



Ministério da Ciência e Tecnologia

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

**RELATÓRIO CIENTÍFICO FINAL
Á FAPESP DO PROJETO DE AUXÍLIO À PESQUISA
Processo nº 2001/02496-6**

**MONOTRON E CAVIDADES AZIMUTALMENTE CORRUGADAS :
APLICAÇÃO À GERAÇÃO DE MICROONDAS DE ALTA POTÊNCIA
(Parte II)**

PEDRO JOSÉ DE CASTRO

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE
CENTRO DE TECNOLOGIAS ESPECIAIS - CTE
LABORATÓRIO ASSOCIADO DE PLASMA
SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, SP**

2004

ÍNDICE

RESUMO	01
1. INTRODUÇÃO	02
2. PROJETO MONOTRON	04
3. DESENVOLVIMENTO DE RESSOADORES DIELÉTRICOS	22
4. CAVIDADES REENTRANTES PARA DETECTORES DE ONDAS GRAVITACIONAIS	38
5. ORIENTAÇÃO DE ESTUDANTES E BOLSISTAS	37
6. PARTICIPAÇÃO EM BANCAS	38
7. PARTICIPAÇÃO EM CONGRESSOS	39
8. TRABALHOS PUBLICADOS	40

RESUMO

O presente Relatório Científico Final de atividades trata da construção e operação inicial de um monotron em 6,7 GHz para geração de microondas de alta potência, do estudo de cavidades reentrantes como transdutor eletromecânico em um detector de ondas gravitacionais e do desenvolvimento de ressoadores dielétricos para aplicação em telecomunicações. Nessas pesquisas têm sido já utilizados os diversos componentes de microondas e de vácuo que foram adquiridos no atual projeto da FAPESP. Os primeiros experimentos do monotron revelaram um desempenho satisfatório do catodo emissor de elétrons fornecendo 10 kV de tensão e 2,7 A de corrente de catodo. Foram implementados melhoramentos na montagem do catodo com ênfase na confecção de um novo filamento de aquecimento e na faixa emissora, com o objetivo de otimizar o seu desempenho com o aumento da corrente de catodo. A cavidade ressonante, por sua vez, composta de várias partes que se encaixam, não proporcionou um bom contato elétrico em termos de microondas, como também, os testes indicaram um baixo rendimento (baixo valor do fator de qualidade). Assim está sendo fabricada uma nova cavidade constituída de uma única peça. Foi caracterizado o sistema de guiagem para a radiação gerada pelo monotron em relação às perdas de transmissão e foi determinada a curva de resposta do detector na frequência de operação do monotron. Tais medições são importantes para a avaliação final da potência de saída do monotron. Atualmente está também em fase final de construção um novo circuito de alta-tensão para 15-20 kV, necessário para o disparo mais potente e eficiente do feixe de elétrons. Foram desenvolvidos ressoadores dielétricos de nanotitanato de bário dopados tanto com zircônia como com estrôncio, verificando uma melhoria gradativa das propriedades dielétricas em microondas. Num projeto em colaboração com a Divisão de Astrofísica do INPE, foram feitos estudos teóricos e experimentais com protótipos de cavidades reentrantes para serem utilizadas como transdutor eletromecânico no detector de ondas gravitacionais Mario Schenberg, ora em construção.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente o LAP/INPE está construindo uma máquina para experimentos de plasma de fusão - o Tokamak ETE. O projeto do Tokamak representa um esforço brasileiro para iniciar a pesquisa no âmbito da fusão nuclear controlada, que constitui uma forma alternativa de energia prevista para este início de milênio. Na máquina em questão serão estudados vários fenômenos da física envolvida e serão feitos vários diagnósticos como a determinação dos parâmetros do plasma – temperatura e densidade.

Para melhorar as condições de plasma inicial está planejado um sistema de radiofrequência para pré- ionização do plasma no tokamak ETE. A finalidade da pré- ionização é criar um plasma inicial de baixa temperatura e densidade instantes antes da descarga principal de partida, economizando desta forma uma quantidade de energia que pode ser usada para prolongar a duração da corrente de plasma. Além disso, tal fato possibilita que o início da descarga principal ocorra longe das paredes da câmara, diminuindo a contaminação do plasma por impurezas. A pré- ionização por ECR (ressonância eletrôn-ciclotrônica) tem sido usada em muitos tokamaks. Ela se baseia no fenômeno de ressonância entre uma onda eletromagnética lançada num gás e o movimento ciclotrônico dos elétrons num campo magnético.

Tendo em vista que comercialmente não há fontes de microondas na faixa de 5 a 11 GHz e que gerem radiação em algumas dezenas de quilowatts com pulsos de longa duração (>1 ms), estudos têm demonstrado que o monotron poderia ser utilizado para essas aplicações [s. 2]. O monotron – o mais simples dos geradores de microondas – poderia preencher esta lacuna e se construído, poderia ser usado no sistema de pré- ionização do plasma tori-esférico do tokamak ETE do LAP/INPE.

O funcionamento do monotron requer um sistema de alto vácuo, visto que o feixe de elétrons requer um meio sem impurezas para a sua propagação. Para medidas de potência propomos o uso de um atenuador que suporte a alta potência envolvida, acrescidos de um detector-sensor e um medidor de potência, além de outros acessórios para completar a linha de transmissão de testes. Uma antena do tipo corneta coletará a radiação emitida pelo monotron.

O desenvolvimento de ressoadores dielétricos para aplicação em circuitos de microondas representa uma das primeiras tentativas no país nesse sentido, a partir de tecnologias e matérias-primas nacionais. Tais dispositivos estão sendo desenvolvidos no nosso Laboratório em colaboração com o Laboratório Associado de Sensores e Materiais para uma possível aplicação no circuito de microondas de um Satélite de Comunicações do INPE. Alguns

protótipos já foram confeccionados e caracterizados e, atualmente, estão sendo estudados ressoadores de nanotitanato de bário dopados com zircônia, com os objetivos de melhorar as suas características em microondas. Este assunto reveste-se de bastante importância pelo fato de que nesta área (Cerâmicas Eletro-Eletrônicas) há dois estudantes – um de Iniciação Científica e o outro defendeu recentemente a sua dissertação de mestrado. Um terceiro estudante de Iniciação Científica concluiu as atividades em 2003.

O primeiro relatório à FAPESP [1] apresentou uma nova etapa do projeto girotron com a pesquisa voltada para novos tipos de ressoadores e fontes de microondas de alta potência. Foi concretizado um estudo inicial tanto teórico como experimental de ressoadores abertos corrugados [1] para uso em girotrons harmônicos e mais tarde, no monotron. Um dos aspectos interessantes desses ressoadores corrugados de perfil senoidal é a sua maior resistência à ruptura dielétrica por campos elétricos intensos em comparação às cavidades dos magnetrons tradicionais, além de apresentar interessantes propriedades eletrodinâmicas em termos de seleção de modos: foram confeccionados ressoadores de secção transversa corrugada senoidalmente. Para o cálculo dos fatores de qualidades de cavidades ressonantes faz-se necessário conhecer o real valor da condutividade elétrica do material da cavidade a ser investigada, que pode variar na frequência de ressonância desejada. Assim, foi criado um método versátil e prático para a medição da condutividade elétrica para quaisquer materiais [1].

O presente relatório refere-se às atividades de pesquisa no período compreendido entre janeiro/2003 a abril/2004. Em todas as etapas experimentais foram utilizados equipamentos, componentes e acessórios adquiridos pelo presente projeto da FAPESP (processo nº 01/02496-6) ou incorporados à estrutura já existente proveniente sobretudo do outro projeto ((processo nº 95/2532-0).

Referência:

- [1] Castro, P.J. “Monotron e Cavidades Azimutalmente Corrugadas: Aplicação à Geração de Microondas de Alta Potência”. I Relatório Científico (Parcial) à FAPESP de Projeto Individual de Pesquisa. Publicação INPE 9777-PRP/239, janeiro de 2003.

2. PROJETO MONOTRON

Conforme estudos já empreendidos, os atributos do monotron [1] o tornam indicado para aplicação em tokamaks esféricos, onde fontes de microondas de 5 a 11 GHz são requeridas para gerar corrente e aquecer plasmas confinados magneticamente [2,3]. Concretamente a sua aplicação está endereçada para o sistema de pré-ionização do plasma do Tokamak ETE, ora em construção no LAP/INPE.

Os primeiros estudos conceituais do monotron datam de 1940 e indicavam uma eficiência máxima teórica de 14,5%. Tal fato levou o monotron a ser considerado um dispositivo de pouco valor prático. Os nossos estudos, no entanto, vieram demonstrar que eficiências de 20% são atingidas com feixes de elétrons de energias fracamente relativísticas (~100 keV) em interação com um modo ressonante TM circularmente simétrico. Fundamentando-se nesta reavaliação, foi proposta a construção de um protótipo experimental para geração de microondas em 6,7 GHz com 20 kW de potência média para pré-ionização e aquecimento de plasmas em tokamaks esféricos.

O monotron é o mais simples das válvulas de microondas, sobretudo por não requerer a aplicação de um campo eletromagnético externo. Constitui um oscilador por efeito de tempo de trânsito em que um feixe de elétrons atravessa a região de interação em um ângulo de trânsito próximo de $(4N+1)B/2$, com N inteiro. Nesta condição de sincronismo, o feixe excita e interage instavelmente com um campo de RF fazendo que as oscilações eletromagnéticas cresçam às expensas da energia contínua do feixe injetado na cavidade. Formam-se então agrupamentos de elétrons que chegam à outra extremidade da cavidade em uma fase desaceleradora do campo de RF e assim transferem energia para a mesma cavidade. Os agrupamentos de elétrons constituem uma componente alternada da corrente alternada de convecção que por sua vez induz nas paredes da cavidade para sustentar as oscilações de forma consistente. Prescindindo de um campo magnético externo e outros atributos, o monotron torna-se um dispositivo compacto, de baixo peso e de fácil construção e manutenção.

A Fig. 2.1 apresenta um diagrama esquemático do monotron. A simulação completa do monotron e que inclui o circuito de saída é mostrada na Fig. 2.1 para o instante $t=1,5$ s no regime estacionário. A cavidade ressonante ao guia de onda de saída através de uma íris circular de raio 0,6 cm que transfere a potência de RF gerada na cavidade ao guia de saída (de raio 2,0 cm) que opera no modo TM_{01} . Para a simulação de um guia de comprimento infinito na mesma Fig.2.2, instala-se um disco resistivo ($\Delta=1,6 \Sigma.m$) com resistência por unidade de área igual à

impedância de onda do modo TM_{01} , isto é $Z_{TM}=\Delta/\epsilon_t$ onde $\epsilon_t=1,0$ cm representa a espessura do disco. Este, por sua vez, é posicionado a $\lambda_g/4$ (λ_g – comprimento de onda guiada) da extremidade curto-circuitada do guia, que se reflete como uma impedância infinita em paralelo com a resistência casada. Assim, o disco resistivo se comporta como um calorímetro ideal que absorve toda a energia radiada pela abertura circular. Note-se também na Fig. 2.2 que o anodo coletor consiste em um bloco metálico maciço para assegurar um resfriamento eficiente em regimes com pulsos de longa duração (vários microsegundos).

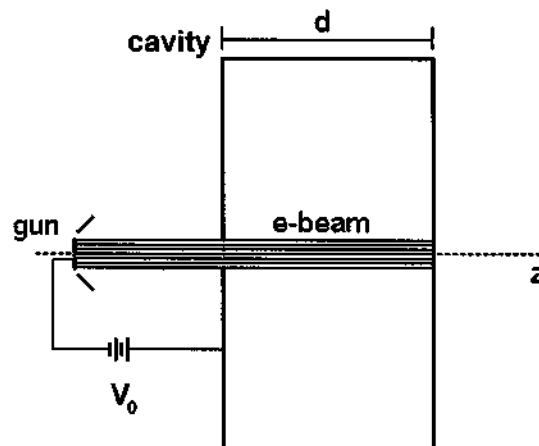


Fig. 2.1. Diagrama esquemático do monotron

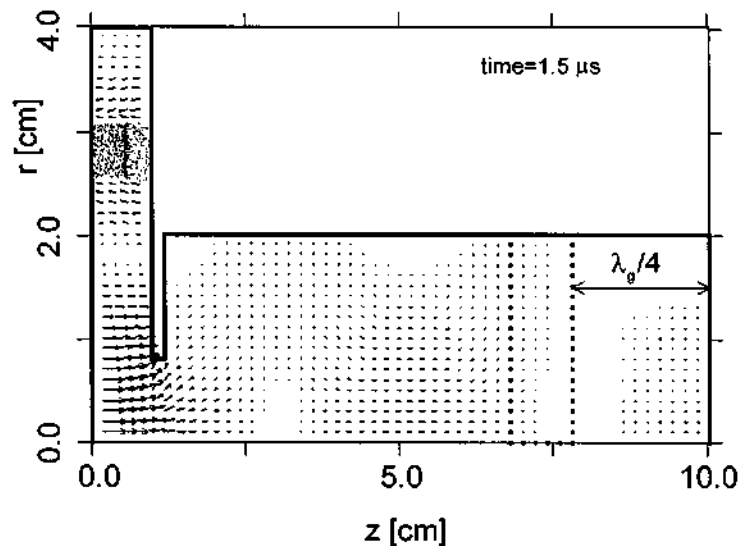


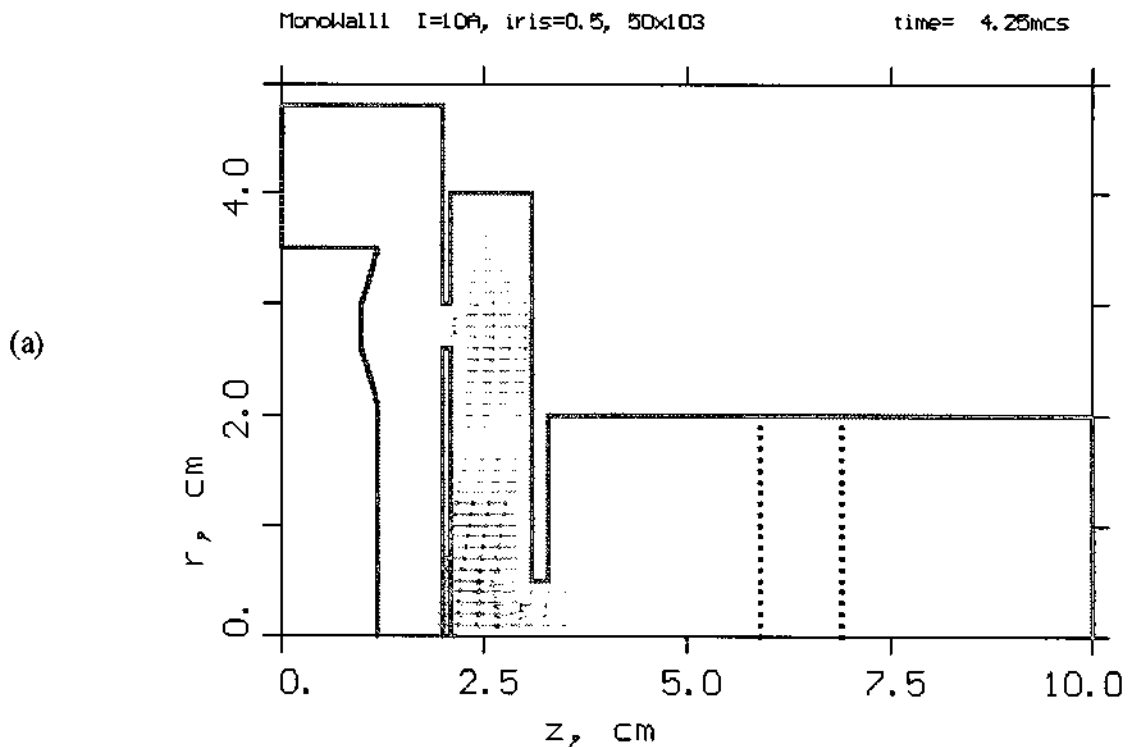
Fig. 2.2. Configuração de simulação por partículas do monotron TM_{020} no regime estacionário (O disco absorvedor é instalado a $\lambda_g/4$ da terminação curto-circuitada do guia de saída.)

O material emissor de elétrons que está sendo empregado é um filme de óxido de bário depositado sobre uma superfície de níquel. Tal material apresenta uma densidade de emissão de

3,0 A/cm² para operação do canhão no regime limitado por temperatura. Futuramente pretende-se empregar catodos de hexaboreto de lantânio com densidade típica de 10 A/cm².

Outras vistas, resultantes de simulações do monotron são apresentadas na Fig. 2.3: em a) uma vista do monotron com o canhão representado pelo anel que contém a faixa emissora; b) uma outra vista, agora com o feixe de elétrons; e c) um resultado concreto com gráfico de potência média (27 kW) e de pico (54 kW) para uma corrente de feixe e tensão de catodo de 10 A e 11 kV; assim, com uma potência de feixe de 110 kW obtemos uma eficiência de 27kW/110kW, que resulta em 24,5%.

A Fig. 2.4 representa uma vista tridimensional da câmara do primeiro protótipo do monotron, onde são indicadas as quatro portas de acesso e isoladores de cerâmica utilizados na polarização do catodo (-38 kV) e na alimentação do filamento de aquecimento da faixa emissora.



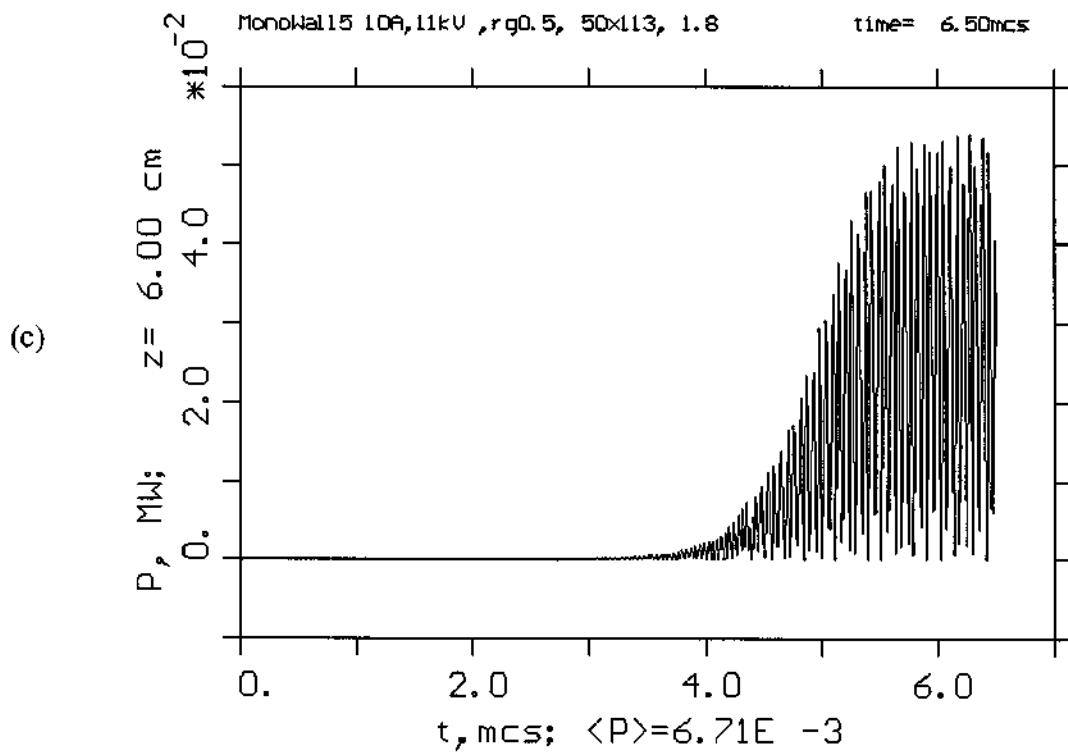


Fig. 2.3. Vistas diversas do monotron provenientes de simulações: a) com canhão de elétrons; b) com feixe de elétrons; c) gráfico de potência

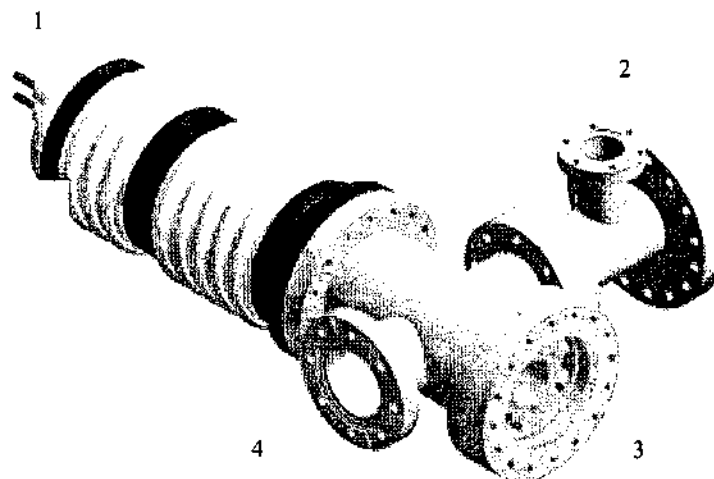


Fig. 2.4. Câmara do monotron primitivo e portas de acesso (1: alimentação do canhão; 2: sistema de vácuo; 3: saída da radiação; 4: diagnóstico da corrente de coletor)

Além do desenvolvimento tecnológico, esta linha de pesquisa justifica-se pelo fato de que na requerida de radiação eletromagnética coerente de dezenas de kilowatts e que operem em pulsos de longa duração ($>1\text{ms}$) não se encontram geradores de microondas disponíveis comercialmente. As atividades foram concentradas na construção do monotron em 6,7 GHz complementadas pela fabricação da estrutura mecânica, flanges, cavidade com íris ressonante. A configuração final do canhão foi definida após intensos testes térmicos para determinar um arranjo que assegurasse, além de um grau de confiabilidade, uma máxima eficiência térmica de aquecimento do catodo. Entre as configurações testadas (incluindo um esquema de aquecimento indireto com o filamento aquecedor embutido em um disco de alumina), chegou-se a um arranjo por aquecimento indireto em que o filamento de tungstênio, a 2500°C , por transferência térmica radiativa mantém o catodo aquecido na temperatura de operação de 1000°C para a emissão termiônica dos elétrons formadores do feixe eletrônico. Uma vista geral de toda a estrutura e montagem é mostrada na Fig. 2.5, onde se inclui a bomba turbomolecular de vácuo (esta foi a primeira montagem utilizada)

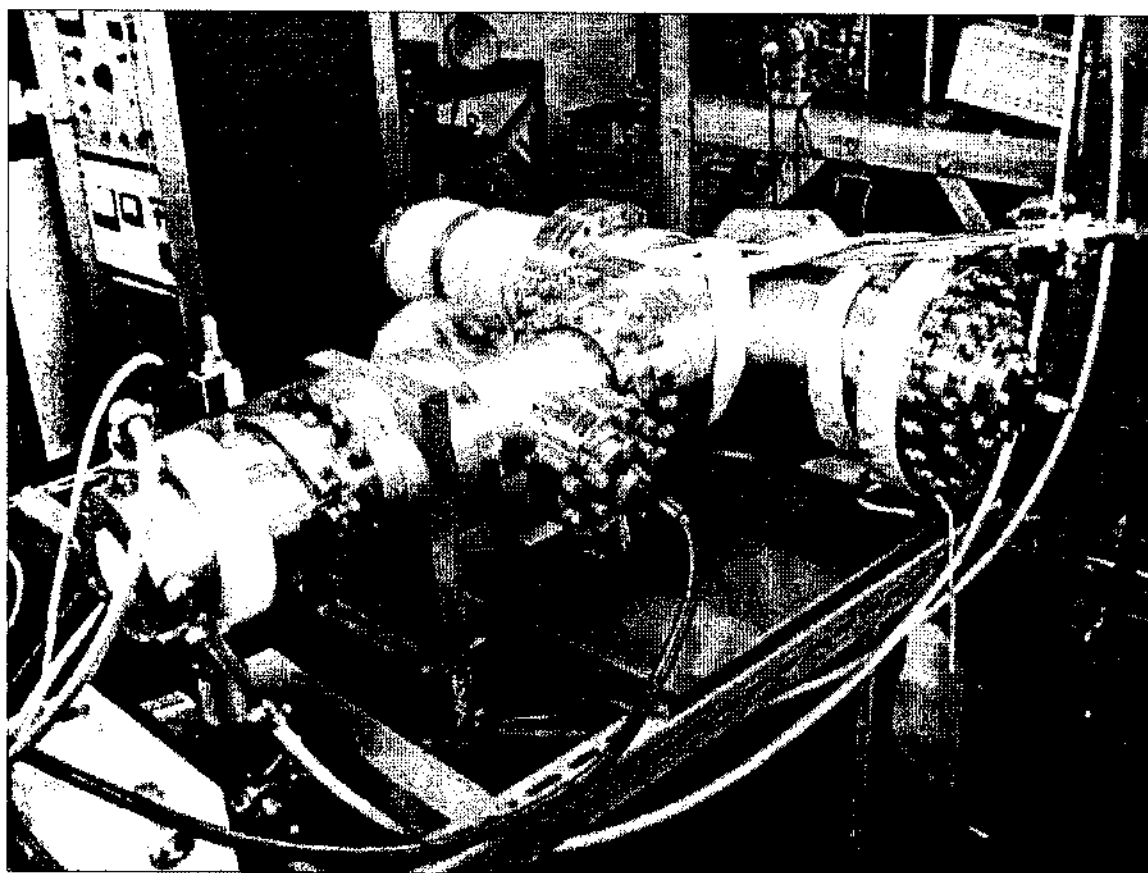


Fig. 2.5. Vista geral da estrutura e montagem do monotron primitivo

Uma fonte pulsada de alta tensão foi responsável pelo disparo do canhão de elétrons do monotron – Fig. 2.6. Esta fonte usa um tetrodo que realiza a dupla função de chavear a energia armazenada em um banco de capacitores ($2,0 \mu\text{F}/100 \text{ kV}$) e regular a tensão de saída. Um resistor de $2,5 \text{ k}\Omega$ em série com o tetrodo protege o sistema contra o risco de curto-circuito. Como a corrente do tetrodo está limitada em torno de 10 A no caso de curto-circuito, a tensão de saída (tensão de carga) suporta até no máximo 25 kV . O sistema pulsado tem uma taxa de repetição de cerca de 1 kHz e uma largura de pulso máxima de $50 \mu\text{s}$.

Os primeiros experimentos do monotron nas condições de catodo quente [4] constataram geração e transporte do feixe de elétrons, fixando a tensão de catodo em 10 kV (para obtenção da frequência teórica de oscilação em torno de $6,7 \text{ GHz}$). Os melhores resultados foram obtidos para uma tensão de filamento de 75 V – que corresponde a uma temperatura de catodo de cerca de 1000°C . Esses resultados superaram a expectativa e foram os seguintes: tensão de catodo: 10 kV ; tensão de saída: 20 kV ; corrente de grade: $0,9 \text{ A}$; corrente coletor: $3,1 \text{ A}$.

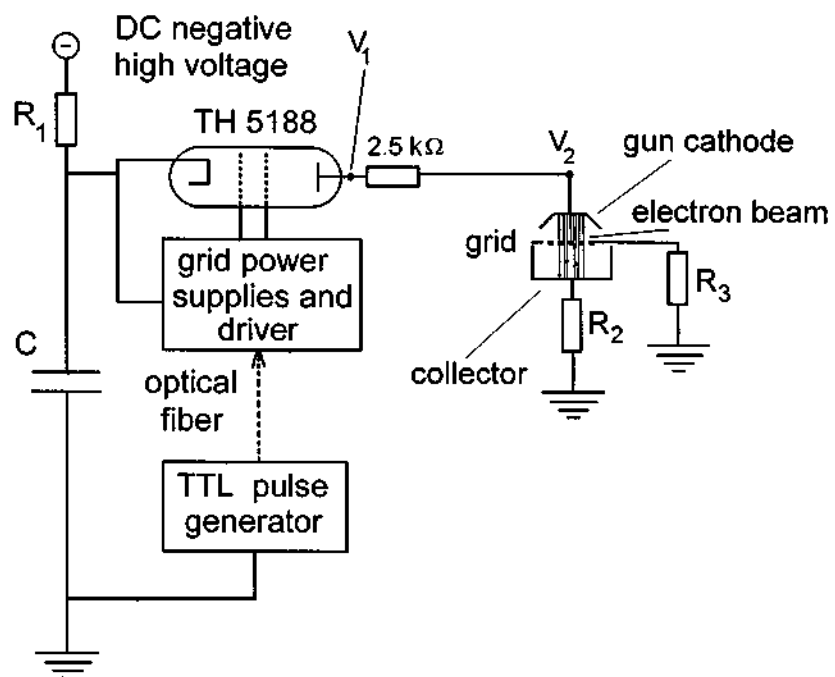


Fig. 2.6. Primeiro circuito do pulsador conectado ao canhão do monotron

A Fig. 2.7 apresenta um oscilograma gravado direto do experimento (canal 1- tensão de saída; canal 2 – tensão de catodo; canal 3 – corrente de coletor; canal 4 – corrente de grade). A corrente de grade deveria ser próxima de zero, então se constatou que parte do feixe ficou retida pela grade. Assim, para experimentos futuros deverá haver uma melhor focalização do feixe de elétrons para minimizar a corrente de grade e assim aumentar a corrente de catodo. Os pulsos de tensão (de saída e de catodo) em relação ao resistor de 2,5 k Ω fornecem a corrente total de 4,0 A $\{I_t = (20-10) \text{ kV} / 2,5 \text{ k}\Omega = 4,0 \text{ A}\}$, que está consistente com a soma das correntes de grade ($\sim 0,9 \text{ A}$) e coletor ($\sim 3,1 \text{ A}$).

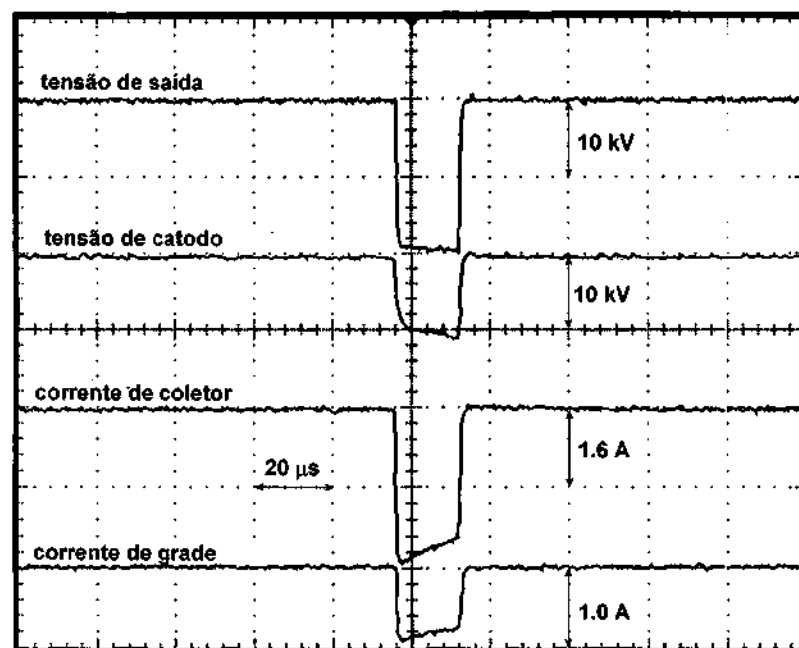


Fig. 2.7. Formas de onda de tensões e correntes medidas

Uma nova montagem do monotron foi implementada para melhorar as características do dispositivo sobretudo em termos de focalização do feixe de elétrons e torná-lo mais operacional, visto que a estrutura anterior era muito complexa e apresentava alguma dificuldade de manobra. Foi retirado o cilindro de material cerâmico de isolamento elétrica para alta tensão, que não era interessante nas condições de alto vácuo e por algumas vezes apresentou vazamento. Na verdade tal cilindro cerâmico foi aproveitado de outros projetos do nosso laboratório. No atual projeto apenas um pequeno anel de material isolante foi acondicionado internamente ao tubo. Além disso, o filamento foi substituído por outro com estrutura auto-sustentável, preso nas bordas do anel de cerâmica. Alguns detalhes de construção do anel da

faixa emissora de elétrons também foram implementados. Em suma, o objetivo de tais modificações é levar a um melhor desempenho do monotron com o aumento da corrente de catodo. A Fig. 2.8 apresenta aspectos técnicos da construção e montagem do novo protótipo com diversas facetas das partes constituintes.

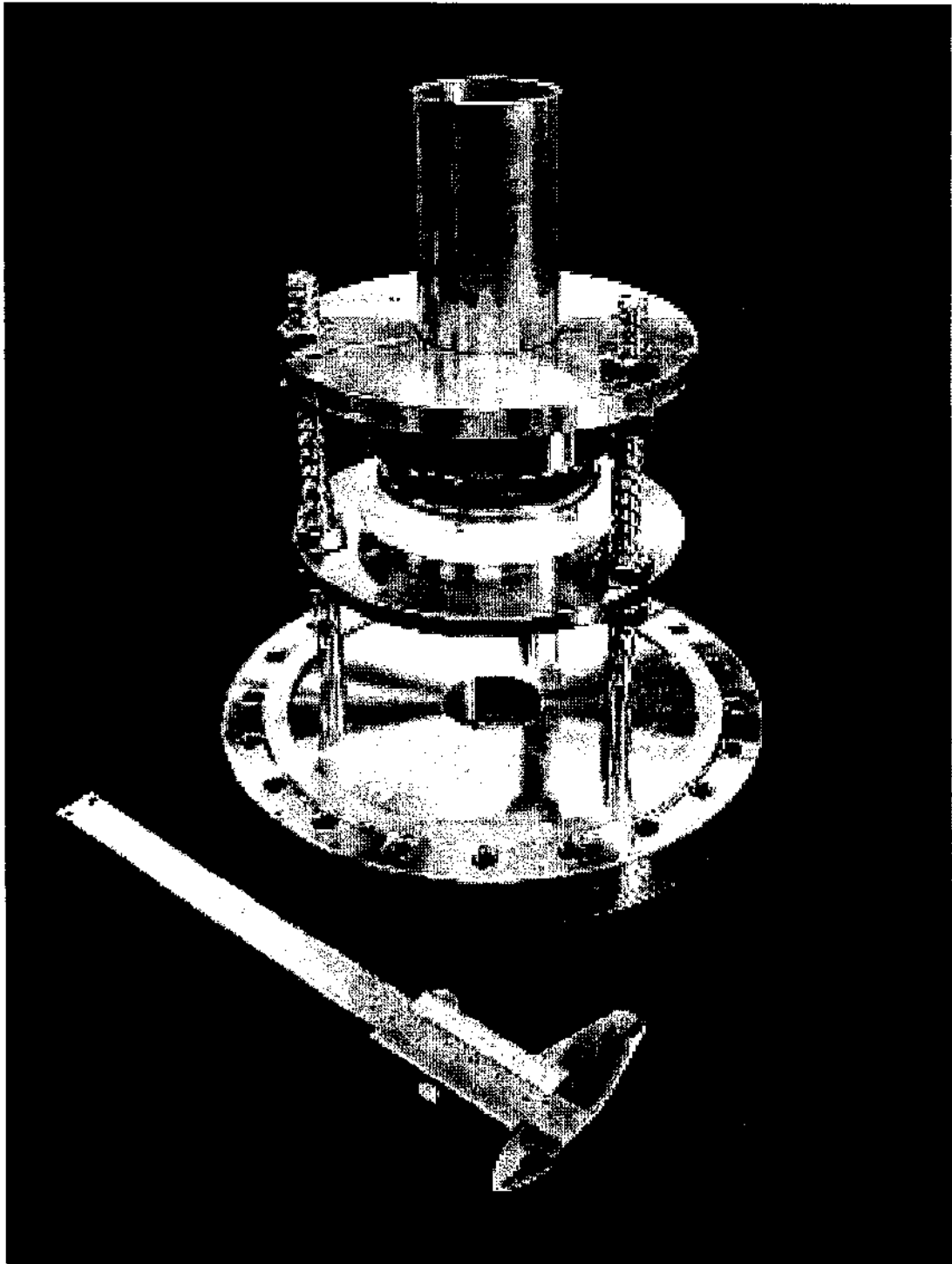


Fig. 2.8. a) Aspectos técnicos da nova montagem do monotron com vista da cavidade ressonante

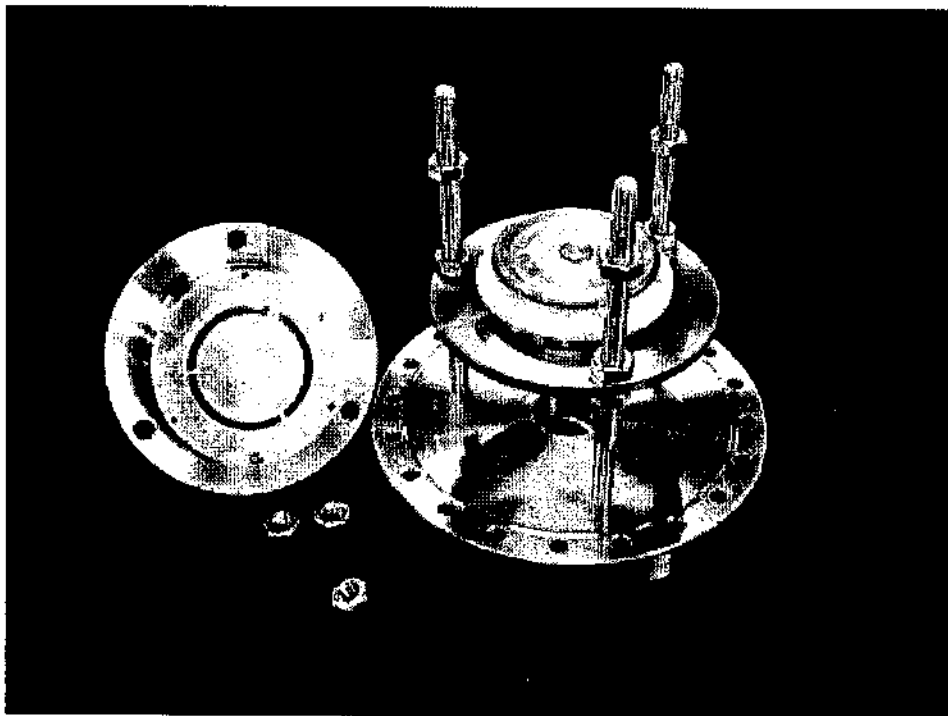
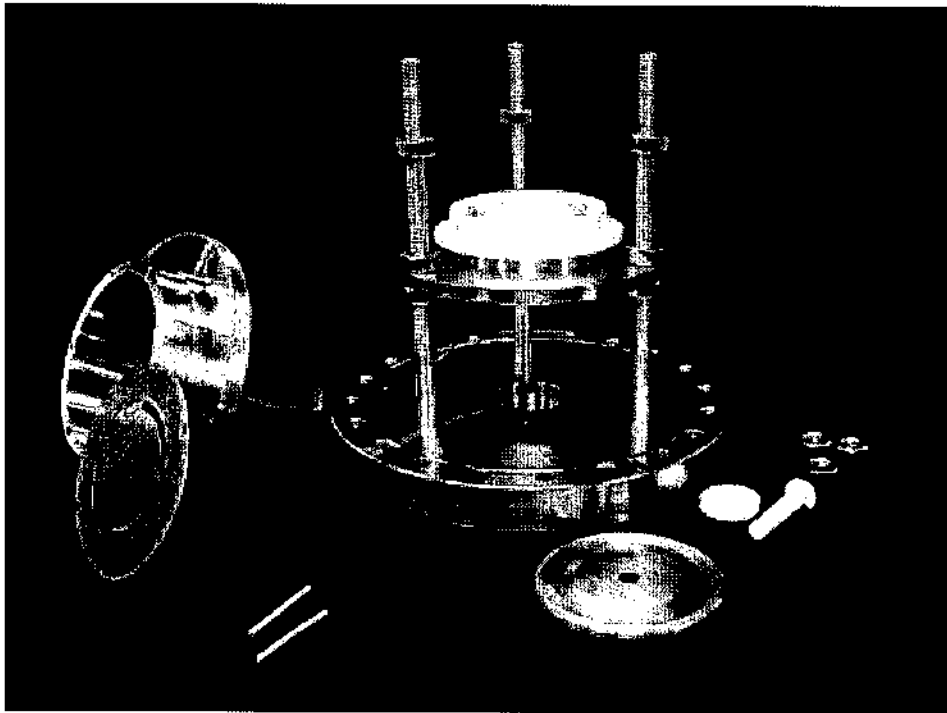


Fig. 2.8. b) Aspectos técnicos da nova montagem do monotron com vista do canhão de elétrons

Relacionado com aumento da corrente de catodo citada no último parágrafo, foi construído um novo circuito do pulsador [5], como retratado na Fig. 2.9. Inicialmente foi empregado um gerador de pulsos com um tetrodo simples, que embora tenha operado com sucesso, ele estava limitado a uma corrente relativamente baixa (10 A) para os propósitos de correntes mais altas do monotron. Este novo pulsador emprega três tetrodos em paralelo, cada qual de 8 A de corrente e comutados por uma chave (IGBT) transistorizada. As vantagens desse novo pulsador são as seguintes: 1) facilidade de sincronizar o chaveamento pelo fato de haver três tubos em paralelo para uma maior corrente de carga (no caso, máximo de 24 A); 2) o driver da chave junto com as fontes da grade de válvulas (V_{G1} e V_{G2}) operam perto do potencial de terra, de modo que não seja necessária uma alta isolamento; 3) o driver da chave IGBT requer muito menos potência do que um driver de uma válvula.

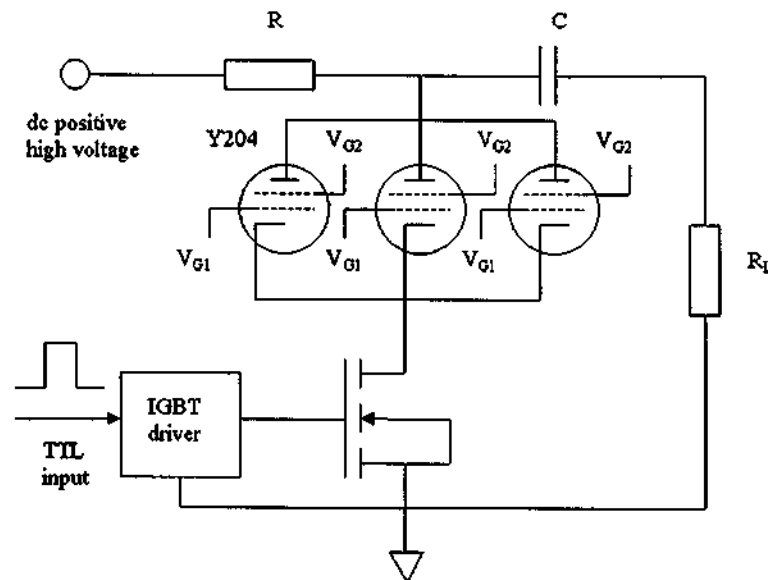


Fig. 2.9. Circuito do novo pulsador com três válvulas tetrodo em paralelo

Foram iniciados os testes com a cavidade do monotron: testes de excitação (por sonda elétrica) e de detecção (por laço magnético) da potência transmitida pelo guia de onda de saída para medir a frequência de ressonância e avaliar o fator Q carregado do sistema eletrodinâmico, cuja montagem é retratada na Fig. 2.10. Experimentos foram implementados para diferentes orifícios da íris, cujos resultados estão dispostos na Tabela 1. As simulações pelo aplicativo XFDTD para uma íris de 10 mm de diâmetro forneceram os seguintes resultados: frequência de ressonância = 6,6556 GHz e fator Q ôhmico (Q_{Ω}) = 1530 e fator Q de difração (Q_D) = 2700 .

Sabendo que o Q total ou carregado (Q_L) é determinado por $1/Q_L = 1/Q_\Omega + 1/Q_D$, assim obtemos para o nosso caso o valor de 975.

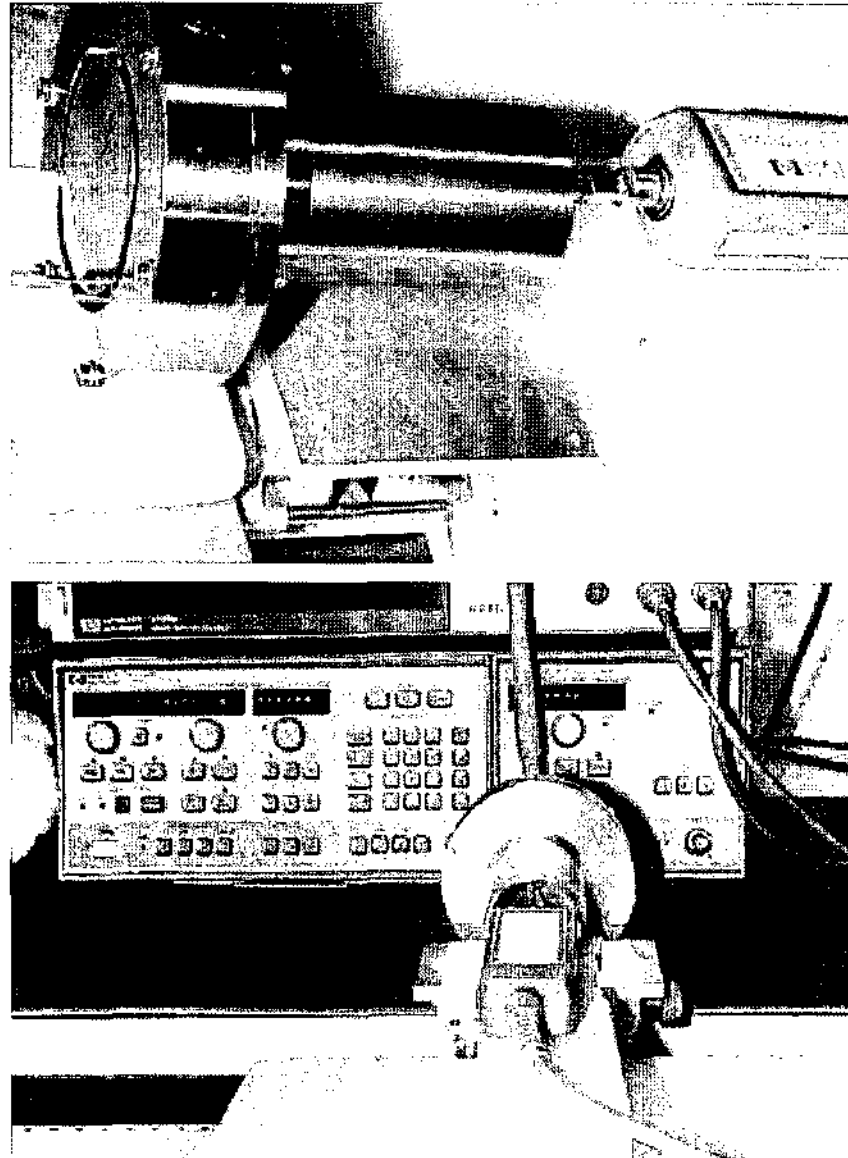


Fig. 2.10. Vistas das montagens de medições para a cavidade do monotron em teste com sondas elétricas e magnéticas

A discordância entre os valores medidos e calculados é devido ao fato de que a cavidade é composta de várias partes que se encaixam, o que não deve proporcionar um bom contato elétrico em microondas. Em contraposição a isso, a vantagem desta montagem seria a facilidade de poder substituir uma íris por outra de diferente diâmetro. De qualquer forma, mesmo o valor

calculado do Q carregado forneceu um valor relativamente baixo pelo baixo valor da condutividade elétrica do aço inoxidável ($\sigma_{\text{aço}} = 0,14 \text{ S/m}$). Tendo em vista esses efeitos indesejáveis, uma nova cavidade está sendo projetada para ser construída em uma única peça, agora de molibdênio, que além de suportar altas temperaturas como o aço ($>1000^\circ\text{C}$), tem um valor maior da condutividade elétrica $\sigma_{\text{molib}} = 1,75 \text{ S/m}$ - que é mais do que 10 vezes maior em relação ao aço. O nosso objetivo é atingir um Q total da ordem de 3.000 (três mil). Para isso estamos estudando a eletrodinâmica do sistema para selecionar o diâmetro e a espessura ideal da íris.

Tabela 1. Valores medidos da frequência de ressonância e fator Q carregado da cavidade do monotron para diferentes diâmetros da íris de acoplamento da radiação com o guia de onda de saída

<i>Diâmetro da íris</i> <i>[mm]</i>	<i>Frequência de ressonância</i> <i>[GHz]</i>	<i>Fator Q carregado</i>
8	6,6322	560
10	6,6511	615
12	6,6730	660

Finalmente, com o objetivo de medir posteriormente os parâmetros do monotron – a frequência de oscilação e a potência de saída, foi montado o sistema de guiagem para a detecção da radiação gerada pelo monotron.

Para medição da frequência gerada pelo monotron procede-se da seguinte maneira: varrendo as frequências do freqüencímetro procura-se a ressonância observando na tela do osciloscópio o momento em que o sinal é absorvido; isto significa que a marcação do freqüencímetro coincide com a frequência do monotron. Na medição da potência de saída, o medidor de potência é sensibilizado através do sensor e observa-se a leitura digital na tela do medidor em dBm. Esta leitura, entretanto, não é a potência final. Anteriormente deve ser feita a calibração do sistema de guiagem que por si só tem perdas de transmissão, valor este que deve ser acrescido à marcação do medidor de potência para compensar a perda inerente do sistema de guiagem., com o objetivo de ao final, obter-se o valor da potência média absoluta. A potência de pico (P_p) está relacionada com a potência média (P_m) da seguinte forma:

$$P_m = P_p \frac{\tau}{T} \quad (1)$$

onde t é largura do pulso e T , o período do pulso.

Uma forma alternativa de medir a potência é através da curva de resposta de um detector, ou seja, a relação entre a potência de entrada com a tensão de saída. A medição no osciloscópio ou no multímetro será em termos de tensão e de posse desta curva característica faz-se a correspondência imediata. Esta forma de medir a potência de saída também será utilizada durante a operação do monotron. A Fig. 2.11 mostra a curva de resposta para o detector Narda 4503A-03.

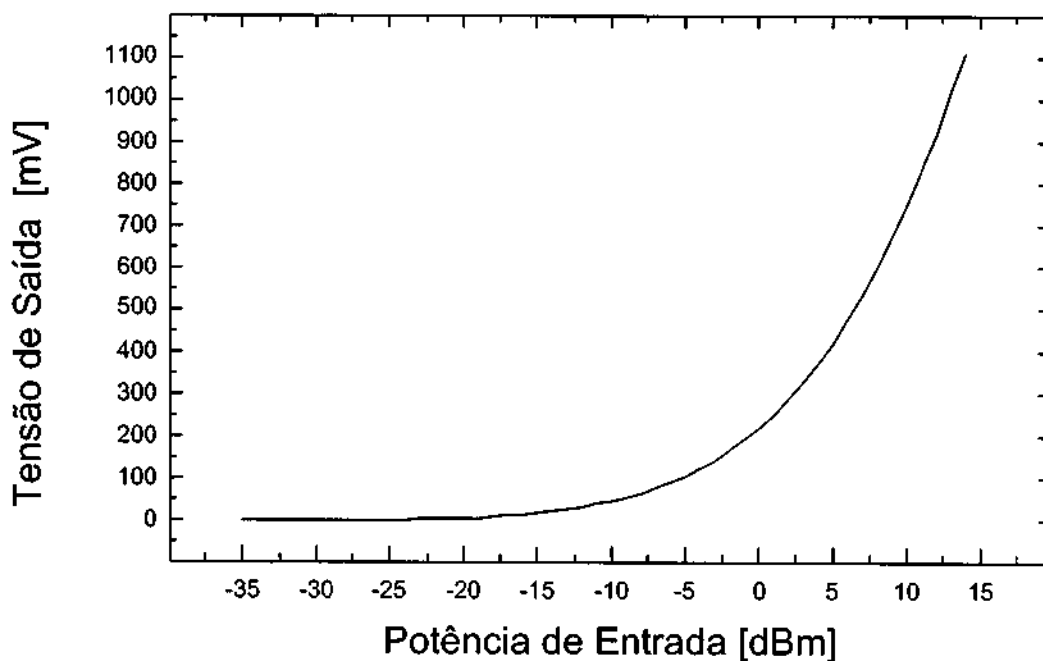


Fig. 2.11. Curva de resposta do detector Narda 4503A-03

Na calibração do sistema de guiagem, segundo o diagrama em blocos da Fig. 2.12, foram obtidos os seguintes resultados que abrangem uma faixa de frequência de 6,50 a 7,00 GHz, com incrementos de 50 MHz - para a porta direta do acoplador direcional (Fig. 2.13) e para a porta acoplada (Fig. 2.14). Para melhor ilustrar, a Fig. 2.15 apresenta um panorama geral da montagem utilizada na calibração da linha de guiagem da radiação do monotron, incluindo equipamentos e acessórios de microondas.

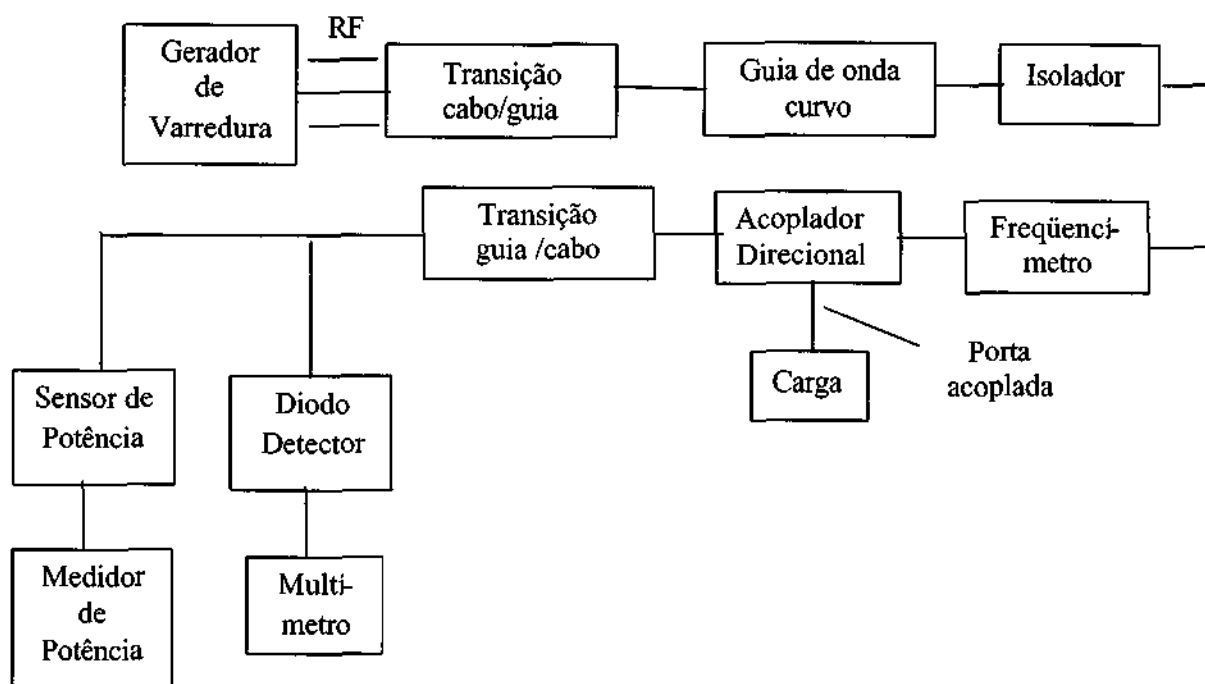


Fig. 2.12. Diagrama em blocos da montagem para calibração do sistema de guiagem

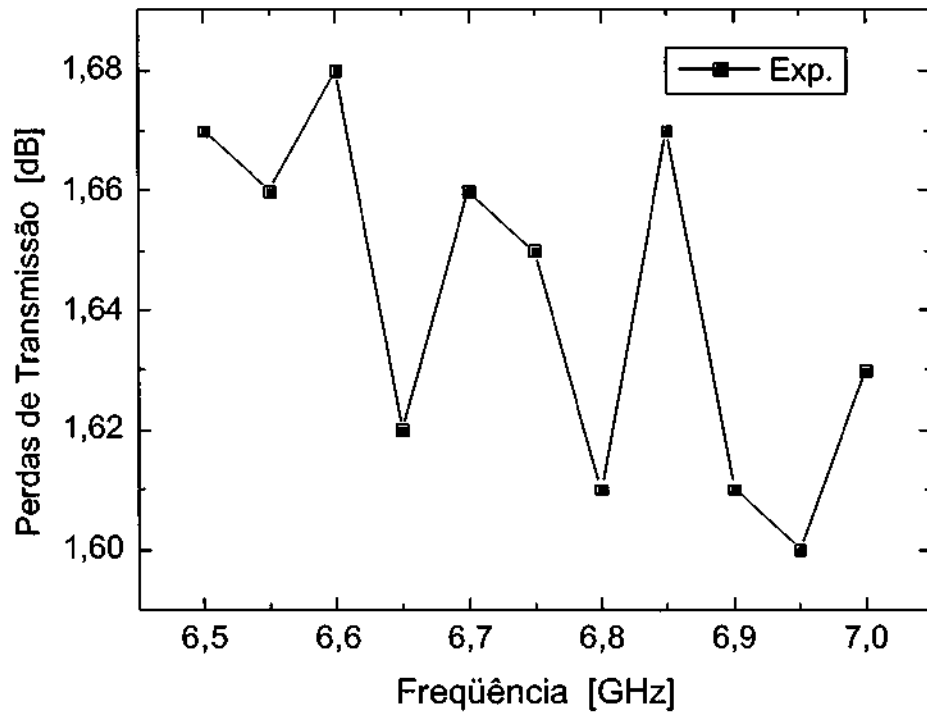


Fig. 2.13. Perdas de transmissão da porta direta do sistema de guiagem do monotron

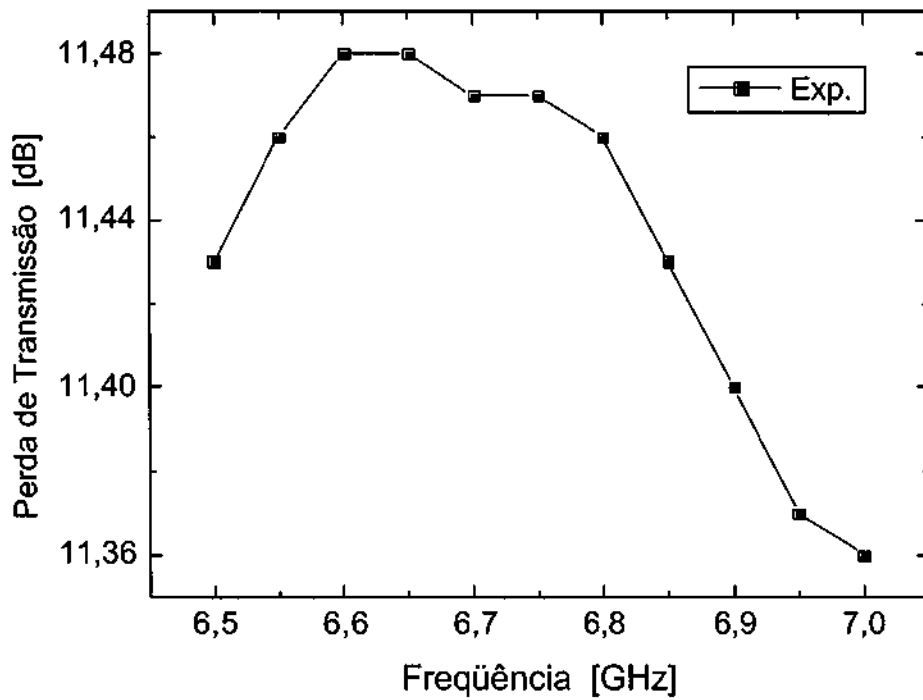


Fig. 2.14. Perdas de transmissão da porta acoplada do sistema de guiagem do monotron

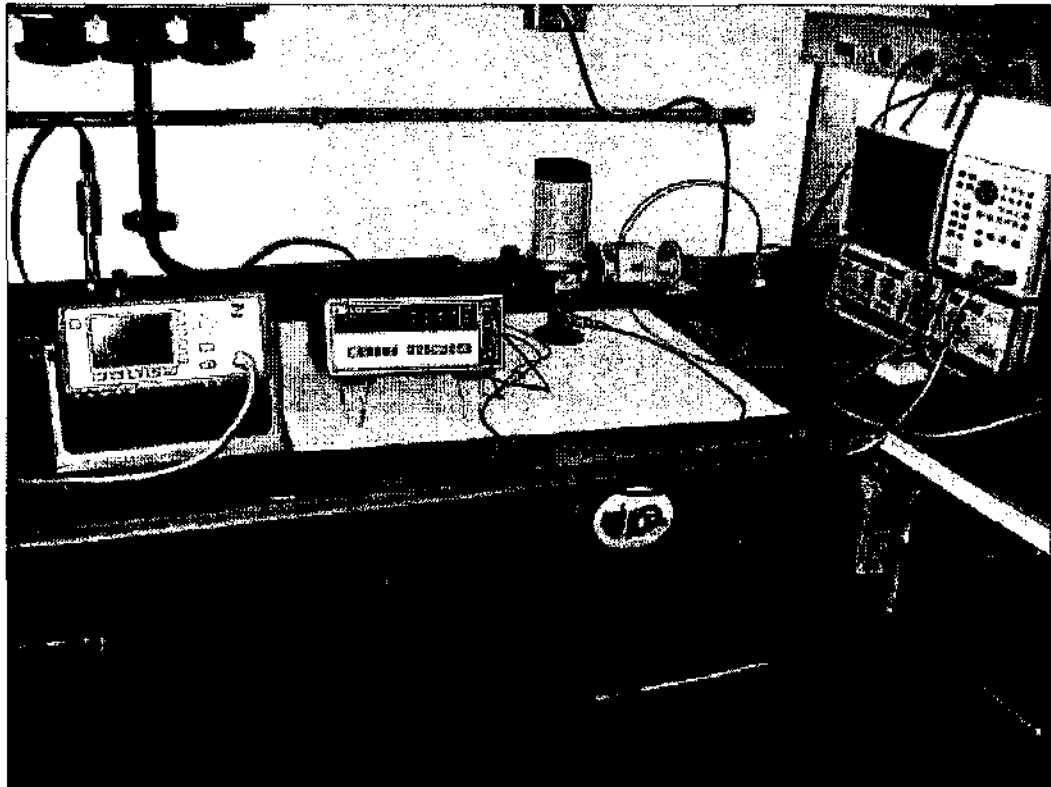
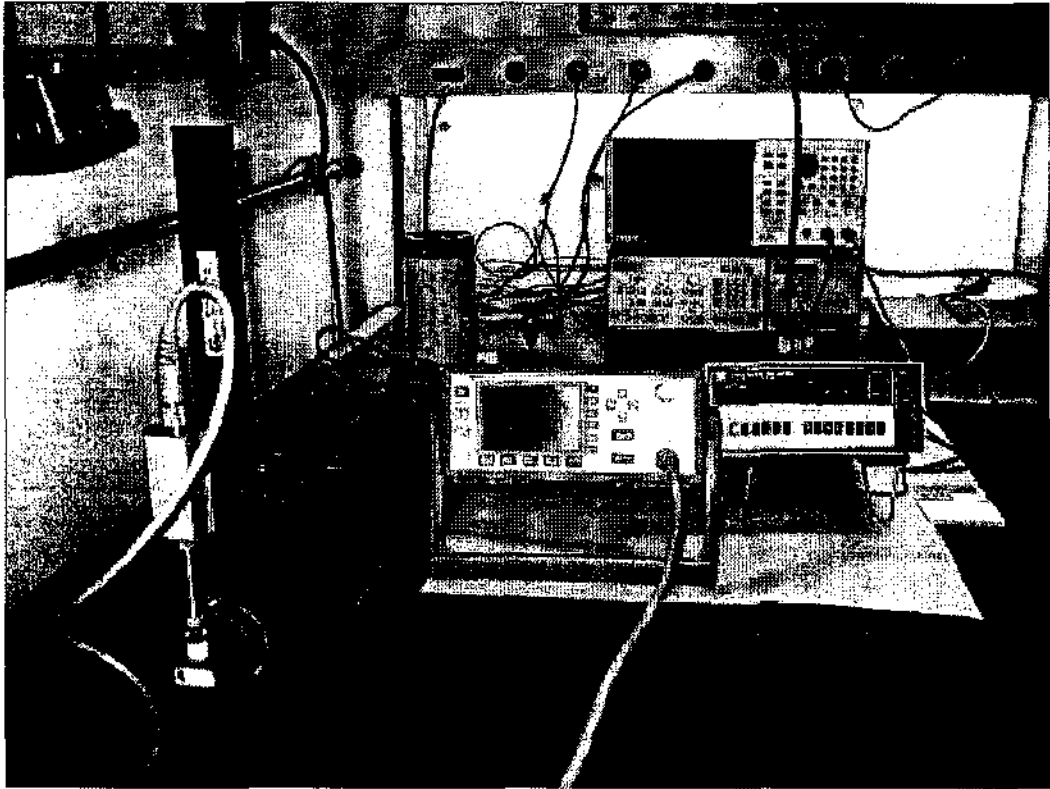


Fig. 2.15. Vistas da montagem utilizada na calibração da linha de guiagem com equipamentos e acessórios de microondas

Referências:

- [1] Barroso, J.J. "Design facts in the axial monotron", *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 28, p. 652-665, June 2000.
- [2] Ludwig, G. O. "The ETE spherical tokamak project". VIII Latin American Workshop on Plasma Physics – LAWPP 98, Tandil, Argentina, November 16-27 1998. *Invited and Review Papers*. Tandil: UNCPBA, 1998, p. 55-65.
- [3] Giraldez, D.C.; Castro, P.J. "The ECR preionization system project for ETE". In: 5º Encontro Brasileiro de Física dos Plasmas, Águas de Lindóia, SP, 30/nov-4/dez 1998. *Proceedings*. SBF, 1998, p. 273-276.
- [4] Barroso, J.J.; Rossi, J.O; Castro, P.J.; Patire Jr., H. "A 25 kV/10A Pulser for Driving a High-Power Pierce Electron Gun", In: 7º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, Fortaleza-CE, 21-24 de setembro, 2003. *Anais*. Fortaleza-CE, SOBRAEP, 2003, p. 63-65.
- [5] Rossi, J.O.; Barroso, J.J. "A 20 kV/30 A pulser for driving a 6.7 GHz microwave generator". Submetido ao 6º Congresso do INDUSCON, Joinville-SC, 12-15 de outubro, 2004.

3. DESENVOLVIMENTO DE RESSOADORES DIELÉTRICOS

Desde 1998, a pesquisa e desenvolvimento em ressoadores dielétricos (RDs) de microondas para uma possível utilização em comunicações via satélite e terrestre, vêm sendo realizados no Laboratório Associado de Sensores e Materiais - LAS em conjunto com o Laboratório Associado de Plasma - LAP, do Centro de Tecnologias Especiais - CTE no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE [1-2]. Neste período, foram desenvolvidas e otimizadas as técnicas de processamento de cerâmicas a partir de misturas mecânicas de pós de BaCO_3 e TiO_2 , realizando-se a sintetização do composto de nanotitanato de bário ($\text{Ba}_2\text{T}_{19}\text{O}_{20}$) e a sinterização da cerâmica em uma única etapa. A segregação de óxido de titânio (TiO_2) na superfície das cerâmicas durante a etapa de sintetização/sinterização foi minimizada pelo envolvimento dos compactados em misturas estequiométricas de pós. Estas implementações resultaram em cerâmicas com microestruturas tanto mais densas como química e microestruturalmente mais homogêneas que os RDs comerciais e outros investigados na literatura. Após estas alterações no processamento cerâmico foram realizados estudos da influência de nióbio (Nb) nas propriedades dielétricas destes RDs. Foram também otimizadas as técnicas de medição dos parâmetros de propriedades dielétricas em frequências de microondas.

A análise de trabalhos recentes de outros autores mostrou mais uma possibilidade da estabilização da fase de $\text{Ba}_2\text{T}_{19}\text{O}_{20}$ através da utilização de zircônia (ZrO_2) [3-4]. Segundo eles, além de apresentar um efeito estabilizador na formação de nanotitanato de bário, a adição da zircônia resultou em boas características dielétricas do material na frequência de 3 GHz, especialmente com um baixo valor do coeficiente de variação da frequência de ressonância com a temperatura, na faixa de 20°C a 60°C [3]. Para aplicações é desejável que o valor deste parâmetro seja próximo de zero.

A partir destas considerações e da experiência adquirida no processamento e caracterizações microestruturais e de compostos cristalinos e determinação de parâmetros dielétricos em microondas, considerou-se de grande interesse a investigação destas cerâmicas de $\text{Ba}_2\text{T}_{19}\text{O}_{20}$ dopadas com zircônia, utilizando matérias-primas brasileiras e métodos de processamento desenvolvidos nos laboratórios do INPE. Segundo a literatura, a porosidade prejudica as propriedades dielétricas destas cerâmicas. O desenvolvimento de ressoadores dielétricos, que satisfaçam os requisitos de alta estabilidade em frequência e baixo ruído para uma possível aplicação como oscilador local na faixa de 5 a 8 GHz de um Satélite de Comunicações, é um projeto de interesse do INPE. Estes dispositivos também podem ter

aplicação em outros tipos de Satélite e em outras frequências de microondas, no âmbito da Engenharia Aeroespacial do INPE.

Foram preparadas misturas mais homogêneas de pós obtidas por: i) misturas mecânicas das suspensões de pós de sulfato de bário (BaSO_4) e TiO_2 e ii) precipitação do sulfato de bário (BaSO_4) em suspensão de TiO_2 em álcool etílico, com o objetivo de otimizar os parâmetros de processamento das cerâmicas sinterizadas de $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ sem adição de zircônia [5]. Os pós foram compactados por prensagem uniaxial (40 MPa) e isostática (300 MPa) em forma de cilindros com uma relação altura/diâmetro adequada, tal que se obtivessem RDs para serem utilizados em frequências de microondas na faixa de 5,7 a 7,0 GHz. A sintetização do $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ e a sinterização das cerâmicas foram realizadas em uma única etapa, sendo também minimizada a segregação de TiO_2 nas superfícies das cerâmicas. As características em microondas - frequência de ressonância (f), constante dielétrica (ϵ_r) e fator de qualidade não-carregado (Q_0) foram determinadas de acordo com a montagem experimental da Fig. 3.1, onde o RD é acondicionado numa caixa de teste feita de cobre e revestida com ouro.

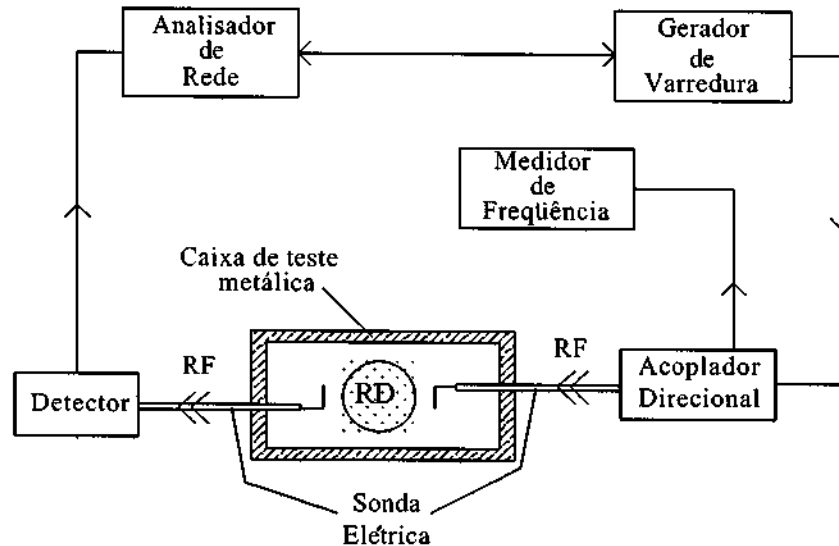


Fig. 3.1. Montagem experimental para medições das características dos RDs

Na medida da constante dielétrica, o RD é colocado entre duas placas metálicas paralelas. Neste caso o RD opera no modo ressonante TE_{011} , onde se completa o meio comprimento de onda na direção axial do ressonador devido à parede metálica. Para determinar a constante dielétrica é necessário achar as soluções da equação dos campos eletromagnéticos [6]

obtida a partir das equações de Maxwell para as condições de contorno na região dielétrica interna (com constante dielétrica ϵ) e na região externa – ar (com constante dielétrica $\epsilon_{ar} = 1$) do ressonador. A equação dos campos é expressa por uma equação transcendental que relaciona a frequência de ressonância f com a constante dielétrica ϵ e as dimensões do ressonador. Com o valor medido da frequência de ressonância determina-se a constante dielétrica que é calculada por um programa de computação no aplicativo “Mathematica”. A precisão da constante dielétrica depende da precisão das medições da frequência de ressonância e das dimensões do RD (altura e raio).

No caso das medições do Q não-carregado, o RD foi colocado entre espaçadores de poucas perdas (discos de teflon) para evitar perdas nas paredes metálicas. A determinação do fator de qualidade (Q_0) é baseada nas medições das frequências nos pontos de meia-potência do espectro do modo ressonante detectado.

A Fig. 3.2 ilustra a montagem real para os testes com os RDs.

As cerâmicas sinterizadas foram caracterizadas pelas técnicas de difração de raios X para identificação das fases presentes (Fig. 3.3) e as superfícies de fratura foram observadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e fotografadas para análise de sua microestrutura.

Os resultados mostraram que as cerâmicas obtidas por mistura de pós de $BaCO_3$, TiO_2 e ZrO_2 possuem melhores graus de densificação em menor temperatura de sintetização/sinterização e homogeneidade da microestrutura de grãos, quando comparadas aos dados da literatura internacional. As cerâmicas obtidas a partir da mistura de $BaSO_4$ e TiO_2 apresentaram uma porosidade alta com tamanhos de poros abaixo de $1 \mu m$ e formação de $Ba_2Ti_9O_{20}$ em temperatura de cerca de $150^\circ C$ menor que as anteriores. A quantidade de ZrO_2 adicionada às misturas de pós mostrou não exercer influência detectável na microestrutura da cerâmica, segundo as técnicas de caracterização utilizadas.

Os resultados das medições em microondas para os RDs investigados (um puro e outros com diferentes composições molares) são apresentados na Tabela 2.1. Quanto à determinação do coeficiente de variação da frequência de ressonância com a temperatura, ainda não foi possível fazê-lo pela não-disponibilidade da câmara térmica que está alocada em outra divisão do INPE.

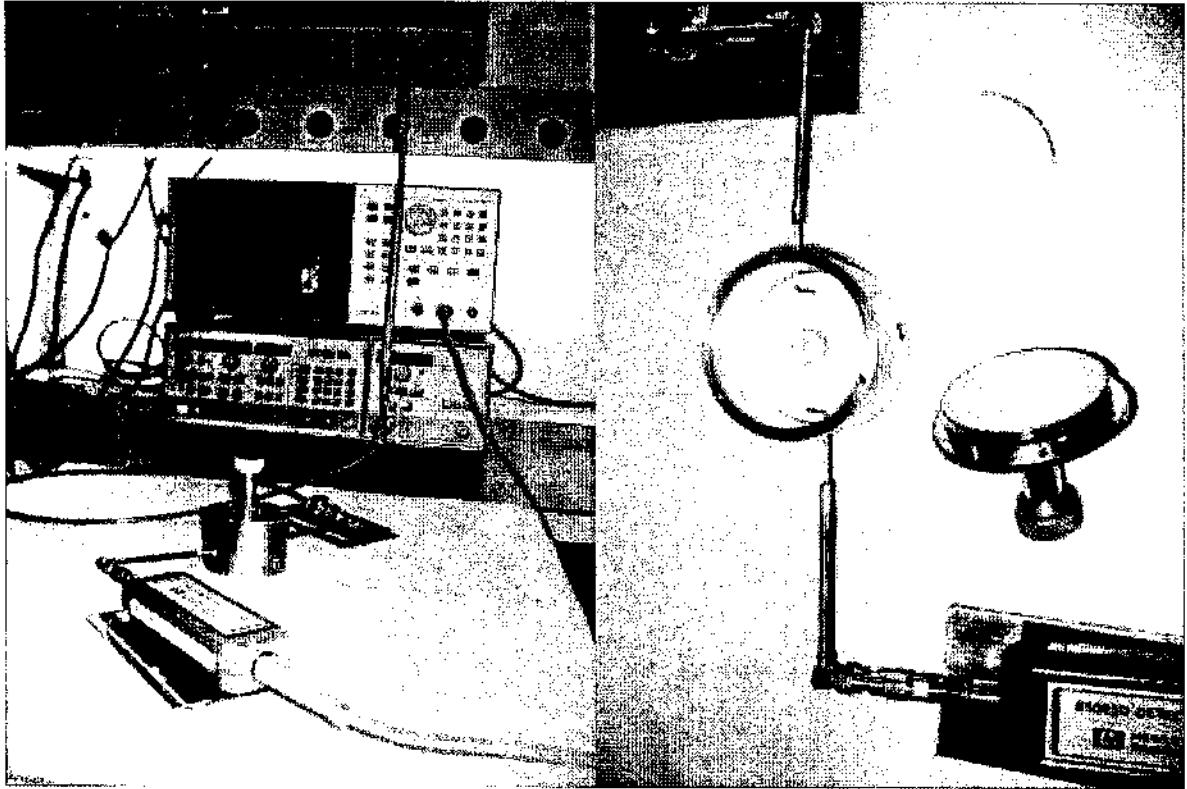


Fig. 3.2. Vista da montagem experimental para testes dos ressoadores dielétricos

Os valores das constantes dielétricas destes ressoadores mostraram terem sido influenciados pela porosidade da microestrutura, pela quantidade adicionada de ZrO_2 e possivelmente pelas impurezas inerentes às matérias-primas. Os poros atuam como se fossem uma segunda fase que é o ar, e de acordo com a literatura, isto implica no aumento das perdas dielétricas. Desta forma, a porosidade é um fator crítico para todas as propriedades dielétricas dos ressoadores cerâmicos. Quanto aos valores dos fatores de qualidade não-carregado, determinados em torno de 5,6 GHz, estes foram menores do que os obtidos na literatura na frequência de 3 GHz, uma vez que as perdas dielétricas aumentam com a frequência.

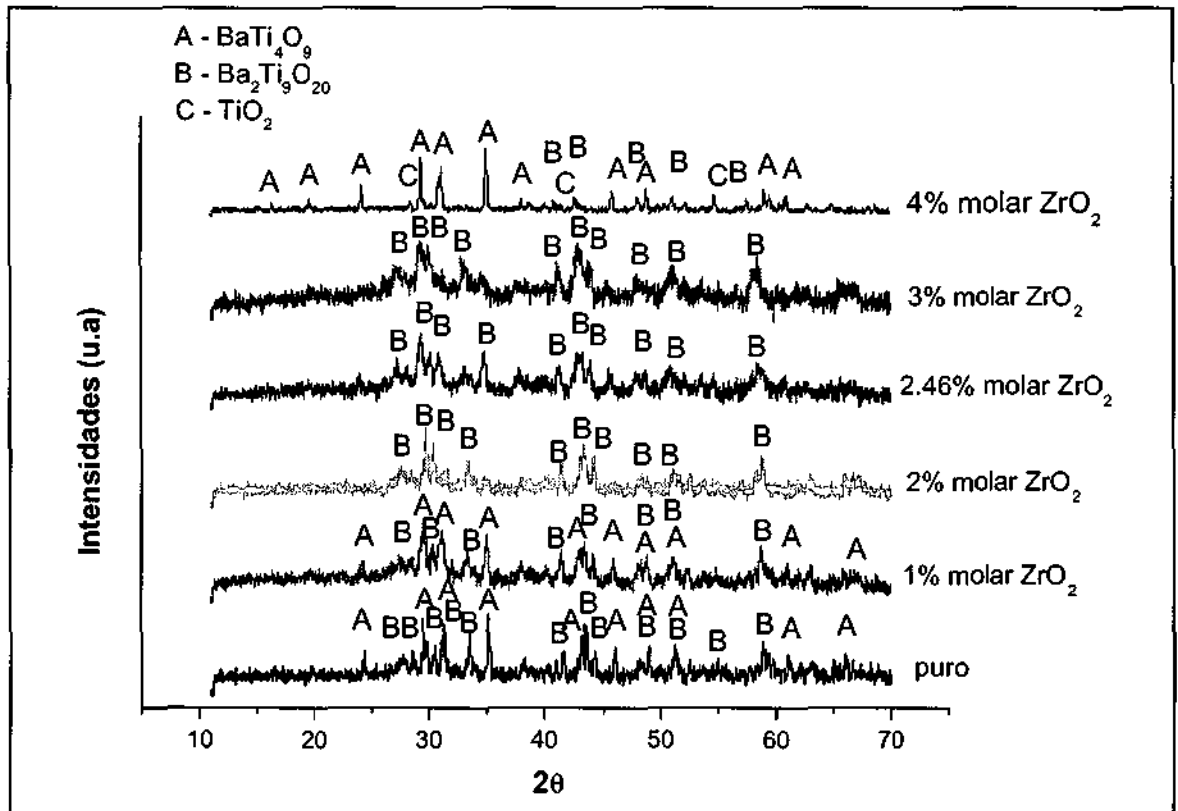


Fig. 3.3. Difratomogramas de raios X das cerâmicas analisadas

As cerâmicas obtidas a partir de mistura dos pós de BaSO₄ e TiO₂ mostraram a possibilidade de obtenção de Ba₂Ti₉O₂₀ sem dopantes e sintetizadas/sinterizadas em 1200°C, menor do que as temperaturas utilizadas para a produção industrial de RDs a partir de misturas mecânicas de BaCO₃ e TiO₂. Pela técnica adotada para a produção do pó, obtiveram-se partículas com tamanhos predominantemente nanométricos. As suas microestruturas apresentaram uma maior homogeneidade em tamanho e forma de grãos e de poros em comparação com as cerâmicas obtidas a partir das misturas dos pós de BaCO₃ e TiO₂. No entanto, elas apresentaram uma porosidade muito elevada, o que se refletiu nos valores do Q não-carregado relativamente baixos. O uso destas cerâmicas como ressoadores dielétricos é promissor e necessita de estudos complementares no sentido de aumentar o seu grau de densificação, uma vez que a diminuição da temperatura de sinterização torna este material economicamente atraente.

Tabela 3.1 – Os valores dos parâmetros em microondas das cerâmicas investigadas

ZrO ₂ (% molar)	H (mm)	a (mm)	f ± 1,5 × 10 ⁻³ → ε _r ± 0,3 (GHz)		f ± 2,0 × 10 ⁻³ → Q _o (GHz)	
0	4,60	5,65	7,86543	28,5	5,57042	3.800±50
1,00	4,65	5,60	7,85144	28,5	5,57473	3.846±60
2,00	4,60	5,55	7,86612	28,9	5,57725	4.305±75
2,46	4,55	5,55	7,87046	29,1	5,57735	3.365±45
3,00	4,55	5,55	7,87292	29,2	5,53862	3.430±45
4,00	4,50	5,55	7,87820	29,6	5,54890	3.571±40

Referências Principais:

- [1] Castro, P.J.; Nono, M.C.A. Microwave properties of barium nanotitanate dielectric resonators. *Journal of Microwave and Optoelectronics*, [on line], v. 1, n. 4, p. 12-19, Sep. 1999. <<http://www.jmo.ene.umb.br>>>
- [2] Nono, M.C.A.; Castro, P.J. Microstructure study and crystalline phase formation on Nb₂O₅-Ba₂Ti₉O₂₀ microwave resonators. *Materials Science Forum*, Trans. Tech. Publ., v. 416-418, p. 11-17, Jan. 2003.
- [3] Lin, W.-Y.; Speyer, R. F. Microwave properties of Ba₂Ti₉O₂₀ doped with zirconium and tin oxides. *Journal of American Ceramic Society*, v. 82, p.1207-1211, 1999.
- [4] Lin, W.-Y.; Speyer, R. F. Dielectric properties of microstructure-controlled Ba₂Ti₉O₂₀ Resonators, *Journal of American Ceramic Society*, v. 82, p. 325-330, 1999.
- [5] Koldayeva, Yu. Processamento e caracterização de cerâmicas de Ba₂Ti₉O₂₀ dopadas com ZrO₂ para aplicação como ressoadores dielétricos em microondas. São José dos Campos. 120 p. *Dissertação de Mestrado* (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/ Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores), INPE, 2004.
- [6] Castro, P.J.; Nono, M.C.A. Ressoadores dielétricos de cerâmicas especiais e sua caracterização em microondas. In: IX Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica, João Pessoa-PB, 07-11 de agosto, 2000. *Anais*. João Pessoa: SBMO/CEFET-PB, 2000. p. 465-469.

4. CAVIDADES REENTRANTES PARA DETECTORES DE ONDAS GRAVITACIONAIS

O estudo de cavidades reentrantes faz parte da colaboração entre o Laboratório Associado de Plasma (LAP) e a Divisão de Astrofísica (DAS) no projeto Gráviton, cujo coordenador é o Dr. Odylio Denys de Aguiar (Projeto FAPESP 2003/04342-1). Nesse projeto de colaboração têm sido investigados tanto diversos protótipos de cavidades sobredimensionadas como um protótipo de cavidade real em condições criogênicas.

Atualmente está em construção um detector de ondas gravitacionais - o detector Mário Schenberg, parte no INPE e outra parte no Instituto de Física da Universidade de São Paulo (Fig. 4.1). É uma estrutura complexa que contém a chamada antena de massa ressonante, que é considerado o dispositivo dos mais sensíveis para detecção de ondas gravitacionais.

Transdutores eletromecânicos empregados em detectores de ondas gravitacionais convertem vibrações mecânicas em sinais elétricos, em que o sinal é amplificado pelo ganho paramétrico intrínseco. O tipo de transdutor paramétrico que será empregado no detector Mario Schenberg foi desenvolvido tanto pelo grupo japonês como pelo grupo australiano [1]. Esse transdutor consiste em uma cavidade reentrante supercondutora fabricada de nióbio que contém um cone truncado central com um espaçamento (“gap”) estreito entre o seu topo e a tampa superior. Esta parede, que desempenhará o papel de uma membrana capaz de oscilar por ação de vibrações externas, é mecanicamente acoplada à antena de massa ressonante na frequência de ressonância da cavidade. Para fazer parte do sistema de transdução, as cavidades reentrantes, alojadas na antena de massa ressonante, devem ser bombeadas por um oscilador de microondas com baixo ruído de fase. O desempenho do transdutor depende de alguns parâmetros intrínsecos da cavidade, como o Q elétrico.

Esta cavidade deve ter modificada alguma de suas características elétricas (capacitância ou indutância), em razão da excitação produzida pela onda gravitacional na antena. Assim, devemos ter uma cavidade de microondas, que seja suficientemente sensível para responder, em um delta de frequência, a uma mínima deformação sobre a sua parede, que estará acoplada ressonantemente à antena esférica. Cavidades comuns circulares ou retangulares, não poderiam nos fornecer uma alta sensibilidade, pois a variação de sua frequência de ressonância é muito pequena em relação à quantidade de deformação esperada. A solução foi encontrada em cavidades reentrantes com poste central em formato de tronco de cone, objeto de nosso estudo, como mostrado na Fig. 4.2.

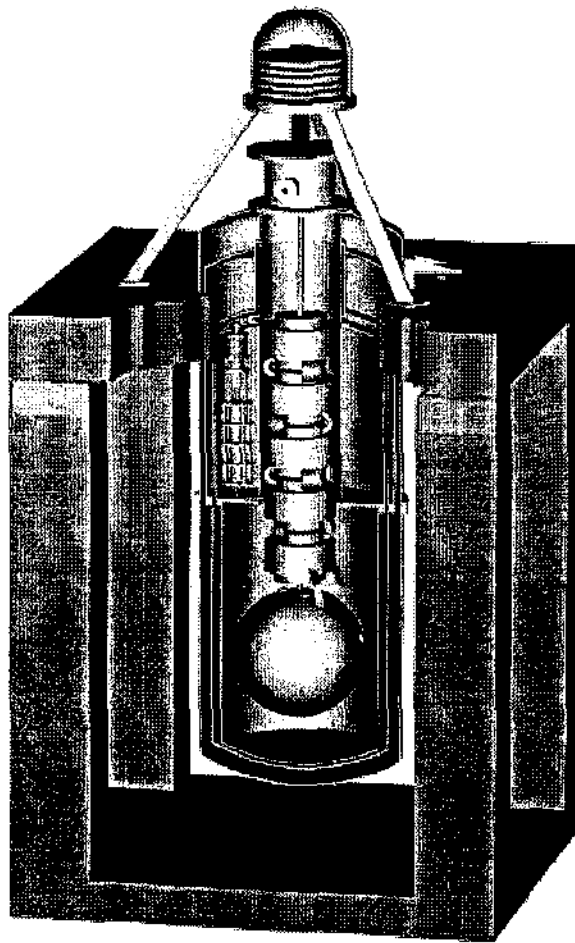


Fig. 4.1. Estrutura do detector Mário Schenberg

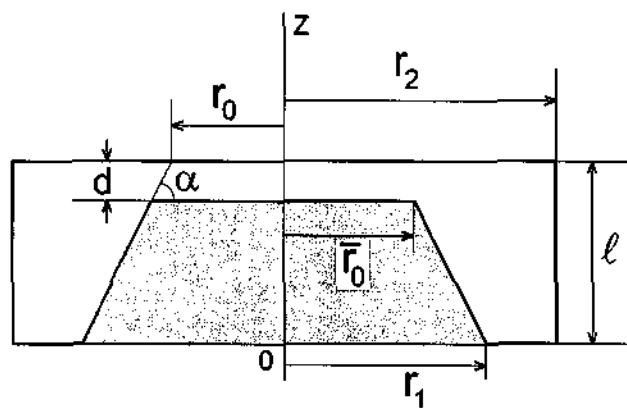


Fig. 4.2. Esquema da cavidade reentrante e seus parâmetros geométricos

A cavidade reentrante pode ser considerada um ressoador do tipo RLC, onde a capacitância é determinada pelo espaçamento entre o poste central e a tampa superior sendo que a indutância é devido ao campo magnético que envolve o poste central. A capacitância da cavidade é modulada pela deflexão da tampa superior [2]. O espaçamento, desta forma, provê um efeito capacitivo sobre a variação de frequência, assim demonstrando que a cavidade reentrante pode ser usada como um transdutor eletromecânico.

Para a primeira etapa de experimentos foi construída uma cavidade superdimensionada, tal que operasse numa frequência de ressonância dez vezes maior, feita de alumínio por ser de fácil usinagem e apresentar boa condutividade à temperatura ambiente. Este tipo de cavidade opera no modo klystron com campos elétricos intensos na região do espaçamento, assim podendo maximizar o acoplamento elétrico a um transformador mecânico externo. Para a cavidade em teste (Fig. 4.2) foram adotadas as seguintes dimensões: raio $r_2=3,2$ cm, altura $\ell=1,4$ cm, e para o cone truncado: raios maior e menor $r_1=1,0$ cm e $r_2=0,5$ cm e com espaçamento $d=0,2$ mm e com uma tampa de 1,0 mm de espessura.

As frequências de ressonância foram medidas na configuração do tipo reflexão, como mostra a Fig. 4.3, onde os campos da cavidade foram excitados e detectados por meio de uma única sonda elétrica como ilustrado na Fig. 4.4.

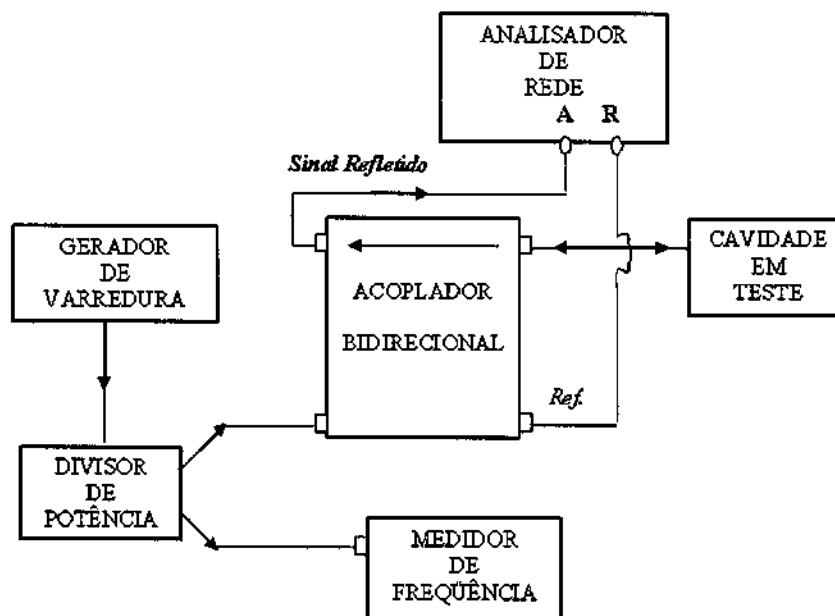


Fig. 4.3. Esquema da montagem experimental para o teste da cavidade ressonante

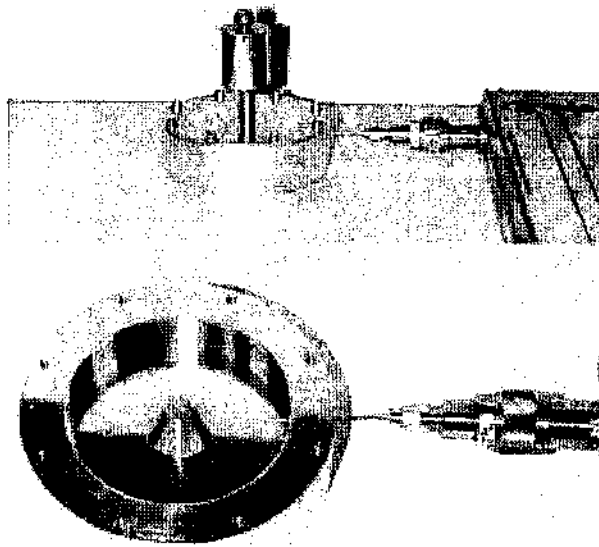


Fig. 4.4. Foto da cavidade ressonante sob teste

Aplicando uma série de pesos calibrados sobre a tampa superior da cavidade, pode-se medir a correspondente variação de frequência, é controlada pelo espaçamento que por sua vez fornece o efeito capacitivo. Na Fig. 4.5.(a) os valores medidos são comparados com os calculados e, correspondentemente, a Fig. 4.5.(b) relaciona a frequência de ressonância com a correspondente deflexão causada pelo peso aplicado. Ao final, o transdutor fornece uma sensibilidade (coeficiente de sintonia) de $\Delta f/\Delta d = 3,0 \text{ MHz}/\mu\text{m}$, que converte deslocamento em algo mensurável - uma medida elétrica.

Outros estudos foram implementados com vários postes em forma de cilindros e cones truncados [2,3]. Num deles para vários postes na forma de cones truncados (Tabela 4.1), pela aplicação de forças deflectoras através de pesos calibrados foram medidas as correspondentes variações de frequências, como mostra a Fig. 4.6 [3].

Comparando os resultados com os diversos troncos de cone, verifica-se que o de número 1 produz a curva com o maior declive, que possui a maior sensibilidade, ou seja, um coeficiente de sintonia maior, no caso, $\Delta f/\Delta d = 40,0 \text{ MHz}/\mu\text{m}$.

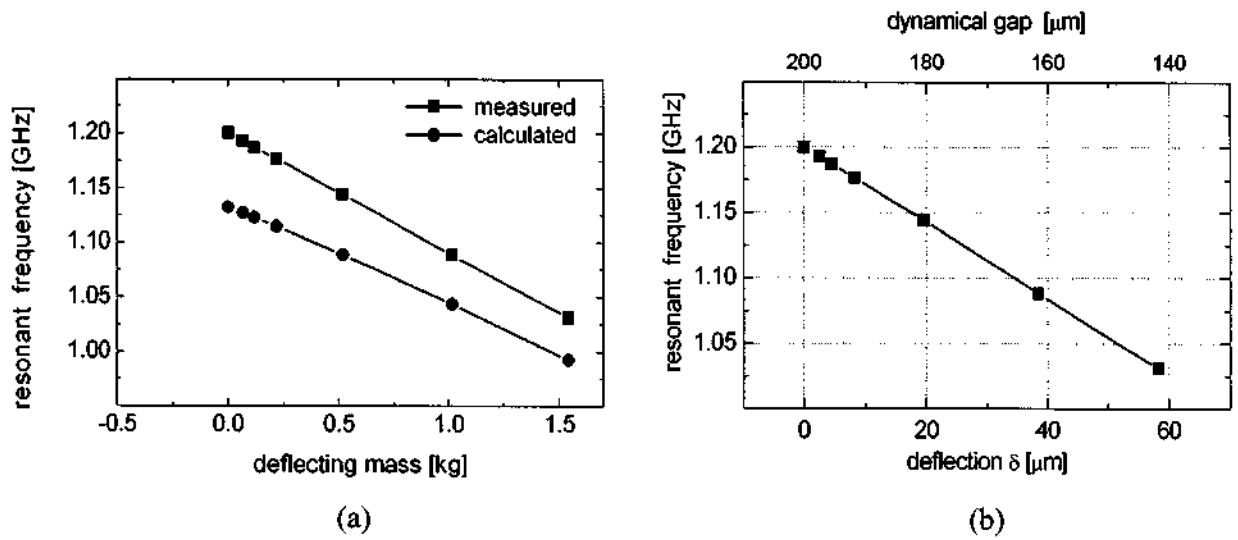


Fig. 4.5 (a) Frequências de ressonância medidas e calculadas em função dos pesos aplicados sobre a tampa da cavidade e (b) a correspondente deflexão

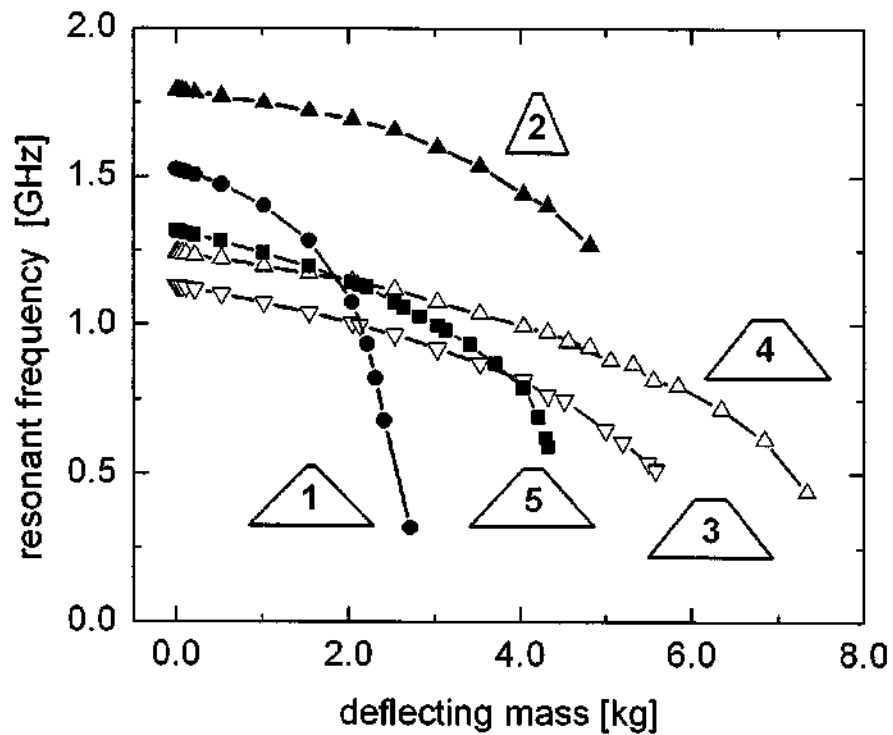


Fig. 4.6. Para vários postes, a dependência das frequências medidas com o peso aplicado

Tabela 4.1 – Para diversos postes na forma de troncos de cone, diferentes espaçamentos (d), raios da base (r_1) e raios menores (r_0)

Poste #	d/mm	r_1/mm	\bar{r}_0
1	0.10	20.0	1.5
2	0.10	10.0	1.5
3	0.30	20.0	5.0
4	0.40	20.0	5.0
5	0.30	20.0	3.0

Outro experimento importante foi com um protótipo real da microcavidade reentrante na temperatura criogênica de 4,2 K [4,5]. A necessidade de realizar medições em temperaturas criogênicas deve-se ao fato de que, para temperaturas inferiores a 9,2 K (temperatura crítica do nióbio), o nióbio torna-se supercondutor, havendo, com isso, uma diminuição das perdas em sua superfície (devido à diminuição da resistividade superficial), possibilitando a obtenção de fatores de qualidade (Q) altos.

A cavidade foi usinada a partir de um cilindro de nióbio de alta pureza, com uma concentração de tântalo inferior a uma parte em 10^3 . Esta concentração é necessária para a diminuição das perdas elétricas no interior da cavidade quando resfriada abaixo de 9,2 K.

A Fig. 4.7 apresenta uma vista esquemática da cavidade. Ela é basicamente uma cavidade cilíndrica de 8 mm de diâmetro e de 1,45 mm de comprimento com um poste cônico central de 1,4 mm de altura. A Fig. 4.8 (a) mostra a cavidade usada em nossos experimentos e a Fig. 4.8 (b), o criostato e seus acessórios. O criostato foi utilizado para que fosse possível inserir a cavidade dentro do tanque de hélio líquido. Para a realização destes experimentos nas condições da supercondutividade do nióbio, por meio do criostato a cavidade era inserida dentro do tanque de hélio líquido e resfriada até 4,2 K (Fig. 4. (b)).

Um aspecto relevante deste trabalho foi a construção de criostato, através do qual foi possível sintonizar a frequência de ressonância e o Q carregado com o deslocamento da sonda no interior da cavidade. Um cabo coaxial UT47 foi fixado nas extremidades de tubo interno do criostato e mantido em seu interior. O movimento de rotação desse tubo, em relação ao externo, permitia o movimento do cabo coaxial no interior da cavidade.

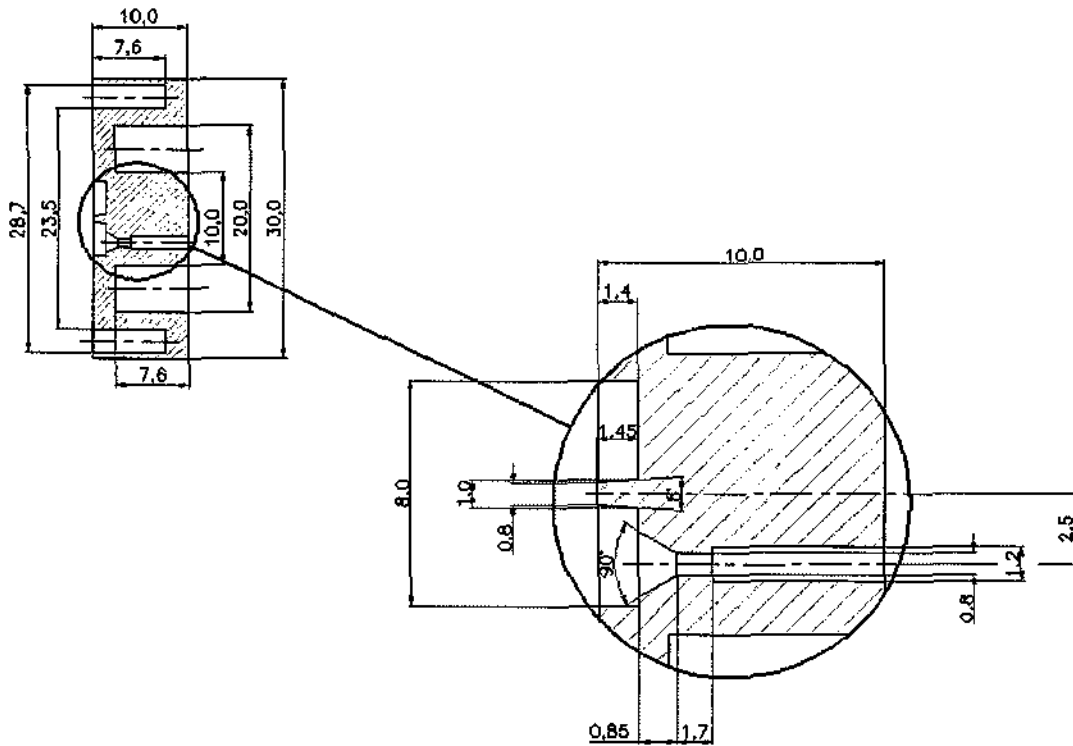
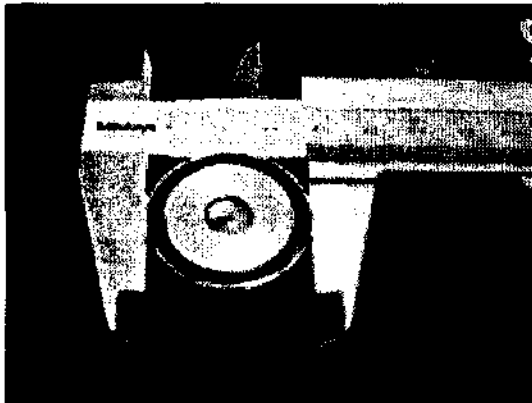
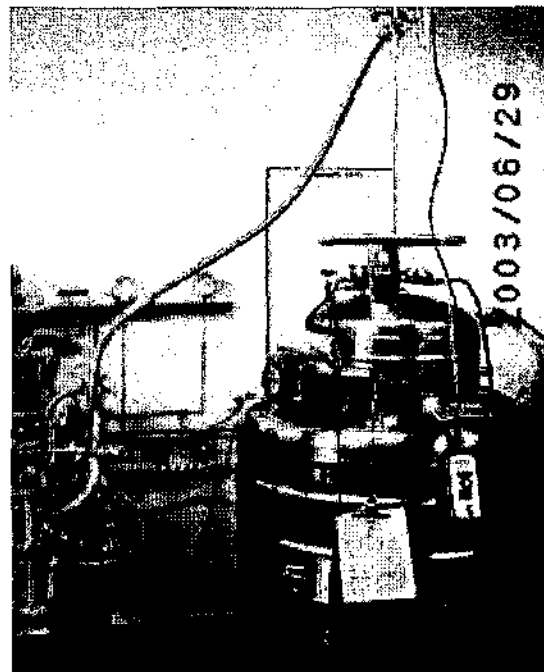


Fig. 4.7. Desenho esquemático da cavidade reentrante.



(a)



(b)

Fig. 4.8. (a) A cavidade reentrante; (b) vista do criostato no qual é instalado o tanque de hélio líquido durante os experimentos

O sinal refletido da cavidade era detectado e medido pelo analisador de rede, na mesma montagem da Fig. 4.3. Conforme mostrado na Fig. 4.9, o pico mais estreito é o do modo ressonante da cavidade de microondas, enquanto que os outros podem estar associados aos modos ressonantes de transmissão dos cabos. O resultado obtido com o analisador de rede nos fornece informações relativas ao que foi transmitido e absorvido por aquele determinado modo. Quando na ressonância, a absorção é máxima, indicando que para outras frequências o sinal é refletido.

No espectro apresentado na Fig. 4.9, o eixo x representa a frequência, enquanto o eixo y representa um valor relativo da potência em dB. A partir destes resultados foi possível determinar os parâmetros de interesse para o nosso estudo, que são a frequência de ressonância e o fator Q carregado. Em particular, esses parâmetros foram medidos em função da posição da sonda no interior da cavidade [4].

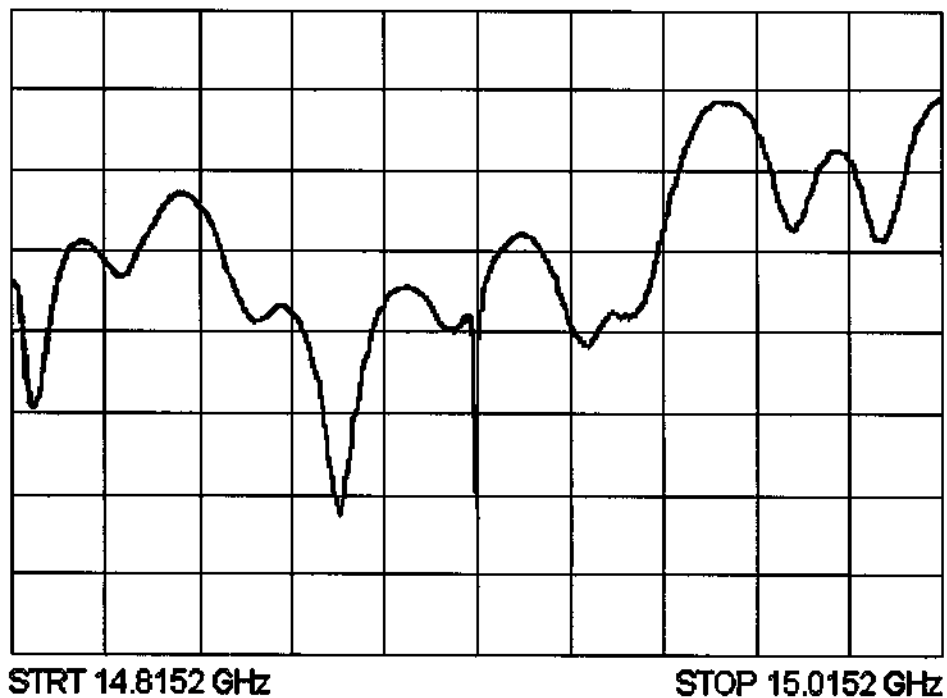


Fig. 4.9. Espectro apresentado pelo analisador de rede (O pico mais estreito, centrado em torno de 14,91 GHz, é o do modo ressonante da cavidade de microondas; o eixo x representa a frequência, enquanto o eixo y representa um valor relativo da potência em dB)

Como resultado dos testes, a frequência de ressonância mediu-se em torno de 14,91 GHz em 4,2K e nas medições do Q carregado obteve-se um valor máximo da ordem de 16,5 mil. Nesses resultados foi observado que a frequência de ressonância é fortemente dependente

da posição da sonda elétrica no interior da cavidade, provavelmente por causa da sua presença que atua como um outro poste [4,5].

O presente estudo experimental foi relevante em termos de aquisição de conhecimentos preliminares para a construção de um transdutor de alto ganho no projeto do detector Schenberg, o qual prevê a utilização de cavidades reentrantes supercondutoras com geometria similar à geometria estudada.

Referências

- [1] Aguiar O. D. et al., “The Brazilian spherical detector: progress and plans”, *Classical and Quantum Gravity*, vol. 21, pp. s457-s463, 2004.
- [2] Barroso, J.J.; Castro, P.J Aguiar, O.D.; Carneiro, L.A.; “Experimental tests on re-entrant klystron cavity for a gravitational wave antenna”. *Classical and Quantum Gravity*, vol. 21, p. s1221-s1224, 2004.
- [3] Barroso, J.J.; Castro, P.J Aguiar, O.D.; Carneiro, L.A. “Re-entrant cavities as electromechanical transducer”. *Revue of Scientific Instruments*, vol. 75, No. 4, p. 1000-1005, April 2004.
- [4] Ribeiro K.L.; Aguiar O.D.; Furtado S.R; Frajuca C.; Castro P.J.; Barroso J.J.; Remy M. “Tests With Superconducting Reentrant Cavities For Transducer Applications In Gravitational Wave Detectors”. *Classical And Quantum Gravity*, Vol. 21, P. S1225-S1229, 2004.
- [5] Ribeiro K.L.; Castro P.J.; Furtado S.R.; Aguiar O.D.; Barroso J.J. “Cavidade ressonante supercondutora como transdutor paramétrico em detectores de ondas gravitacionais”.
Submetido ao MOMAG2004 – 11^o Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 6^o Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, São Paulo, SP, 16-19 de agosto, 2004.

5. ORIENTAÇÃO DE ESTUDANTES E BOLSISTAS

- Estudante: Yuliya Koldayeva
 - Nível: Mestrado
 - Curso: Programa de Pós-graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE) na Área de Concentração em Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores (CMS)/ ETE/INPE. (Bolsa CAPES)
 - Título do Trabalho: Processamento e Caracterização de Cerâmicas de Nanotitanato de Bário Dopadas com Zircônia para Aplicação como Ressonadores Dielétricos em Microondas”
 - Instituição: LAP/CTE/INPE, LAS/CTE/INPE (grupo TECAMB)
 - Orientação em conjunto com a Dra. Maria do Carmo de Andrade Nono (Laboratório Associado de Sensores e Materiais – LAS / Grupo de Tecnologias Ambientais – TECAMB)
 - Data da defesa : 08/abril/2004.

- Estudante: Solange Âmara Fonseca
 - Nível: Iniciação Científica
 - Curso: Iniciação Científica em Ciência e Tecnologia de Materiais (Bolsa PIBIC/CNPq)
 - Título do Trabalho: “Desenvolvimento de Ressonadores Dielétricos de Nanotitanato de Bário Ativados com Estrôncio”
 - Instituição: LAP/INPE, LAS/INPE (grupo TECAMB)
 - Orientação em conjunto com a Dra. Maria do Carmo de Andrade Nono (LAS)
 - Início em fevereiro/2002
 - Término em dezembro/2003

- Bolsista: Rosana Rothmeier da Silva
 - Nível: Treinamento Técnico, nível II (Programa de Capacitação Técnica relacionado com o Processo nº 2001/02496-6 da FAPESP)
 - Título do Projeto: “Um Motor de Passo para Posicionamento de Antenas no Processo de Determinação de Diagrama de Radiação de Ressonadores e Geradores de Microondas”
 - Instituição: INPE/FAPESP
 - Data: maio/2002 a abril/2003

5. ORIENTAÇÃO DE ESTUDANTES E BOLSISTAS

- Estudante: Yuliya Koldayeva
 - Nível: Mestrado
 - Curso: Programa de Pós-graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE) na Área de Concentração em Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores (CMS)/ ETE/INPE. (Bolsa CAPES)
 - Título do Trabalho: Processamento e Caracterização de Cerâmicas de Nanotitanato de Bário Dopadas com Zircônia para Aplicação como Ressonadores Dielétricos em Microondas”
 - Instituição: LAP/CTE/INPE, LAS/CTE/INPE (grupo TECAMB)
 - Orientação em conjunto com a Dra. Maria do Carmo de Andrade Nono (Laboratório Associado de Sensores e Materiais – LAS / Grupo de Tecnologias Ambientais – TECAMB)
 - Data da defesa : 08/abril/2004.

- Estudante: Solange Tamara Fonseca
 - Nível: Iniciação Científica
 - Curso: Iniciação Científica em Ciência e Tecnologia de Materiais (Bolsa PIBIC/CNPq)
 - Título do Trabalho: “Desenvolvimento de Ressonadores Dielétricos de Nanotitanato de Bário Ativados com Estrôncio”
 - Instituição: LAP/INPE, LAS/INPE (grupo TECAMB)
 - Orientação em conjunto com a Dra. Maria do Carmo de Andrade Nono (LAS)
 - Início em fevereiro/2002
 - Término em dezembro/2003

- Bolsista: Rosana Rothmeier da Silva
 - Nível: Treinamento Técnico, nível II (Programa de Capacitação Técnica relacionado com o Processo nº 2001/02496-6 da FAPESP)
 - Título do Projeto: “Um Motor de Passo para Posicionamento de Antenas no Processo de Determinação de Diagrama de Radiação de Ressonadores e Geradores de Microondas”
 - Instituição: INPE/FAPESP
 - Data: maio/2002 a abril/2003

- Estagiário: Rodrigo Aparecido da Silva
 - Nível: Técnico em Mecânica
 - Instituição: INPE/Escola Técnica Everardo Passos (ETEP)
 - Data: março/2003 a dezembro/2003

- Estagiário: Alcir Donizete da Silva
 - Nível: Técnico em Mecânica
 - Instituição: INPE/Escola Técnica Everardo Passos (ETEP)
 - Data: março/2004 a dezembro/2004 (em andamento)

- Estudante: Tatiana Regina da Fonseca
 - Nível: Iniciação Científica
 - Curso: Iniciação Científica em Ciência e Tecnologia de Materiais (Bolsa PIBIC/CNPq)
 - Título do Trabalho: “Cerâmicas de Nanotitanato de Bário Para Aplicação como Ressonadores Dielétricos”
 - Instituição: LAP/INPE, LAS/INPE (grupo TECAMB)
 - Orientação em conjunto com a Dra. Maria do Carmo de Andrade Nono (LAS)
 - Início em fevereiro/2004 (em andamento)

6. PARTICIPAÇÃO EM BANCAS E COMITÊS

- Banca de **Revalidação de Diploma** de Doutorado de Adalberto Pacífico Comiran (obtido no Instituto de Telecomunicações de Moscou), fevereiro/março, 2002.
- **Presidente da Comissão Examinadora** do Concurso Público do INPE para o cargo de Tecnologista Sênior, Código 59, 4-6 de junho, 2002.
- Banca Examinadora de **Exame de Qualificação de Mestrado** de Yuliya Koldayeva, do curso de Engenharia e Tecnologia Espaciais, INPE, 2 de junho, 2003.
- Banca Examinadora de **Defesa de Mestrado** de Yuliya Koldayeva, do curso de Engenharia e Tecnologia Espaciais, 8 de abril, 2004.
- Comitê de **Avaliação de Processos de Infra-Estrutura (CT-INFRA)**, CNPq, Brasília, 7-10 de outubro, 2003.

6. PARTICIPAÇÃO EM CONGRESSOS

- X Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica, Recife-PE, 12-16 de agosto, 2002 (apresentação de 2 trabalhos).
- IEEEEMTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference – IMOC 2003, Foz do Iguaçu, PR, 20-23 de setembro, 2003 (apresentação de trabalho).
- X Latin American Workshop on Plasma Physics & 7th Brazilian Meeting on Plasma Physics, São Pedro – SP, December 1-5, 2003 (apresentação de 2 trabalhos – posters).
- PTECH 2003 – Fourth International Latin-American Conference on Powder Technology, Guarujá – SP, 19-21 de novembro, 2003 (apresentação de trabalho).

• 8. TRABALHOS PUBLICADOS

A) Trabalhos de 2002 a janeiro de 2003 (relacionados no I Relatório à FAPESP)

[1] BARROSO, J.J.; CASTRO, P.J.; LEITE NETO, J.P. "Electrical conductivity measurement through the loaded Q factor of a resonant cavity". *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 24 (1): 79-86, Jan. 2003.

[2] NONO, M.C.A.; CASTRO, P.J. "Microstructure study and crystalline phase formation on $\text{Nb}_2\text{O}_5\text{-Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ microwave resonators". *Materials Science Forum*, 416-418: 11-17, Jan. 2003.

[3] FREITAS, D.; NONO, M.C.A.; CASTRO, P.J. "Cubic polycrystalline zirconia stabilized with yttrium and rare earth oxides mixtures: processing phase and microstructure characterization". *Materials Science Forum*, 416-418: 525-530, Jan. 2003.

[4] CASTRO, P.J.; BARROSO, J.J.; LEITE NETO, J.P. "Determinação do fator Q ôhmico de ressoadores com corrugação transversa de perfil senoidal". In: X Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica, Recife-PE, 12-16 de agosto, 2002. *Anais*. Recife-PE, SBMO, 2002, p. 561-565.

[5] BARROSO, J.J.; CASTRO, P.J.; LEITE NETO, J.P. "Medida da condutividade elétrica de materiais metálicos através do fator Q de uma cavidade ressonante". In: X Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica, Recife-PE, 12-16 de agosto, 2002. *Anais*. Recife-PE, SBMO, 2002, p. 66-68.

[6] FONSECA, S.T.; NONO, M.C.A.; CASTRO, P.J.; KURANAGA, C. " $\text{SrO}_2\text{-Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ ceramics as microwave dielectric resonators for telecommunication applications". In: 1st Brazil – Material Research Meeting, Rio de Janeiro-RJ, 7-10 July, 2002. *Proceedings*. Rio, SBPMat, 2002, p. 194-196.

[7] FONSECA, S.T.; NONO, M.C.A.; CASTRO, P.J. "Cerâmicas de nanotitanato de bário para aplicação de ressoadores dielétricos em microondas". Relatório de Projeto de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq/INPE). Apresentado no Seminário de Iniciação Científica do INPE, 10-11 de junho, 2002. *Relatório INPE-9036-PRE/4713*, Laboratório Associado de Plasma, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, agosto de 2002. 15 p.

[8] FONSECA, S.T.; NONO, M.C.A.; CASTRO, P.J. "Microstructure study of barium nanotitanate ceramics doped with strontium for microwave application" [CD ROM]. In: Congresso Int. de Microscopia e Microanálise no Mercosul (MICROMAT 2002), Curitiba, PR, 20-22 de novembro, 2002. *Proceedings*. Curitiba, Micromat, 2002, p. 56-59.

B) Trabalhos de janeiro de 2003 a abril de 2004 : publicados em revista, anais de conferências e Relatórios Técnicos

- [1] LUDWIG, G.O.; DEL BOSCO, E.; FERREIRA, J.G.; BERNI, L.A.; OLIVEIRA, R.M.; ANDRADE, M.C.R.; SHIBATA, C.S.; UEDA, M.; BARBOSA, L.F.W.; BARROSO, J.J.; CASTRO, P.J.; PATIRE, H. "Spherical tokamak development in Brazil". *Brazilian Journal of Physics*, n. 33, p. 848-859, 2003.
- [2] BARROSO, J.J.; CASTRO, P.J.; CARNEIRO, L.A.; AGUIAR, O.D. "Reentrant klystron cavity as an electromechanical transducer". In: IMOC 2003 – International Microwave and Optoelectronics Conference, September 20-23, Foz do Iguaçu – PR, Brazil. *Proceedings v. II*. Curitiba-PR, SBMO/IEEE, 2003, p. 1081-1084.
- [3] BARROSO, J.J.; ROSSI, J.O.; PATIRE JR., H.; CASTRO, P.J. "A 25 kV/10A pulser for driving a high-power pierce electron gun", In: 7^a Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, Fortaleza-CE, 21-24 de setembro, 2003. *Anais*. Fortaleza-CE, SOBRAEP, 2003, p. 62-64.
- [4] BARROSO, J.J.; CASTRO, P.J. AGUIAR, O.D.; CARNEIRO, L.A.; "Experimental tests on re-entrant klystron cavity for a gravitational wave antenna". *Classical and Quantum Gravity*, vol. 21, p. s1221-s1224, 2004.
- [5] RIBEIRO K.L.; AGUIAR O.D.; FURTADO S.R.; FRAJUCA C.; CASTRO P.J.; BARROSO J.J.; REMY M. "Tests with superconducting reentrant cavities for transducer applications in gravitational wave detectors". *Classical and Quantum Gravity*, vol. 21, p. s1225-s1229, 2004.
- [6] AGUIAR O.D., ANDRADE L.A., BARROSO J.J., CAMARGO FILHO L., CARNEIRO L. A, CASTRO C.S., CASTRO P.J., COSTA C.A., COSTA K.M.F., ARAUJO J.C.N., LUCENA A.U., PAULA W., REY E.C., SOUZA S.T., FAUTH A.C., FRAJUCA C., FROSSATI G., FURTADO S.R., LIMA L.C., MAGALHÃES N.S, MARINHO R.M., MATOS E.S., MELO J.L., MIRANDA O.D., OLIVEIRA N.F., PALEO B.W., REMY M., RIBEIRO K.L., STELLATI C., VELLOSO W.F., WEBER J. "The Brazilian spherical detector: progress and plans". *Classical and Quantum Gravity*, vol. 21, p. s457-s463, 2004.
- [7] BARROSO, J.J.; CASTRO, P.J. AGUIAR, O.D.; CARNEIRO, L.A.; "Reentrant cavities as electromechanical transducer". *Revue of Scientific Instruments*, vol. 75, No. 4, p. 1000-1005, April 2004.
- [8] NONO, M. C. A.; FONSECA, S. T.; CASTRO, P. J.; KOLDAYEVA, YU. "Microstructure and microwave characterization of $\text{SrO}_2\text{-Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ dielectric resonators for telecommunications applications". Para publicação em Materials Science Forum.
- [9] KOLDAYEVA, YU.; NONO, M. C. A.; CASTRO, P. J.; KURANAGA, C.; FONSECA, S. T. "Phase stabilization with ZrO_2 for improvement of dielectric performance of $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ ceramics". Para publicação em Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials - Trans Tech Pub.
- [10] KOLDAYEVA, YU.; NONO, M. C. A.; CASTRO, P. J.; FONSECA, S. T. "Microstructure and some microwave properties of $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ doped with ZrO_2 ". Para publicação em Materials Science Forum.

[11] AGUIAR O.D., ANDRADE L.A., BARROSO J.J., CAMARGO FILHO L., CARNEIRO L. A., CASTRO C.S., CASTRO P.J., COSTA C.A., COSTA K.M.F., ARAUJO J.C.N., LUCENA A.U., PAULA W., REY E.C., SOUZA S.T., FAUTH A.C., FRAJUCA C., FROSSATI G., FURTADO S.R., LIMA L.C., MAGALHÃES N.S, MARINHO R.M., MATOS E.S., MELO J.L., MIRANDA O.D., OLIVEIRA N.F., PALEO B.W., REMY M., RIBEIRO K.L., STELLATI C., VELLOSO W.F., WEBER J. "The Brazilian spherical detector: status report". Submetido p/ Tenth Marcel Grossman Meeting Rio de Janeiro, RJ, July 20-26, 2004.

[12] RIBEIRO K.L.; CASTRO P.J.; FURTADO S.R.; AGUIAR O.D.; BARROSO J.J. "Cavidade ressonante supercondutora como transdutor paramétrico em detectores de ondas gravitacionais". Submetido ao MOMAG2004 - 11º Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 6º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, São Paulo, SP, 16-19 de agosto, 2004.

[13] CASTRO, P.J. "Monotron e cavidades azimutalmente corrugadas: aplicação à geração de microondas de alta potência". I Relatório Científico à FAPESP de Projeto Individual de Pesquisa. Publicação INPE 9777-PRP/239, 2003.

[14] SILVA, R. R.; CASTRO, P.J.; FERREIRA, J.G.; COSTA, F.E.D.F. "Um motor de passo para posicionamento de antenas". Publicação INPE 10204-PRP/240, dezembro de 2003.

C) Trabalhos de janeiro de 2003 a abril de 2004 : apresentados em Conferências e publicados na forma de Resumos

BARROSO, J.J.; CASTRO, P.J.; LEITE, J.P. "Um método para medir a condutividade elétrica de metais em frequências de microondas". XXIII Congresso Brasileiro de Aplicações de Vácuo na Indústria e na Ciência - CBRAVIC, Florianópolis-SC, 10-12 de julho, 2002.

[1] AGUIAR, O.D.; BARROSO, J.J.; CASTRO, P.J; CARNEIRO, L.A. "Experimental tests with reentrant klystron cavities of the type used by the Australian gravitational wave antenna Niobè" 5th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves, Tirrenia, Italy, July 6-11, 2003.

[2] FONSECA, S. T.; NONO, M. C. A.; CASTRO, P. J.; KOLDAYEVA, Yu. "Microstructure study of barium nanotitanate ceramics doped with strontium for microwave application". In: 10th International Symposium on Metastable, Mechanically Alloyed and Nanocrystalline Materials, Foz do Iguaçu – PR, August 24-28, 2003. *Program & Abstracts*. São Carlos: UFScar, 2003, v. 1, p. 127.

[3] KOLDAYEVA, YU.; NONO, M. C. A.; CASTRO, P. J.; KURANAGA, C.; FONSECA, S.T. "Phase stabilization with ZrO₂ for improvement of dielectric performance of Ba₂Ti₃O₂₀ ceramics". In: 10th International Symposium on Metastable, Mechanically Alloyed and Nanocrystalline Materials, Foz do Iguaçu – PR, August 24-28, 2003. *Program & Abstracts*. São Carlos: UFScar, 2003, v. 1, p. 56.

- [4] KOLDAYEVA, YU.; NONO, M. C. A.; KURANAGA, C.; FONSECA, S. T. "Nanosized BaSO₄ powder for Ba₂Ti₉O₂₀ ceramics fabrication". In: 2nd Brazil – Materials Research Society Meeting, Rio de Janeiro, October 26-29, 2003. *Program and Book of Abstracts*. Rio, SBPMat, 2003, v.1, p.68.
- [5] KOLDAYEVA, Yu.; NONO, M. C. A.; CASTRO, P.J.; FONSECA, S. T. "Microstructure and some microwave properties of Ba₂Ti₉O₂₀ doped with ZrO₂". In: PTECH 2003 - Fourth International Latin-American Conference on Powder Technology, Guarujá – SP, 19-21 de novembro, 2003. *Abstract*. SP, Associação Brasileira de Cerâmica (ABC), 2003, p. 106.
- [6] NONO, M. C. A.; FONSECA, S. T.; CASTRO, P. J.; KOLDAYEVA, Yu. "Microstructure and microwave characterization of SrO₂-Ba₂Ti₉O₂₀ dielectric resonators for telecommunications applications". In: PTECH 2003 - International Latin-American Conference on Powder Technology, Guarujá – SP, November 19-21, 2003. *Abstract*. SP, ABC, 2003, p. 107.
- [7] AGUIAR, O.D.; BARROSO, J.J.; CARNEIRO, L.A.; CASTRO, C.S.; CASTRO, P.J.; COSTA C.A. "Transducers for the Schenberg detector". In: XXIV Encontro Nacional de Física de Partículas e Campos, Caxambu – MG, 1-4 de outubro, 2003. *Programa e Resumos*. SP, Sociedade Brasileira de Física (SBF), 2003, p. 44 [poster].
- [8] AGUIAR, O.D.; BARROSO, J.J.; CARNEIRO, L.A.; CASTRO, P.J.; COSTA C.A. "The Schenberg detector: first criogenic run of the sphere and latest developments". In: XXIV Encontro Nacional de Física de Partículas e Campos, Caxambu – MG, 1-4 de outubro, 2003. *Programa e Resumos*. SP, SBF, 2003, p. 50 [poster].
- [9] CASTRO, P.J.; BARROSO, J.J.; AGUIAR, O.D.; CARNEIRO, L.A.; "Electromagnetic cavities as electromechanical transducers: theory and experiment". In: X Latin American Workshop on Plasma Physics & 7th Brazilian Meeting on Plasma Physics. São Pedro – SP, December 1-5, 2003. *Program and Abstracts*. SP, SBF, 2003, p. 52.
- [10] LUDWIG, G.O.; DEL BOSCO, E.; BERNI, L.A.; FERREIRA, J.G.; OLIVEIRA, R.M.; ANDRADE, M.C.R.; SHIBATA, C.S.; BARROSO, J.J.; CASTRO, P.J. "Progress on the ETE spherical tokamak". In: X Latin American Workshop on Plasma Physics & 7th Brazilian Meeting on Plasma Physics. São Pedro – SP, December 1-5, 2003. *Program and Abstracts*. SP, SBF, 2003, p. 66.
- [11] CASTRO, P.J.; BARROSO, J.J.; ROSSI, J.O.; PATIRE JR., H.; "Generation of a 5a, 10kv hollow electron beam by a pierce gun" In: X Latin American Workshop on Plasma Physics & 7th Brazilian Meeting on Plasma Physics. São Pedro – SP, December 1-5, 2003. *Program and Abstracts*. SP, SBF, 2003, p. 101.



AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO

Número

LAP001/2004

URLIB

M38

Título

Monotron e Cavidades Azimutalmente Corrugadas: Aplicação à Geração de Microondas de Alta Potência

Autor

Pedro José de Castro

Tradutor

Não tem

Editor

Origem	Projeto	Série	No. de Páginas	No. de Fotos	No. de Mapas
	PRAD/FAPESP		43		

Tipo

RPQ PRE NTC PRP MAN PUD TAE

Divulgação

Externa Interna Reservada Lista de Distribuição Anexa

Periódico / Evento

Convênio

PROJETO FAPESP

Autorização Preliminar

31/12/04
Data

Edson Del Boeco
Chefe do Laboratório
de Desenvolvimento em Física
Titular da Unidade

Revisão Técnica

Solicitada Dispensada

Recebida ___/___/___ Devolvida ___/___/___

HORACIO HIDEELI YANAGISHI
Chefe do
Centro de Tecnologias Especiais
Titular de Nível "A"

Assinatura do Revisor

Revisão de Linguagem

Solicitada Dispensada

Recebida ___/___/___ Devolvida ___/___/___

HORACIO HIDEELI YANAGISHI
Chefe do
Centro de Tecnologias Especiais
Titular de Nível "A"

Assinatura do Revisor

Autorização Final

03/12/04
Data

Edson Del Boeco
Chefe do Laboratório
de Desenvolvimento em Física
Titular da Unidade

Palavras Chave

Monotron, Ressonador Dielétrico, Cavidades Reentrantes

INPE-11800-PRP/243



Secretaria	
<u>06112104</u>	Recebida <u> </u> / <u> </u> / <u> </u> Devolvida <u> </u> / <u> </u> / <u> </u>
Data	
<u>Michelle Chierici</u>	
Encaminhado Por	Devolvido Por

Controle e Divulgação	
<u> </u> / <u> </u> / <u> </u> Data	Recebido Por: _____
	Devolvido Para: _____
Pronto Para Publicação em: <u> </u> / <u> </u> / <u> </u>	<u> </u> / <u> </u> / <u> </u> Data
No. _____ Quant. _____	Assinatura

Observações
Relatório FAPESP