuga mecânica:

$$\alpha = \alpha [\Delta(m/Z), v_{\theta}^2, 1/T].$$

Para uma temperatura típica da ordem de 1 eV e uma velocidade periférica de 3,1 km/s obtém-se um fator de separação unitário igual ao da centrífuga mecânica. Para uma velocidade de rotação da ordem de 10,3 km/s o enriquecimento do urânio poderia ser realizado em apenas um estágio. Experimentalmente, já foram observadas velocidades de rotação desta ordem e até maiores.

4. Modelagem da centrífuga de plasma

Até o presente, a maioria dos experimentos, de separação de elementos ou de isótopos em centrífugas de plasma, foram realizados em plasmas parcialmente ionizados, ou em colunas de plasma com envoltório de gás neutro. Nestes casos, a separação ocorre principalmente na componente neutra, tal como na centrífuga mecânica, servindo o plasma primordialmente como impulsor. As possíveis vantagens da centrífuga parcialmente ionizadas são: a menor temperatura de operação decorrente da grande abundância de partículas neutras e a redução na potência de entrada, que é muito maior quando é necessário manter o plasma completamente ionizado. As desvantagens decorrentes da presença de partículas neutras são: aumento da viscosidade, que retarda os íons e produz rotação com cisalhamento (provoca atrito e turbulência); e possível limitação da velocidade de rotação, associada ao fenômeno da velocidade crítica de Alfvén. Sendo $\vec{v}_i$ e $\vec{v}_n$ as velocidades médias dos íons e das partículas neutras, respectivamente, e ϕ_i o potencial mínimo de ionização das partículas neutras, a velocidade crítica de Alfvén, para um plasma parcialmente ionizado, é dado por:

$$|\vec{v}_i - \vec{v}_n| \leq v_c = (2e\phi_i/m_i)^{1/2}.$$

Desta forma, a presença de partículas neutras resulta em limitações na separação isotópica. Para evitar os efeitos nocivos introduzidos por estas partículas, a coluna de plasma deve ser totalmente ionizada e envolvida por vácuo. Uma descarga em arco no vácuo, magnetizada por um campo axial, produz uma coluna de plasma estável totalmente ionizada, em condições favoráveis para a operação de uma centrífuga de plasma.

Todos os modelos analíticos até agora desenvolvidos, com respeito à centrífuga de plasma, empregam a teoria de fluidos para descrever o plasma, com simplificações que conduzem ao modelo MHD. O que torna particularmente difícil a descrição de descargas em configurações não-coaxiais, tal como ilustrado na Figura 4, mesmo em condições de equilíbrio, é que as variações radial e axial são igualmente importantes em uma extensa região próxima ao catodo.

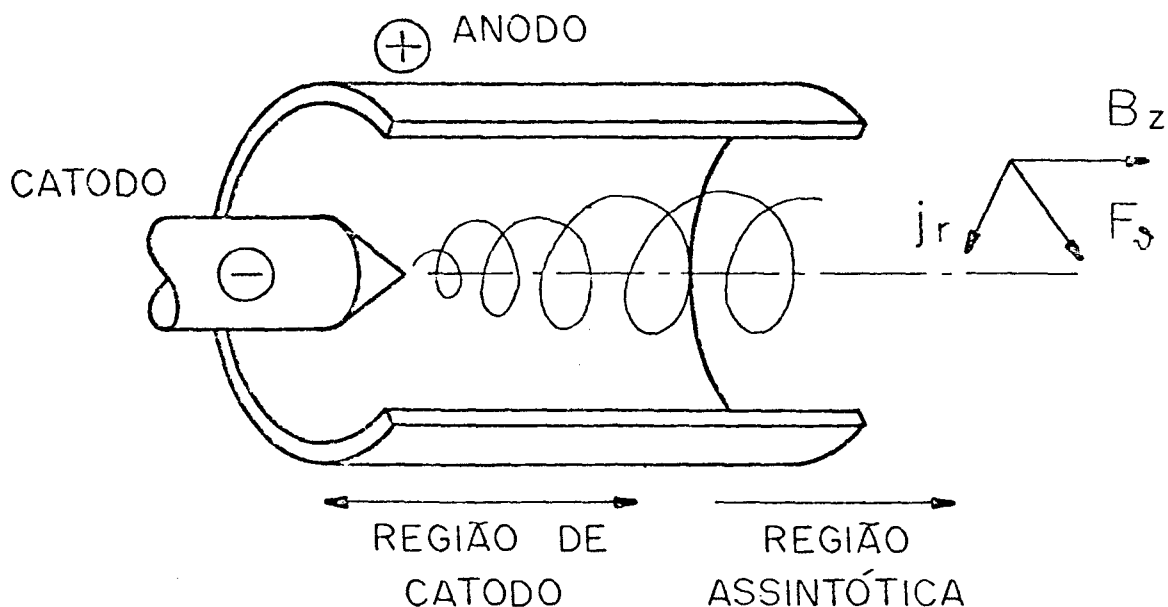


Fig. 4 - Arco magnetoplasmadinâmico utilizado em centrífuga de plasma. A centrifugação é obtida pela interação da corrente radial, j_r , em uma descarga de geometria cilíndrica, com o campo magnético axial aplicado, B_z , resultando na força azimuthal, F_θ .

Nesta região de catodo, as componentes azimutal e radial da velocidade são de grandeza comparável, embora muito menores que a componente axial. O problema pode ser grandemente simplificado limitando a análise à região assintótica (estado de quase-equilíbrio), onde as variações com a coordenada axial são muito menores que em intervalos equivalentes na região próxima ao catodo. Nesta região, a componente radial de velocidade é muito menor que as demais componentes, e a componente axial de velocidade é praticamente independente das coordenadas axial e radial, embora assumam valores ligeiramente diferentes de uma espécie para outra. Além disso, na região assintótica a coluna de plasma executa uma rotação de corpo rígido. Em geral, efeitos de viscosidade não são importantes no estudo de descargas em plasmas totalmente ionizados. Obviamente, estas aproximações resultam na perda de uma grande quantidade de informação, principalmente no que diz respeito à influência da geometria do catodo na descarga. Porém, o estudo deste sistema, mesmo idealizado, possibilita o discernimento de alguns aspectos do comportamento da centrífuga de plasma.

ANEXO 3

RESULTADOS RECENTES NA ÁREA PLASMAS E RADIAÇÃO (PRAD)

A tecnologia de fontes de radiação milimétrica de alta coerência espectral e alta potência sofreu um avanço considerável, principalmente, nos últimos seis anos, tendo em vista suas aplicações nas áreas de fusão termonuclear controlada e sistemas de radar de alta resolução. No campo da fusão, mais especificamente, os girotrons podem ser empregados no aquecimento de plasmas até a temperatura de ignição. Estas aplicações já vêm sendo realizadas nos principais laboratórios de pesquisa na área de física dos plasmas.

O Instituto de Pesquisas Espaciais iniciou o desenvolvimento desta tecnologia, no Brasil, tendo por meta a construção de um girotron na frequência de 30 GHz. O projeto detalhado deste dispositivo, que será futuramente utilizado em experimentos de aquecimento de plasmas por ressonância ciclotrônica de elétrons, continua sendo executado. Já foram realizados estudos preliminares da interação do feixe de elétrons com os campos da cavidade, visando a determinação das condições de otimização da eficiência de conversão de energia dos elétrons para o campo de radiação. Encontra-se em fase adiantada o projeto do canhão injetor de elétrons. Este projeto está sendo realizado utilizando técnicas de simulação numérica, conforme ilustrado na Figura 1. Assim que este programa de caracterização do feixe eletrônico for concluído, será integrado aos programas de otimização já mencionados.

Visando a aplicação do girotron no aquecimento de plasmas termonucleares, iniciou-se o desenvolvimento de programas de acompanhamento de raios em plasmas magnetizados. Estes programas estão sendo utilizados no estudo da acessibilidade e da deposição de energia no plasma, em dispositivos do tipo tokamak ou de espelhos magnéticos. A Figura 2 ilustra a aplicação destes programas no estudo do aquecimento, por ressonância ciclotrônica de elétrons, em um plasma com os parâmetros do projeto do futuro tokamak TBR-2. Foi, também, iniciado o acoplamento do

programa de acompanhamento de raios a um programa de transporte para estudo da evolução temporal do equilíbrio durante a aplicação do pulso de aquecimento.

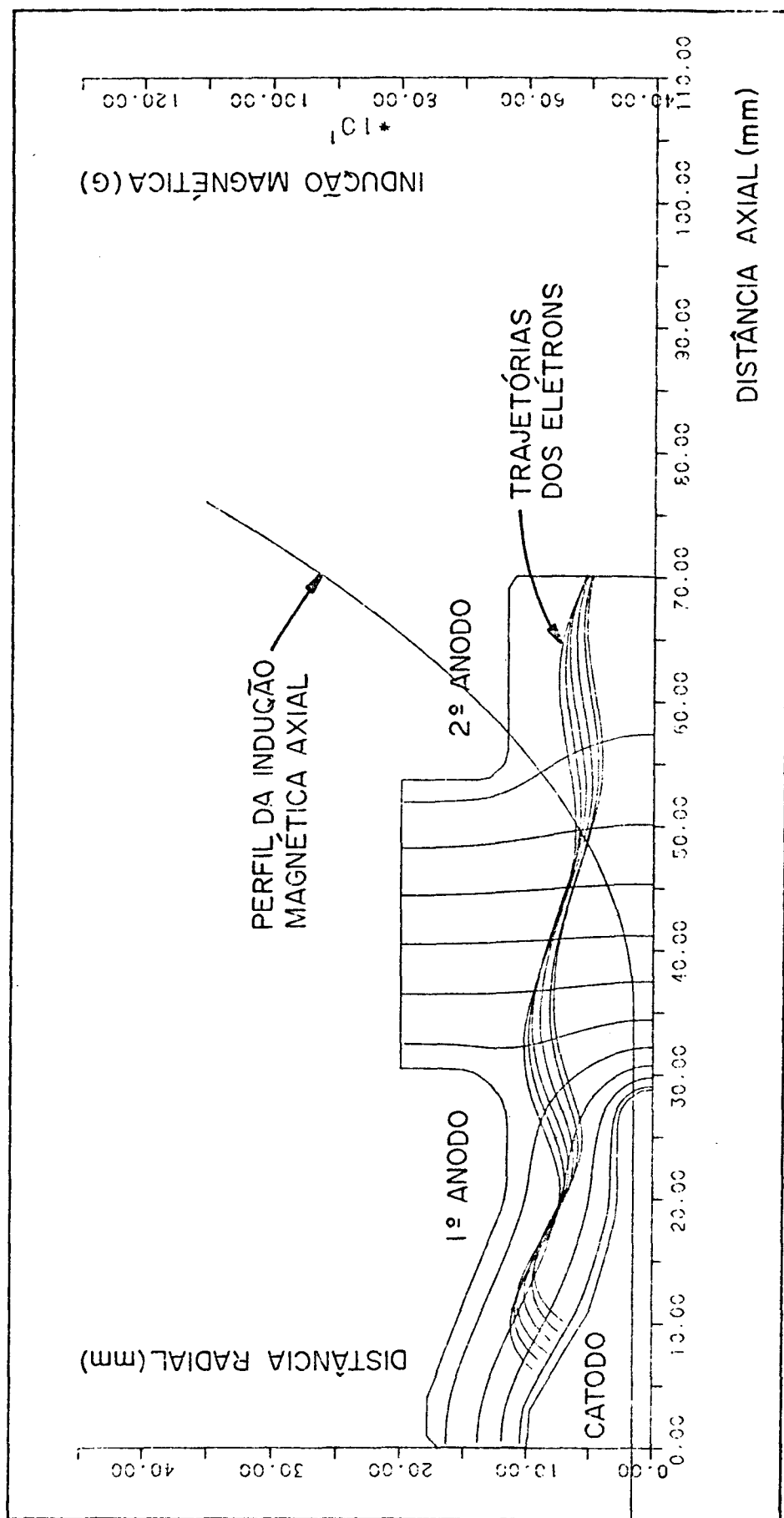


Fig. 1 - Canhão injetor de elétrons do girotron

Os elétrons emitidos pelo catodo ($\sim 50\text{kV}$) são inicialmente acelerados pelo 1º anodo ($\sim 20\text{kV}$) em um campo E-B cruzado, de modo a executarem uma rotação azimutal. Em seguida, são acelerados pelo 2º anodo (0kV), atingindo velocidades relativísticas. Uma parte apreciável (até 70%) da energia axial dos elétrons é convertida em energia transversal, durante o processo de aceleração e compressão adiabática do feixe eletrônico. As partículas descrevem trajetórias helicoidais em torno das linhas do campo magnético externo. A alta eficiência dos girotrons é atribuída, em parte, ao uso deste canhão injetor tipo magnetron, que opera em regime de emissão limitada por temperatura para diminuir o efeito deletério da carga espacial.

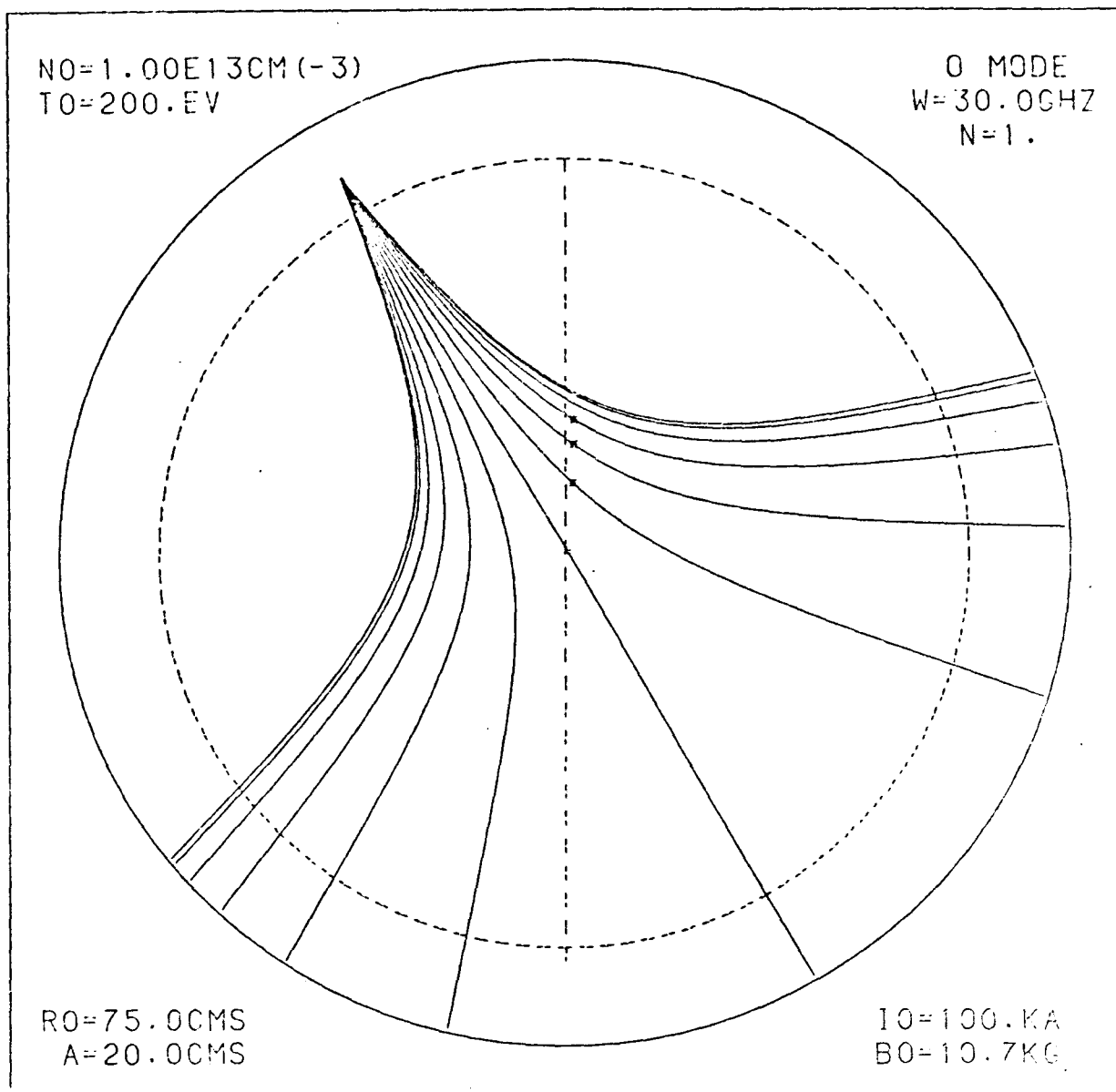


Fig. 2a - Vista poloidal das trajetórias dos raios para a propagação de ondas do modo ordinário no tokamak TBR-2. A onda eletromagnética é introduzida no plasma através de uma antena que lança um feixe de raios com uma distribuição cônica num ângulo poloidal de 120° . Cada asterisco ao longo da trajetória do raio indica uma deposição de energia adicional de 10%. Note-se que a deposição de energia ocorre próximo à camada de ressonância ciclotrônica ($\omega = \Omega_e$) representada pela linha pontilhada. Como se vê parte da energia incidente é refratada e não atravessa a camada ressonante. Os parâmetros do plasma são: densidade eletrônica central (n_0) = $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, temperatura eletrônica central (T_0) = 200 eV, raio maior do torus (R_0) = 75 cm, raio do plasma (a) = 20 cm, corrente total do plasma (I_0) = 100 kA, campo magnético toroidal central (B_0) = 10,7 kG. Os parâmetros da onda são: frequência (ω) = 30 GHz, modo ordinário (0), fundamental ($N=1$).

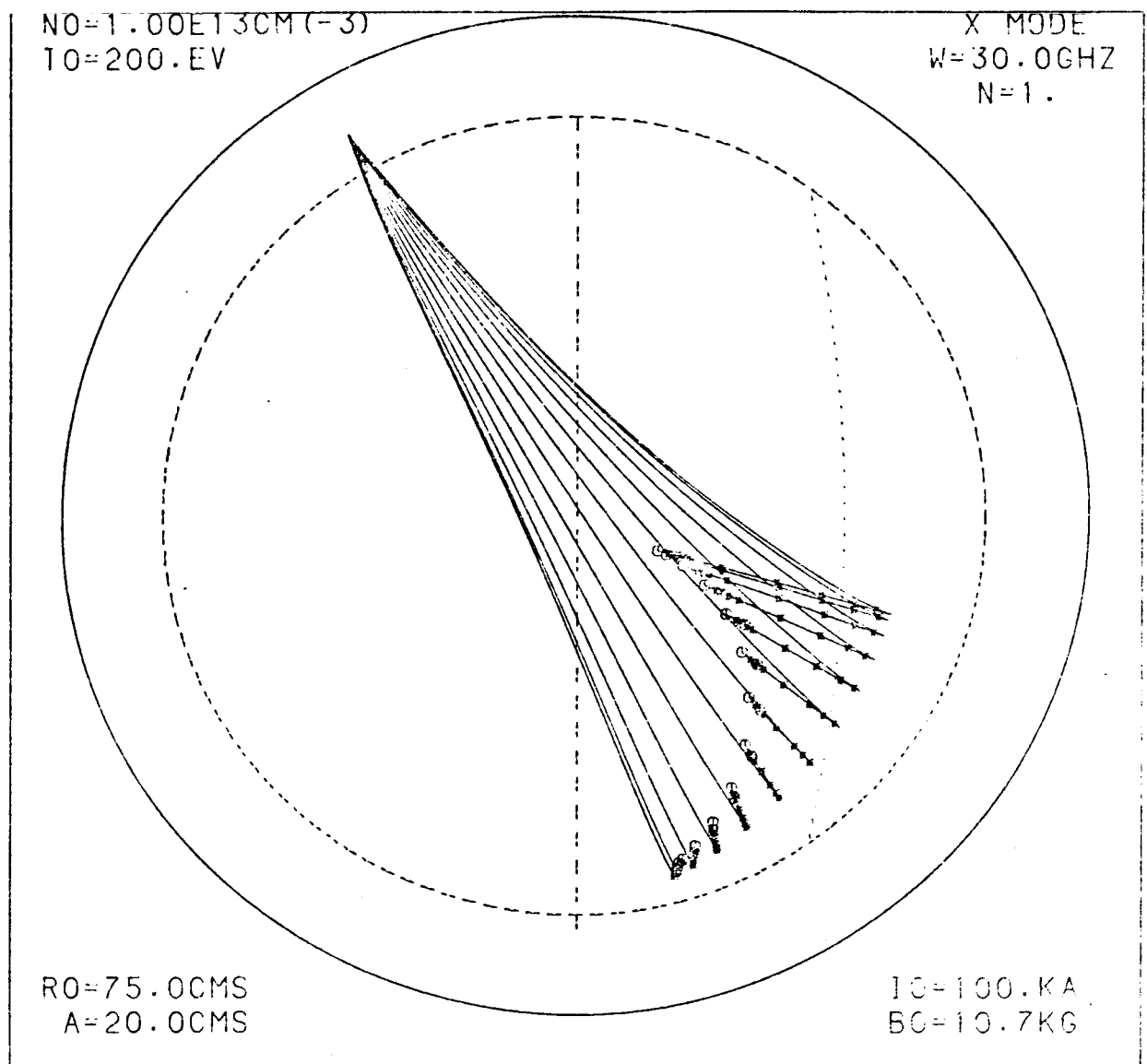


Fig. 2b = Propagação do modo extraordinário. Os parâmetros do plasma são os mesmos que na figura anterior. Note-se que toda a energia é depositada próxima à superfície híbrida superior (linha pontilhada) após haver sofrido conversão de modo, transformando-se em onda de Bernstein.

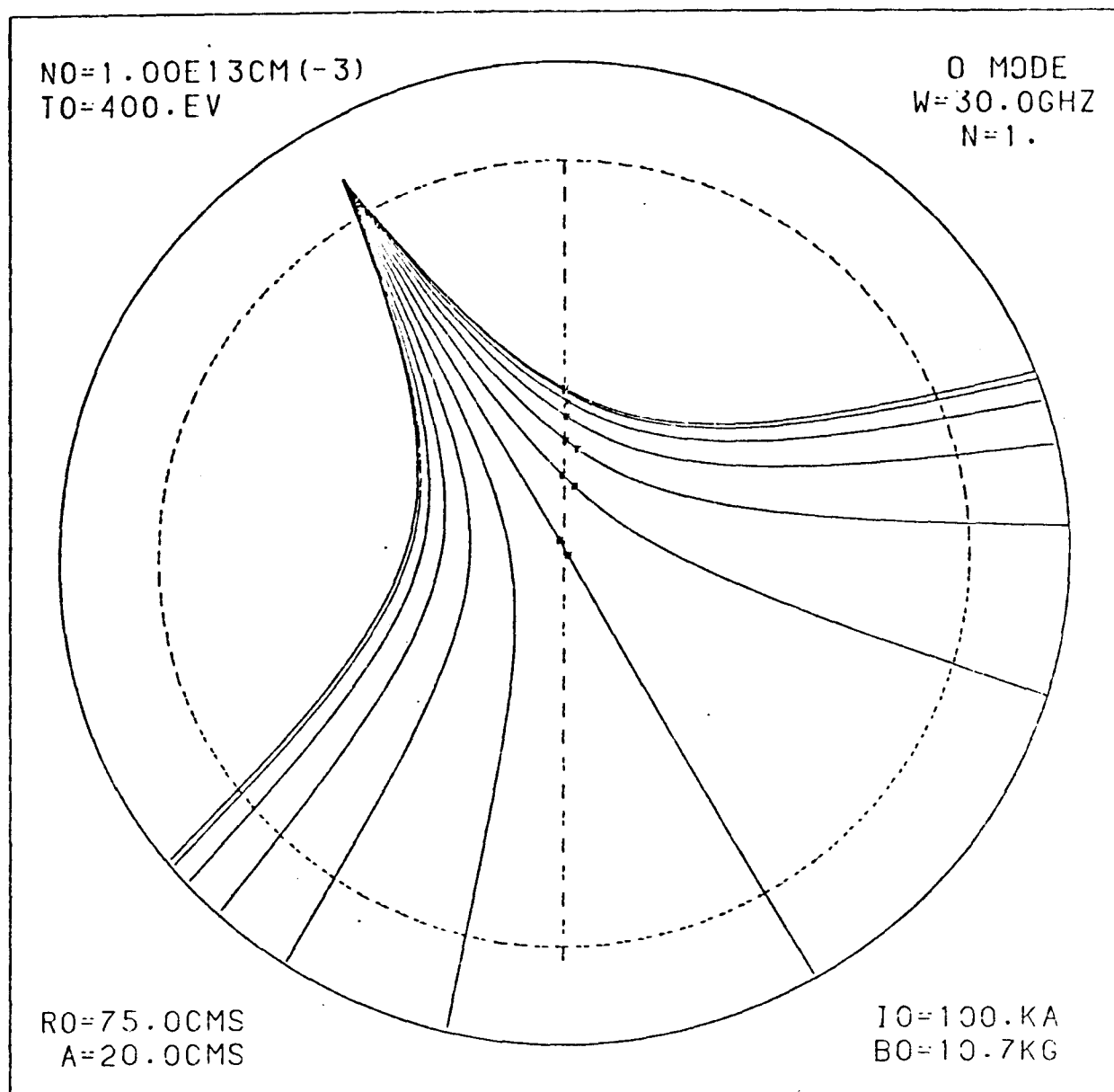


Fig. 2c - Trajetória dos raios para propagação do modo ordinário. Nesta simulação usaram-se os mesmos parâmetros da figura (2a), com exceção da temperatura eletrônica que foi aumentada para $T_0 = 400$ eV. A comparação desta figura com a figura (2a) permite que se observe o efeito da temperatura na deposição de energia.

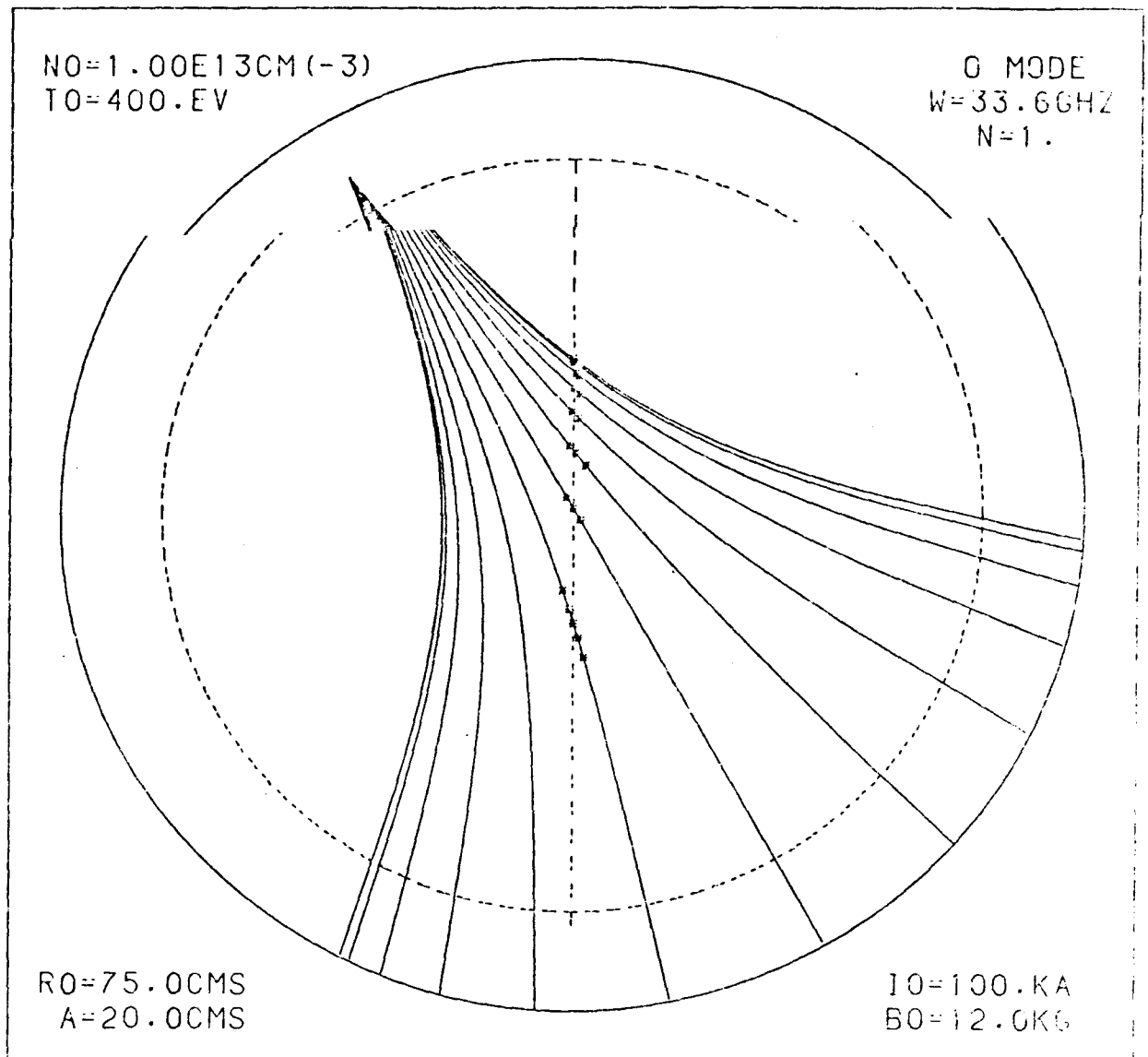


Fig. 2d - Propagação do modo ordinário. Nesta simulação aumentou-se a frequência da onda para $\omega = 33,6$ GHz e o campo magnético toroidal central para $B_0 = 12$ kG. Os outros parâmetros do plasma são os mesmos da figura (2c). Nestas condições observou-se um aumento dramático na deposição de energia.

ANEXO 4

PROJETO DE UM PROPULSOR IÔNICO

G.E. Perche

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq
12200 - São José dos Campos, SP, Brasil

RESUMO

Entre os sistemas de propulsão elétrica para satélites e espaçonaves destaca-se o propulsor eletrostático com ionização de mer_ cúrio por bombardeamento de elétrons. Este trabalho apresenta o proje_ to de um propulsor deste tipo com 5 cm de diâmetro, impulso específico de 3.000s e empuxo de 5 mN. A vantagem de utilizar um foguete exógeno e os testes que se pretende realizar também são descritos.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	v
1. FUNCIONAMENTO	1
2. APLICAÇÕES	3
3. CARACTERÍSTICAS DO PROJETO	5
4. PARTE EXPERIMENTAL	7

LISTA DE FIGURAS

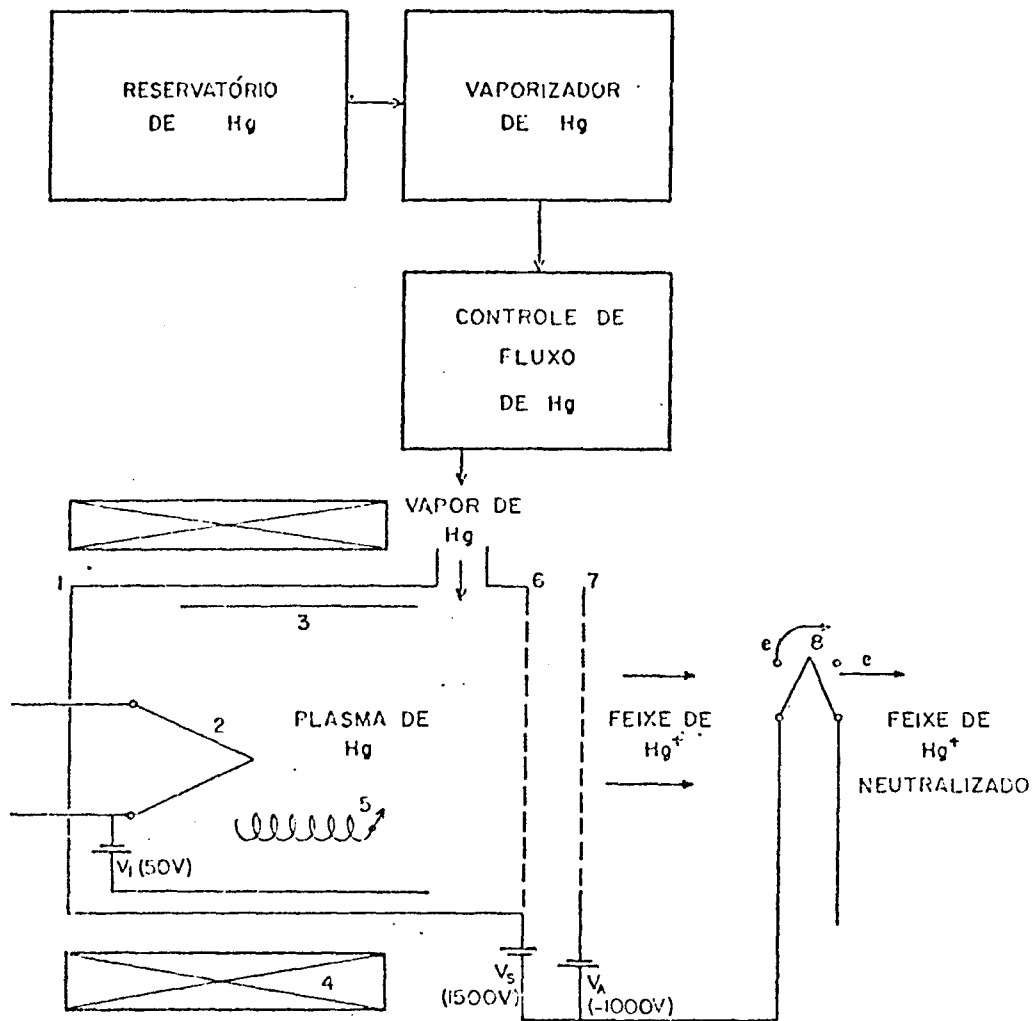
	<u>Pág.</u>
1 - Funcionamento esquemático de um propulsor iônico	2
3 - Atuação dos propulsores para manter correta a latitude de um satélite	3
4 - Alteração da posição de um satélite no espaço	4
5 - Satélite entrando no espaço interplanetário	5
6 - Corte do primeiro modelo do propulsor iônico	6
7 - Foto do primeiro modelo do propulsor iônico	8

1. FUNCIONAMENTO

Impulso específico (I_s) é a quantidade de empuxo (F) gerada em um foguete por unidade de vazão em peso de propelente ($\dot{m}g$). Este valor é diretamente proporcional à velocidade de saída dos gases (v) e está limitado a 300 s para foguetes químicos:

$$I_s = F/\dot{m}g = v/g.$$

O propulsor iônico por aceleração eletrostática é capaz de apresentar impulso específico até 10.000 s e empuxo da ordem de 10 mN. No propulsor (Figura 1), o propelente vaporizado (Hg, Cs, Ar ou outros) é injetado em uma câmara de ionização onde é bombardeado por elétrons com energia de aproximadamente 50eV (caso de o propelente ser mercúrio). Do choque entre as partículas resulta um plasma com densidade $n = 10^{12}/\text{cm}^3$ e temperatura $kT_e = 5\text{eV}$. Os íons criados são extraídos e acelerados pelo campo elétrico existente entre a grade de separação e a de aceleração, junto à saída da câmara. A velocidade final dos íons é controlada pelo potencial da grade de separação e, a fim de manter a neutralidade da espaçonave, alguns elétrons são emitidos junto ao feixe de íons. Os elétrons primários são obtidos por emissão termoiônica e o trajeto dos elétrons do catodo ao anodo é aumentado criando um campo magnético axial no interior da câmara.



- 1 - Câmara de ionização
- 2 - Catodo
- 3 - Anodo
- 4 - Bobinas do campo magnético
- 5 - Trajetória dos elétrons primários
- 6 - Grade de separação
- 7 - Grade de aceleração
- 8 - Neutralizador

Fig. 1 - Funcionamento esquemático de um propulsor iônico.

2. APLICAÇÕES

Mudança de Órbita

O propulsor é capaz de levar 2 ou 3 vezes mais carga paga de uma órbita de 300 Km para uma órbita geostacionária que o propulsor que utiliza hidrazina. (Figura 2).

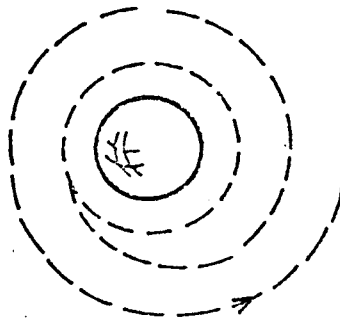


Fig. 2 - Trajetória para mudança de órbita utilizada por um propulsor iônico.

Correção de Latitude

O propulsor é capaz de aumentar em 300 Kg a carga paga de um satélite geostacionário de 2.000 Kg com vida útil de 7 anos (Figura 3).

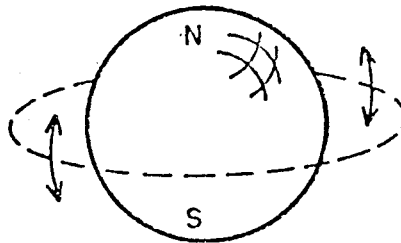


Fig. 3 - Atuação dos propulsores para manter correta a latitude de um satélite.

Satélites Míveis

O impulso total fornecido por um propulsor elétrico é cerca de dez vezes maior que o oferecido por foguetes químicos de mesma massa (Figura 4).

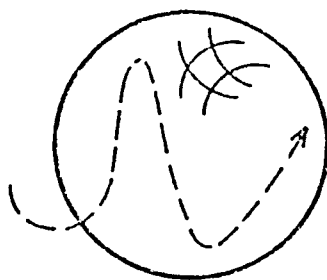


Fig. 4 - Alteração da posição de um satélite no espaço.

Missões Interplanetárias

Os propulsores elétricos são capazes de levar mais equipamento científico a bordo e tornar a espaçonave mais veloz (Figura 5).

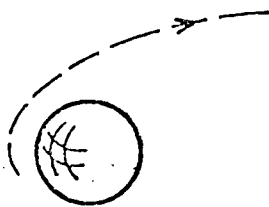


Fig. 5 - Satélite entrando no espaço interplanetário.

3. CARACTERÍSTICAS DO PROJETO

Tração:	5 mN
Impulso específico:	3.000 s
Propelente:	Hg
Câmara de ionização:	Fluxo Reverso
Construção:	Modular

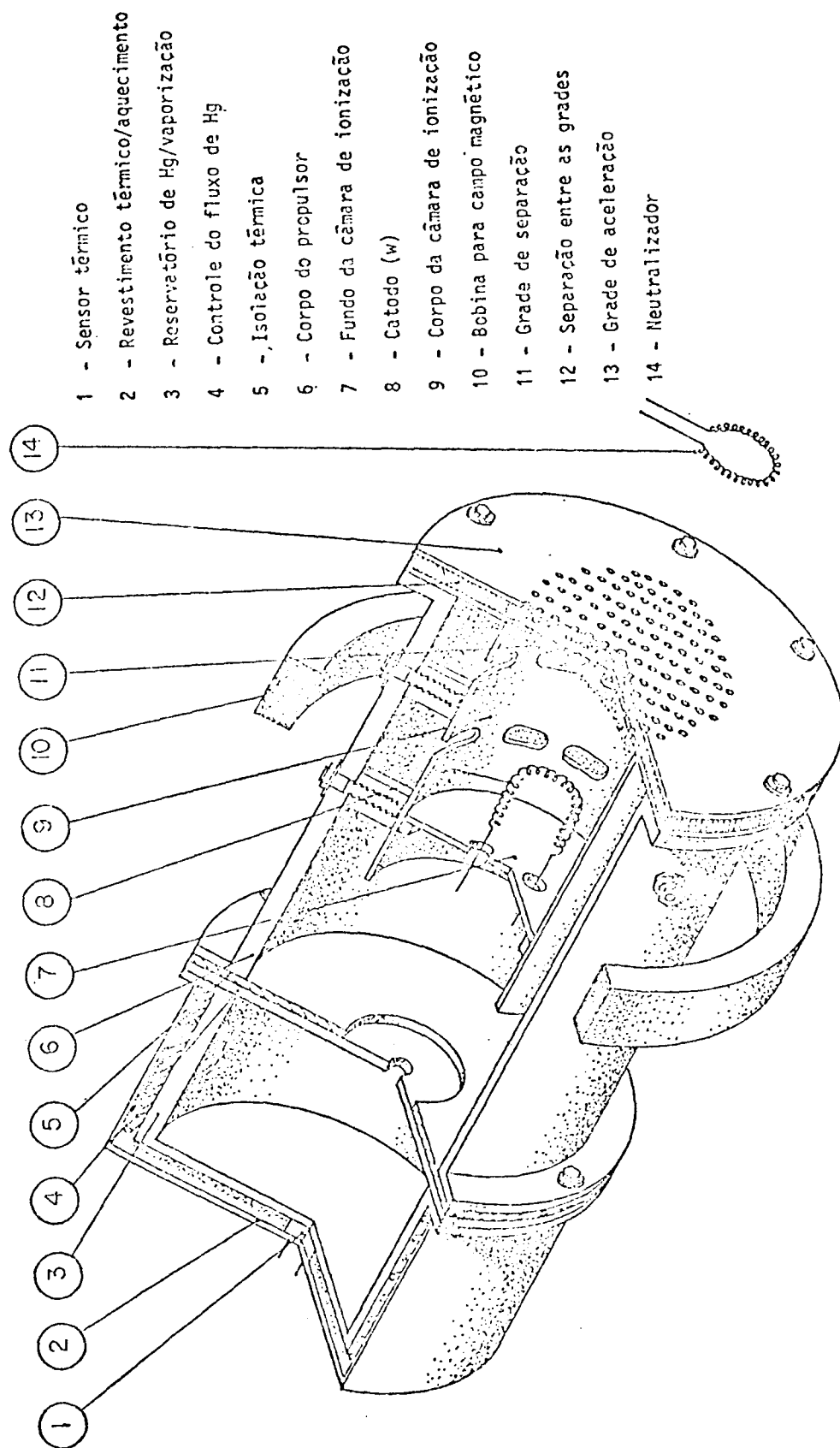
Dimensões

Potencial de grade de separação:	1500 V
Potencial da grade de aceleração:	-1200 V
Separação das grades:	1.4 mm
E spessura da grade de separação:	.5 mm
E spessura da grade de aceleração:	1.0 mm
Densidade de corrente pelas grades:	116 A/m ²
Diâmetro da secção de saída:	5 cm
Corrente do feixe de íons:	100 mA
Diâmetro dos furos das grades:	1.4 mm
Comprimento da câmara de ionização:	10 cm
Campo magnético no centro da câmara:	60 G

Fontes de alimentação

Vaporizador:	10V/5A
Aquecedor do catodo:	10V/5A
Descarga do catodo:	80V/8A
Campo magnético:	10V/5A
Grade de separação:	1.500/100 mA
Grade de aceleração:	1.500/100 mA
Aquecedor do neutralizador:	10V/5A
Neutralizador:	10V/100 mA

Na Figura 6 pode-se ver o primeiro modelo do propulsor iô
nico.



- 1 - Sensor térmico
- 2 - Revestimento térmico/aquecimento
- 3 - Reservatório de Hg/vaporização
- 4 - Controle do fluxo de Hg
- 5 - Isolção térmica
- 6 - Corpo do propulsor
- 7 - Fundo da câmara de ionização
- 8 - Catodo (w)
- 9 - Corpo da câmara de ionização
- 10 - Bobina para campo magnético
- 11 - Grade de separação
- 12 - Separação entre as grades
- 13 - Grade de aceleração
- 14 - Neutralizador

Fig. 6 - Corte do primeiro modelo do propulsor iônico

4. PARTE EXPERIMENTAL

A Figura 7 mostra a fotografia do primeiro modelo do propulsor iônico que é constituído de: Reservatório de Hg, Vaporizador, Câmara de ionização, Grades de separação e Aceleração, Campo magnético e Neutralizador. Cada uma das partes componentes do propulsor pode ser modificada separadamente, sem alteração das demais. Desta forma, é possível otimizar cada um dos componentes do propulsor de forma simples.

Para simular as condições que serão encontradas no espaço, a câmara de testes do propulsor deve ser suficientemente grande para não interagir de forma significativa com o feixe de íons, manter uma pressão de 10^{-6} torr no máximo e possuir um sistema que assegure que todo o mercúrio expelido pelo propulsor não interfira com o feixe. O feixe de íons será estudado em uma câmara com 85 cm de diâmetro por 120 cm de comprimento e resfriamento criogênico, o propulsor estará instalado em uma câmara menor acoplada à primeira por uma válvula tipo pêndulo, que permite que a câmara menor possa ser aberta e fechada sem que o vácuo na câmara principal seja perdido.

Pretende-se realizar os testes de empuxo, consumo de propelente, impulso específico e outras condições de operação no início de 1984, sendo que até 1985 espera-se ter dados suficientes para construir um segundo modelo mais aprimorado.

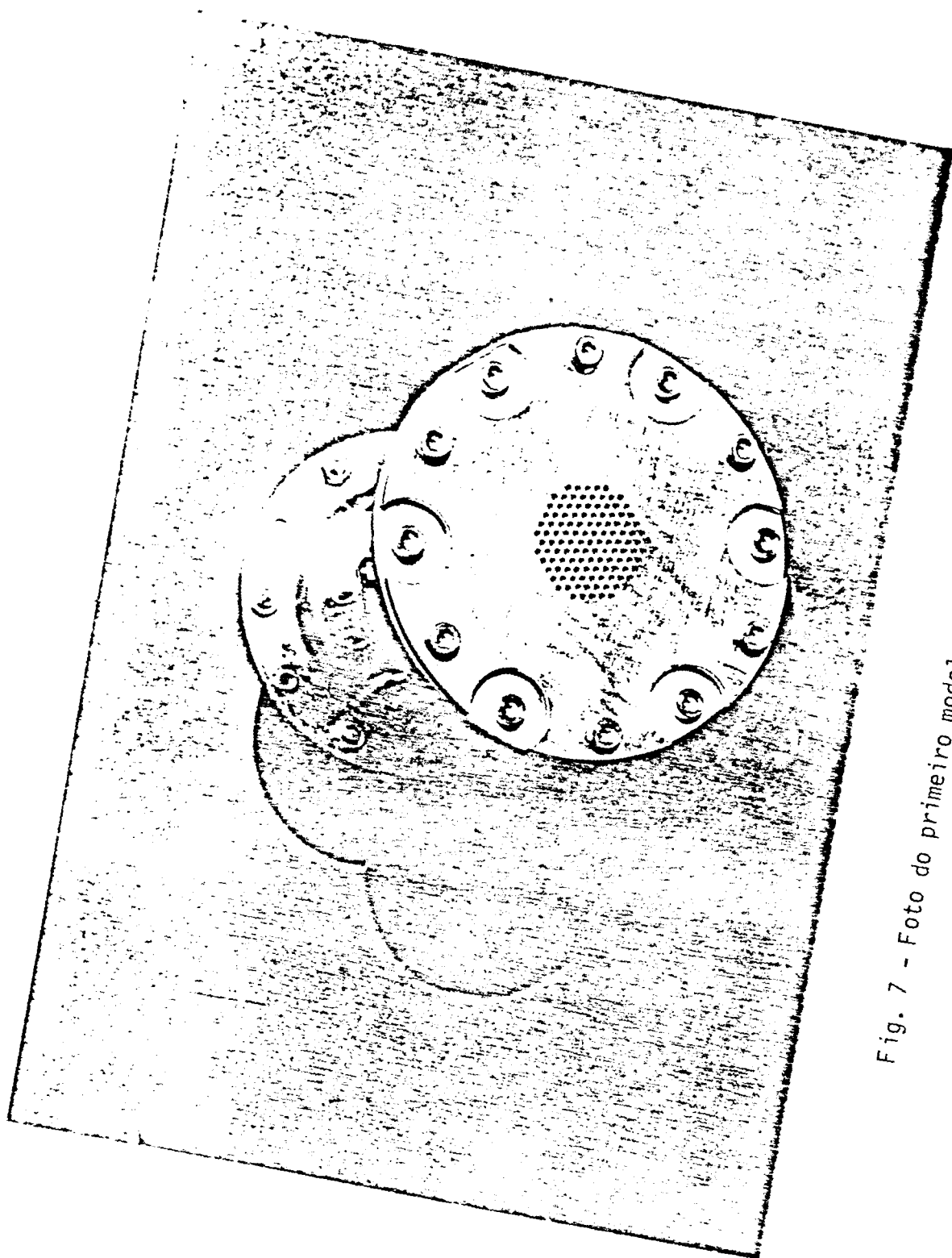


Fig. 7 - Foto do primeiro modelo do propulsor iônico.