



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Estudo dos Transdutores Paramétricos do Detector de Ondas Gravitacionais Mario Schenberg

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Antônio Unias de Lucena (ITA, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: antoniounias@redecasd.ita.br

Dr. Odylio Denys de Aguiar (DAS/INPE, Orientador)

E-mail: odylio@das.inpe.br

Maio de 2004

Qual a utilidade de se estudar ondas gravitacionais?

Certa vez, o primeiro-ministro inglês Gladstone perguntou a Faraday sobre a utilidade de se estudar a eletricidade. Faraday respondeu-lhe: "Para que serve uma criança?".

Anos depois, Hertz demonstrou na prática a existência das ondas eletromagnéticas previstas pelo trabalho de Maxwell, que se baseou nas experiências de Faraday. E, com certeza, o mundo atual é inconcebível sem a utilização das ondas eletromagnéticas.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	4
 CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	
2.1 - ONDAS GRAVITACIONAIS.....	5
2.2 - DETECTORES DE ONDAS GRAVITACIONAIS.....	6
2.3 - RUÍDOS TÉRMICOS E VIBRACIONAIS.....	7
2.4 - TRANSDUTORES.....	11
CAPÍTULO 3 – RESULTADOS E ANÁLISES.....	21
CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	26
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	27

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

O detector Mario Schenberg é constituído de uma massa ressonante de CuAl6% com 65 cm de diâmetro, pesando em torno de 1,15T e com sensibilidade para ondas gravitacionais com frequência em torno de 3100 e 3300Hz. Por sua vez, o transdutor é uma parte fundamental do projeto já que, como as ondas gravitacionais produzem deformações muito pequenas para as dimensões humanas, é necessário utilizar este dispositivo eletro-mecânico para amplificar a amplitude da onda gravitacional captada, tornando mais fácil a sua detecção.

Este projeto de Iniciação Científica teve por objetivo o estudo de transdutores paramétricos utilizados em detectores de onda gravitacional, em especial para o detector brasileiro Mario Schenberg, sendo que o estudo se focalizou mais nas cavidades ressonantes utilizadas pelo transdutor. Experimentalmente, foram realizadas medidas da figura de mérito das cavidades (Q elétrico) e também da sua frequência de ressonância.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 - Ondas Gravitacionais:

Ondas Gravitacionais são perturbações na métrica espaço-tempo provocadas pela aceleração relativa entre massas, de forma que a derivada segunda do momento de quadrupolo não seja constante. Sua real existência ainda não foi comprovada, por isto a importância deste projeto.

A idéia de onda gravitacional foi obtida através da resolução da equação de Einstein que relaciona a curvatura do espaço-tempo com a massa do universo a partir de um caso particular, no vácuo sem matéria.

Porém, apesar de estas ondas não terem sido ainda detectadas, sua existência é tida como certa devido a uma prova indireta obtida pelos físicos Joseph Taylor e Russel Hulse. No início da década de 80, eles descobriram duas estrelas, uma orbitando em torno da outra, um pulsar, e, segundo a relatividade geral, um sistema assim emite ondas gravitacionais, perdendo energia nesse processo e emitindo ondas gravitacionais. Com a perda de energia, os pulsares espiralam um contra o outro, provocando vários efeitos físicos também explicáveis pela relatividade. Esses efeitos foram observados e concordam muito bem com os requisitos da teoria de Einstein. Por isso, ambos ganharam o prêmio Nobel de Física de 1993, por esse trabalho.

Não se conhece ainda a natureza da onda gravitacional, mas, em analogia às ondas eletromagnéticas, já se fala de uma possível partícula chamada gráviton, sua partícula-mensageira, apesar de a onda gravitacional não ter sido quantizada ainda.

2.2 - Detectores de Ondas Gravitacionais:

Somente nos anos 60, e, portanto muito após o advento da Teoria da Relatividade Geral de Einstein, vários físicos se propuseram a detectar as ondas gravitacionais propostas por ele, não para confirmar a teoria da Relatividade Geral, que já estava consolidada com a explicação do desvio da órbita de Mercúrio calculada pela física newtoniana e pela comprovação em 1919 de que as ondas eletromagnéticas são atraídas por campo gravitacional, mas sim, pela possibilidade que a detecção poderia causar de se tentar desenvolver um novo tipo de astronomia: a astronomia das ondas gravitacionais.

O primeiro físico a se destacar na busca das ondas gravitacionais foi o norte-americano Joseph Weber. Em 1969, ele relatou os resultados de uma experiência para detectar ondas gravitacionais. Nela, Weber usou dois detectores de radiação gravitacional por ele desenvolvidos. Eles foram colocados a mais de 970km de distância um do outro, de modo que as vibrações ou outras variações locais no campo gravitacional da Terra não seriam indicadas por ambos detectores no mesmo instante. Porém, muitos cientistas têm dúvidas quanto à validade deste experimento.

De acordo com a técnica de detecção de ondas gravitacionais, podemos classificar os detectores em dois tipos principais: os de ressonância de massa (barra cilíndrica e esfera) e os de laser.

Os detectores de ressonância de massa funcionam pelo seguinte princípio: a onda gravitacional, ao passar pela massa, provoca uma deformação e transdutores acoplados à sua superfície, transformam essa deformação num sinal elétrico capaz de ser interpretado. Os detectores esferoidais são capazes de detectar ondas originárias de qualquer direção, enquanto os de barra estão

restritos a observações em direções próximas dos planos perpendiculares ao cilindro e, por este motivo, o projeto Mario Schenberg optou por uma massa de ressonância na forma de esfera. Porém, detectores esferoidais exigem um maior processamento de informações.

Já os detectores de laser se baseiam nas interferências no espaço-tempo que a passagem da onda gravitacional provocará ao passar pelo feixe de laser. Quando a onda gravitacional atinge a o interferômetro, os comprimentos dos feixes de laser de seus braços mudam, produzindo uma diferença de fase $\Delta\phi$ proporcional à amplitude da onda, alterando a figura de interferência sobre o fotodetector. Esta alteração no padrão de interferência corresponde à detecção da onda gravitacional.

2.3 - Ruídos Térmicos e Vibracionais

Sem dúvida o principal motivo que levou a comunidade científica a desconsiderar os resultados obtidos por Joseph Weber com seu detector de ondas gravitacionais foi o fato do mesmo estar à temperatura ambiente e também não estar isolado de ruídos vibracionais externos.

Estando o detector à temperatura ambiente, os ruídos térmicos ocasionados pelos movimentos quânticos das moléculas (movimento browniano) podem causar a sensação de que a massa ressonante está vibrando e que por isso captou uma onda gravitacional. Além disso, ruídos vibracionais externos como, por exemplo, abalos sísmicos e outros ruídos provocados pelo homem, podem ser captados pelo detector se este não estiver isolado vibracionalmente do mundo externo, podendo causar interferências numa possível detecção da onda gravitacional.

Por isto, o detector Mario Schenberg estará disposto em um sistema de câmaras criogênicas, resfriado a temperaturas de milikelvins. Num primeiro momento o detector estará a 4K e futuramente deseja-se que ele esteja funcionando em temperaturas da ordem de 50 mk.

A fim de isolá-lo vibracionalmente, foi construído um sistema de isolamento vibracional constituído de vários estágios de conjunto de "massa-mola" (Figuras 1 e 2). Cada estágio tem por objetivo reduzir a amplitude do ruído que ocorre sobre o detector de tal forma que o ruído resultante sobre a massa ressonante após ser amortecido pelos diversos estágios do sistema de isolamento vibracional tenham uma amplitude bem inferior à da onda gravitacional que espera ser detectada, não provocando desta forma, interferência na detecção. A ordem de amortecimento de sistema de isolamento vibracional é de 300 dB. Espera-se que o detector Mario Schenberg atinja uma sensibilidade à 50mK que se possa medir ondas gravitacionais de amplitude $4,3 \times 10^{-20}$ m. Vale lembrar que o detector não estará medindo esta amplitude e sim o sinal resultante da ressonância da esfera após este ser amplificado pelo transdutor.

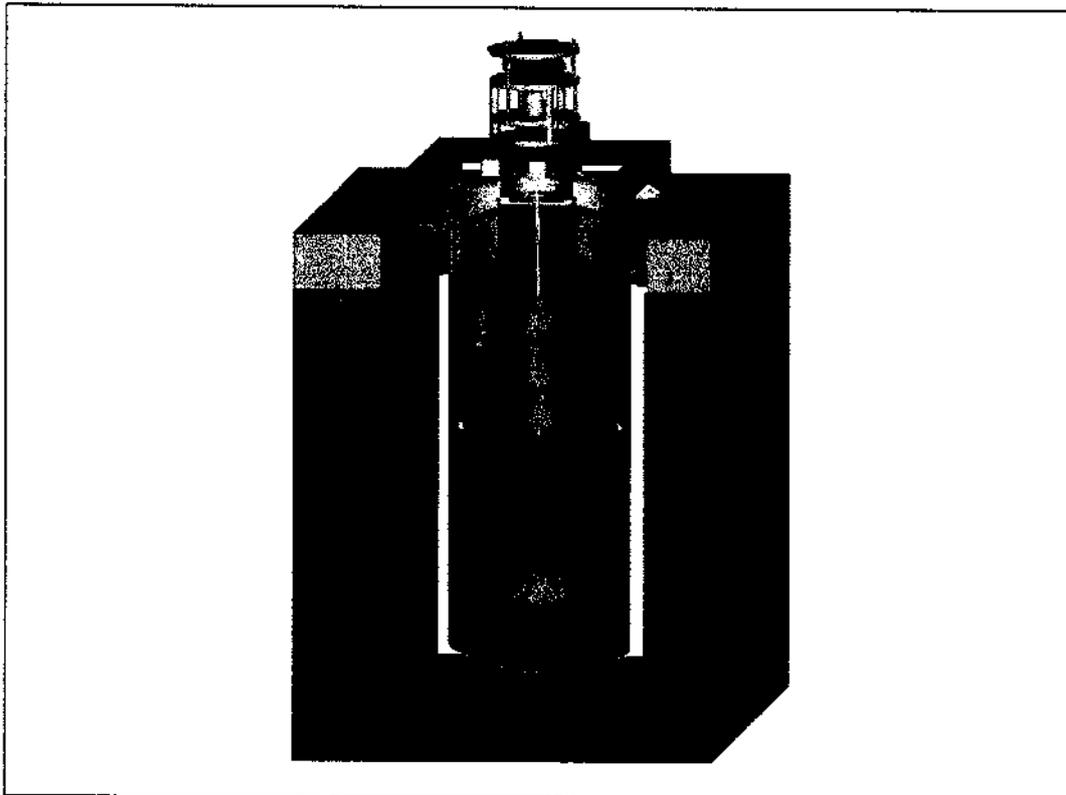


Fig.1 - Desenho em AutoCad do Detector SCHENBERG em corte para visualização da parte mecânica interna

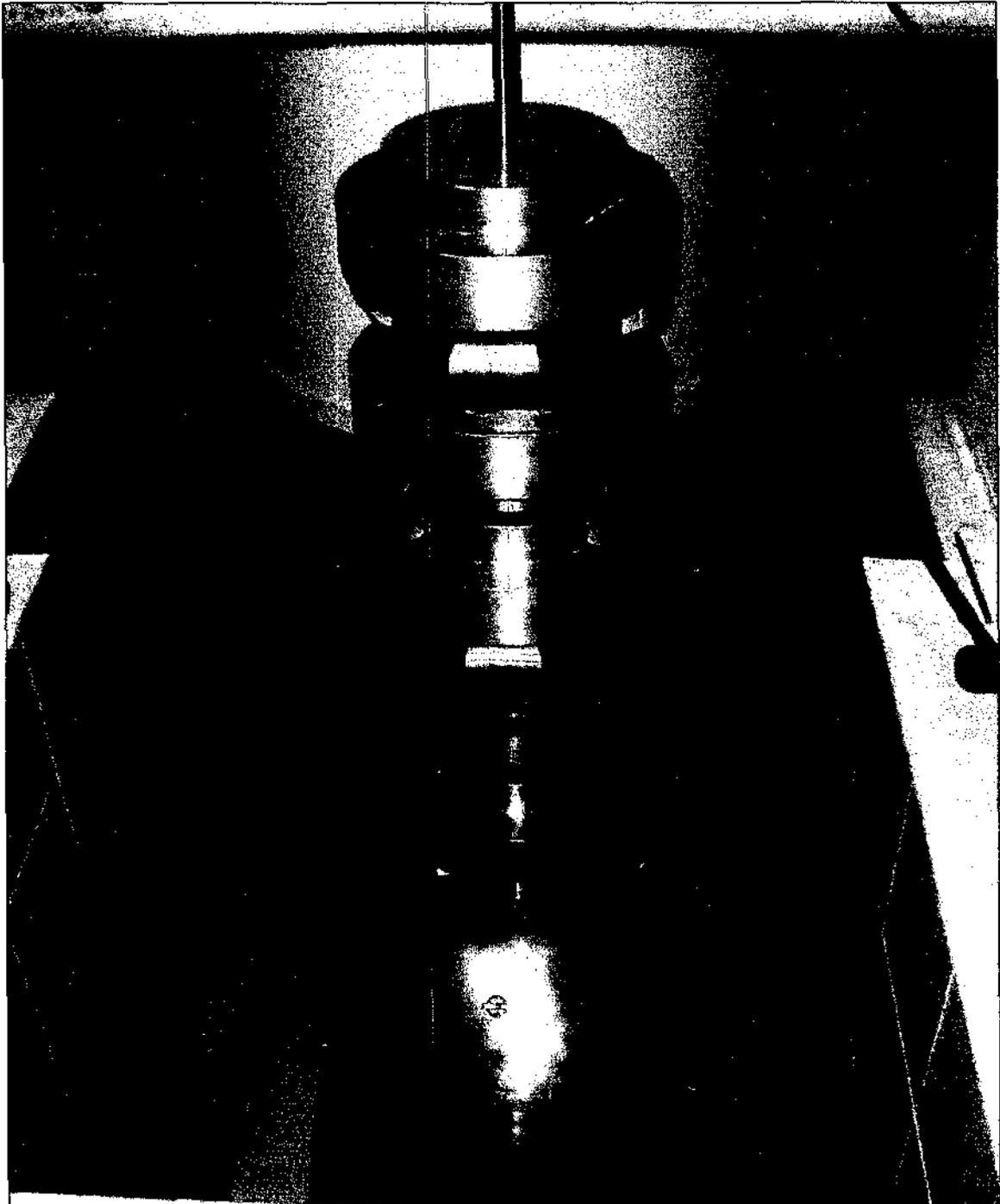


Fig.2 - Estágio de construção do detector de ondas gravitacionais Mario Schenberg

2.4 - Transdutores

Transdutor elétrico é um dispositivo capaz de converter uma grandeza física não elétrica, tal como deformação, temperatura ou pressão em um impulso elétrico. No caso do projeto, o transdutor irá transformar a vibração mecânica de sua membrana de ressonância em um sinal elétrico correspondente a uma grandeza previamente calibrada.

A detecção de ondas gravitacionais é feita pela determinação da oscilação da antena. Esta oscilação, por sua vez, é medida através de transdutores eletromecânicos que convertem a vibração mecânica em um sinal elétrico, daí a importância dos transdutores no detector de ondas gravitacionais.

Os primeiros detectores de ondas gravitacionais utilizavam cristais piezelétricos acoplados à sua superfície. Depois, estes cristais foram substituídos por transdutores passivos, indutivos ou capacitivos e atualmente alguns detectores passaram a utilizar transdutores paramétricos ou ativos.

Transdutores paramétricos são aqueles “bombeados” com sinal AC, que utilizam a variação de um parâmetro do circuito que relaciona uma variável mecânica com uma variável elétrica de forma não linear. Estes transdutores, ao contrário dos transdutores passivos utilizam uma fonte de potência externa, possuindo, assim, um ganho de potência intrínseco. Esse ganho é obtido pela conversão do sinal da antena para uma frequência muito maior.

Dentre os motivos pelos quais os detectores mais modernos utilizam os transdutores paramétricos, destacam-se:

- O transdutor paramétrico tem um grande coeficiente de acoplamento eletromecânico obtido devido à ação paramétrica. Acoplamento

eletromecânico é a razão de conversão de energia mecânica em elétrica ou o contrário.

- Os transdutores paramétricos são auto calibrados, isto é, a sensibilidade da antena pode ser determinada sem a necessidade de um transdutor auxiliar para calibração.

Entretanto, o transdutor paramétrico apresenta algumas desvantagens. Para seu funcionamento, ele necessita de um oscilador externo, e este deve possuir baixo ruído em amplitude e frequência. Isto é importante, pois o sinal modulado apresentará 'sidebands' com valores em torno de kHz e um oscilador com alto ruído de frequência impossibilitaria uma leitura adequada deste sinal. Além disso, existe a dificuldade de ajuste da frequência da bomba à frequência de ressonância da cavidade.

2.4.1 – Funcionamento do Transdutor:

Para um bom funcionamento do detector de ondas gravitacionais, seus transdutores devem possuir algumas características adequadas, tanto no caso do funcionamento mecânico quanto elétrico.

2.4.1.1 – Funcionamento Mecânico:

O funcionamento da parte mecânica do transdutor deve seguir as seguintes diretrizes: amplificar a amplitude de oscilação da esfera, forçar o transdutor a efetuar movimentos perpendiculares à superfície da esfera e criar um transdutor cuja primeira frequência de ressonância coincidisse com a frequência dos modos de vibração quadripolares da esfera.

A amplificação mecânica tem dois estágios: um efetuado pelo próprio corpo do transdutor e outro realizado pela membrana ressonante do transdutor. O transdutor é constituído por um corpo cilíndrico acoplado a uma parte externa também cilíndrica por meio de molas (Figuras 3 e 4). Neste transdutor também está acoplada uma cavidade ressonante na qual a membrana ressonante está sobreposta.

O transdutor foi projetado de tal forma que sua primeira frequência de ressonância coincidissem exatamente com a frequência dos modos normais quadripolares da esfera, pois, se isto não fosse respeitado, poderia acontecer uma interferência na leitura do sinal. Isto ocorreria, pois parte da energia da onda gravitacional poderia excitar estes primeiros modos normais. Além disso, é necessária uma grande janela livre de ressonância para os modos posteriores.

No que se refere ao movimento de vibração do corpo do transdutor, a vibração do transdutor deve ser de tal forma que seu corpo central se deslocasse radialmente à esfera, isto é, efetuasse movimentos "para cima e para baixo" perpendiculares à fixação do transdutor. Modos em que ocorrem deslocamentos laterais da região superior dos transdutores não são adequados para o acoplamento, pois a excitação sobre a membrana não teria a máxima energia possível, o que é essencial para ocorrer amplitudes consideravelmente altas. Estas amplitudes são fundamentais, pois é a partir da interferência deste sinal com o sinal injetado no transdutor que será possível detectar a onda gravitacional.

Além disso, o projeto mecânico tem por objetivo amplificar a vibração da esfera ressonante do detector de ondas gravitacionais. A esfera ao entrar em ressonância vibrará com uma amplitude esperada de 10^{-20} m. A parte mecânica deste transdutor terá a finalidade de amplificar o sinal mecânico para 10^{-16} m. Então, este sinal mecânico será transformado em um sinal elétrico capaz de ser interpretado.

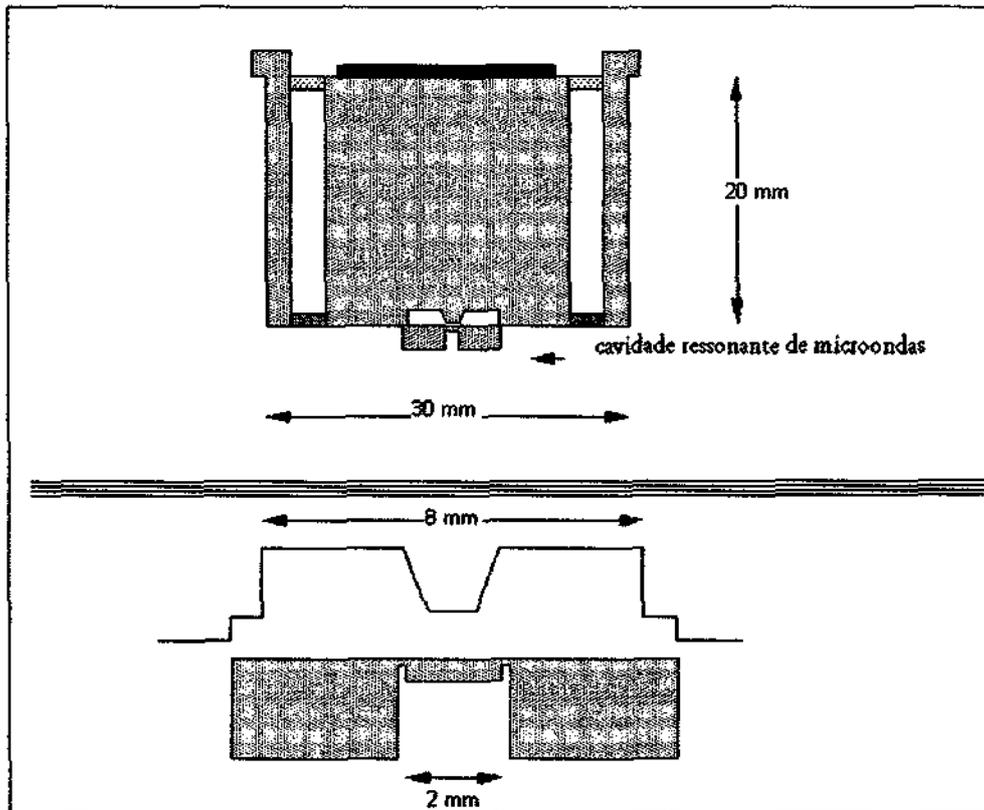


Fig.3 - Desenho Técnico do Transdutor

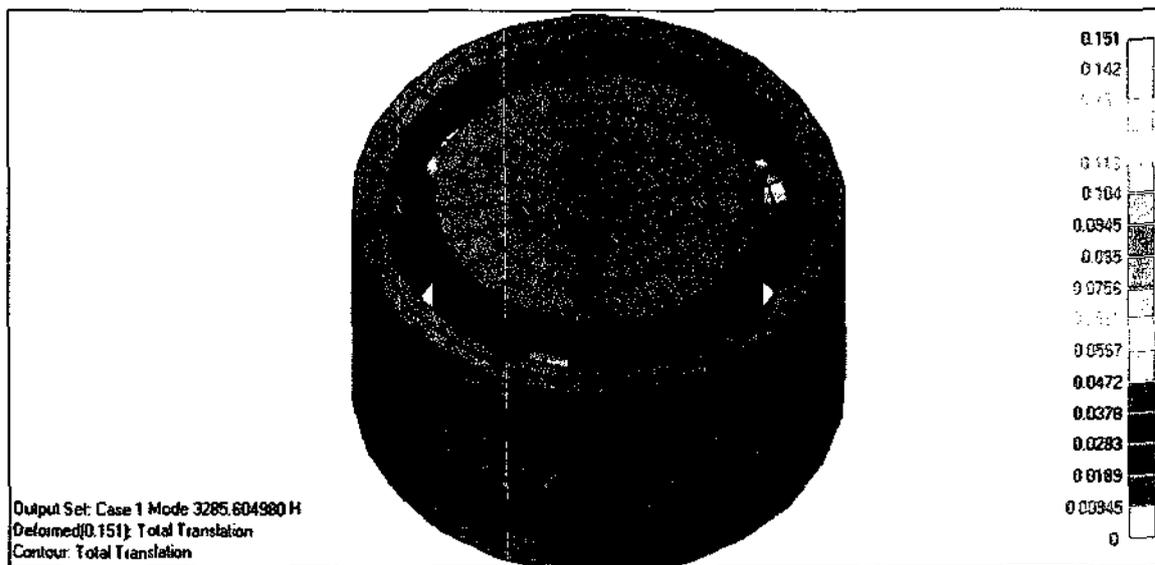


Fig.4 - Visão tridimensional do transdutor



Fig.5 - Detalhe da cavidade onde o transdutor será colocado

2.4.1.2 – Funcionamento Elétrico:

Eletricamente, o transdutor funcionará da seguinte forma: em sua cavidade de microondas será injetado um sinal de 10,21Ghz. Quando o corpo do transdutor entrar em oscilação, fará com que a membrana do ressonador também oscile. Esta membrana vibrando, alterará sua distância em relação ao poste da cavidade ressonante. A variação na distância implica na variação da capacitância da cavidade e conseqüentemente na sua freqüência de ressonância. Assim, o sinal injetado na cavidade será modulado, produzindo bandas laterais (sidebands) na freqüência de $10,21\text{Ghz} \pm 3,2\text{khz}$. Este sinal elétrico será então amplificado e filtrado e deste sinal resultante poderá se chegar a alguma conclusão sobre a detecção das ondas gravitacionais. O projeto possui mais de um transdutor, pois

com o conjunto de seis transdutores é possível também determinar a direção de propagação e a polarização da onda gravitacional.

As principais partes que compõem o transdutor estão mais bem detalhadas logo abaixo.

2.4.1.2.1 - Cavidades de Microondas

O transdutor paramétrico, propriamente dito, será formado por uma cavidade de microondas com uma das suas paredes com possibilidade de se mover ressonantemente na mesma frequência mecânica da antena gravitacional, no caso esta parede é sua membrana ressonante. Esta cavidade deve ter modificada alguma de suas características elétricas, a capacitância, 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 naquela parede, que estará acoplada ressonantemente à antena esférica.

Foi escolhida uma cavidade de tal forma que, na ressonância, as configurações de campo na cavidade consistem, predominantemente, de um campo magnético ao redor do poste central e de um campo radial elétrico entre o final do poste e a tampa superior. Desta forma, o campo elétrico entre o poste e a membrana pode ser considerado praticamente constante, para uma determinada distância entre poste e membrana, e quando a distância relativa entre o poste e a membrana varia, a capacitância da cavidade também varia. A taxa de dependência da frequência com a variação da distância possui o seguinte valor: 85MHz/ μm .

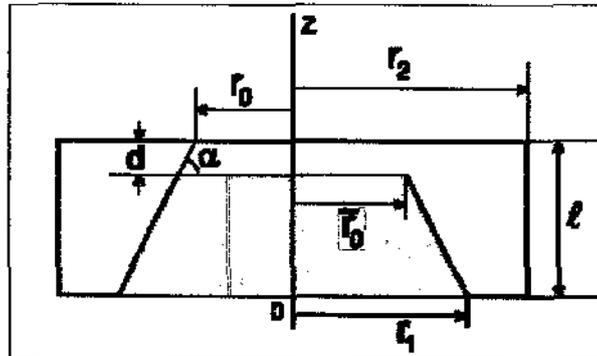


Fig. 6 - Formato da cavidade ressonante utilizada

Nesta cavidade existe um "gap" (espaçamento) entre a superfície superior do poste e a "tampa" da cavidade. Este pequeno gap é um fator importantíssimo na determinação da frequência de ressonância de um modo TM, pois este gap, funciona como um capacitor no final de uma linha de transmissão, e assim, podemos determinar a sua frequência de ressonância. A capacitância deste capacitor varia bastante de acordo com a variação do gap, e assim, podemos medir a deformação na tampa, de acordo com a variação na frequência de ressonância. Um ponto crítico do projeto será a fixação da membrana ressonante na cavidade, já que esta deverá estar a uma distância de 13µm do poste da cavidade.

A figura abaixo ajuda na visualização do problema:

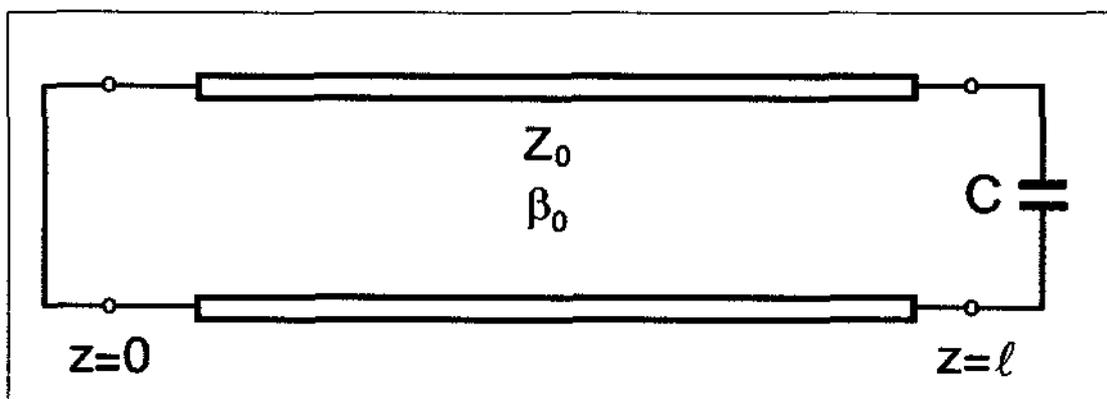


Fig. 7 - Modelo utilizado para se descobrir a frequência de ressonância

As dimensões da cavidade foram obtidas a partir do modelamento de um circuito LCR, de forma que somente os modos ressonantes TEM fossem permitidos. Para isto, dimensionou-se a profundidade da cavidade em $\lambda \ll \lambda_0/4$ (sendo λ a altura da cavidade e λ_0 o comprimento de onda correspondente à frequência do modo), fazendo com que os modos TE e TM fossem proibidos. O raio externo da cavidade foi definido de forma a ser menor do que $\lambda_0 / 3.41$.

O material escolhido para confeccionar a cavidade foi o nióbio, pois, para temperaturas inferiores a 9 K, o este material se torna supercondutor, havendo, com isto, uma diminuição das perdas em sua superfície (devido à diminuição da resistividade superficial), possibilitando, assim, a obtenção de altos Q elétricos. Além disso, as paredes da cavidade passarão por um processo de polimento químico para diminuir suas rugosidades.

O oscilador do projeto vai gerar um sinal com frequência de 10,21GHz. Uma dificuldade do projeto seria construir cavidades com este exato valor de frequência de ressonância. Para evitar este problema, junto ao oscilador será usado um sintetizador de frequências. Estes serão acoplados por um mixer, o sinal daí resultante passará por um filtro para que só a frequência de interesse alcance o transdutor.

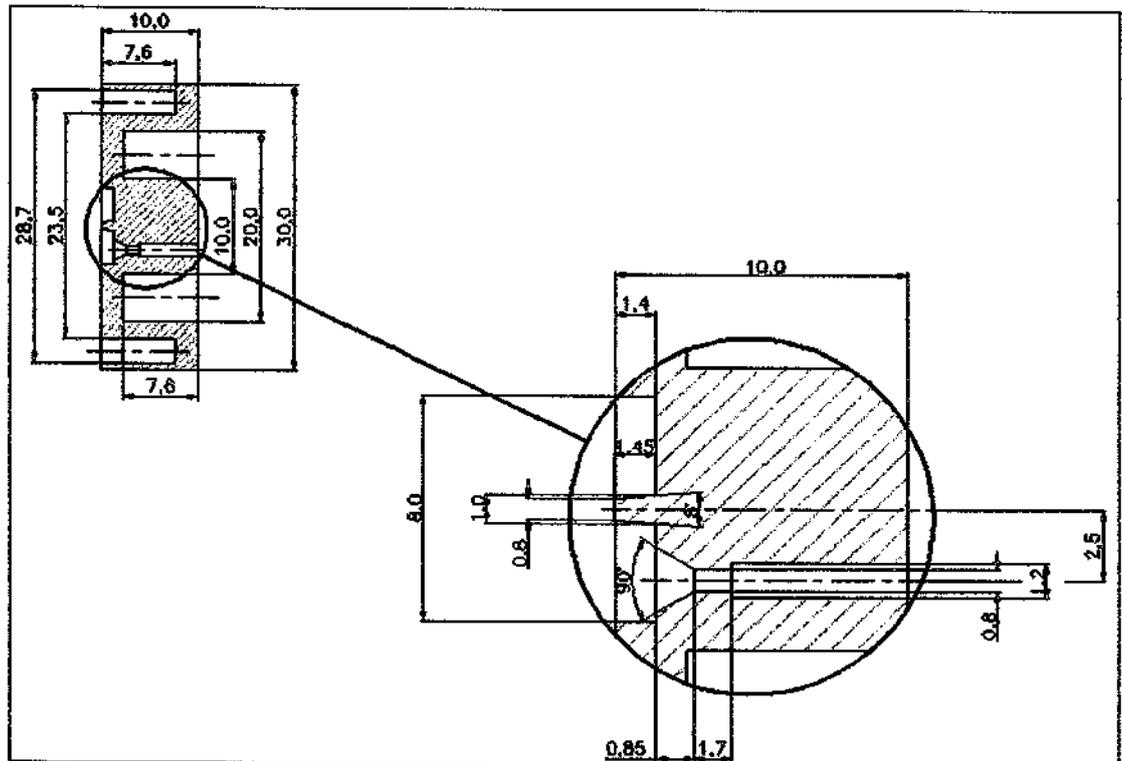


Fig. 8 - Desenho esquemático da cavidade reentrante.

2.4.1.2.2 – Amplificação e Transmissão dos Sinais Elétricos

O circuito de amplificação é imprescindível para o bom funcionamento do transdutor. Por isso, a fim de evitar que os amplificadores utilizados no projeto insiram ruído no sistema, serão utilizados amplificadores com baixa temperatura de ruído.

No entanto, um problema existente é que os amplificadores de baixo ruído na faixa de microondas saturam facilmente ou somente apresentam baixíssimos ruídos com potências muito baixas para o sinal de entrada. Desta forma, o sinal da bomba ou da portadora deve ser suprimido do sinal modulado antes deste ser amplificado.

O sinal injetado pela bomba alcançará o transdutor através de cabos coaxiais. Entretanto, estes cabos poderão introduzir algum ruído sísmico no detector, vindo a excitar a esfera ou o transdutor. A fim de evitar este problema, sobre os cabos coaxiais haverá um mecanismo de isolamento vibracional.

Já para a transmissão dos sinais elétricos da cavidade ressonante ao circuito de amplificação, será usado um par de antenas microstrip em cada transdutor; isto será importante, pois não haverá risco, desse modo, de ocasionar ruídos sísmicos sobre o transdutor.

CAPÍTULO 3 – RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 – Estudo Teórico

3.1.1- Q elétrico e acoplamento eletromecânico

O Q elétrico é um fator importante no estudo do projeto, pois este está diretamente relacionado ao acoplamento eletromecânico do transdutor pela seguinte fórmula:

$$\beta_o = \frac{16P_{inc}\beta_e}{\omega_o m \omega_n^2 (1+\beta_e)} \left(\frac{1}{1+4Q_e \omega_m / \omega_o^2} \right)^2 \left(\frac{Q_e df}{f_o dx} \right)^2 \quad (1)$$

Se não houvesse esta dependência com o acoplamento eletromecânico, o Q elétrico ideal seria aquele com o maior valor possível, pois assim, as perdas elétricas nas paredes da cavidade seriam minimizadas. Porém, da fórmula, percebe-se que o Q elétrico possui um valor ótimo e que foi calculado como aproximadamente 1,6M.

3.1.2 - Valor de tensão correspondente à onda gravitacional

Estimando que o detector receba 1000 grávitons e que o transdutor seja capaz de transformar a energia destes 1000 grávitons em uma energia equivalente a 1000 fótons, temos:

$$E = \frac{1}{2}(m\omega^2 \delta_x^2) \quad (2)$$

Onde E é a energia dos 1000 fótons, m a massa da membrana ressonante, ω a frequência mecânica do detector, δx é a vibração da membrana ressonante. Efetuando-se os cálculos, chega-se a δx aproximadamente igual a 10^{-15} m.

Vibração e voltagem se relacionam pela seguinte fórmula:

$$\delta_{x_{rms}} = \delta_{v_{rms}} \left(\frac{df}{dx} \frac{dV}{df}(f) \right)^{-1} \quad (3)$$

onde dv/df a taxa de conversão do mixer, df/dx a sensibilidade do transdutor.

Realizando as contas com os dados do detector Mario Schenberg e utilizando o Q elétrico máximo, a tensão na saída do transdutor será aproximadamente $3,8 \times 10^{-6}$ V.

3.2 – Medidas do Q elétrico

Para o estudo prático da cavidade ressonante, foi construída uma cavidade com dimensão dez vezes maior que a proposta para o transdutor. Por isso, a sua frequência de ressonância é dez vezes menor do que a frequência da cavidade projetada e também sua sensibilidade é cem vezes menores. Além disso, esta cavidade também não foi feita com o material que será utilizado no experimento, nióbio, e sim com alumínio.

O esquema da montagem feita para o teste da cavidade foi o seguinte:

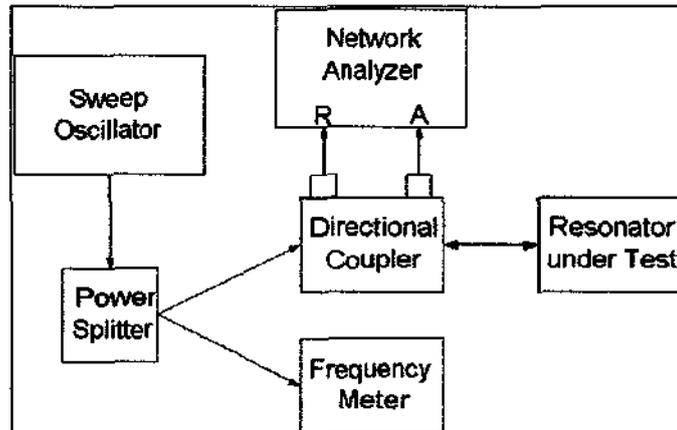


Fig.9 - Esquema da montagem para o teste da cavidade ressonante.

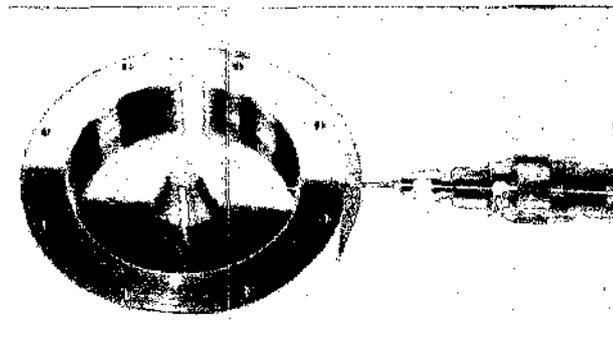


Fig. 10 -- Foto da montagem experimental

As medidas foram realizadas à temperatura ambiente e foram medidos vários Q elétricos variando a posição da sonda em relação à tampa da cavidade, ou seja, em função de seu acoplamento; tendo a tampa como referência. Para a sonda situada no limiar da tampa da cavidade seria possível estimar o valor do Q elétrico não-carregado, já que o acoplamento neste caso é aproximadamente zero.

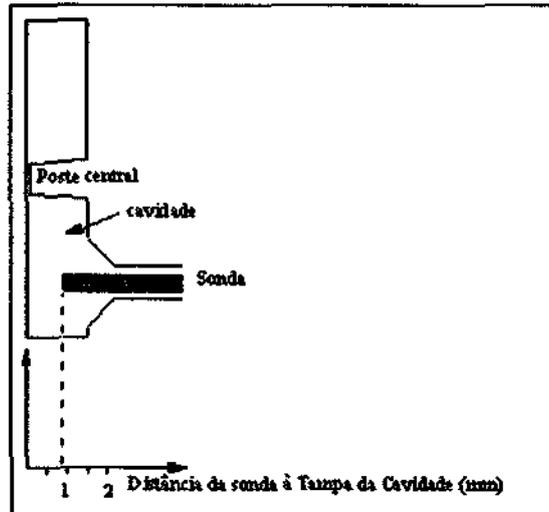


Fig. 11 – Disposição da sonda em função da distancia em relação à tampa

Durante a medida do Q elétrico, não foram pegos os pontos a -3dB do pico. Foi utilizada a fórmula a seguir onde Δ é a atenuação em relação ao pico, B é o patamar longe da ressonância e A a potência em dB no pico.

$$\Delta = 10 \log 2 + \left[A(\text{dB}) - 10 \log \left(10^{\frac{A(\text{dB})}{10}} + 10^{\frac{B(\text{dB})}{10}} \right) \right] \quad (4)$$

Os dados obtidos estão plotados nos gráficos abaixo.

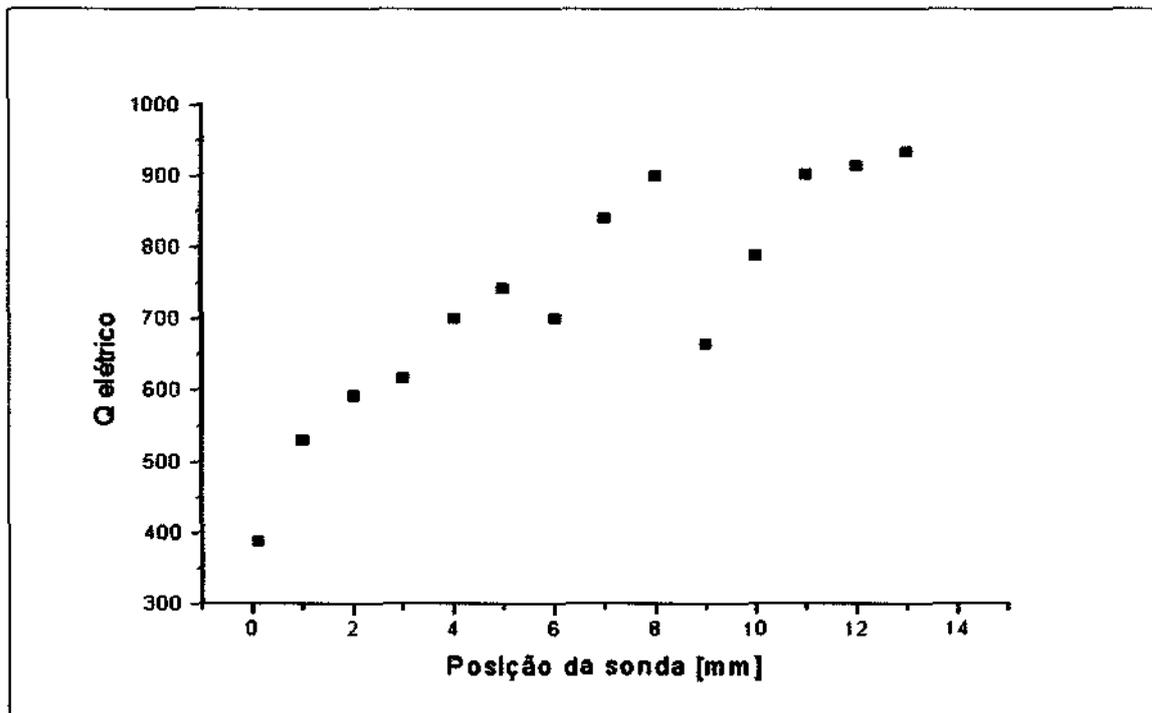


Fig.12 – Q elétrico em função da posição da sonda

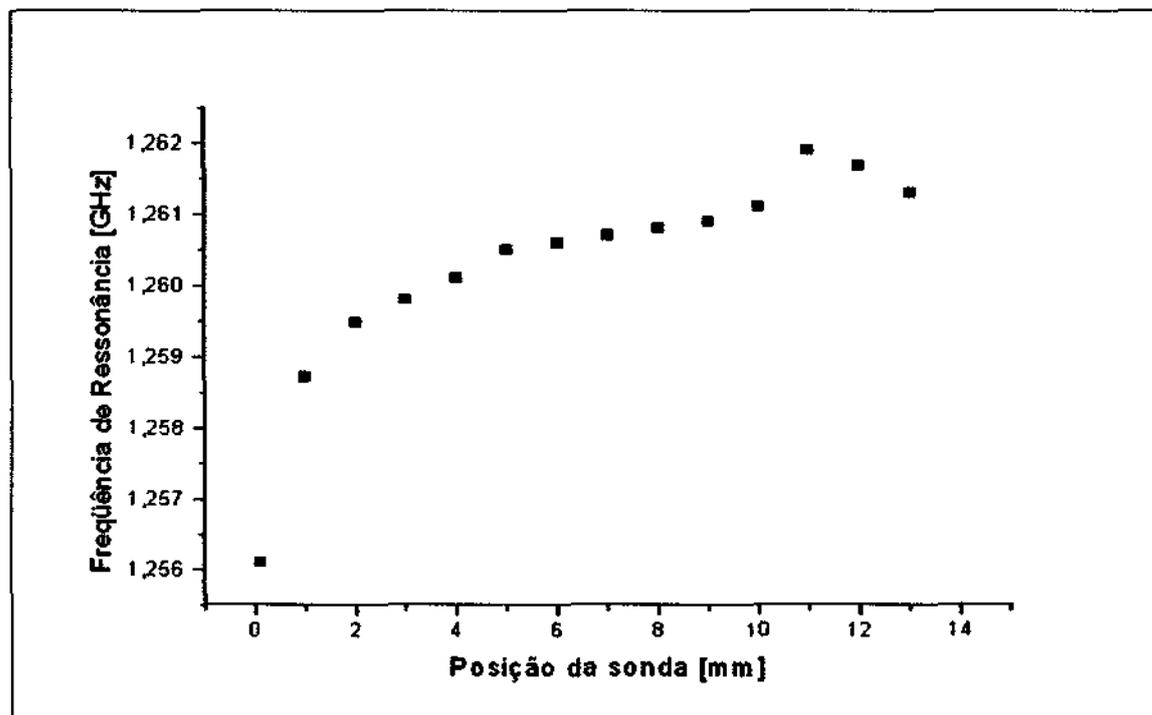


Fig.13 – Frequência de ressonância em função da posição da sonda

Constata-se que a sonda ao ser inserida na cavidade, devido às suas dimensões, acaba atuando como um novo poste, afetando conseqüentemente no seu acoplamento elétrico.

Interpretando os gráficos, percebe-se que a frequência tem um comportamento praticamente monotônico. O Q elétrico, porém, possui oscilações consideráveis, mas, na média, seu valor aumenta monotonicamente. Estas oscilações são devidas às incertezas durante a medida, já que os valores de A e B são bastante próximos. Da leitura dos gráficos, observa-se que o valor do Q não carregado é de aproximadamente 1000.

Capítulo 4 – Conclusões e Trabalhos Futuros

O trabalho obtido foi importante, pois algumas dúvidas experimentais sobre o Q elétrico da cavidade ressonante foram solucionadas. Porém, para o total desenvolvimento do projeto, ainda é necessária a realização das seguintes etapas:

- 1) Medidas do Q elétricos da cavidade projetada para o transdutor a temperaturas criogênicas.
- 2) Melhoria na técnica de medida do Q elétrico para evitar as grandes incertezas observadas durante as medições.
- 3) Simulação computacional da cavidade ressonante para determinação do Q elétrico teórico esperado.
- 4) Simulação computacional do conjunto cavidade ressonante e aparatos eletrônicos para recepção e transmissão dos sinais elétricos.

10 - Referências Bibliográficas

- [1] Ribeiro, K. L. – Estudo do Sistema de Transdução Paramétrica para Detectores de Ondas Gravitacionais - 2003
- [2] Linthorne, N. P. – A cryogenic resonant bar gravitational radiation antenna with a superconducting re-entrant cavity parametric transducer – 1991
- [3] Tobar, M. E. – Gravitational Wave Detection and Low Noise Sapphire Oscillators - 1993
- [4] Turner, P. J. – Operation of the Southern Hemisphere Resonant Bar Gravitational Radiation Detector – 1995