INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SÃO PAULO – IFSP

JOSÉ ALVES DE AMORIM

CONTROLE DO ESPAÇAMENTO NA CAVIDADE DE MICRO-ONDAS DO DETECTOR DE ONDAS GRAVITACIONAIS MARIO SCHENBERG

São Paulo
2013

JOSÉ ALVES DE AMORIM

CONTROLE DO ESPAÇAMENTO NA CAVIDADE DE MICRO-ONDAS DO DETECTOR DE ONDAS GRAVITACIONAIS MARIO SCHENBERG

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Automação e Controle de Processos.

Área de Concentração:
Controle e Automação

Orientador: Prof.º Dr. Carlos Frajuca

São Paulo
2013

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO
CAMPUS SÃO PAULO
DIRETORIA GERAL DO *CAMPUS* SÃO PAULO
Coordenadoria de Registros Escolares de Pós-Graduação

ATA DE EXAME DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Nome do Programa: **Mestrado Profissional em Automação e Controle de Processos**

Nome do(a) Aluno(a) : José Alves de Amorim

Nome do Orientador: Prof. Dr. Carlos Frajuca

Nome do Co-orientador:

Título do Trabalho: "Controle do Espaçamento na Cavidade de Microondas do Detector de Ondas Gravitacionais Mario Schenberg"

Abaixo o resultado de cada participante da Banca Examinadora

Nome completo dos Participantes Titulares da Banca	Sigla da Instituição	Aprovado / Não Aprovado
Prof. Dr. Carlos Frajuca – Orientador	IFSP – SPO	Aprovado
Prof. Dr. Fábio da Silva Bortoli	IFSP – SPO	Aprovado
Prof. Dr. Sérgio Turano	Unicsul	Aprovado
Nome completo dos Participantes Suplentes da Banca	**Sigla da Instituição**	**Aprovado / Não Aprovado**
Prof. Dr. Mauricio Bernardino Magro	Cufsa	—
Prof. Dr. Ricardo Pires	IFSP – SPO	—

Considerando-o: [X] APROVADO
[ ] NÃO APROVADO

Assinaturas

São Paulo, 09 de outubro de 2013

Presidente da Banca

Membro Interno

Membro Externo

Observações:
No título do trabalho onde se lê microondas leia-se micro-ondas.

*À minha querida esposa Daniela
que sempre está ao meu lado
demonstrando seu amor e
carinho e ao meu filho Bruno
que a cada sorriso me faz a
pessoa mais feliz do mundo.*

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida.

Aos meus pais Rosilda e José (in memoriam), responsáveis pelo que sou hoje, exemplos de honestidade e determinação qualidades fundamentais para que eu conseguisse alcançar mais este objetivo.

Ao professor Dr. Carlos Frajuca pela orientação, sempre paciente e disposto a ajudar mesmo nas situações mais simples.

Aos professores do Instituto Federal de São Paulo, que sempre mostraram que este caminho é difícil, porém possível, compartilhando o conhecimento, até mesmo fora da sala de aula.

À todos os professores que passaram pela minha vida acadêmica, pois cada um da sua maneira deu-me suporte para almejar este trabalho.

Aos meus colegas de mestrado que tornaram até as situações mais difíceis, como os sábados de estudo, em momentos descontraídos e de grande enriquecimento.

Ao Instituto Federal de Ciências, Educação e Tecnologia de São Paulo pelo uso de seus laboratórios e pela oportunidade de realizar este curso.

Aos colegas do laboratório de elétrica, em especial o Kauê, pelas dicas e por ser sempre prestativo.

Aos meus amigos de todos os momentos que sempre incentivaram e criticaram quando necessário.

“Não se deve ir atrás de objetivos fáceis. É preciso buscar o que se pode ser alcançado por meio dos maiores esforços.”

Albert Einstein

RESUMO

O detector de ondas gravitacionais brasileiro, Mario Schenberg, está localizado no Departamento de Física dos Materiais e Mecânica da Universidade de São Paulo (USP), sua massa (ou antena) esférica possui 1,15 toneladas e 65 cm de diâmetro e é constituída por uma liga de cobre-alumínio com 94% de cobre e 6% de alumínio. Ao ser idealizado e desenvolvido pelo grupo *Gráviton* o projeto previu que ele teria sensibilidade suficiente para captar sinais de amplitudes da ordem de 10^{-22} $Hz^{-1/2}$, na faixa de 3000-3400Hz. A fim de alcançar este objetivo o grupo estuda formas de minimizar os ruídos presentes no detector. A pesquisa descrita neste trabalho tem como finalidade atenuar o ruído vibracional existente nos transdutores acoplados ao detector, para tal, será empregada a associação em série de dois capacitores aos transdutores responsáveis por realizar a detecção das ondas gravitacionais. Um capacitor estará ligado a um sistema de molas para ajustar o tamanho do *gap* (distância entre o poste que carrega a cavidade reentrante de micro-ondas e a membrana que fecha esta cavidade) presente nos transdutores e o segundo será responsável pela comunicação do detector em funcionamento com o meio externo, sem contato mecânico, o sistema terá uma d.d.p. variável para que seja possível manter o *gap* constante, utilizando um sistema de controle, o qual também será desenvolvido, mesmo na situação em que o detector já esteja funcionando a vácuo e em temperaturas ultra criogênicas.

Palavras-chave: ondas gravitacionais, transdutores paramétricos, detectores de massa ressonante, detector Mario Schenberg.

ABSTRACT

The Brazilian gravitational wave detector, Mario Schenberg, is located in the Department of Physics of Materials and Mechanics of the University of São Paulo (USP), its mass (or antenna) has spherical 1.15 tons and 65 cm in diameter and consists of a copper-aluminum alloy containing 94% copper and 6% aluminum. To be designed and developed by the project group *Gráviton* predicted that he would have sufficient sensitivity to capture signals amplitudes of the order of 10^{-22} $Hz^{-1/2}$, in the range of 3000-3400Hz. To achieve this goal the group is studying ways to minimize the noise present in the detector. The research described in this paper aims to alleviate the noise existing in the vibrational transducers coupled to the detector to this end, will be used the association of two capacitors in series to the transducers responsible for performing the detection of gravitational waves. A capacitor is connected to a spring system to adjust the size of the *gap* (distance between the pole that carries microwave reentrant cavity and the membrane which closes the cavity) present in the transducer and the second will be responsible for communication with the detector operating in the external environment, without mechanical contact, the system will have a potential diference variable so that the *gap* can be maintained constant using a control system, which will also be developed even in a situation in which the switch is already operating at vacuum and ultra cryogenic temperatures.

Keywords: gravitational waves, parametric transducers, resonant mass detectors, detector Mario Schenberg.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

$R_{\mu\nu}$ - curvatura espaço-tempo (tensor de Ricci)

$g_{\mu\nu}$ - Tensor métrico espaço-tempo

R - Escalar de curvatura

Λ - Constante cosmológica

G - Constante gravitacional

c - Velocidade de propagação da luz no vácuo

$T_{\mu\nu}$ - Tensor energia-momento

F - Força exercida sobre um sistema

K - Constante elástica de uma mola

Δf - Largura de banda

f_c - Frequência característica de emissão da fonte

q - Número de ciclos coerentes apresentados pelo sinal

K_{eq} - Constante elástica equivalente de um sistema de molas

x - Tamanho de uma mola em repouso

d_1 - Distância entre as placas do capacitor 1

m - Massa da placa móvel do capacitor 1

g - Aceleração gravitacional

C - Capacitância elétrica em um capacitor de placas paralelas;

ε - Constante dielétrica do meio

A - Área de uma das placas do capacitor

d - Distância entre as placas de um capacitor

C_1 - Capacitância elétrica do capacitor 1

C_2 - Capacitância elétrica no capacitor 2

C_{eq} - Capacitância elétrica equivalente referente aos capacitores 1 e 2

E_e - Energia eletrostática

$\vec{E}$ - Campo elétrico na direção normal às placas de um capacitor

$\vec{D}$ - Deslocamento elétrico na direção normal às placas de um capacitor

e_e - Densidade de energia eletrostática

σ - Densidade superficial de cargas

Q - Carga elétrica armazenada em um capacitor

$\vec{F}_e$ - Força elétrica

$\left(\frac{\partial E_e}{\partial x}\right)_Q$ - Derivada parcial da energia elétrica na direção x, com carga elétrica constante

$\left(\frac{\partial E_e}{\partial y}\right)_Q$ - Derivada parcial da energia elétrica na direção y, com carga elétrica constante

$\left(\frac{\partial E_e}{\partial z}\right)_Q$ - Derivada parcial da energia elétrica na direção z, com carga elétrica constante

$\vec{F}_{elástica}$ - Força elástica

$\vec{P}$ - Força peso

d_1 - Distância entre as placas do capacitor 1

V - Tensão elétrica gerada pela fonte

Q_1 - Carga armazenada no capacitor 1

Q_2 - Carga armazenada no capacitor 2

V_1 - Tensão elétrica no capacitor 1

V_2 - Tensão elétrica no capacitor 2

s - Variável complexa

$R(s)$ - Sinal de entrada de um sistema de controle

$G_1(s)$ - Controlador de um sistema de controle

$D(s)$ - Distúrbio ou perturbação externa de um sistema de controle

$G_2(s)$ - Planta de um sistema de controle

$C(s)$ - Sinal de saída controlada de um sistema de controle

$H(s)$ - Sensor de um sistema de controle

a - Amplitude do sinal em forma degrau de um sistema de controle

$C_{1(a_r)}$ - Capacitância elétrica do ar na região que possui ar e mica como dielétricos em série do capacitor 1

C_{mica} - Capacitância elétrica da mica na região que possui ar e mica como dielétricos em série do capacitor 1

$C_{eq(mica-ar)}$ - Capacitância elétrica equivalente na região que possui ar e mica como dielétricos em série do capacitor 1

ε_{ar} - Constante dielétrica do ar atmosférico

ε_{mica} - Constante dielétrica da mica

$\varepsilon_{acrílico}$ - Constante dielétrica do acrílico;

A_1 - Área de uma das placas do capacitor 1

A_{mica} - Soma das áreas das placas de mica fixadas entre as placas e as molas do capacitor 1

h_{mica} - Espessura da placa de mica

C_2 - Capacitância elétrica no capacitor 2 de placas paralelas

A_2 - Área de cada placa do capacitor 2

$A_{acrílico}$ - Área do anel de acrílico posicionado entre as placas do capacitor 2

d_2 - Distância entre as placas do capacitor 2

L - é a deformação da mola na situação de tração

h - Distância entre a base fixa da mola e a placa fixa do capacitor 1

SUMÁRIO

Página

1 INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade o homem observa o espaço a fim de tentar descobrir o início do mundo que temos hoje e, além disso, procura saber qual a influência sofrida pela humanidade devido as interações dos astros.

O que é conhecido hoje na astronomia deve-se a cientistas como Cláudio Ptolomeu (sec. II d.C), Nicolau Copérnico (1473-1543), Galileu Galilei (1564-1642), Tycho Brahe (1546-1601), Johannes Kepler (1571-1630), Isaac Newton (1642-1727), entre outros não menos importantes. No entanto, Albert Einstein (1879-1955) em 1916 mudou a forma de “visualizar” o universo com a teoria da Relatividade Geral.

Desde então, procurou-se verificar os fenômenos físicos previstos na teoria de Einstein. Em relação à Relatividade Geral, quase todos os fenômenos previstos foram verificados e/ou provados empiricamente como, por exemplo, a curvatura da trajetória da luz ao passar por um corpo massivo que foi confirmada mediante a visualização de um eclipse solar em 1919 (VIDEIRA, 2005). Tem-se como exceção a detecção das Ondas Gravitacionais (OG).

A detecção de OG não é simples pois, ao contrário das ondas eletromagnéticas elas interagem pouco com a matéria e, além disso, a intensidade das OG é muito baixa.

Na busca pela detecção de ondas gravitacionais, países em todo o planeta estão realizando pesquisas na criação e desenvolvimento de detectores de ondas gravitacionais cada vez mais sensíveis, dentre os quais deve-se citar o Brasil, que possui o detector Mario Schenberg.

1.2 EQUAÇÕES DE CAMPO GRAVITACIONAL

No inicio do século XIX ocorreu a primeira publicação que sugeria a existência de radiação gravitacional.

Em 1916 Einstein publicou a Teoria da Relatividade Geral, teoria que descreve a métrica do campo gravitacional como sendo uma curvatura espaço-tempo, devido à presença de um corpo com massa.

A partir das equações de campo Einstein previu a existência das OG, como explicado por Costa (2005):

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda = 8\pi \frac{G}{c^4} T_{\mu\nu} \tag{1.1}$$

Onde:

$R_{\mu\nu}$ - representa a curvatura espaço-tempo (tensor de Ricci)

$g_{\mu\nu}$ - é o tensor métrico espaço-tempo

R - é o escalar de curvatura

Λ - constante cosmológica

G - constante gravitacional

c - velocidade de propagação da luz no vácuo

$T_{\mu\nu}$ - tensor energia-momento

A equação (1.1) pode ser escrita também em termos do tensor de Einstein $G_{\mu\nu}$, ficando assim definida:

$$G_{\mu\nu} = 8\pi \frac{G}{c^4} T_{\mu\nu} \Rightarrow T_{\mu\nu} = \frac{c^4}{8\pi G} G_{\mu\nu} \tag{1.2}$$

A força resultante em um sistema massa-mola pode ser aproximado à lei de Hooke através da equação 1.3:

$$F = -Kx \tag{1.3}$$

Onde:

F - representa a força exercida sobre o sistema

K - é constante elástica da mola

x - é o descolamento sofrido pelo corpo

Verifica-se grande semelhança entre as equações (1.2) e (1.3), onde o tensor energia-momento $T_{\mu\nu}$ esta para a força F, o tensor de Einstein $G_{\mu\nu}$ esta para o deslocamento x e $\frac{c^4}{8\pi G} = 4{,}8.10^{43}\, {m^3 kg}/{s^6}$ esta para a constante elástica K, o que sugere que a equação de campo de Einstein descreve um sistema vibracional. Além disso, o valor $4{,}8.10^{43}\, {m^3 kg}/{s^6}$ indica que o sistema é extremamente rígido, o que demonstra que a lei da gravitação de Newton é uma boa aproximação.

1.3 FONTES DE ONDAS GRAVITAVIONAIS

Ribeiro (2003) explica que segundo a Relatividade Geral, OG são perturbações na métrica espaço-tempo, fenômeno que causa deformação na mesma devido a energia fornecida. A partir da equação de campo é verificado que a luminosidade (potência total) de irradiação é proporcional ao termo $G/c^5 = 2{,}75x10^{-53}\, s/J$, segundo Furtado (2009), ou seja, a potência da OG é muito pequena. Desta forma, a expectativa é que sejam detectadas ondas gravitacionais provenientes de eventos que envolvam grande quantidade de energia, ou seja, provenientes de eventos astrofísicos.

De acordo com Andrade (2004) as OG geralmente são classificadas por critérios relacionados a comportamentos temporais ou de frequências de emissão.

Usando como referência o comportamento temporal de emissão temos a seguinte relação:

$$\Delta f = \frac{f_c}{q} \tag{1.4}$$

Onde:

Δf - é a largura de banda.

f_c - é a frequência característica de emissão da fonte.

q - é o número de ciclos coerentes apresentados pelo sinal.

Ainda usando como referência o comportamento temporal das OG, pode-se classificar as fontes astrofísicas como: impulsivas, periódicas e estocásticas (THORNE apud ANDRADE 2004 p.29).

1.3.1 Fontes Impulsivas

As fontes impulsivas emitem ondas que apresentam poucos ciclos coerentes q, ou seja, os sinais emitidos mantêm coerência durante um tempo correspondente a pequenos ciclos da onda. Consequentemente o valor da largura de banda Δf é grande.

São candidatos a fontes impulsivas as seguintes fontes: a coalescência de sistemas binários formados por estrelas compactas ou pequenos buracos negros em buracos negros de grande massa, colapso de estrela formando estrela de nêutron ou buraco negro (ANDRADE, 2004).

1.3.2 Fontes Periódicas

As fontes periódicas emitem ondas continuamente e mantêm a coerência por um tempo longo, ou seja, o valor de q é grande. Desta forma o valor de Δf é pequeno o que significa que estas ondas são emitidas em uma frequência característica.

Têm-se como exemplos de fontes periódicas estrelas de nêutron em rotação com alguma assimetria em sua superfície, estrelas pulsantes (anãs brancas ou estrelas de nêutron), rotação de sistemas binários e rotação de pulsares com assimetria (ANDRADE, 2004).

1.3.3 Fontes Estocásticas

As fontes estocásticas são caracterizadas pela emissão aleatória de OG, o que ocorre quando estas são emitidas por grande quantidade de fontes independentes e não correlacionadas que não podem ser resolvidas independentemente (PEREIRA, 2008). É evidente que este tipo de sinal é uma somatória de uma distribuição aleatória o que leva a conclusão de que q é um valor muito pequeno, tendendo a zero.

Segundo Andrade (2004) pode-se citar como exemplos de fontes estocásticas: sistemas binários na Via Láctea ou em galáxias próximas e ondas gravitacionais primordiais.

1.4 DETECÇÃO DE ONDAS GRAVITACIONAIS

Desde a publicação da Teoria da Relatividade Geral tenta-se verificar e/ou observar as previsões teóricas decorrentes da mesma. Até o momento a única previsão não observada são as OG. Em 1976, Hulse e Taylor foram os primeiros a identificar a existência das OG, de forma indireta, a partir da observação por mais de uma década do comportamento orbital do pulsar PSR 1913 + 16. A variação no seu período só pode ser explicada pela emissão das OG. Esta descoberta foi premiada com o Prêmio Nobel em 1993 (BORTOLI, 2011).

Há cerca de 50 anos iniciou-se os experimentos em busca da detecção de OG. Na década de 60 Joseph Weber começou a investigar a existência das OG. Ele desenvolveu o primeiro detector de OG utilizando massa ressonante e, além disso, foi um dos idealizadores dos detectores de OG utilizando interferômetros a laser (BLAIR, 2000).

Atualmente vários países do mundo possuem detectores de ondas gravitacionais, os quais utilizam uma das seguintes técnicas:

- Interferométricos: mede a distorção do espaço-tempo causada pela passagem da onda;
- Massa Ressonante: detecta a OG a partir da absorção da energia emitida por um corpo massivo com frequência de ressonância igual a da onda.

Grandes recursos tecnológicos e financeiros são empregados nestes detectores e, como consequência, vários segmentos da física e engenharia sofrem uma grande expansão como, por exemplo, o controle de sistemas criogênicos e os sistemas de isolamento vibracional. Estes esforços têm como objetivo desenvolver detectores cada vez mais sensíveis e precisos. A interação das OG com a matéria é muito baixa e sua amplitude é muito pequena, desta forma os detectores precisam ser extremamente sensíveis, por outro lado, esta baixa interação com a matéria permite a propagação da OG pelo espaço interestelar sem perda de energia ou de suas características principais. Ou seja, com a detecção das OG será possível analisar sistemas extremamente distantes da Terra, assim como informações de épocas remotas da formação do universo.

Desta forma, é evidente que há grande interesse na detecção de OG, motivado por importantes descobertas, tais como as enumeradas por Frajuca et al (2007):

- Testar teorias de gravitação, em especial a teoria da Relatividade Geral de Einstein;
- Investigar a astrofísica de corpos celestes, especialmente aqueles que não emitem radiação suficiente na banda eletromagnética.
- Verificar a existência de objetos astrofísicos previstos teoricamente;
- Desenvolver a astrofísica gravitacional.

1.4.1 Detectores Interferométricos

Este método de detecção foi estudado inicialmente na década de 1970. A configuração mais simples deste tipo de detector é a mesma apresentada pelo interferômetro de Michelson.

Interferômetro é um instrumento que utiliza a característica ondulatória da luz para gerar um padrão de interferência.

No interferômetro, um laser altamente potente e monocromático é enviado a um divisor de feixe, o qual direciona dois feixes que percorrem caminhos ópticos perpendiculares entre si. Ao final de cada caminho há um espelho preso a uma massa de teste. Ao ser refletido pelos espelhos os feixes voltam novamente para o divisor onde são recombinados e detectados pelo foto-sensor. O espelho é livre para movimentos horizontais como é mostrado na figura 1.1:

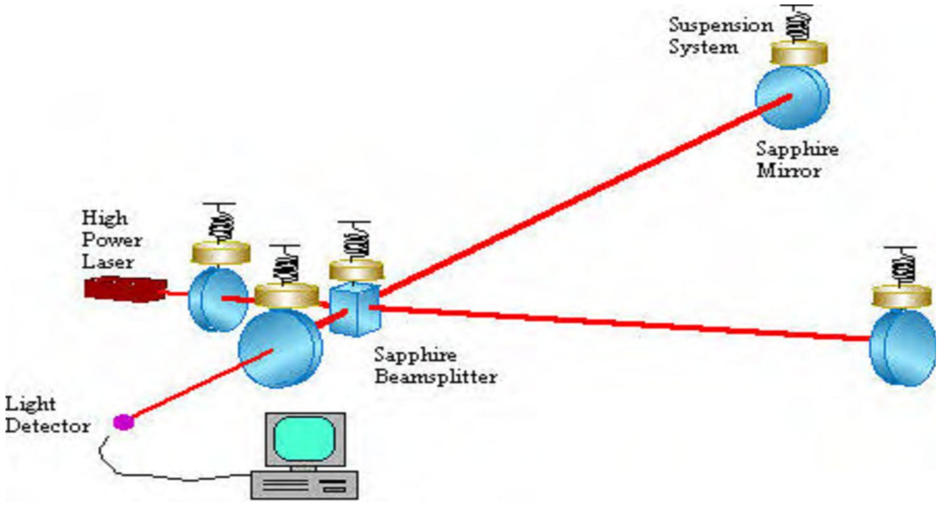

Figura 1.1 – Representação esquemática de um detector interferométrico.
Fonte: (RIBEIRO, 2003).

Inicialmente é produzida uma diferença de fase de 180^0 entre os dois feixes, sendo esta diferença de fase produzida através de ajustes no braço do interferômetro. Ao retornarem para o foto-sensor não é detectado sinal, neste cenário é dito que o interferômetro está ajustado em “franjas-negras”.

A interação de OG com as massas de teste situadas nos espelhos altera a posição relativa entre os espelhos, modificando o ângulo de fase entre os feixes de luz e, consequentemente, gerando sinal no foto-sensor (RIBEIRO, 2003).

Quando comparados com os detectores de massa ressonantes, os detectores interferométricos apresentam como grande vantagem o fato de apresentarem uma banda larga de detecção, ou seja, podem varrer uma grande faixa de frequências. No entanto, segundo Bortoli (2011), apresentam algumas desvantagens:

- São bem mais caros que os detectores de massa ressonante;
- Não podem responder sobre a quantização das ondas gravitacionais;
- São “cegos” para certas direções e polarizações das OG, quando comparados aos detectores ressonantes de massa esférica.

Atualmente detectores interferométricos com braços de comprimento na ordem de 10^3 m encontram-se em operação ou em fase de desenvolvimento, no entanto, dependendo da frequência da OG a ser detectada há a necessidade do detector interferométrico possuir braços ainda maiores. Este tipo de exigência não pode ser alcançada na Terra, devido a sua curvatura, inviabilizando o desenvolvimento do detector.

A tabela 1.1, relaciona os detectores de OG interferométricos com suas principais características:

Tabela 1.1 – Detectores de Ondas Gravitacionais Interferométricos.
Fonte: (BORTOLI, 2011).

Detector e Localização	**Tamanho dos braços (m)**	**Banda (Hz)**	**Status**	**h(Hz)$^{-1/2}$**
LIGO I => Advanced LIGO (Hanford, Washington, USA)	4000	40 - 6000	Em modernização	~ $6x10^{-22}$
LIGO II => Advanced LIGO (Hanford, Washington, USA)	2000	40 - 6000	Está sendo desmontado	---
LIGO III => Advanced LIGO (Livingston, Lousiania, USA)	4000	40 - 6000	Em modernização	~ $5x10^{-23}$
VIRGO => Advanced VIRGO (Piza, Itália)	3000	10^0 - 10^4	Em modernização até 2014	~ $6x10^{-23}$
TAMA (Mitaka, Tokyo, Japão)	300	10^1 - 10^4	Em modernização	~ $8x10^{-22}$
GEO 600 => GEO HF (Hannover, Alemanha)	600	10^0 - 10^4	Em modernização	~ $1x10^{-22}$
AIGO (Perth, Austrália)	80 a 4000	---	Em planejamento	---
INDICO (Índia)	---	---	Em estudo de possibilidade	---
LCGT (Japão)	---	---	Telescópio criogênico de grande escala	---
ET (Einstein Telescope) (European Commission, FP7)	---	< 10	2008 início Projeto 2017 início preparação do local	---

1.4.2 Detectores Massa Ressonante

Os detectores de massa ressonante são constituídos por um corpo metálico massivo (antena), cujos modos fundamentais de vibração são excitados na incidência de um pulso de OG com frequência característica próxima da frequência de oscilação da antena, ou seja, as posições relativas das partículas que constituem a massa ressonante sofrem alterações. Na Figura 1.2, há um exemplo de um anel de partículas sofrendo o efeito da passagem de uma OG, onde pode ser visto que há oscilação em duas direções: h_+ e h_x.

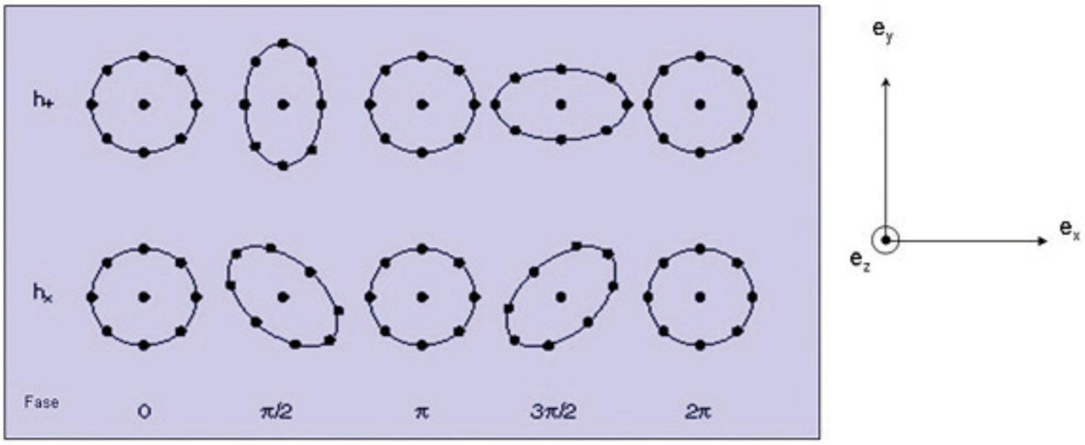

Figura 1.2 - Efeito da passagem de uma onda gravitacional, incidindo na direção z, sobre um anel de partículas.
Fonte: (FRAJUCA, C. et al, 2007).

Esta oscilação possui amplitude muito baixa, impossível de ser verificada sem a utilização de aparelhos específicos. Por isso, os detectores de massa ressonante possuem transdutores elétricos acoplados em sua superfície, de modo que essas oscilações mecânicas sejam convertidas em sinais elétricos, podendo ser ampliadas para serem analisadas (FRAJUCA, BORTOLI, MAGALHÃES, 2009).

Na década de 60 Joseph Weber construiu o primeiro detector de OG, utilizando como método de detecção uma massa ressonante (Figura 1.3). Ribeiro (2003) explica que este detector consistia de um cilindro metálico massivo mantido a temperatura ambiente e isolado vibracionalmente em uma câmara de vácuo, cuja frequência longitudinal de 1,6 Hz era monitorada por sensores piezo-elétricos.

Devido suas características este tipo de detector é classificado como de primeira geração.

Figura 1.3 - Joseph Weber e o Detector de Massa Ressonante de Primeira Geração.
Fonte: (WEBER 1960 apud FURTADO 2009 p.27)

Com o objetivo de aumentar a sensibilidade do detector foi idealizado um detector de massa ressonante criogênica. Este tipo de detector entrou em operação na década de 1980 e sua massa ressonante era resfriada a uma temperatura de cerca de 4K, utilizando hélio liquido. A utilização deste novo método deu origem aos detectores de segunda geração. A partir do procedimento de resfriamento e também, devido a melhorias no sistema vibracional, a transdutores mais sofisticados e de amplificadores de amplitude mecânica houve um aumento de sensibilidade dos detectores de segunda geração da ordem de dez mil vezes em relação aos de primeira geração (BORTOLI, 2011).

Em seguida foram criados os detectores de massa ressonante de terceira geração, eles diferem por serem resfriados a temperaturas ultra-criogênicas (próximas ao zero absoluto), através da utilização de refrigeradores por diluição. Esta nova tecnologia possibilita que alguns detectores de terceira geração atinjam a sensibilidade de $10^{-20} – 10^{-21}$ ($Hz^{-1/2}$).

Na década de 1990 iniciou-se a utilização de detectores de quarta geração, que possuem a mesma tecnologia dos de terceira geração só que utilizam massa ressonante esférica. Este é o tipo em que se enquadra o detector de OG Mario Schenberg, alvo deste trabalho. Segundo Melo (2002) a utilização de massa esférica tem as seguintes vantagens:

- Omnidirecionalidade: o esferóide, que apresenta 5 modos quadripolares fundamentais, é sensível a ondas oriundas de qualquer direção do espaço;
- Sensibilidade independente da polarização: o detector é sensível aos dois tipos de polarização previstos para as ondas;
- Possibilidade de determinação da direção de origem da onda, utilizando um único detector. Por meio da decomposição da onda nos cinco modos e da resolução do problema inverso, descobre-se a direção da origem. (MAGALHÃES et al. 1995 apud MELO 2002 p.43);
- Seção reta para absorver energia cerca de 70 vezes maior que uma barra na mesma frequência de detecção.

Desta forma podem-se classificar os detectores de massa ressonante segundo a Tabela 1.2:

Tabela 1.2 - Classificação dos detectores de massa ressonante, segundo suas características de operação.
Fonte: (BORTOLI, 2011).

Geração	**Massa Ressonante / Vácuo**	**Temperatura**
Primeira	Cilíndrica sob vácuo	Ambiente
Segunda	Cilíndrica sob vácuo	4 K
Terceira	Cilíndrica sob vácuo	Menor que 0,1 K
Quarta	Esférica sob vácuo	Menor que 0,1 K

A tabela 1.3 relaciona os detectores de massa ressonante existentes com suas características mais relevantes:

Tabela 1.3 – Características dos Detectores de OG de Massa Ressonante.
Fonte: Baseado em (BORTOLI, 2011).

Detector, Localização e Classificação (Geração)	Material	Massa (ton)	Comprimento ou Diâmetro (m)	Temperatura (K)	Temp. de Ruído (mK)	Transdutor	Frequência (Hz)	Situação Operacional	H ($10^{-20}Hz^{-1/2}$)
ALLEGRO (LSU, Baton Rouge, Louisiana, EUA) 2ª Ger.	Al 5056	2,30	3,0	4,2	6	Ressonante Indutivo	900	Inativo	1 - 0,1
EXPLORER (CERN, Genebra, Suiça) 2ª Ger.	Al 5056	2,30	3,0	2,0	6	Ressonante Capacitivo	900	Inativo	1 - 0,1
NIOBE (UWA, Perth, Austrália) 2ª Ger.	Nb	1,50	2,50	5,00	1	Ressonante Paramétrico Microonda	700	Inativo	50
NAUTILUS (INFN, Frascati, Itália) 3ª Ger.	Al 5056	2,50	3,00	0,90	4	Ressonante Capacitivo	900	Ativo	1 - 0,1
AURIGA (Legnaro, Itália) 3ª Ger.	Al 5056	2,50	3,00	0,90	1	Ressonante Capacitivo	900	Ativo	1 - 0,1
MARIO SCHENBERG (USP, São Paulo, Brasil) 4º Ger.	Cu(94%)-Al(6%)	1,15	0,65	4,20		Ressonante Microonda	3200	Teste de transdutores	---
MINI-GRAIL (Laiden, Holanda) 4ª Ger.	Cu(94%)-Al(6%)	1,15	0,68	0,05		Ressonante Capacitivo	2900	Teste	---

1.5 DETECTOR MARIO SCHENBERG

No Brasil, o grupo Gráviton, tendo como colaboradores as instituições USP, INPE, ITA, IFSP, UNICAMP, FAPESP, CAPES, CNPq, Leiden University, UWA entre outros, foi responsável pelo projeto e construção do primeiro detector de OG brasileiro, o detector Mario Schenberg. (AGUIAR, 2012). Seu nome foi dado em homenagem ao físico brasileiro Mario Schenberg (1914-1990), ex-professor do Instituto de Física da USP, um dos pioneiros da física teórica e da astrofísica moderna no Brasil.

O detector está localizado no departamento de Física dos Materiais e Mecânica da Universidade de São Paulo (USP). Na figura 1.4 há uma visão geral do detector.

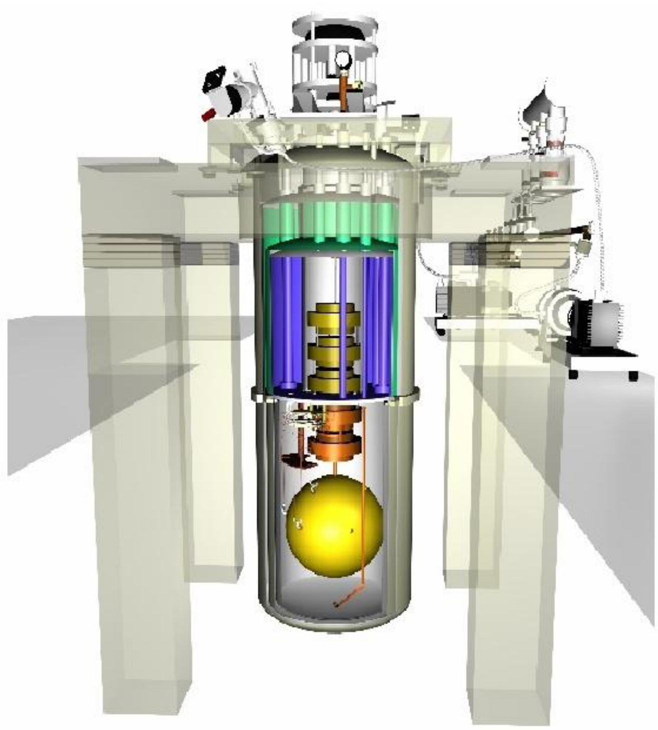

Figura 1.4 - Visão geral do detector de Ondas Gravitacionais Mario Schenberg com algumas de suas partes.
Fonte: (BORTOLI, 2011).

O detector Mario Schenberg é um detector de massa ressonante esférica de quarta geração, sua antena (massa esférica) possui 1,15 toneladas e 65 cm de diâmetro e é constituída por uma liga de cobre-alumínio com 94% de cobre e 6% de alumínio, as figuras 1.5 e 1.6 ilustram seus principais componentes. Para garantir um fator de qualidade mecânico alto (da ordem de 10^6 a 10^7) durante a sua confecção a liga de cobre-alumínio foi fundida e a seguir usinada na forma esférica.

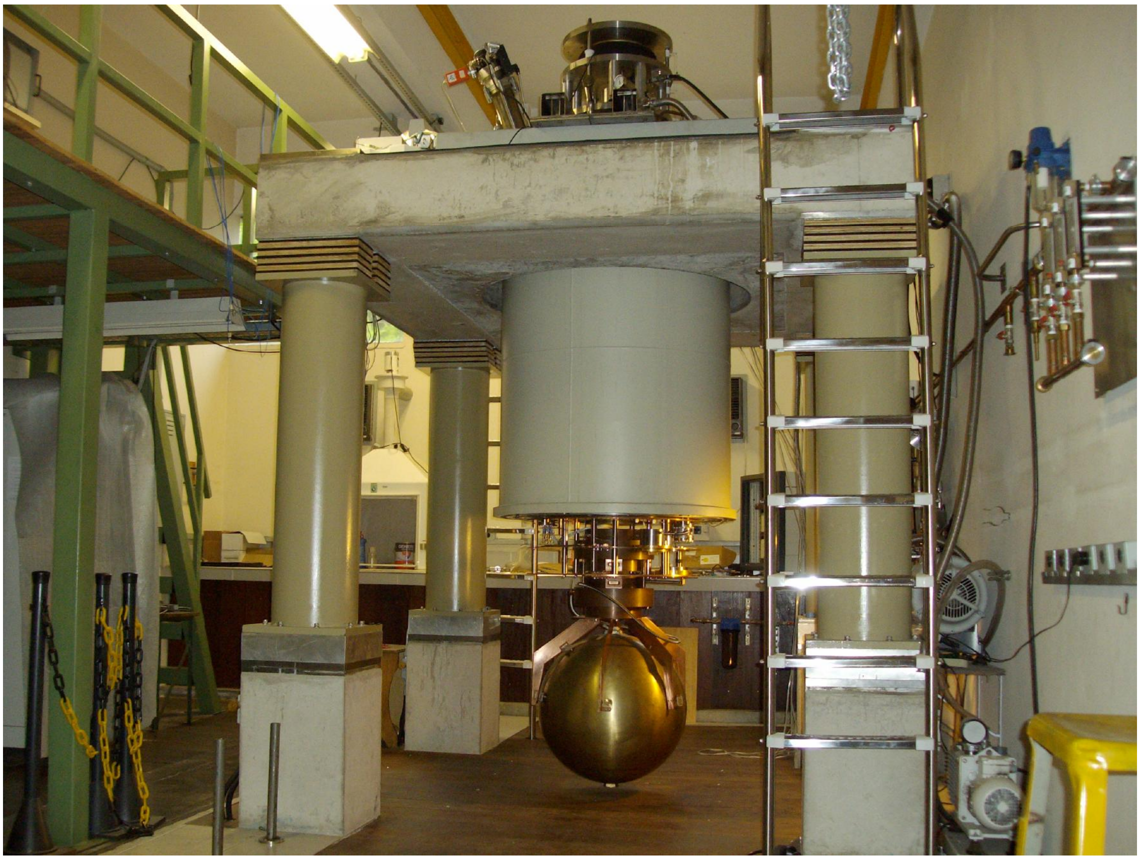

Figura 1.5 – Detector de Ondas Gravitacionais Mario Schenberg.
Fonte: (AGUIAR, 2012).

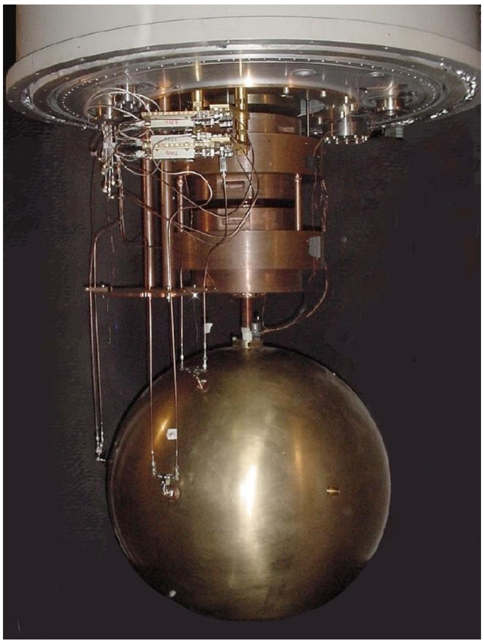

Figura 1.6 – Antena esférica do detector de Ondas Gravitacionais Mario Schenberg.
Fonte: (AGUIAR, 2012).

O detector entrou em operação em 8 de Setembro de 2006 e até 2008 foi testado com um sistema de apenas 3 transdutores acoplados à sua superfície (AGUIAR, 2012).

Há dois tipos principais de transdutores que podem ser utilizados neste tipo de detector de OG: os passivos e os paramétricos. Devido a problemas envolvendo os transdutores passivos como: perdas em corrente contínua nos circuitos supercondutores e desempenho dos amplificadores SQuID, no detector Mario Schenberg foi feita a opção de usar os detectores paramétricos.

Segundo Bortoli (2011) são utilizados seis transdutores paramétricos de micro-ondas, do tipo cavidade reentrante. Estes transdutores utilizam Casadores Mecânicos de Impedância (CMI) de dois modos, também chamados de ressonadores.

Os transdutores são responsáveis pelo monitoramento das oscilações mecânicas da antena, a fim de amplificá-las e convertê-las em sinal elétricos. A disposição destes transdutores na superfície da esfera é baseada no trabalho de Merkowitz e Johnson (MERKOWITZ, 1993; FRAJUCA, 2002 apud FRAJUCA; BORTOLI; MAGALHÃES, 2011 p.255) e foi confirmada por Magalhães e colaboradores (FRAJUCA, 2005; MAGALHAES, 1997 apud FRAJUCA; BORTOLI; MAGALHÃES, 2011 p.255), figura 1.7.

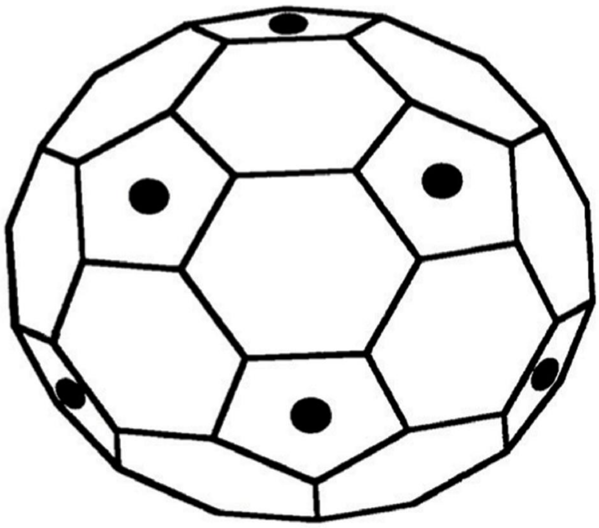

Figura 1.7 – Posição dos seis Casadores Mecânicos de Impedância utilizados sobre a antena no detector Mario Schenberg relativamente à superfície de um icosaedro truncado.
Fonte: (FRAJUCA; BORTOLI; MAGALHÃES, 2011).

O detector foi construído para operar em uma frequência central de cerca de 3200Hz, que é a frequência característica da massa ressonante. Ao incidir em um detector de massa ressonante, uma onda com frequência semelhante à frequência característica da massa produzirá uma excitação nos modos normais quadripolares de vibração e devido ao alto fator de qualidade mecânico a energia absorvida pela massa se dissipará lentamente e, apenas nos seus modos normais, produzindo, desta forma, amplitudes mensuráveis pelos transdutores acoplados à superfície da massa.

A fim de diminuir o ruído térmico a esfera é resfriada e mantida em uma região a vácuo. Para isso a esfera e os sistemas a ela unidos são acondicionados em uma garrafa térmica, denominada *dewar*. Também é necessária a utilização de sistemas mecânicos com finalidade de produzir isolamento vibracional adequado à antena para manter o ruído mecânico abaixo do ruído térmico. Estes sistemas minimizam os ruídos sísmicos ambientais e os não-sísmicos (BORTOLI, 2011).

O projeto prevê o resfriamento da esfera à temperatura em torno de 50 mK e operação a vácuo de $2x10^{-5}$ torr. Desta forma a esfera terá sensibilidade suficiente para captar sinais de amplitudes da ordem de 10^{-22} $Hz^{-1/2}$, na faixa de 3000-3400Hz, sendo competitivo com detectores interferométricos.

Dentro desta banda de freqüência Costa (2002) relaciona algumas fontes candidatas a serem observadas pelo detector Mario Schenberg:

- Colapsos nucleares em supernovas axi-assimétricas;
- Instabilidade em estrelas de nêutrons;
- Excitação dos primeiros modos quadrupolares de alguns buracos negros;
- Coalescência de objetos compactos, como estrelas de nêutrons e buracos negros;
- Rotação de estrelas bosônicas ou de matéria estranha em 1,6 kHz;
- Espiralação de mini-buracos negros em sistemas binários.

O grande desafio é desenvolver e aperfeiçoar técnicas a fim de aumentar a sensibilidade do detector para que as informações obtidas por ele sejam eficientes e confiáveis. Para isso é necessário eliminar ou minimizar seus ruídos, ou seja, os ruídos internos e ruídos externos.

Segundo Bortoli (2006) os ruídos internos são separados em:

- Ruídos térmicos:
  - Ruído térmico da suspensão: é produzido devido a ação de forças decorrente ao movimento Browniano que podem fazer oscilar as partes mecânicas da suspensão. Podem ser minimizados com o resfriamento a baixas temperaturas;
  - Ruído térmico da antena: é definido pela temperatura termodinâmica e pelo tempo de relaxação da massa ressonante. Podem ser minimizados com o resfriamento da antena a baixíssimas temperaturas e com a utilização de material de alto fator de qualidade mecânica Q.
- Ruídos da câmara de mistura (*Mixer Chamber*): é produzido durante o processo de resfriamento por diluição. Pode ser diminuido fazendo-se contato térmico entre o refrigerador e a antena através de um módulo antivibracional;
- Ruídos eletrônicos do transdutor: são provenientes do movimento dos sensores.

Tem-se também, os ruídos externos que podem interferir nos sinais obtidos pelo sensor, relacionados da seguinte forma por Bortoli (2006):

- Ruídos sísmicos e vibracionais: são provenientes de movimentos da crosta terrestres e construções civis, assim como tráfego de automóveis, trens, etc. Podem ser minimizados com o emprego de filtros mecânicos elaborados para atuarem com filtro passa baixa;
- Ruídos sonoros: são produzidos por qualquer tipo de poluição sonora. Pode ser minimizado com o isolamento vibracional, que inclui o alto vácuo ao redor da antena;

- Ruídos devido a ondas eletromagnéticas: são ruídos causados pela emissão de ondas eletromagnéticas de televisões, rádios, indução eletromagnética devido ao ato de ligar e desligar equipamentos do próprio laboratório, etc. Podem ser minimizados com o emprego de uma gaiola de Faraday ou isolando a antena com as camadas de metal com que são feitas as câmaras criogênicas;
- Ruídos devido à interferência de raios cósmicos: raios cósmicos são partículas de alta energia que entram frequentemente na atmosfera terrestre. Como é quase que impossível a sua blindagem, uma alternativa é circundar o detector de OG com detectores de raios cósmicos e utilizar um sistema de veto.

É evidente que o esforço do grupo Gráviton está voltado para o desenvolvimento de técnicas que diminuam os ruídos acima citados.

Tendo em vista este cenário, este trabalho tem como objetivo atenuar o ruído vibracional existente nos transdutores.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação esta escrita em seções, sendo estruturados em 8 capítulos, sendo destacados os seguintes pontos principais:

- **Capitulo 1 – Introdução**: Estão descritos alguns tópicos da Relatividade Geral dando ênfase às OG, assim como suas fontes. Exemplifica os tipos de detectores de OG focando no detector de OG Mario Schenberg explicando seus objetivos e as dificuldades encontradas, as quais serviram de motivação para realização deste trabalho;

- **Capitulo 2 – Proposta de transdutores do detector Mario Schenberg**: Entre os desafios a serem vencidos pelo grupo Gráviton, está a atenuação dos ruídos externos, já que estes diminuem a eficiência do detector de OG Mario Schenberg. Neste capítulo há a descrição deste problema;

- **Capitulo 3 – Relação de deslocamento versus voltagem**: Neste capítulo é descrita uma possível solução para atenuar o ruído existente no transdutor. Com esta finalidade é proposto um protótipo, além disso, são relacionados os cálculos matemáticos envolvidos, assim como as leis físicas envolvidas.

- **Capitulo 4 – Protótipo experimental**: Nesta seção são relatados o desenvolvimento e os materiais usados para a fabricação do protótipo, assim como as dificuldades obtidas na construção do mesmo.
- **Capítulo 5 Sistema de controle –** É feita a descrição de um modelo de sistema de controle em malha fechada que poderia ser utilizado para manter o sistema estável ou então quando necessário retomar a uma configuração pré definida;
- **Capítulo 6 – Resultados**: São apresentados os valores obtidos analiticamente. Foram incluídos gráficos para facilitar a visualização e interpretação;
- **Capítulo 7 – Análise e discussão dos resultados**: Nesta seção os valores são analisados e comparados com os valores analíticos. Também são discutidos os problemas encontrados durante o procedimento experimental, assim como suas possíveis soluções;
- **Capítulo 8: Conclusões**: São apresentadas as principais conclusões utilizando a análise dos dados obtidos durante a realização dos experimentos. Além disso, são sugeridos estudos e trabalhos futuros relacionados ao tema.

2 PROPOSTA DE TRANSDUTORES DO DETECTOR MARIO SCHENBERG

Como já citado nas seções anteriores, os transdutores são componentes fundamentais para detecções de OG no detector Mario Schenberg.

Para que o funcionamento do transdutor seja eficiente a cavidade deve permanecer sintonizada em frequência de ressonância, para isso é necessário poder ajustar o tamanho do *gap* (distância entre o poste que carrega a cavidade reentrante de micro-ondas e a membrana que fecha esta cavidade) na fase final da montagem e/ou após o fechamento do *dewar*, em tempo real.

Uma solução para ajustar o *gap* seria aplicar uma diferença de potencial (d.d.p.) em um capacitor posicionado junto ao transdutor aumentando ou diminuindo o gap, com o auxilio de um sistema de molas. O sistema proposto utilizará um segundo capacitor ligado eletricamente em série com o capacitor junto ao transdutor, para que desta forma não haja contato mecânico entre o transdutor e o suporte do detector fazendo o papel de uma antena. A figura 2.1 ilustra esta situação:

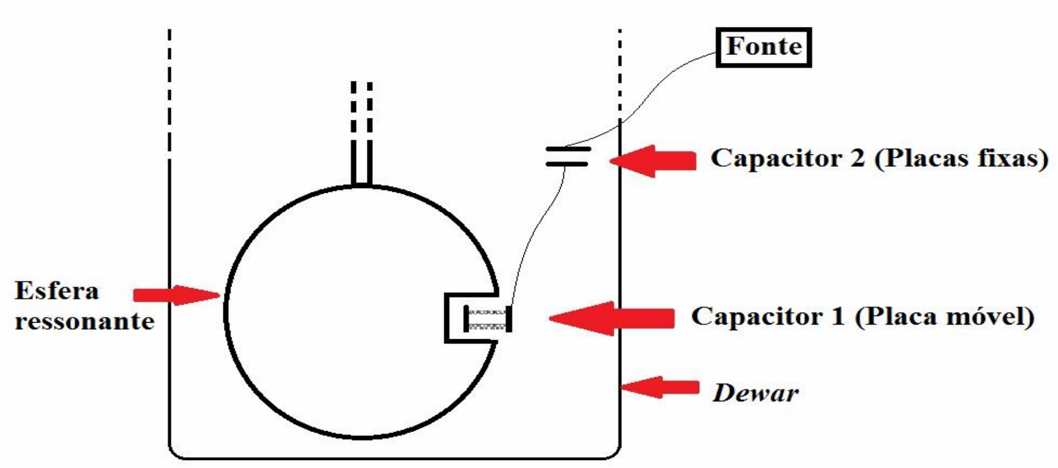

Figura 2.1 – Esboço fora de escala do sistema formado pelos capacitores e a fonte geradora de tensão, posicionado junto ao detector.

O modelo de transdutor considerado já foi configurado pelo grupo Gráviton, por isso a intervenção será feita de forma que este modelo não seja alterado, para isto, o capacitor que possui uma placa móvel será posicionado junto ao poste que carrega a cavidade reentrante, como pode ser visualizado na figura 2.2:

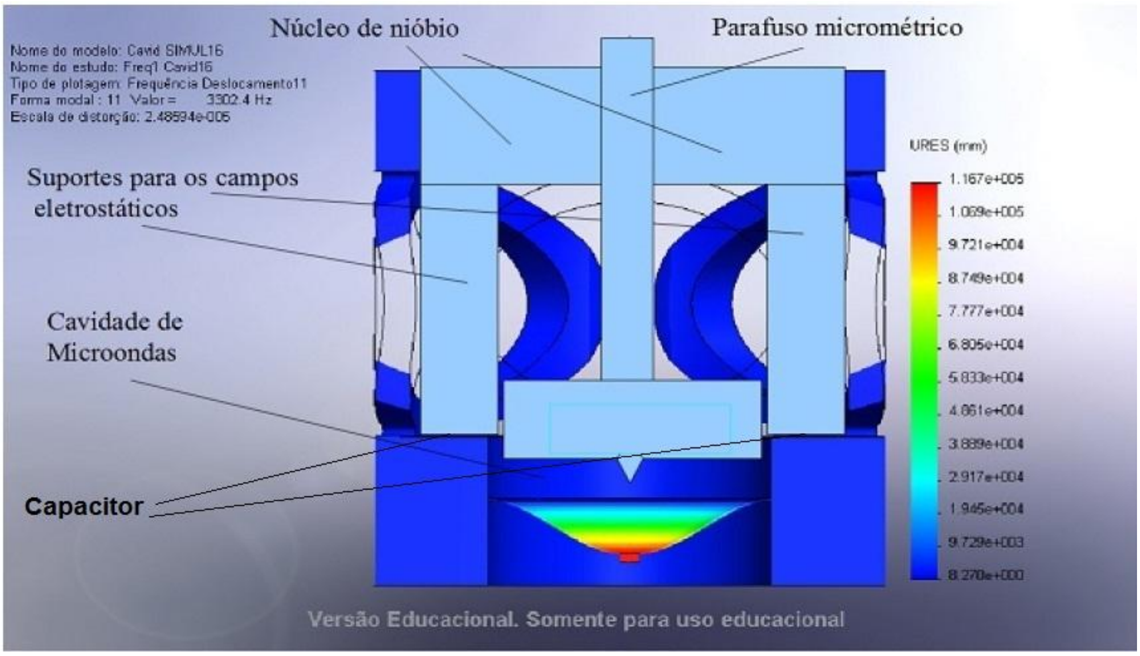

Figura 2.2 – Configuração do modelo do transdutor proposto por Bortoli (2011) para o detector de ondas gravitacionais Mario Schenberg, já com o emprego do capacitor.

Para verificar se esta solução é possível e viável, foi proposto um protótipo envolvendo dois capacitores de placas paralelas, sendo que um dos capacitores possui uma das placas unida a um sistema de molas, a fim de verificar a relação entre o deslocamento da placa devido à ação das molas e da diferença de potencial aplicada ao sistema.

Conhecido este comportamento é possível realizar um ajuste preciso e refinado mesmo com o detector em operação. No entanto, há necessidade de manutenção e regulagem constante devido a alterações no tamanho do gap referente aos ruídos que o transdutor esta exposto, desta forma é necessário um sistema de controle automatizado para certificar que a cavidade esteja sempre sintonizada em frequência de ressonância, com este intuito foi desenvolvido um sistema de controle teórico a fim de manter a cavidade ressonante, mesmo na ocorrência dos ruídos citados anteriormente.

3 RELAÇÕES DE DESLOCAMENTO VERSUS VOLTAGEM

Para entender o comportamento de deslocamento das placas do capacitor acoplado ao sistema de molas é necessário conhecer as leis físicas envolvidas no sistema. Nesta seção serão apresentadas estas leis, assim como, os cálculos necessários para estabelecer o comportamento do sistema.

Antes de analisar a parte elétrica do sistema, serão apresentados os cálculos referente a parte mecânica, ou seja, as propriedades das molas envolvidas.

Para obter informações sobre a constante elástica da mola é necessário analisar a situação do sistema de molas com o capacitor 1 em equilíbrio com o circuito aberto, ou seja, as forças envolvidas na placa móvel do capacitor 1 sendo apenas força elástica ($\vec{F}_{elástica}$) e força peso ($\vec{P}$) segundo as equações a seguir:

$$\vec{F}_{elástica} + \vec{P} = 0 \Rightarrow P - F_{elástica} = 0$$
$$K_{eq}.(x - d_1) = m.g \qquad (3.1)$$

Onde:

K_{eq} - Constante elástica equivalente das 4 molas;

x - Tamanho da mola em repouso;

d_1 - Distância entre as placas do capacitor 1 na situação de equilíbrio;

m - Massa da placa móvel do capacitor 1;

g - Aceleração gravitacional.

Sendo assim, pode-se expressar a constante elástica equivalente (K_{eq}) da mola com a expressão:

$$K_{eq} = \frac{m.g}{x - d_1} \qquad (3.2)$$

Conhecendo o valor da constante elástica é possível analisar a situação mais complexa, com o circuito fechado, que tem como consequência a análise da capacitância equivalente do sistema.

Lembrando que a capacitância de um capacitor constituído por placas paralelas e obtido através da relação 3.3:

$$C = \frac{\varepsilon . A}{d} \tag{3.3}$$

Onde:

C - Capacitância elétrica em um capacitor de placas paralelas;

ε - Constante dielétrica do meio;

A - Área de uma das placas do capacitor;

d - Distância entre as placas do capacitor.

Quando utilizados 2 capacitores de placas paralelas ligados eletricamente em série, como proposto, há necessidade de calcular a capacitância equivalente, que neste caso é dado pela equação 3.4:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \Rightarrow \frac{1}{C_{eq}} = \frac{C_2 + C_1}{C_1 . C_2}$$

$$C_{eq} = \frac{C_2 . C_1}{C_2 + C_1} \tag{3.4}$$

Onde:

C_1 - Capacitância elétrica do capacitor 1;

C_2 - Capacitância elétrica no capacitor 2;

C_{eq} - Capacitância elétrica equivalente referente aos capacitores 1 e 2.

Estando o sistema em equilíbrio, sendo submetido a uma d.d.p. V, pode-se analisar as forças envolvidas no capacitor 1, e desta forma, estabelecer as relações entre o sistema de molas e a d.d.p. do sistema.

Para isso é necessário obter a energia eletrostática armazenada em um capacitor formado por placas planas e paralelas:

$$E_e = \frac{1}{2}\int_V \vec{E}.\vec{D}.dv \tag{3.5}$$

Sendo que: $\vec{E} = \frac{\sigma}{\varepsilon}\widehat{n}$ e $\vec{D} = \varepsilon.\vec{E} = \sigma.\widehat{n}$

Onde:

E_e - Energia eletrostática;

$\vec{E}$ - Campo elétrico na direção normal às placas;

$\vec{D}$ - Deslocamento elétrico na direção normal às placas;

ε - Constante dielétrica do meio;

σ - Densidade superficial de cargas.

Desta forma, tem-se que a densidade de energia (e_e) é dada por:

$$e_e = \frac{1}{2}\vec{E}.\vec{D} = \frac{1}{2}.\frac{\sigma}{\varepsilon}\widehat{n}.\sigma.\widehat{n} = \frac{1}{2}.\frac{\sigma^2}{\varepsilon} \tag{3.6}$$

Sendo assim a energia é obtida fazendo a integral da densidade de energia em todo o volume:

$$E_e = \int_V e_e.dv = \int_V \frac{1}{2}.\frac{\sigma^2}{\varepsilon}.dv = \frac{1}{2}.\frac{\sigma^2}{\varepsilon}.A.d \tag{3.7}$$

Lembrando que a densidade superficial de cargas é dada pela carga (Q) por unidade de área (A):

$$\sigma = \frac{Q}{A} \tag{3.8}$$

Então, a equação 3.7 fica definida como:

$$E_e = \frac{1}{2}.\left(\frac{Q}{A}\right)^2 \frac{1}{\varepsilon}.A.d \Rightarrow E_e = \frac{1}{2}.\frac{Q^2.d}{\varepsilon.A} \quad (3.9)$$

Conhecendo o valor da energia elétrica é possível obter a força elétrica ($\vec{F}_e$) através do calculo do seu gradiente utilizando a seguinte equação:

$$\vec{F}_e = -\nabla E_e \quad (3.10)$$

Quando a equação 3.10 é utilizada em um sistema de coordenadas retangulares pode ser expressa da seguinte forma:

$$F_e = -\left[\left(\frac{\partial E_e}{\partial x}\right)_Q + \left(\frac{\partial E_e}{\partial y}\right)_Q + \left(\frac{\partial E_e}{\partial z}\right)_Q\right] \quad (3.11)$$

O índice Q exprime o fato de que as derivadas devem ser tomadas com carga fixa. No sistema de capacitores propostos é fácil verificar que há variação apenas em uma coordenada. Então, aplicando a equação 3.11 na equação 3.9 temos:

$$F_e = -\left[\left(\frac{\partial E_e}{\partial d}\right)_Q\right] = -\frac{\partial}{\partial d}\left[\frac{1}{2}.\frac{Q^2.d}{\varepsilon.A}\right]$$

$$F_e = -\frac{1}{2}.\frac{Q^2}{\varepsilon.A} \quad (3.12)$$

Mas a carga elétrica de um capacitor é definida em relação à diferença de potencial do mesmo segundo a relação $Q = CV$, então:

$$F_e = -\frac{1}{2}.\frac{(C.V)^2}{\varepsilon.A} \quad (3.13)$$

Sendo assim, a qualquer instante, o sistema sendo submetido a uma d.d.p e estando em equilíbrio, pode-se verificar as forças envolvidas:

$$\vec{F}_{elástica} + \vec{P} + \vec{F}_e = 0 \Rightarrow F_{elástica} - P - F_e = 0 \tag{3.14}$$

Com o auxilio das equações 3.1 e 3.13, tem-se a relação:

$$K_{eq}.(x - d_1) = m.g + \frac{1}{2}.\frac{(C.V)^2}{\varepsilon.A}$$

$$V^2 = \frac{2.\varepsilon.A}{C^2}.\left[K_{eq}.(x - d_1) - m.g\right]$$

$$V = \sqrt{\frac{2.\varepsilon.A}{C^2}.\left[K_{eq}.(x - d_1) - m.g\right]} \tag{3.15}$$

Onde:

C - Capacitância elétrica do capacitor 1, que possui uma das placas acoplada às molas;

x - Tamanho das molas em repouso;

d_1 - Distância entre as placas do capacitor 1, tendo como inicial o valor com a fonte geradora de tensão desligada;

K_{eq} - Constante elástica equivalente das molas;

m - Massa da placa móvel do capacitor 1;

g - Aceleração gravitacional;

V - d.d.p. entre as placas do capacitor 1.

Como a d.d.p (V) e a capacitância (C) da equação 3.15 refere-se apenas ao capacitor 1, é mais conveniente reescreve-la da seguinte forma:

$$V_1 = \sqrt{\frac{2.\varepsilon.A}{{C_1}^2}.\left[K_{eq}.(x - d_1) - m.g\right]} \tag{3.16}$$

A d.d.p. obtida usando a equação 3.16 é entre as placas do capacitor 1, quando os 2 capacitores forem usados no mesmo circuito, ligados em série este valor será diferente do valor gerado pela fonte.

Por conservação de cargas, sabe-se que o valor das cargas em cada uma das 4 placas do sistema é o mesmo em módulo.

Então pode-se relacionar a tensão elétrica em cada um dos capacitores da seguinte forma:

$$Q_1 = Q_2 \Rightarrow C_1.V_1 = C_2 V_2 \tag{3.17}$$

Onde:

Q_1 - Carga armazenada no capacitor 1;

Q_2 - Carga armazenada no capacitor 2;

C_1 - Capacitância elétrica do capacitor 1;

V_1 - Tensão elétrica no capacitor 1;

C_2 - Capacitância elétrica do capacitor 2;

V_2 - Tensão elétrica no capacitor 2.

Outra informação conhecida é que a tensão elétrica gerada tem que ser a mesma dissipada nos 2 capacitores:

$$V = V_1 + V_2 \tag{3.18}$$

Onde:

V - Tensão elétrica gerada pela fonte;

V_1 - Tensão elétrica no capacitor 1;

V_2 - Tensão elétrica no capacitor 2.

Manipulando as equações 3.17 e 3.18, chega-se na seguinte relação:

$$C_1.V_1 = C_2.(V - V_1) \Rightarrow \frac{C_1.V_1}{C_2} = V - V_1 \Rightarrow V_1 + \frac{C_1.V_1}{C_2} = V$$

$$V_1.\left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right) = V \Rightarrow V_1 = V.\left(\frac{C_2}{C_2 + C_1}\right) \tag{3.19}$$

Substituindo a equação 3.19 na 3.16 é obtida uma equação que relaciona a tensão elétrica gerada com a variação de distância das placas do capacitor 1:

$$V.\left(\frac{C_2}{C_2 + C_1}\right) = \sqrt{\frac{2.\varepsilon.A}{C_1^{\,2}}.\left[K_{eq}.(x - d_1) - m.g\right]}$$

$$V = \sqrt{\left(\frac{C_2 + C_1}{C_2}\right)^2.\frac{2.\varepsilon.A}{C_1^{\,2}}.\left[K_{eq}.(x - d_1) - m.g\right]}$$

$$V = \sqrt{\frac{2.\varepsilon.A}{C_{eq}^{\,2}}.\left[K_{eq}.(x - d_1) - m.g\right]} \tag{3.20}$$

Na próxima seção as equações aqui relacionadas serão aplicadas ao protótipo experimental.

4 PROTÓTIPO EXPERIMENTAL

Os protótipos desenvolvidos neste trabalho tiveram como objetivo verificar a viabilidade e a eficiência da implementação de um sistema de calibração dos transdutores utilizados no detector Mario Schenberg. Esta calibração modificaria a rigidez da mola destes transdutores e poderia ser feita até mesmo com o detector em operação. Os capacitores montados nestes protótipos foram confeccionados com dimensões bem maiores do que as que se deseja utilizar nos transdutores do detector.

4.1 CONFIGURAÇÕES INICIAIS DO PROTÓTIPO

Para simular o comportamento do projeto proposto na seção anterior, foi desenvolvido e construído um protótipo constituído por dois capacitores planos de placas paralelas.

O capacitor, que será identificado como capacitor 1, é confeccionado com 2 placas planas paralelas separadas por molas que serão submetidas a uma diferença de potencial (d.d.p.) variável, com o objetivo de verificar a possibilidade de se ajustar a constante elástica destas molas através da variação da d.d.p. aplicada entre as suas placas.

O capacitor, que será identificado como capacitor 2, também confeccionado com 2 placas planas paralelas, servirá para prover o potencial elétrico que alimentará o capacitor 1, isto sem o contato mecânico. No detector Mario Schenberg isto garantiria a não introdução de ruído externo na antena através do sistema de calibração que esta sendo proposto aqui.

Para montar os capacitores em questão foram utilizadas 4 placas quadradas de latão, sendo cada par aplicado a um capacitor.

O capacitor 1 possui uma de suas placas com posição variável de acordo com a d.d.p. aplicada ao sistema. A outra placa permanece fixa. Entre as duas placas foram posicionadas 4 molas de metal, que tem como objetivo garantir a aproximação gradual das placas. Desta forma, é possível verificar o comportamento destas molas sujeitas à compressão, por meio do deslocamento destas placas.

As figuras 4.1 e 4.2 mostram as molas com suas respectivas posições em relação às placas de metal do capacitor 1.

Figura 4.1 – Estrutura das molas utilizadas.

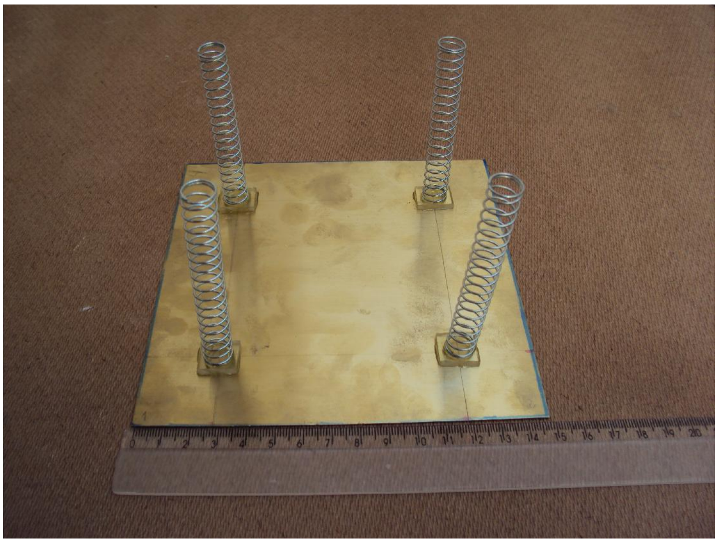

Figura 4.2 – Disposição das molas em relação à placa.

Para que duas placas de metal exerçam o papel de um capacitor é necessário que entre elas haja um dielétrico, para o propósito do projeto o ar atmosférico é o mais apropriado.

Pela construção do protótipo, as molas estariam em contato mecânico com as duas placas e desta forma não haveria d.d.p. entre as placas. Para solucionar este problema foram usados em cada uma das extremidades das molas pedaços de acrílico colados com cola epóxi *Araldite* isolando eletricamente as placas como pode ser visualizado na figura 4.3:

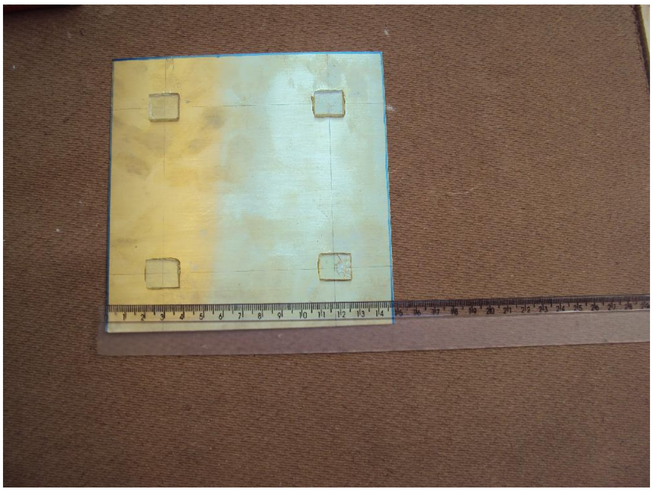

Figura 4.3 – Disposição dos pedaços de acrílico usados como isolante elétrico entre molas e placas.

O capacitor 2 possui a mesma geometria do capacitor 1, com a diferença que neste capacitor a distância entre as suas placas deve permanecer constante. Para que isto fosse possível foi inserido entre as duas placas um anel de acrílico, como pode ser visto na figura 4.4.

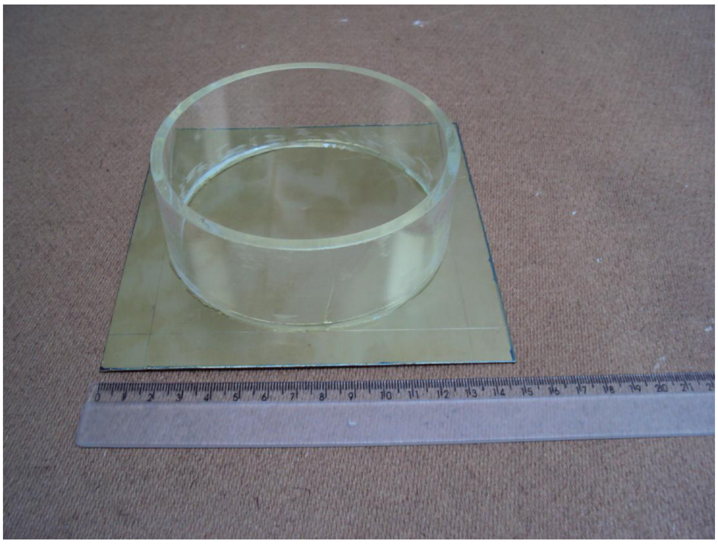

Figura 4.4 – Anel de acrílico usado para manter a distância das placas do capacitor 2 constante.

O ambiente em que os capacitores estavam inseridos possibilitou a utilização do ar atmosférico como dielétrico no capacitor 1. No capacitor 2 havia um dielétrico misto, formado pelo ar atmosférico e o anel de acrílico nele inserido, ou seja, o capacitor 2 tem capacitância equivalente referente aos dois dielétricos em paralelo.

4.2 CIRCUITOS ELÉTRICOS

Para realizar a coleta de dados foram propostos 2 modelos de circuitos elétricos:

- um sistema mais simples contendo apenas o capacitor 1, constituído pelas placas paralelas e molas acopladas entre elas e com d.d.p. variável, a fim de verificar o comportamento da força elétrica gerada pelo campo elétrico entre as placas e a força potencial gravitacional elástica armazenada nas molas. Este sistema foi denominado de **circuito elétrico 1**, como pode ser visto na figura 4.5.

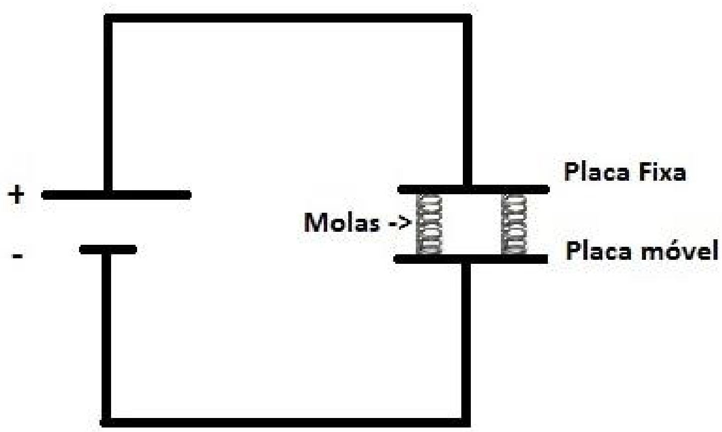

Figura 4.5 – Circuito elétrico constituído pelo gerador de tensão, capacitor 1 e molas.

- um sistema mais próximo do que seria usado no detector de OG Mario Schenberg, com o emprego do capacitor 2 ligado em série com o capacitor 1. Este sistema foi denominado **circuito elétrico 2**. A figura 4.6 ilustra esta situação.

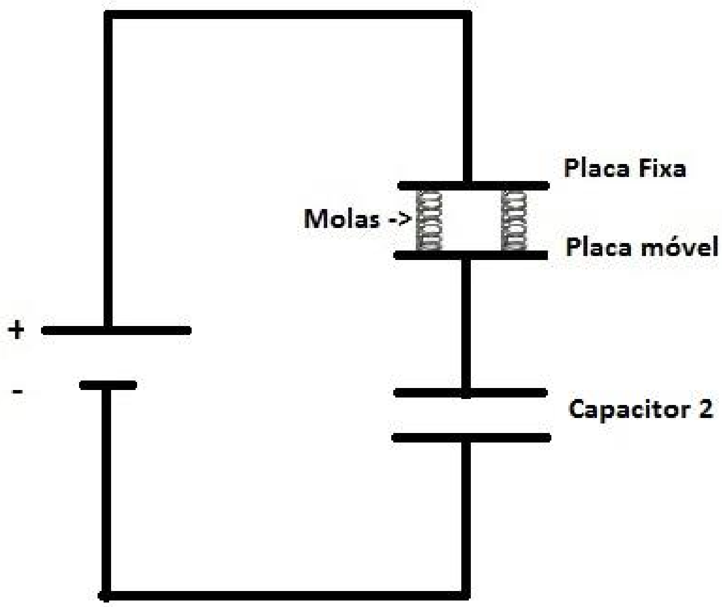

Figura 4.6 – Circuito elétrico constituído pelo gerador de tensão, capacitor 1, molas e capacitor 2.

4.3 DIMENSÕES DO PROTÓTIPO

Em um primeiro momento foi estudada a possibilidade de utilizar placas quadradas de latão com aproximadamente 30 cm (de comprimento) de cada lado e com espessura de 0,85 mm. Com estas dimensões a massa de cada placa medida foi da ordem de 0,5 kg. Utilizando placas estas dimensões, as molas não estavam estabilizando devido ao peso da placa quando apoiada sobre elas, e como consequência as molas estavam entortando. Além disso, foi possível verificar que devido ao peso a placa de latão estava apresentando deformação na região onde não possuía apoio de mola e desta forma, a região central das placas apresentavam distância entre si menor que na região das bordas. Tendo em vista estas adversidades o modelo que utilizava essas dimensões não foi usado.

Uma estratégia usada para solucionar estes problemas foi diminuir o comprimento das placas para aproximadamente 15 cm de cada lado, ou seja, a massa de cada placa passou a ser 0,125 Kg. A leitura desta medida pode ser visualizada na figura 4.7.

Figura 4.7 – Placa de latão sendo pesada.

Usando estas dimensões verificou-se que os problemas apresentados anteriormente foram solucionados.

Com o objetivo de realizar medidas mais precisas utilizou-se um paquímetro de precisão 0,05 mm, e com isso verificou-se que as dimensões das placas apresentavam pequenas variações de comprimento, assim como, o comprimento das 4 molas utilizadas.

Para obter um valor único da área de cada placa mediu-se o comprimento de um lado e do lado oposto a este, e em seguida foi calculada a média aritmética destes dois valores, fazendo o mesmo processo com os lados restantes e por final calculando a área das duas médias obtidas. Este procedimento foi aplicado nas quatro placas de latão envolvidas no protótipo.

Entre as placas de latão do capacitor 1 foram inseridas 4 molas de metal, sendo que cada uma possuía um apoio de acrílico em cada uma das extremidades, a fim de isolar eletricamente as placas. O comprimento das molas também apresentou pequenas variações quando comparadas.

A figura 4.8 ilustra o capacitor 1 confeccionado.

Figura 4.8 – Capacitor 1 montado.

Os valores medidos do capacitor 1 podem ser melhor observados na tabela 4.1 a seguir:

Tabela 4.1 – Valores medidos no capacitor 1.

Capacitor 1				
Placa Fixa				
Massa (Kg)	0,125(5)			
Espessura (mm)	0,85(5)			
Comprimento dos lados (mm)	150,50(5)	150,80(5)	152,85(5)	151,20(5)
Placa Móvel				
Massa (Kg)	0,125(5)			
Espessura (mm)	0,85(5)			
Comprimento dos lados (mm)	151,10(5)	151,00(5)	150,95(5)	150,90(5)
Apoio de Acrílico (8 unidades)				
Espessura (mm)	3,10(5)			
Comprimento dos lados (mm)	15,00(5)		15,00(5)	
Molas (4 unidades)				
Comprimento em repouso (mm)	79,45(5)	80,45(5)	79,15(5)	79,20(5)
Comprimento comprimida (mm)	52,10(5)	53,05(5)	52,85(5)	52,80(5)

A metodologia para construção do capacitor 2 foi a mesma do capacitor 1, assim como, para calcular a área das placas de latão. Para que a distância entre as placas de latão permanecesse a mesma em todo o procedimento experimental foi inserido um anel de acrílico entre elas, como pode ser visualizado na figura 4.9:

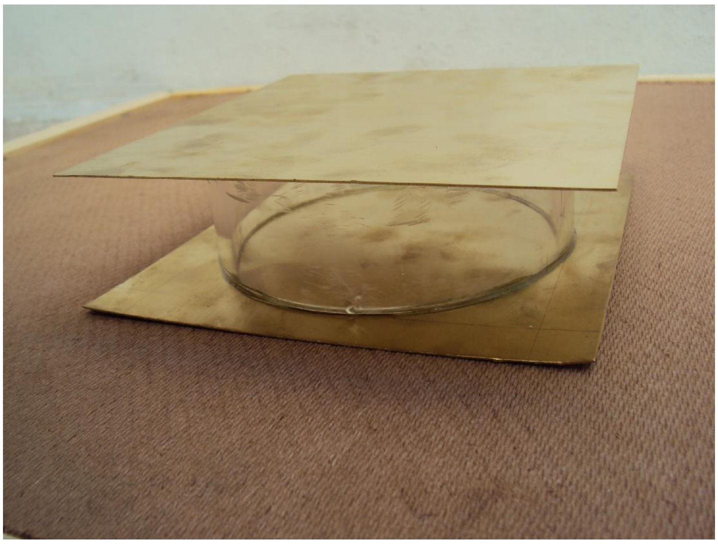

Figura 4.9 – Capacitor 2 montado.

Os valores das dimensões dos componentes do capacitor 2 podem ser visualizados na tabela 4.2:

Tabela 4.2 – Valores medidos no capacitor 2.

Capacitor 2				
Placa 1				
Massa (Kg)	0,125(5)			
Espessura (mm)	0,85(5)			
Comprimento dos lados (mm)	149,85(5)	150,15(5)	150,25(5)	150,00(5)
Placa 2				
Massa (Kg)	0,125(5)			
Espessura (mm)	0,85(5)			
Comprimento dos lados (mm)	150,05(5)	150,35(5)	149,95(5)	149,90(5)
Anel de Acrílico				
Altura (mm)	40,15(5)			
Espessura (mm)	5,65(5)			
Diâmetro externo (mm)	120,05(5)			

4.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Com os dois capacitores construídos foi possível realizar a primeira tomada de dados. Inicialmente usamos apenas o capacitor 1 no arranjo experimental. Para isto uma de suas placas foi ligada eletricamente ao pólo positivo de uma fonte de tensão constante da marca *Instrutherm* enquanto a outra placa foi ligada da mesma forma ao pólo negativo da mesma fonte. Neste aparelho o valor da d.d.p. poderia sofrer variações gradativas de 0 a 60 volts. A figura 4.10 mostra a fonte em funcionamento.

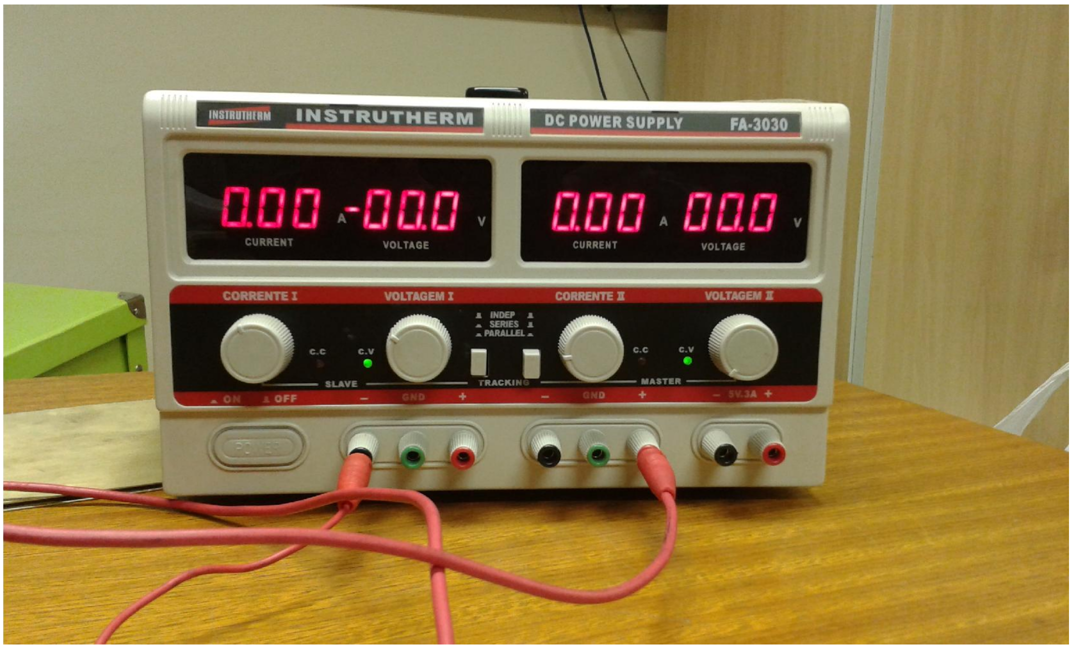

Figura 4.10 – Fonte de tensão usada no procedimento experimental.

Para medir as variações de distância entre as placas do capacitor 1 devido a força elétrica gerada pelo campo elétrico entre elas, com o gerador ligado, foi usado um relógio comparador, figura 4.11. Ele foi colocado em cima de uma mesa de madeira, para que não interferisse no campo elétrico das placas, sua ponta de metal, a qual serve para fazer a leitura da variação de distância, foi colocada em contato mecânico com a placa móvel, de tal forma que uma variação sensível de distância seria registrada pelo relógio comparador.

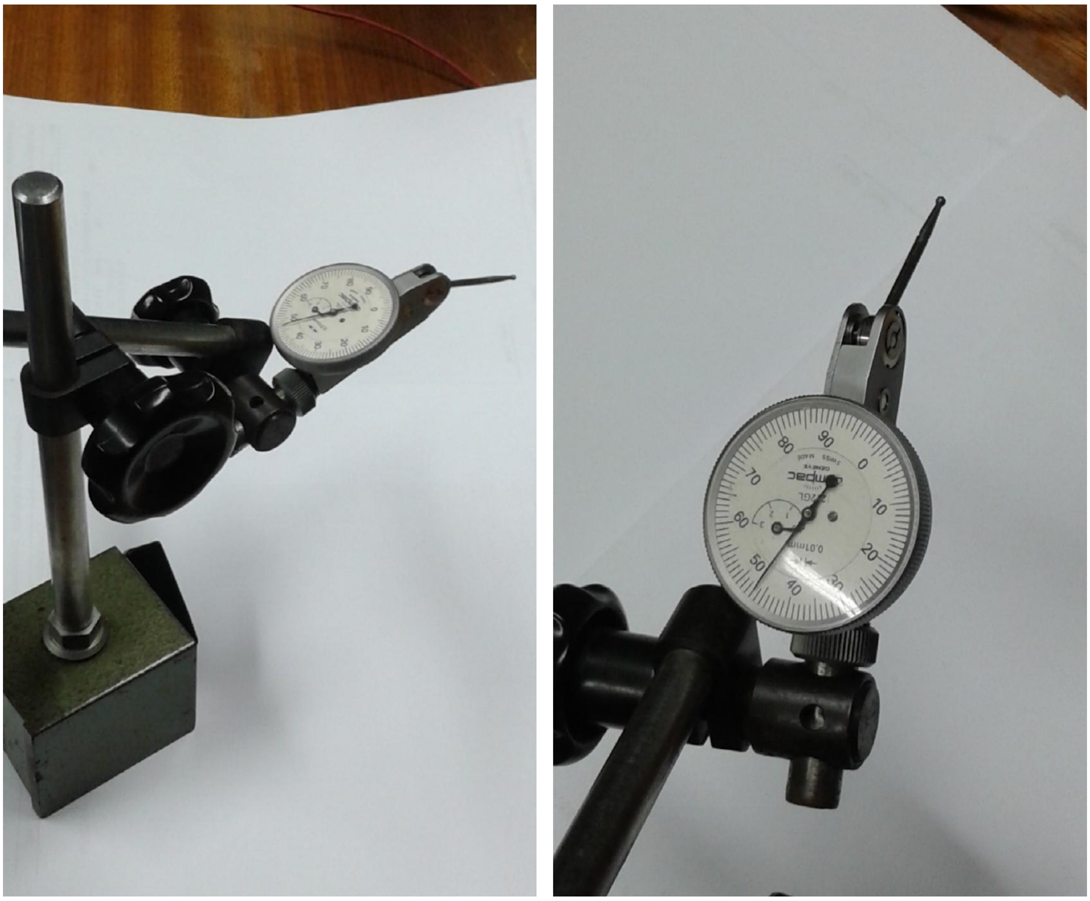

Figura 4.11 – Relógio comparador usado no procedimento experimental.

Ao dar início a tomada de dados verificou-se que não ocorreu nenhuma alteração na marcação do relógio comparador, ou seja, as placas de latão não se atraíram o suficiente para gerar deslocamento mensurável da placa móvel. Este fato ocorreu mesmo na situação em que o gerador de tensão estava ligado em seu valor máximo.

Para ter certeza que o circuito estava fechado foi usado um multímetro para medir a d.d.p. entre as placas de latão, através de contato físico. Foi verificado que as placas estavam com d.d.p na ordem de 60V, quando o gerador de tensão estava operando com valor máximo. Desta forma foi estudada uma nova estrutura de capacitores, uma vez que a atual não estava sendo eficiente.

Através do efeito verificado no experimento foi possível concluir que a força elétrica gerada pelo campo elétrico estava sendo insuficiente para aproximar as placas de latão. Com a finalidade de aumentar a força de atração entre as placas de latão foram idealizados capacitores com distância menores entre suas placas.

Um outro fator que poderia estar dificultando a aproximação das placas era o valor da constante elástica das molas. Uma intervenção para amenizar esta adversidade seria o emprego de molas com valor da constante elástica inferior à usada até o momento.

Desta forma, foi estudada a melhor forma que as molas deveriam ter, e neste caso optou-se por usar molas com elos de maior diâmetro para aumentar a estabilidade das placas. Mas estas deveriam ser mais maleáveis, ou seja, com constante elástica inferior a usada anteriormente. Como não foram encontradas molas de compressão que atendessem estes requisitos optou-se em usar molas de tração. Estas foram previamente deformadas, para que passassem a atuar como molas de compressão. Na figura 4.12 a mola sofreu deformação inelástica e abaixo tem uma mola de mesmo tipo antes de sofrer a deformação.

Figura 4.12 – Esquematização de deformação inelástica realizada na mola.

Como estas molas apresentavam valor de comprimento superior ao pretendido optou-se em obter as quatro molas a partir da mesma, ou seja, uma mola foi cortada em 4 pedaços iguais originando 4 menores.

Com esta nova estrutura de capacitores e tendo como objetivo a diminuição da distância entre as placas de latão seria necessário utilizar um material mais fino que as placas de acrílico usadas em cada uma das extremidades das molas a fim de isolar eletricamente as placas. Para esta finalidade foram usadas placas de mica (figura 4.13), material bastante usado como isolante em eletrônica, pois possuem espessura da ordem de 10^{-1} mm. Foram usados 8 pedaços de placa de mica, sendo fixados cada um em uma das extremidades das molas usadas no capacitor 1.

Figura 4.13 – Placa de mica usada como isolante nas molas do capacitor 1.

A alteração de diminuição da distância entre as placas foi aplicada aos 2 capacitores, no capacitor 2 para tal finalidade o anel de acrílico foi substituído por um de altura inferior.

As alterações, assim como a geometria final dos capacitores, podem ser visualizadas nas figuras 4.14, 4.15 e 4.16:

Figura 4.14 – Capacitor 1 montado com distância entre placas diminuída.

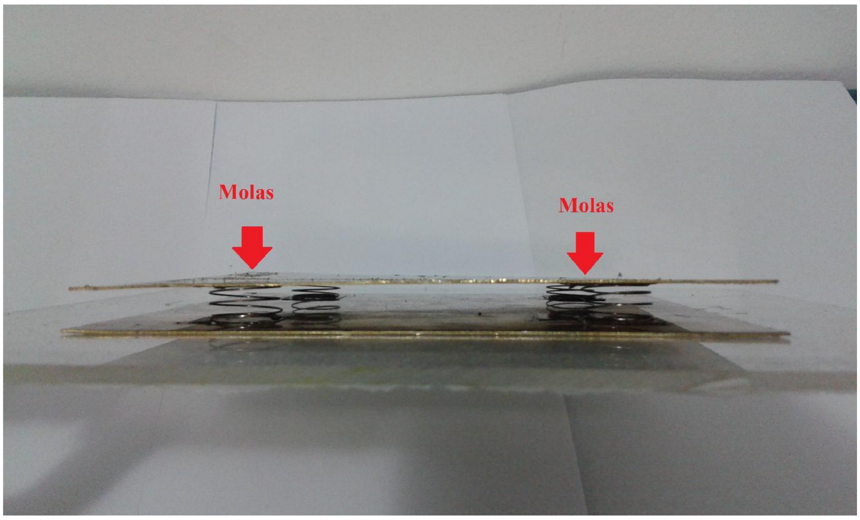

Figura 4.15 – Molas do capacitor 1 em destaque.

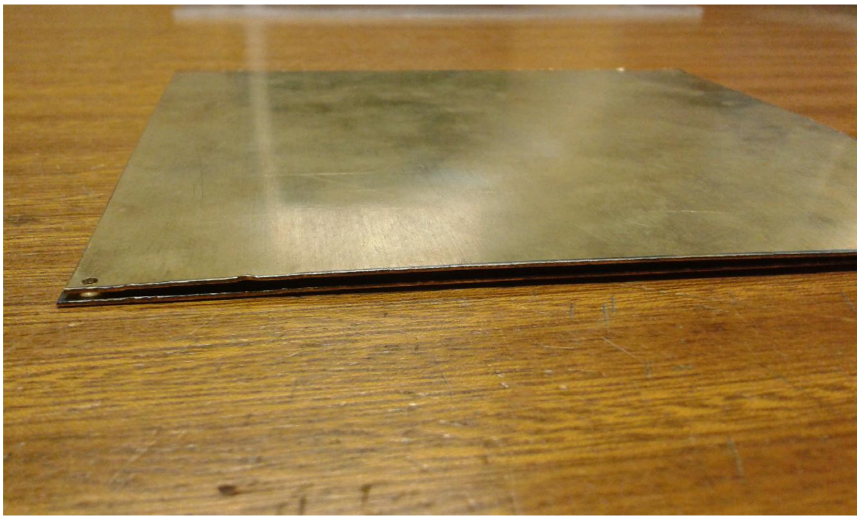

Figura 4.16 – Capacitor 2 montado com distância entre placas diminuída.

Uma outra alteração realizada neste segundo modelo de protótipo foi a criação de pequenos furos, da ordem de 1 mm de diâmetro, em um dos cantos de cada placa de latão (figura 4.17), isto porque durante a ligação elétrica do circuito experimental, no primeiro modelo de capacitores desenvolvidos, houve dificuldade para unir os fios às placas de latão.

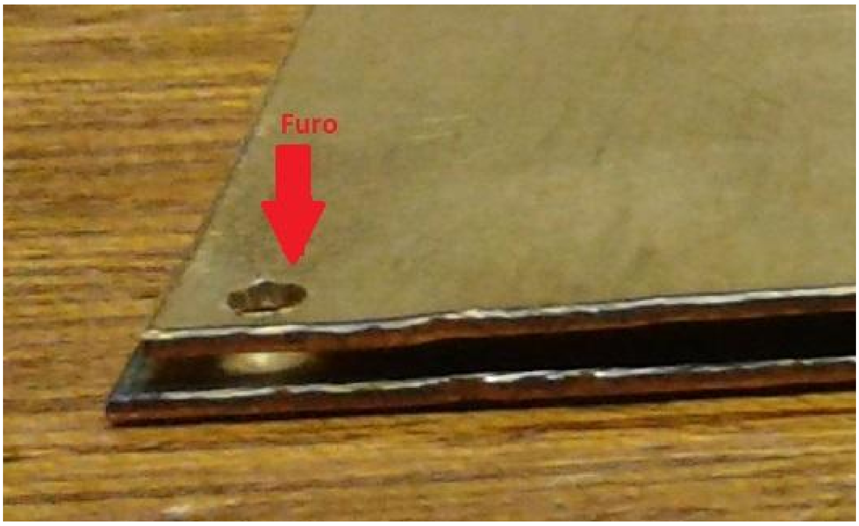

Figura 4.17 – Detalhe de furo feito nas placas de latão.

Neste segundo momento as dimensões dos capacitores foram estabelecidas conforme as tabelas 4.3 e 4.4:

Tabela 4.3 – Valores medidos no capacitor 1, após alterações.

Capacitor 1				
Placa Fixa				
Massa (Kg)	0,125(5)			
Espessura (mm)	0,85(5)			
Comprimento dos lados (mm)	150,50(5)	150,80(5)	152,85(5)	151,20(5)
Placa Móvel				
Massa (Kg)	0,125(5)			
Espessura (mm)	0,85(5)			
Comprimento dos lados (mm)	151,10(5)	151,00(5)	150,95(5)	150,90(5)
Apoio de Mica (8 unidades)				
Espessura (mm)	0,15(5)			
Comprimento dos lados (mm)	22,50(5)		20,00(5)	
Molas (4 unidades)				
Comprimento em repouso (mm)	12,45(5)	12,50(5)	12,50(5)	12,55(5)
Comprimento comprimida (mm)	6,25(5)	6,35(5)	6,30(5)	6,25(5)

Tabela 4.4 – Valores medidos no capacitor 2, após alterações.

Capacitor 2				
Placa 1				
Massa (Kg)	0,125(5)			
Espessura (mm)	0,85(5)			
Comprimento dos lados (mm)	149,85(5)	150,15(5)	150,25(5)	150,00(5)
Placa 2				
Massa (Kg)	0,125(5)			
Espessura (mm)	0,85(5)			
Comprimento dos lados (mm)	150,05(5)	150,35(5)	149,95(5)	149,90(5)
Anel de Acrílico				
Altura (mm)	1,45(5)			
Espessura (mm)	5,65(5)			
Diâmetro externo(mm)	120,05(5)			

O aparato experimental foi novamente montado usando esta nova estrutura. Novamente optou-se em realizar a tomada de dados apenas no capacitor 1, então a mesma fonte de tensão da marca *Instrutherm* teve seus terminais ligados a cada uma das placas do capacitor.

Novamente um voltímetro foi usado nas placas de latão para verificar se realmente estava ocorrendo uma d.d.p. entre elas. A fonte então foi ligada e sua tensão elétrica variada de 0 a 60 V. Usando o relógio comparador em contato com a placa móvel do capacitor 1 (figura 4.18) foi possível verificar que novamente não ocorreu nenhuma alteração mensurável na posição da placa, ou seja, mesmo com esta nova geometria as placas de latão não conseguiram gerar um campo elétrico que possibilitasse atrair as placas através da força elétrica.

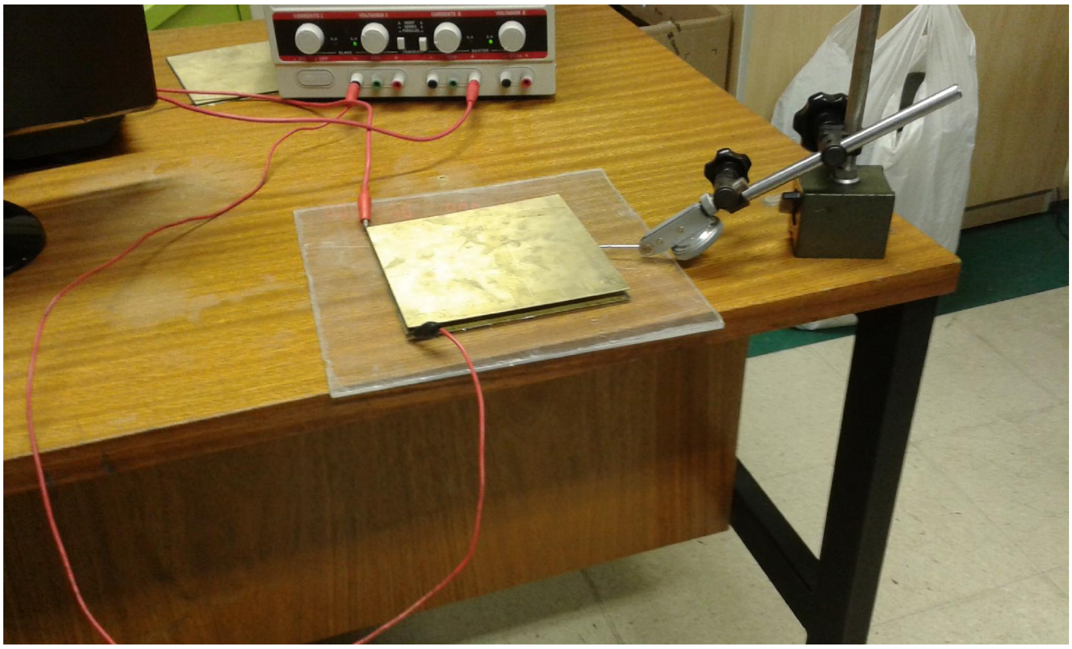

Figura 4.18 – Capacitor 1 com nova estrutura ligado a fonte geradora de tensão elétrica.

A repetição da ausência de movimento da placa do capacitor 1, apesar de não ter sido esperada, foi de grande valor experimental e como consequência possibilitou a concretização de conclusões que serão discutidas com maiores detalhes nas próximas seções.

5 SISTEMA DE CONTROLE

Foi desenvolvido um sistema de controle teórico com a função de manter constante a distância entre as placas do capacitor 1, caso esta venha a ser alterada por ruídos ou outros fatores na cavidade do detector, evitando assim, variações de baixa frequência na cavidade. Desta forma foi proposto um sistema de controle em malha fechada.

Espera-se que para uma determinada distância entre as placas do capacitor 1 exista uma d.d.p. fornecida ao sistema correspondente. Tendo esta correspondência em vista, o sinal de referência do controlador deve ser mantida constante. Caso ocorra uma perturbação externa, o sistema de controle deve atuar produzindo um degrau ao sistema de forma que a distância volte a ser a necessária para que continue ocorrendo ressonância na cavidade do detector.

A figura 5.1 ilustra o sistema de controle em malha fechada proposto:

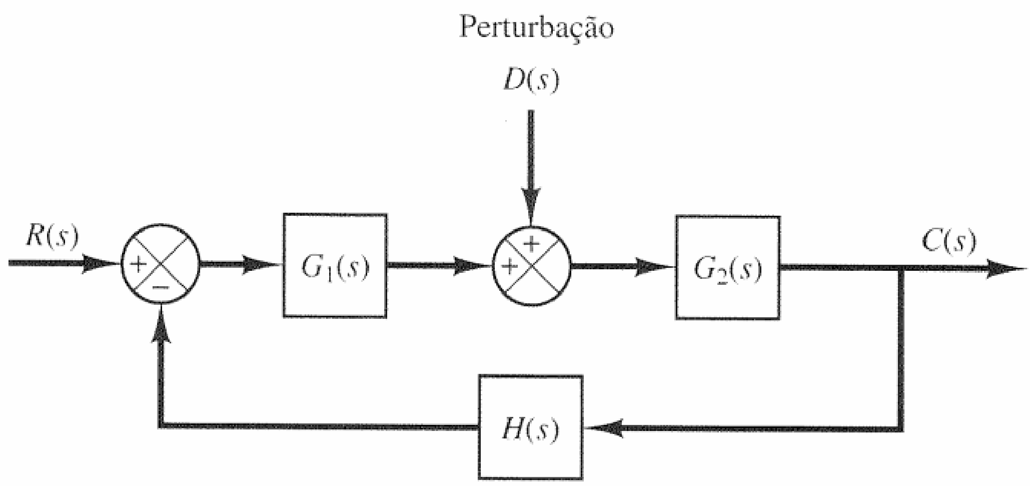

Figura 5.1 – Sistema de controle em malha fechada proposto.
Fonte: (OGATA, 1998).

Onde:

s - Variável complexa;

$R(s)$ - Sinal de entrada;

$G_1(s)$ - Controlador;

$D(s)$ - Distúrbio ou perturbação externa;

$G_2(s)$ - Planta;

$C(s)$ - Sinal de saída controlada;

$H(s)$ - Sensor.

A analise deste sistema de controle acarreta na seguinte função de transferência $T(s)$:

$$T(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_1(s).G_2(s)}{1 + G_1(s).G_2(s).H(s)} \tag{5.1}$$

A proposta é que o sinal mantenha-se com valor constante, em forma de degrau, portanto a função de transferência obtida na relação 5.1 deve ter a seguinte forma:

$$T(s) = \frac{a}{s} \tag{5.2}$$

Onde:

a - Amplitude do degrau;

s - Variável complexa.

6 RESULTADOS

Neste capitulo serão apresentados os resultados obtidos utilizando as dimensões do protótipo e a teoria envolvida no sistema. Para isso foram estabelecidas convenções de tamanho e distância, as quais estão expostas nas figuras 6.1, 6.2 e 6.3:

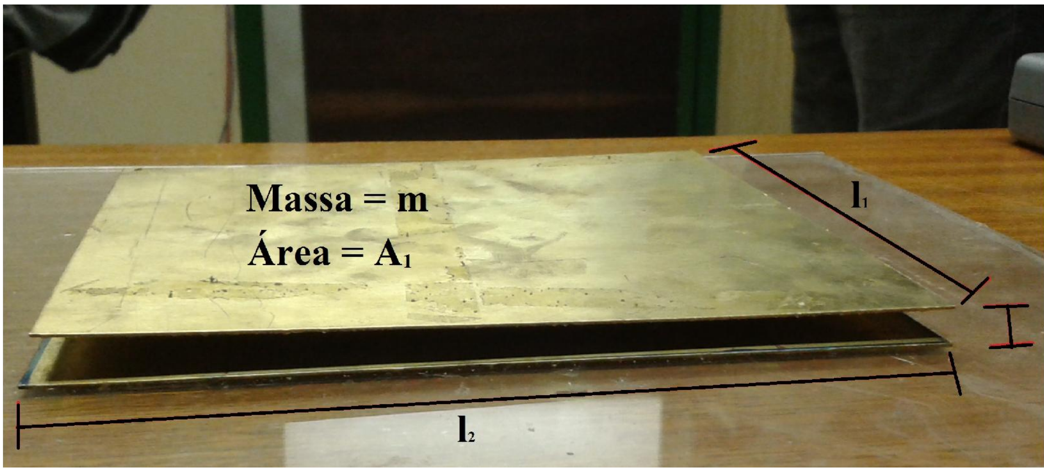

Figura 6.1 – Dimensões dos componentes do Capacitor 1 em destaque com suas respectivas siglas.

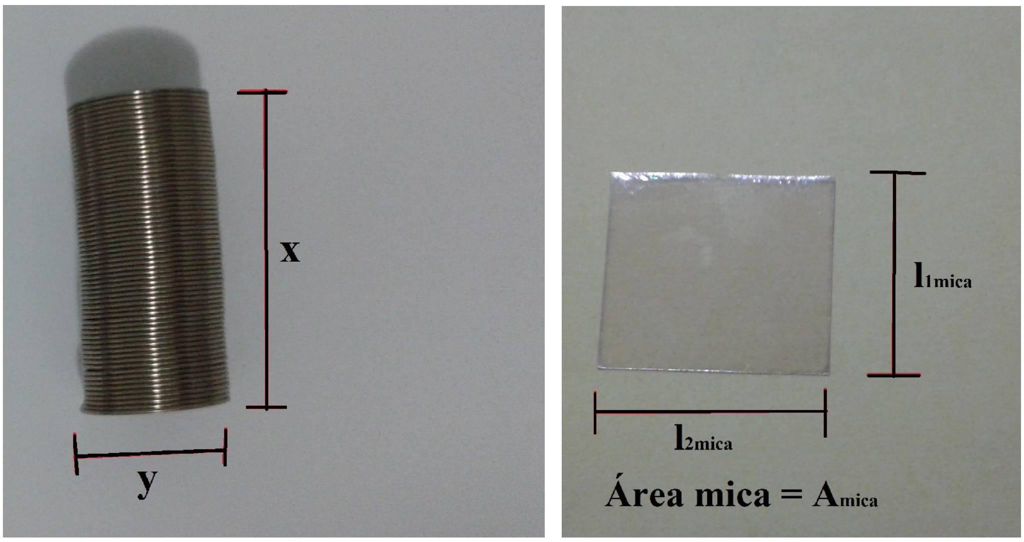

Figura 6.2 – Dimensões de uma das molas e de uma das placas de mica usadas no Capacitor 1 em destaque com suas respectivas siglas.

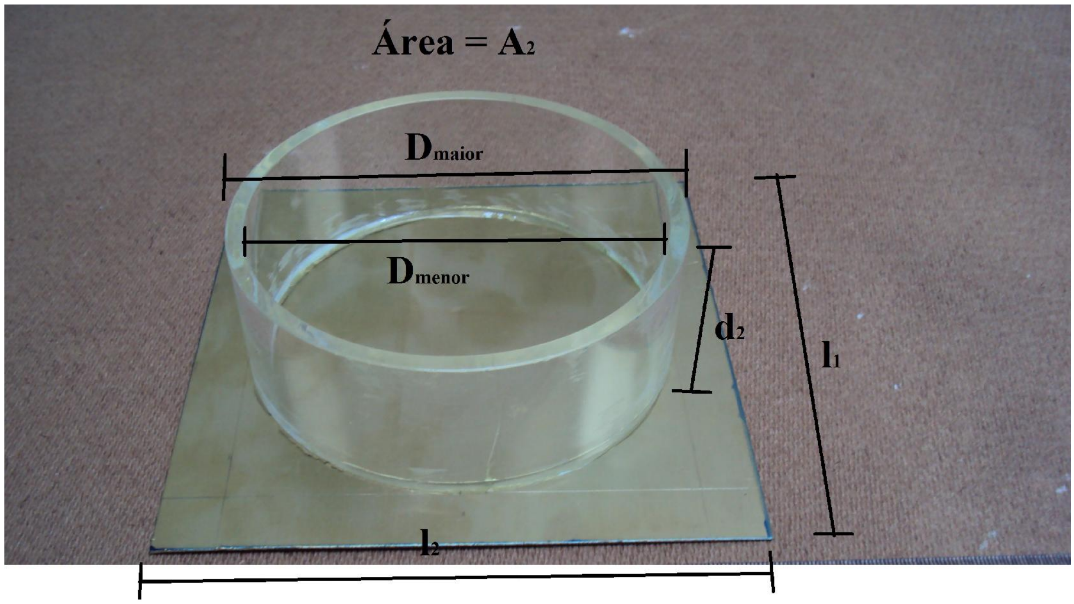

Figura 6.3 – Dimensões dos componentes do Capacitor 2 em destaque com suas respectivas siglas.

Utilizando as informações de dimensões dos componentes dos capacitores envolvidos no protótipo que estão exibidas nas tabelas 4.3 e 4.4, foi possível calcular algumas informações úteis verificando a relação entre as distâncias das placas do capacitor 1 e a d.d.p. gerada entre suas placas. Além disso, todos os valores foram convertidos para o Sistema Internacional (SI), facilitando assim, possíveis análises e comparações.

Inicialmente, com o auxilio da equação 3.2, calculou-se a constante elástica equivalente (K_{eq}) das 4 molas usadas no sistema:

$$K_{eq} = \frac{m.g}{x - d_1} = \frac{0{,}125.9{,}7885}{0{,}0125 - 0{,}0063}$$

$$K_{eq} = 197{,}35(5)\,{}^{N}\!/_{m} \tag{6.1}$$

Como as 4 molas em questão estavam posicionadas em paralelo uma em relação as outras, a constante elástica média de cada mola ($\overline{K}$) foi calculada apenas pela divisão da constante equivalente por 4:

$$K_{eq} = \sum_{i=1}^{n} K_i = K_1 + K_2 + K_3 + K_4 \Rightarrow \overline{K} = \frac{K_{eq}}{4}$$

$$\overline{K} = \frac{197{,}35}{4} \Rightarrow \overline{K} = 49{,}34(5)\,{}^{N}\!/_{m} \qquad (6.2)$$

Para obter estes valores foi usado apenas o capacitor 1 e o circuito permaneceu desligado, sem corrente elétrica percorrendo-o.

Na etapa seguinte o circuito foi ligado à fonte geradora de tensão, como explicado nas seções anteriores.

Como nesta situação não houve alteração de distância entre as placas, mesmo quando a fonte geradora de tensão estava operando no seu valor máximo (~60V), os cálculos foram realizados através de simulações usando como suporte a teoria envolvida no sistema.

A força elástica ($\vec{F}_{elástica}$) utilizada na equação 3.1 obedece aproximadamente à lei de *Hooke*, para pequenas oscilações do corpo em torno do seu ponto de equilíbrio, esta restrição é importante, pois para desvios maiores tendem a aparecer correções não-lineares (termos proporcionais a $x^2, x^3, ...$) na equação $\vec{F}_{elástica} = K.\vec{x}$, (NUSSENZVEIG, 2002). Desta forma, foi feita variação no valor da distância entre as placas do capacitor 1 de 1.10^{-5} m tendo como de partida o $6{,}3.10^{-3}$ m, que foi a distância medida com o gerador de tensão desligado, reduzindo até o valor de $5{,}0.10^{-3}$ m.

A partir desta variação foram calculados os valores da capacitância equivalente (C_{eq}) e da d.d.p. entre as placas do capacitor 1 necessária para que ocorresse a variação na distância.

Os cálculos estão organizados em três seções, a primeira tendo apenas o capacitor 1 ligado eletricamente em série com a fonte geradora de tensão elétrica, a segunda tendo o capacitor 2 ligado eletricamente em série com o capacitor 1 e com a fonte geradora de tensão elétrica, como representados nas figuras 4.5 e 4.6 e a terceira seção será para verificar a validade da constante elástica equivalente (K_{eq}) das molas.

6.1 CIRCUITO COM APENAS O CAPACITOR 1 (UMA PLACA MÓVEL)

Utilizando a equação 3.3 e os valores da tabela 4.3 foi possível realizar os cálculos da capacitância para cada valor de distância entre as placas do capacitor 1. Neste capacitor há um misto de dielétricos, uma região possui apenas o ar atmosférico como dielétrico e a região onde as placas de mica estão posicionadas possui como dielétricos o ar atmosférico e a mica. A região em que o ar atmosférico e a mica são dielétricos a capacitância equivalente é calculada como se fossem capacitores em série. E esta região por sua vez, esta em paralelo em relação à região que possui apenas o ar atmosférico como dielétrico. Os valores dos dielétricos do ar atmosférico e da mica são respectivamente ($\varepsilon_{ar} = 1{,}0006(1)$) e ($\varepsilon_{mica} = 5{,}4(1)$) (MACHADO, 2007):

$$\frac{1}{C_{eq(mica-ar)}} = \frac{1}{C_{mica}} + \frac{1}{C_{1(a_r)}} \Rightarrow C_{eq(mica-ar)} = \frac{C_{mica}.C_{1(a_r)}}{C_{mica} + C_{1(a_r)}}$$

$$C_1 = C_{ar} + C_{eq(mica-ar)} = C_{ar} + \frac{C_{mica}.C_{1(a_r)}}{C_{mica} + C_{1(a_r)}}$$

$$C_1 = \frac{\varepsilon_{ar}.\left(A_1 - A_{mica}\right)}{d_1} + \frac{\dfrac{\varepsilon_{mica}.A_{mica}}{2.h_{mica}} \cdot \dfrac{\varepsilon_{ar}.A_{mica}}{(d_1 - 2.h_{mica})}}{\dfrac{\varepsilon_{mica}.A_{mica}}{2.h_{mica}} + \dfrac{\varepsilon_{ar}.A_{mica}}{(d_1 - 2.h_{mica})}}$$

$$C_1 = \frac{\varepsilon_{ar}.\left(A_1 - A_{mica}\right)}{d_1} + \frac{\varepsilon_{mica}.A_{mica}.\varepsilon_{ar}.A_{mica}}{(d_1 - 2.h_{mica}).\varepsilon_{mica}.A_{mica} + 2.h_{mica}.\varepsilon_{ar}.A_{mica}}$$

$$C_1 = \frac{\varepsilon_{ar}.\left(A_1 - A_{mica}\right)}{d_1} + \frac{\varepsilon_{mica}.\varepsilon_{ar}.A_{mica}}{(d_1 - 2.h_{mica}).\varepsilon_{mica} + 2.h_{mica}.\varepsilon_{ar}} \qquad (6.3)$$

Onde:

$C_{1(a_r)}$ - Capacitância elétrica do ar na região que possui ar e mica como dielétricos em série do capacitor 1;

C_{mica} - Capacitância elétrica da mica na região que possui ar e mica como dielétricos em série do capacitor 1;

$C_{eq(mica-ar)}$ - Capacitância elétrica equivalente na região que possui ar e mica como dielétricos em série do capacitor 1;

C_1 - Capacitância elétrica equivalente do capacitor 1;

ε_{ar} - Constante dielétrica do ar atmosférico;

ε_{mica} - Constante dielétrica da mica;

A_1 - Área de uma das placas do capacitor 1;

A_{mica} - Soma das áreas das placas de mica fixadas entre as placas e as molas do capacitor 1;

h_{mica} - Espessura da placa de mica;

d_1 - Distância entre as placas do capacitor 1.

Substituindo os valores numéricos da tabela 4.3 na equação 6.3, ocorre:

$$C_1 = \frac{1{,}0006.(0{,}0228 - 0{,}0018)}{d_1} + \frac{5{,}4.1{,}0006.0{,}0018}{(d_1 - 2.0{,}00015).5{,}4 + 2.0{,}00015.1{,}0006}$$

$$C_1 = \frac{0{,}021}{d_1} + \frac{0{,}0097}{(d_1 - 0{,}0003).5{,}4 + 0{,}00030018}$$

$$C_1 = \frac{0{,}021}{d_1} + \frac{0{,}0097}{5{,}4.d_1 - 0{,}0013} \quad (6.4)$$

Estes valores estão representando, através do gráfico, na figura 6.4. Os valores da capacitância foram calculados na unidade Faraday (F), seguindo o Sistema Internacional (SI).

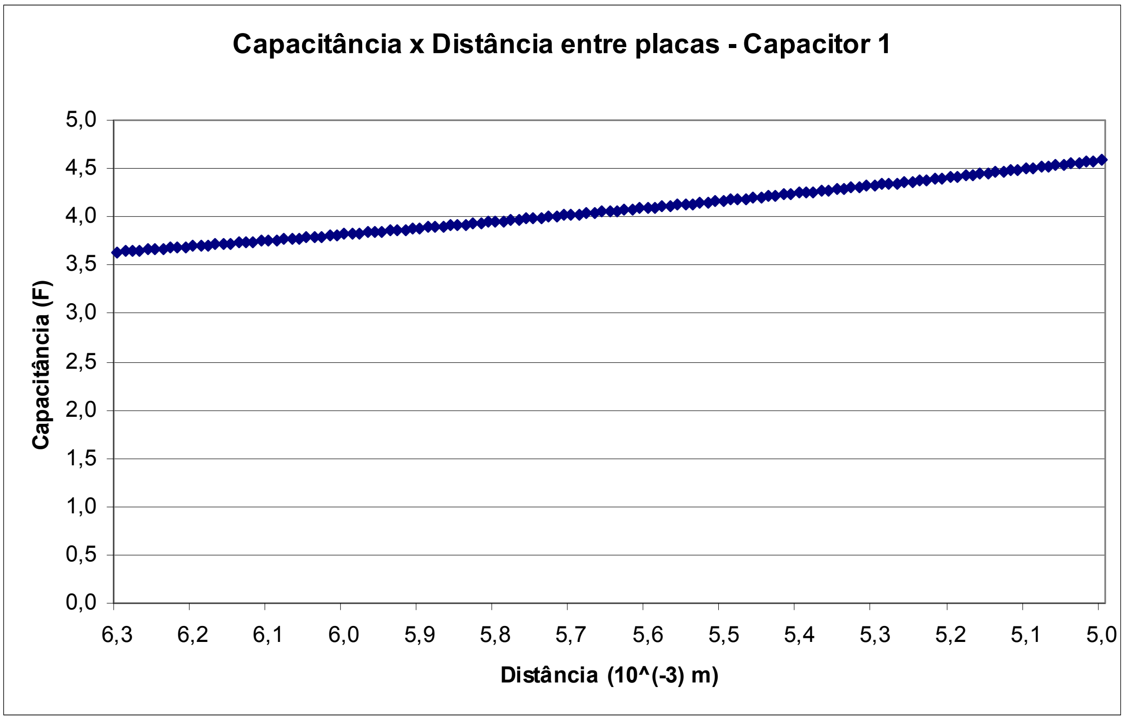

Figura 6.4 – Variação da capacitância do capacitor 1 em relação a distância de suas placas, usando apenas o capacitor 1 ligado ao circuito.

Foram realizados também os cálculos referente à tensão necessária para manter a distância das placas no capacitor 1 em um determinado valor, os quais foram realizados com o uso da equação 3.15, dos valores relacionados na tabela 4.3 e das relações 6.1, 6.3 e 6.4. Seus valores foram calculados na unidade Volts (V):

$$V = \sqrt{\frac{2.\varepsilon.A}{C^2}.\left[K_{eq}.(x - d_1) - m.g\right]}$$

$$V = \sqrt{\frac{2.\varepsilon_{ar}.A_1}{\left(\frac{\varepsilon_{ar}.(A_1 - A_{mica})}{d_1} + \frac{\varepsilon_{mica}.\varepsilon_{ar}.A_{mica}}{(d_1 - 2.h_{mica}).\varepsilon_{mica} + 2.h_{mica}.\varepsilon_{ar}}\right)^2}.\left[K_{eq}.(x - d_1) - m.g\right]}$$

$$V = \sqrt{\frac{2.1{,}0006.0{,}0228}{\left(\frac{0{,}021}{d_1} + \frac{0{,}0097}{5{,}4.d_1 - 0{,}0013}\right)^2}.\left[197{,}35.(0{,}0125 - d_1) - 0{,}125.9{,}7885\right]} \qquad (6.5)$$

Os valores calculados estão exibidos na figura 6.5:

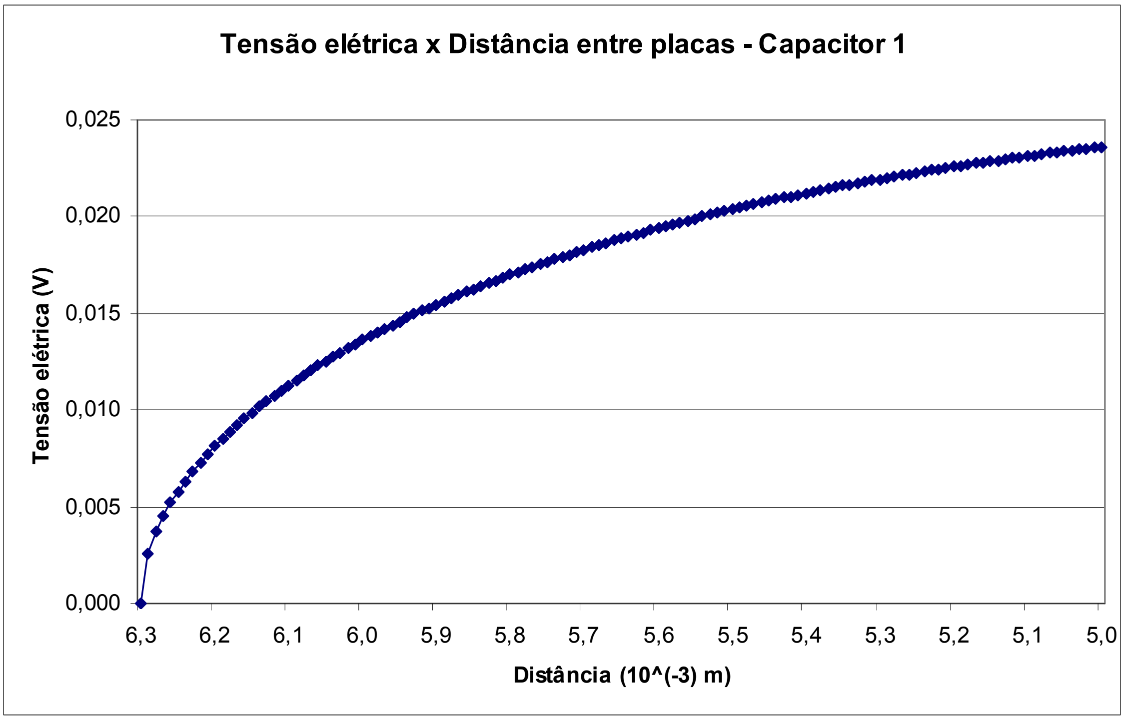

Figura 6.5 – d.d.p. no capacitor 1 em relação a distância de suas placas, usando apenas o capacitor 1 ligado ao circuito.

6.2 CIRCUITO COM OS 2 CAPACITORES LIGADOS

Nesta seção serão apresentados os valores obtidos através dos cálculos realizados usando o sistema composto pelos dois capacitores ligados em série com a fonte geradora de tensão elétrica.

Para realização dos cálculos de capacitância e finalmente de d.d.p. em relação a distância entre as placas é necessário inicialmente apresentar o valor obtido do cálculo da capacitância do capacitor 2 (C_2). Para isso, foram usados a equação 3.3, os valores da tabela 4.4 e as constantes dielétricas do ar ($\varepsilon_{ar} = 1{,}0006(1)$) (MACHADO, 2007) e do acrílico ($\varepsilon_{acrílico} = 4{,}0(5)$) (MACEDO, 2010), pois neste capacitor há um misto de dielétricos, sendo posicionados em paralelo. Além disso, a área efetiva do capacitor é a área da placa de latão descontando a área do acrílico:

$$C=\frac{\varepsilon.A}{d}\Rightarrow C_2=\frac{\varepsilon_{ar}.(A_2-A_{acrílico})}{d_2}+\frac{\varepsilon_{acrílico}.A_{acrílico}}{d_2}$$

$$C_2=\frac{1,0006.(0,0225-0,0001)+4,0.0,0001}{0,00565}$$

$$C_2=4,04(3)F \tag{6.6}$$

Onde:

C_2 - Capacitância elétrica no capacitor 2 de placas paralelas;

ε_{ar} - Constante dielétrica do ar atmosférico;

$\varepsilon_{acrílico}$ - Constante dielétrica do acrílico;

A_2 - Área de cada placa do capacitor 2;

$A_{acrílico}$ - Área do anel de acrílico posicionado entre as placas;

d_2 - Distância entre as placas do capacitor 2.

Com o uso do valor da capacitância do capacitor 2, da equação 3.4 e das relações 6.4 e 6.6 foi possível calcular a capacitância equivalente (C_{eq}) do circuito com os 2 capacitores. Para cada distância das placas do capacitor 1 há um valor de capacitância equivalente correspondente, sendo a unidade de medida usada o Faraday (F).

$$C_{eq}=\frac{C_2.C_1}{C_2+C_1}=\frac{4,04.\left(\frac{0,021}{d_1}+\frac{0,0097}{5,4.d_1-0,0013}\right)}{4,04+\left(\frac{0,021}{d_1}+\frac{0,0097}{5,4.d_1-0,0013}\right)} \tag{6.7}$$

Para facilitar a análise dos valores, os mesmo estão exibidos na figura 6.6:

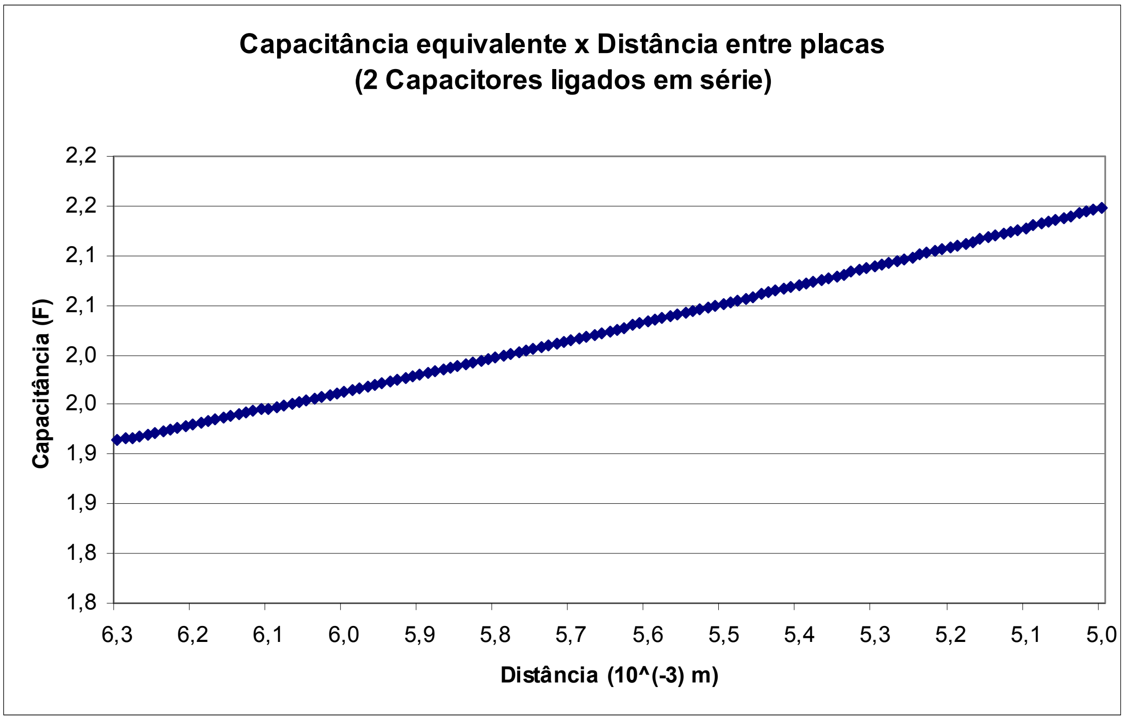

Figura 6.6 – Variação da capacitância equivalente em relação a distância das placas do capacitor 1, usando os 2 capacitores ligados ao circuito.

Tendo a capacitância equivalente foram calculados os valores da tensão gerada necessária para manter as placas do capacitor 1 em uma determinada distância.

Para realizar este cálculo foram usados os valores da capacitância equivalente (C_{eq}), da constante dielétrica do ar ($\varepsilon_{ar} = 1{,}0006(1)$), da mica ($\varepsilon_{mica} = 5{,}4(1)$) (MACHADO, 2007) e do acrílico ($\varepsilon_{acrílico} = 4{,}0(5)$) (MACEDO, 2010), assim como, a equações 3.20, as tabelas 4.3 e 4.4 e as relações 6.5 e 6.7.

$$V = \sqrt{\frac{2.\varepsilon.A}{C_{eq}^{\ 2}}.\left[K_{eq}.(x - d_1) - m.g\right]}$$

$$V = \sqrt{\frac{2.1{,}0006.0{,}0228}{\left(\dfrac{4{,}04.\left(\dfrac{0{,}021}{d_1} + \dfrac{0{,}0097}{5{,}4.d_1 - 0{,}0013}\right)}{4{,}04 + \left(\dfrac{0{,}021}{d_1} + \dfrac{0{,}0097}{5{,}4.d_1 - 0{,}0013}\right)}\right)^2}.\left[197{,}35.(0{,}0125 - d_1) - 0{,}125.9{,}7885\right]} \quad (6.8)$$

Os valores calculados estão exibidos na figura 6.7:

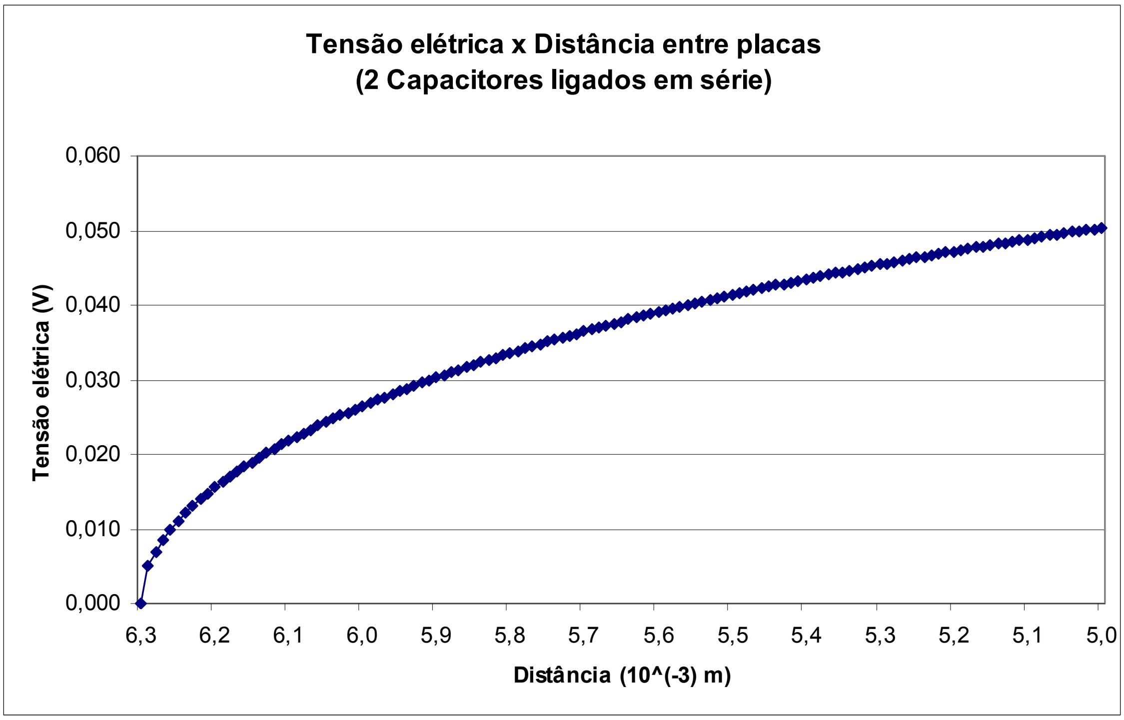

Figura 6.7 – Tensão elétrica gerada em relação a distância das placas do capacitor 1, usando os 2 capacitores ligados ao circuito.

6.3 VERIFICAÇÃO DO VALOR DA CONSTANTE ELÁSTICA EQUIVALENTE

Nos 2 circuitos os valores calculados não foram o esperado, pois a tensão elétrica necessária para fazer a distância das placas ser alterada é muito inferior ao valor que foi usada durante o experimento, sendo assim, o esperado seria ocorrer alteração de distância durante o experimento. Tendo este fato em vista, adotou-se um procedimento diferente para calcular a constante elástica equivalente das molas (K_{eq}) com a finalidade de verificar se o método estava sendo aplicável ao protótipo. Ao invés de usar a força de compressão da mola usou-se a força de tração.

A placa móvel do capacitor 1 foi pendurada, ficando suspensa apenas pela ação das forças das molas. Neste caso o comprimento da mola em repouso era de 0,08125 m e com a placa de latão suspensa o comprimento da mola passou a ser de

0,24750 m, ou seja, sua deformação foi de 0,16625 m. Estes valores foram calculados usando a média dos valores medidos de cada mola e representados na tabela 6.1. Para certificar que a deformação da mola ocorreu no regime de deformação elástica, após as medidas com a mola tracionada repetiu-se as medidas com a mola em repouso, obtendo os mesmos valores inicialmente medidos, ou seja, a deformação ocorreu no regime elástico, e portanto, a equação 3.1 continua obedecendo a lei de *Hooke*.

Tabela 6.1 – Valores medidos da mola na situação de tração.

Molas (4 unidades)				
Comprimento em repouso (mm)	81,20(5)	81,25(5)	81,25(5)	81,30(5)
Comprimento tracionada (mm)	247,50(5)	247,40(5)	247,55(5)	247,55(5)

Usando o mesmo método da relação 6.1 foi calculada esta nova constante elástica equivalente (K_{eq}):

$$K_{eq} = \frac{0{,}125.9{,}7885}{0{,}16625}$$

$$K_{eq} = 7{,}36(5)\, {}^{N}\!/_{m} \tag{6.9}$$

E analogamente à relação 6.2 a constante elástica media de cada mola é:

$$\overline{K} = \frac{197{,}35}{4} \Rightarrow \overline{K} = 1{,}84(5)\, {}^{N}\!/_{m} \tag{6.10}$$

Para verificar o deslocamento da placa em função da tensão gerada, nesta nova situação, foi feita a suposição de que a placa móvel estava suspensa na vertical pelas molas e a força elétrica, assim como a força peso estava puxando a placa móvel do capacitor 1 para baixo, aproximando-a da placa fixa.

A equação 3.14 continua sendo da mesma forma:

$$\vec{F}_{elástica} + \vec{P} + \vec{F}_e = 0 \Rightarrow F_{elástica} - P - F_e = 0$$

No entanto, nesta nova situação o aumento da deformação da mola causa uma diminuição na distância das placas do capacitor 1, a figura 6.8 representa essa relação:

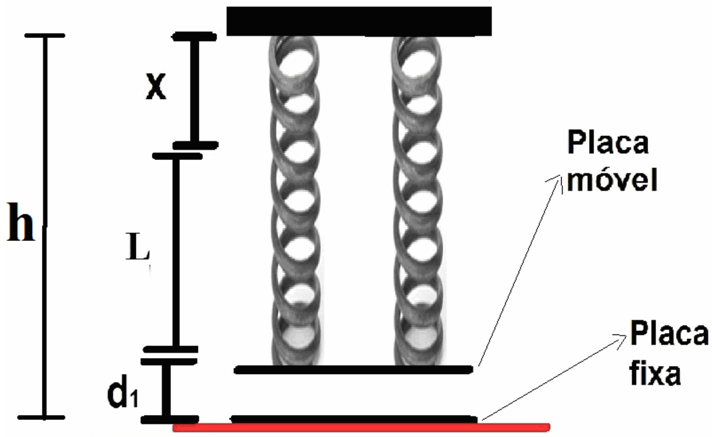

Figura 6.8 – Dimensões do Capacitor 1 em destaque com suas respectivas siglas, supondo o caso em que ocorresse tração nas molas.

Onde:

x - é o tamanho da mola em repouso;

L - é a deformação da mola;

d_1 - Distância entre as placas do capacitor 1;

h - Distância entre a base fixa da mola e a placa fixa do capacitor 1.

Estando o capacitor 1 estruturado desta forma, a equação 3.15 sofre algumas alterações:

$$K_{eq}.L = m.g + \frac{1}{2}.\frac{(C.V)^2}{\varepsilon.A} \tag{6.11}$$

Mas a deformação da mola poder ser expressa em termos do tamanho da mola em repouso, da distância entre as placas do capacitor 1 e da distância total entre a base fixa da mola e a placa fixa do capacitor 1, fato que modifica a equação 6.11 para:

$$K_{eq}.(h-(x+d_1)) = m.g + \frac{1}{2}.\frac{(C.V)^2}{\varepsilon.A}$$

$$V^2 = \frac{2.\varepsilon.A}{C^2}.\left[K_{eq}.(h-(x+d_1)) - m.g\right]$$

$$V = \sqrt{\frac{2.\varepsilon.A}{C^2}.\left[K_{eq}.(h-(x+d_1)) - m.g\right]} \qquad (6.12)$$

Supondo este novo sistema ligado a um gerador de tensão da mesma forma proposta ao protótipo: capacitor 1 ligado eletricamente em série com a fonte geradora de tensão e capacitor 1, capacitor 2 e fonte geradora de tensão ligados em série, foi possível verificar seu comportamento com o auxilio da equação 6.12, fazendo as devidas alterações nas equações:

- equação 6.5:

$$V = \sqrt{\frac{2.\varepsilon.A}{C^2}.\left[K_{eq}.(h-(x+d_1)) - m.g\right]}$$

$$V = \sqrt{\frac{2.1{,}0006.0{,}0228}{\left(\frac{0{,}021}{d_1} + \frac{0{,}0097}{5{,}4.d_1 - 0{,}0013}\right)^2}.\left[7{,}36.(0{,}2538 - (0{,}08125 + d_1)) - 0{,}125.9{,}7885\right]} \qquad (6.13)$$

- equação 6.8:

$$V = \sqrt{\frac{2.1{,}0006.0{,}0228}{\left(\dfrac{4{,}04.\left(\frac{0{,}021}{d_1} + \frac{0{,}0097}{5{,}4.d_1 - 0{,}0013}\right)}{4{,}04 + \left(\frac{0{,}021}{d_1} + \frac{0{,}0097}{5{,}4.d_1 - 0{,}0013}\right)}\right)^2}.\left[7{,}36.(0{,}2538 - (0{,}08125 + d_1)) - 0{,}125.9{,}7885\right]}$$

(6.14)

No primeiro caso, usando as informações da equação 6.13 os cálculos realizados estão exibidos na figura 6.9:

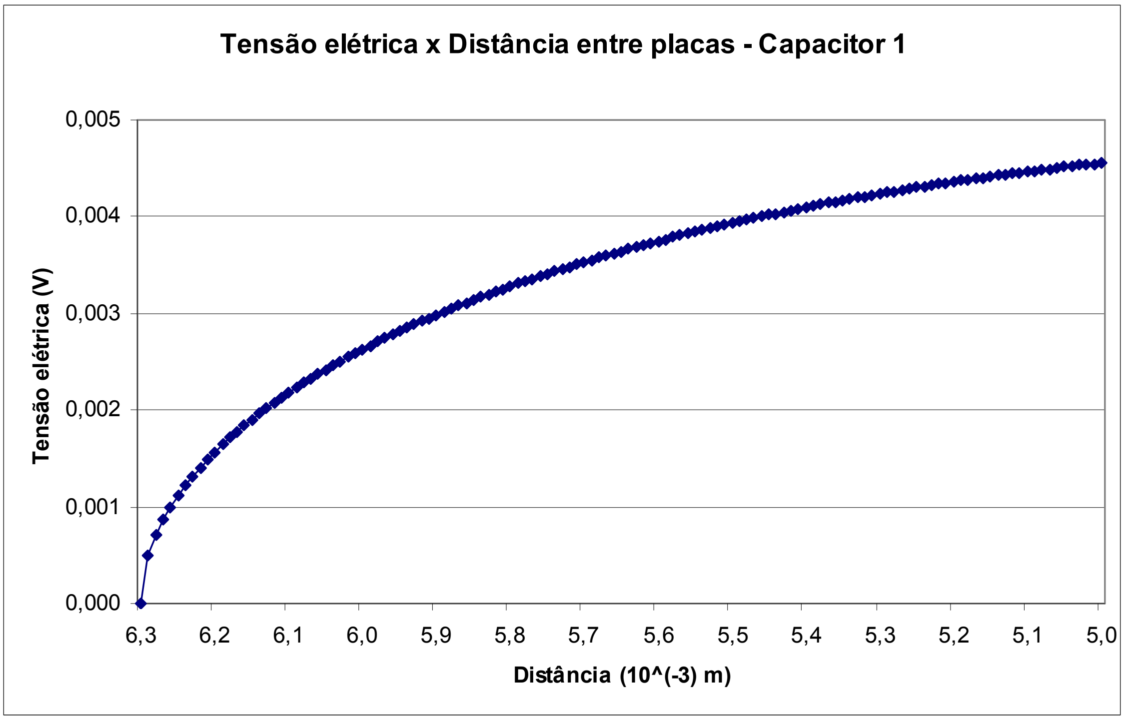

Figura 6.9 – d.d.p. no capacitor 1 em relação a distância entre suas placas, usando apenas o capacitor 1 ligado ao circuito, utilizando a nova constante elástica e supondo o caso em que ocorresse tração nas molas.

Há uma região no gráfico que os valores aproximam-se de uma linearidade, esta região está compreendida em valores de distância entre $6{,}0.10^{-3}$ m e $5{,}5.10^{-3}$ m. Quando plotado apenas estes valores o gráfico apresenta a seguinte característica:

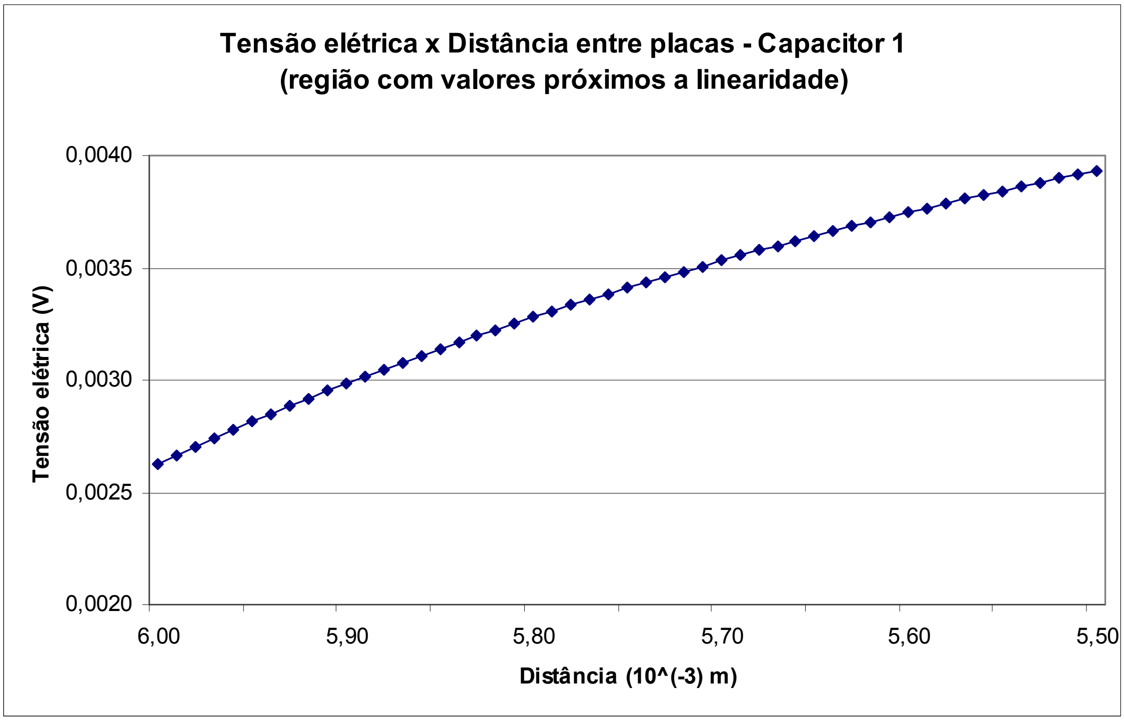

Figura 6.10 – d.d.p. no capacitor 1 em relação a distância entre suas placas, usando apenas o capacitor 1 ligado ao circuito, utilizando a nova constante elástica e supondo o caso em que ocorresse tração nas molas, com valores de distância entre $6{,}0.10^{-3}$ m e $5{,}5.10^{-3}$ m.

No segundo caso, supondo os dois capacitores ligados em série com a fonte de tensão, foram realizados cálculos utilizando os valores obtidos na equação 6.14, os quais estão expostos na figura 6.11:

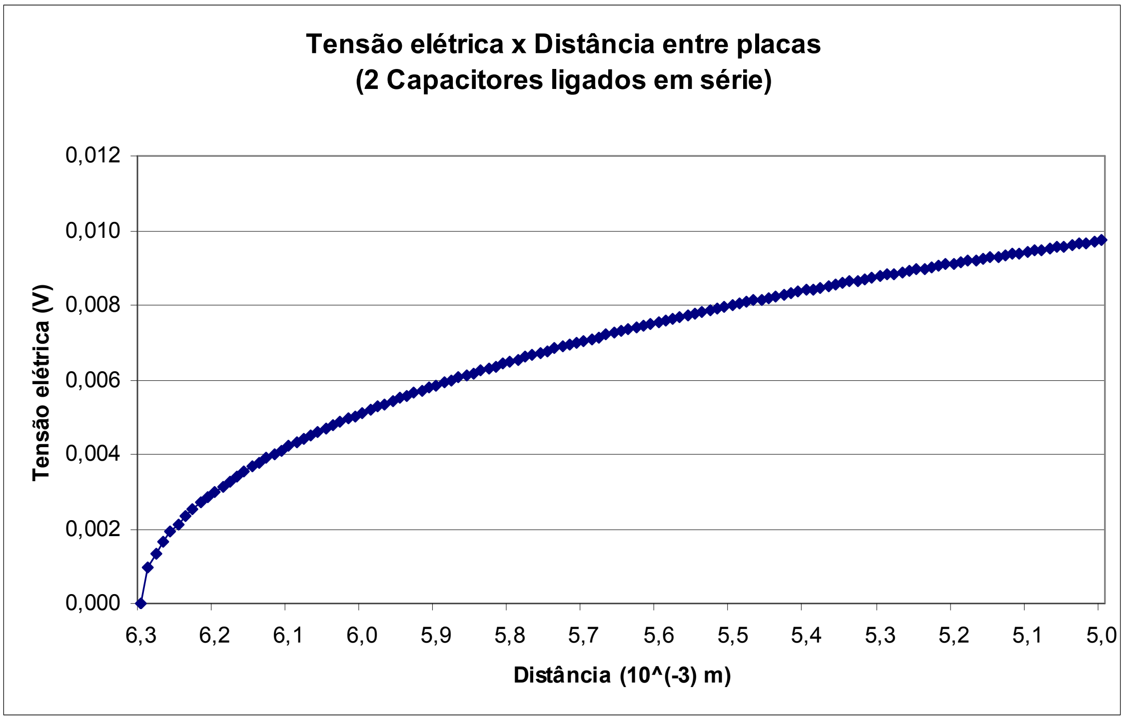

Figura 6.11 – d.d.p. no circuito constituído pelos 2 capacitores em relação a distância entre as placas do capacitor 1, utilizando a nova constante elástica e supondo o caso em que ocorresse tração nas molas.

Neste caso também é possível verificar que na região com distância de valores entre $6{,}0.10^{-3}$ m e $5{,}5.10^{-3}$ m há uma tendência à linearidade, como pode ser visualizado na figura 6.12:

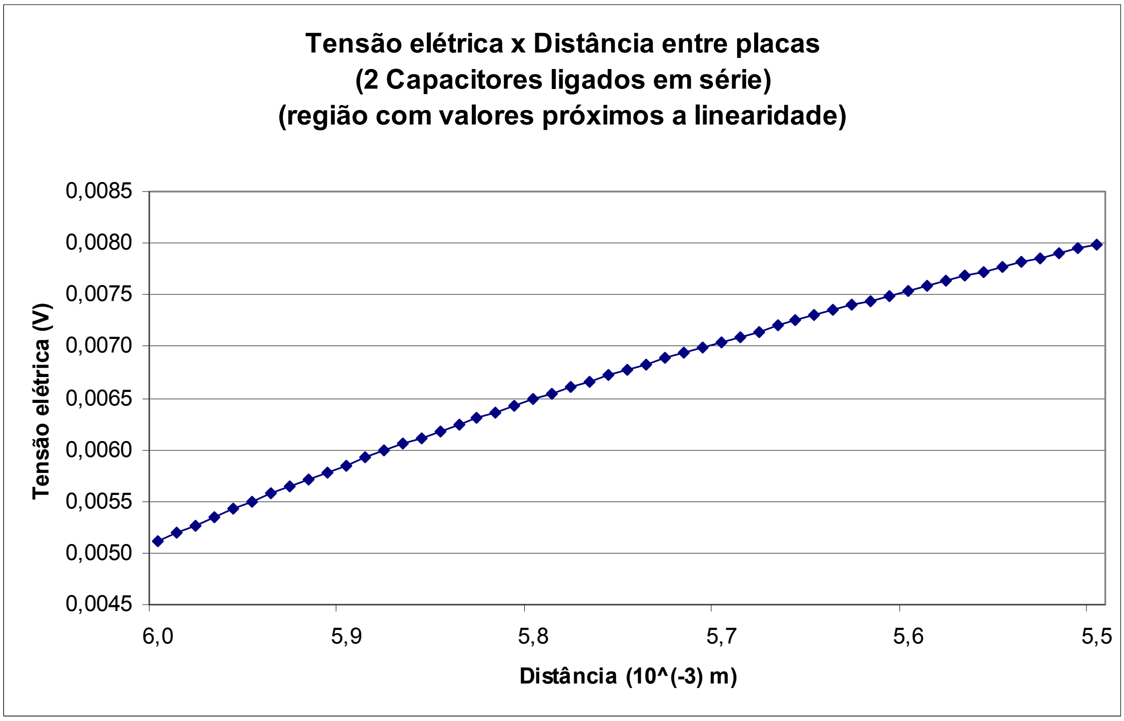

Figura 6.12 – d.d.p. no circuito constituído pelos 2 capacitores em relação a distância entre as placas do capacitor 1, utilizando a nova constante elástica e supondo o caso em que ocorresse tração nas molas, com valores de distância entre $6{,}0.10^{-3}$ m e $5{,}5.10^{-3}$ m.

Todos os valores calculados nesta seção serão analisados e interpretados no próximo capítulo.

7 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção serão analisadas as informações obtidas, confrontando-as com suas expectativas teóricas.

Ao realizar o cálculo da constante elástica equivalente (K_{eq}) das 4 molas usadas no sistema obteve-se o valor:

$$K_{eq} = 197{,}35(5)\, {}^{N}\!/\!_{m}$$

Na construção do protótipo foi proposto o uso de molas que sofressem deformação com aplicação de pequena força, ou seja, era desejado o uso de molas com constante elástica pequena. A mola utilizada ao ser manuseada atendia esta característica física, ou seja, o valor da constante elástica obtido através do cálculo não estava coerente com suas características.

Em seguida foram feitos cálculos referentes às características físicas dos capacitores.

Com o uso apenas do capacitor 1, com uma de suas placas podendo se mover devido a ação de forças atuantes no sistema, as operações matemáticas originaram uma capacitância inversamente proporcional à distância das placas que o forma, como era esperado, segundo a teoria.

$$C_1 = \frac{0{,}021}{d_1} + \frac{0{,}0097}{5{,}4.d_1 - 0{,}0013}$$

Quando estes valores foram visualizados por meio do gráfico exibido na figura 6.4 esta dependência ficou evidente.

Nesta mesma situação, com apenas o capacitor 1 pertencente ao sistema, obteve-se uma equação que relaciona a tensão gerada pela fonte com a distância entre as placas do capacitor.

$$V = \sqrt{\frac{2.\varepsilon.A}{C^2}.\left[K_{eq}.(x - d_1) - m.g\right]}$$

Quando os valores da tensão elétrica foram calculados e visualizados em um gráfico, percebeu-se a dependência próxima ao linear, em uma determinada região, porém os valores obtidos foram muito menores que os esperados, na ordem de 10^{-2} V, já que durante o procedimento experimental com tensões entre 0 e 60 V não foi gerada uma força elétrica suficiente para alterar a distância das placas e nos cálculos houve variação de distância.

Com o uso dos dois capacitores ao circuito elétrico foi calculada a capacitância equivalente do sistema, que novamente apresentou dependência inversamente proporcional a distância das placas do capacitor 1.

$$C_{eq} = \frac{4{,}04.\left(\frac{0{,}021}{d_1} + \frac{0{,}0097}{5{,}4.d_1 - 0{,}0013}\right)}{4{,}04 + \left(\frac{0{,}021}{d_1} + \frac{0{,}0097}{5{,}4.d_1 - 0{,}0013}\right)}$$

Quando os valores foram visualizados em forma de gráfico, apresentaram linearidade, de acordo com a teoria.

Novamente foram calculados os valores de tensão elétrica em relação a distância das placas do capacitor 1, desta vez com os dois capacitores ligados ao sistema, novamente este valores apresentaram linearidade em uma determinada região do gráfico e também valores muito inferiores ao esperado, quando comparados com o experimental.

Devido aos valores de tensão obtidos, foi verificado se algum procedimento experimental havia sido medido de forma ineficaz. Como o cálculo da constante elástica equivalente apresentou um valor muito elevado, em comparação às suas características físicas, foi decido realizar o cálculo através da análise de sua força restauradora de tração ao invés da força restauradora de compressão, como havia sido feito.

Este novo cálculo apresentou um valor muito inferior ao calculado anteriormente, valor este, que se assemelha às suas características físicas.

$$K_{eq} = 7{,}36(5)\, {}^{N}\!/_{m}$$

Com a utilização deste novo valor a relação da tensão elétrica gerada pela fonte em relação à distância das placas do capacitor foi alterada, e assim, foram calculados novamente os valores de tensão, usando apenas o capacitor 1 e, posteriormente, usando os dois capacitores ligados em série.

Nos dois casos os valores foram plotados em gráficos e foram observadas regiões em que a curva formada se aproximava de um regime linear, porém os valores de tensão elétrica necessários para alterar a posição das placas do capacitor 1 continuou sendo bem inferiores aos valores usados experimentalmente.

8 CONCLUSÕES

Desde o inicio do desenvolvimento do detector de OG Mario Schenberg o grupo *Gráviton* almeja que o detector possua sensibilidade suficiente para captar sinais de amplitudes da ordem de 10^{-22} $Hz^{-1/2}$, na faixa de 3000-3400Hz. Com o intuito de alcançar este objetivo há pesquisas em diferentes segmentos com a finalidade de atenuar os ruídos que interferem na captação dos sinais da OG.

Este trabalho apresentou uma solução para manter eficiente o funcionamento do transdutor usado na detecção do sinal. Para isso a sua cavidade deve permanecer sintonizado em frequência de ressonância, ou seja, o tamanho do *gap* (distância entre o poste que carrega a cavidade reentrante de micro-ondas e a membrana que fecha esta cavidade) deve permanecer constante. Ou que seja possível ajustar este *gap* com o detector em funcionamento.

Uma possível solução, aqui apresentada, foi o emprego de dois capacitores planos ligados em série, o primeiro tendo uma de suas placas móvel, com seu lado externo ligado a um sistema de mola, para que a força resultante aplicada a ele seja responsável pela manutenção do tamanho do *gap* e o segundo capacitor apenas com o papel de atuar como antena, ligando o detector ao meio externo, sem a necessidade de contato mecânico.

Foi desenvolvido um protótipo com estas características, mas inicialmente verificou-se que algumas dimensões, assim como, características físicas deveriam ser modificadas.

Um segundo protótipo foi desenvolvido, este com molas de pouca rigidez facilitando o deslocamento da placa do capacitor e também com tamanho reduzido.

Apesar das características próximas ao idealizado, quando testado experimentalmente não foi verificado nenhuma variação da distância das placas, mesmo com tensão elétrica alta.

Inicialmente este fato foi justificado pelas dimensões dos materiais usados no protótipo. Quando realizados os cálculos teóricos, usando as dimensões medidas experimentalmente, verificou-se que a tensão necessária para modificar a distância entre as placas era bem inferior à utilizada experimentalmente.

Uma característica chamou a atenção durante os cálculos teóricos, a constante elástica equivalente do sistema de mola, ter apresentado valor muito elevado. O método usado para este cálculo foi a análise das forças atuantes no capacitor 1, de placa móvel. Neste caso a força elástica atuava na forma de restauração de uma compressão. Quando a constante elástica equivalente foi calculada usando a força elástica atuando como forma de restaurar uma força de tração o valor calculado foi bem menor, mais próximo às características físicas apresentadas pelas molas.

Uma possível explicação para este fato é que como as molas usadas no protótipo eram de comprimento da ordem de 10^{-2}m a própria estrutura das molas (distância entre elos) estava interferindo na compressão da mesma.

Outra característica que deve ser levada em consideração é que durante o procedimento experimental foi usado um relógio comparador para verificar a variação da distância das placas do capacitor 1, para isso seu leitor foi posicionado em contato mecânico com a placa móvel. Foi verificado, ao manusear este instrumento de medição, que era necessário uma força menor para mover a placa móvel do capacitor 1 do que o leitor do relógio comparador.

Neste caso é possível que a força gerada pela tensão elétrica fornecida pela fonte tenha sido suficiente para mover a placa do capacitor 1, no entanto, não foi suficiente para deslocar o leitor do relógio comparador. Quando esta análise foi realizada não havia mais tempo hábil para realização do procedimento experimental com outro tipo de medidor, além disso, os laboratórios utilizados não possuíam outros tipos de leitores, como por exemplo, leitor a *laser*.

Mesmo sem ter obtido os valores experimentais esperados o trabalho foi de grande enriquecimento intelectual e poderá ser usado como fonte de pesquisa, pois no decorrer do experimento, assim como no período de análise foram obtidas informações físicas teóricas e experimentais de grande valor para possíveis trabalhos futuros.

Além disso, os valores calculados a partir das dimensões do protótipo foram satisfatórios, uma vez que, tanto usando apenas o capacitor 1 ligado ao circuito, como usando os dois capacitores, as capacitâncias calculadas estavam de acordo com o sistema teóricos de uso de capacitores de placas paralelas simples. Outro fato importante é que os valores de tensão elétrica cálculos quando plotados originaram curvas que em determinados valores de distância entre placas aproximavam-se a linearidade. Ou seja, usando estes valores seria possível mudar a posição da placa móvel do capacitor 1 de forma linear com a alteração da tensão elétrica fornecida ao sistema.

8.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Desde o inicio da construção do protótipo foram apresentadas adversidades, sendo que algumas foram solucionadas.

As placas de metal (latão) apresentaram pequenas variações de tamanho, pois não foram cortadas por um aparelho de alta precisão. O mesmo ocorreu com as molas utilizadas no capacitor 1. O uso de aparelhos mais precisos na produção dos materiais do protótipo acarretaria em valores mais confiáveis.

A leitura da distância entre as placas, principalmente durante o processo de alteração de distância entre as placas do capacitor 1, precisa ser realizada por um aparelho que não influencie no movimento da placa, deixando-a livre para deslocamento. Neste tipo de procedimento poderia ser usado um leitor a *laser*.

A obtenção das molas que se enquadraram nas características desejadas na construção do protótipo não é fácil e, no caso desse trabalho, a mola não foi eficiente quando utilizada na forma de compressão. Então uma possível variação na estrutura do protótipo poderia acarretar em dados experimentais efetivos. Podem-se utilizar molas em uma posição que elas trabalhem na forma de tração, ficando elas ligadas à placa do capacitor pelo lado externo.

As dificuldades citadas não causaram variações significativas aos cálculos envolvidos no protótipo, com exceção do uso do relógio comparador. Em um experimento mais criterioso ou até mesmo em um possível aparelho que seria usado no detector de OG Mario Schenberg estas informações podem mudar características físicas do processo, então devem ser levadas em consideração.

Na situação de um trabalho que possua aparelhos de alta precisão, seria de grande valor o estudo de um protótipo em escala real ao que seria usado no detector de OG Mario Schenberg, assim como, em temperaturas criogênicas, pois algumas características físicas se alteram quando aplicadas em materiais em escala reduzida ou em baixas temperaturas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR Odylio. D. The Mario Schenberg Gravitational Wave Detector: the first commission run. **XXVII ENFPC**, Águas de Lindóia, set. 2005. Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/enfpc/xxvii/sys/resumos/t0287-3.pdf>. Acesso em: 12 de junho de 2012.

AGUIAR Odylio. D. et al. The gravitational wave detector "Mario Schenberg": Status of the project. **Brasilian Journal of Physics**, vol.32, n.4, p.866-868, dez. 2002. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/bjp/files/v32_866.pdf >. Acesso em: 23 de maio de 2012.

AGUIAR Odylio D. et al. D. Status report of the Schenberg gravitational wave antenna. **Journal of Physics: Conference series**, vol.363 012003, 2012. Disponível em: <http://iopscience.iop.org/1742-6596/363/1/012003/>. Acesso em: 03 de julho de 2012.

ALVES, Márcio Eduardo da Silva. **Fundos estocásticos de ondas gravitacionais primordiais.** Tese de Doutorado – INPE, São José dos Campos, 2009.

ANDRADE, Luiz Alberto de. **Cálculo do ruído de uma antena esférica para ondas gravitacionais acoplada a transdutores paramétricos.** Dissertação de Mestrado – INPE, São José dos Campos, 1999.

ANDRADE, Luiz Alberto de. **Desenvolvimento de osciladores em 10 GHz de ultrabaixo ruído de fase e análise de seus desempenhos nos transdutores paramétrico do detector de ondas Mario Schenberg**. Tese de Doutorado – INPE, São José dos Campos, 2004.

BLAIR, D. G.; JU L.; ZHAO. Detection of gravitational waves. **Rep. Prog. Phys**, v.63(2000), p.1317-1427, jan.2000.

BORTOLI, Fábio da Silva. **Estudo de casadores de impedância mecânicos para transdutores paramétricos de micro-ondas em detectores esféricos de ondas gravitacionais**. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

BORTOLI, Fábio da Silva. **Sistemas vibracionais do detector de ondas gravitacionais Mario Schenberg**. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

CARVALHO, Natália do Carmo. **Construção de uma nova geração de transdutores paramétricos para o detector de ondas gravitacionais Mario Schenberg**. Dissertação de Mestrado – INPE, São José dos Campos, 2012.

CASTRO, Cláudio de Souza. **Estudo das fontes astrofísicas candidatas à observação pelo detector de ondas gravitacionais "Mario Schenberg**. Dissertação de Mestrado – INPE, São José dos Campos, 2002.

COSTA, César Augusto. **Modelagem matemática do comportamento mecânico do detector de ondas gravitacionais "Mario Schenberg".** Dissertação de Mestrado – INPE, São José dos Campos, 2002.

COSTA, César Augusto. **Simulação da resposta do Detector Mario Schenberg a ondas gravitacionais oriundas de fontes astrofísicas**. Tese de Doutorado – INPE, São José dos Campos, 2005.

DOCA, R. H.; BISCUOLA, G. J.; BOAS, N. V. **Física**: Ensino Médio - volume 1. 1 ed. São Paulo. Saraiva, 2010.

FRAJUCA, C. et al. Análise de sinais utilizando a transformada Q. **Sinergia**, v.8, n.1, p.36-44, jan./jun. 2007.

FRAJUCA, C.; BORTOLI, F, S; MAGALHÃES, N. S. Estudo de seis casadores de impedância mecânica em um detector de ondas gravitacionais esférico. **Sinergia**, v.10, n.2, p.115-123, jul./dez. 2009.

FRAJUCA, C.; BORTOLI, F, S; MAGALHÃES, N. S. Simulações pelo método de elementos finitos da esfera do detector Mario Schenberg esférico. **Sinergia**, v.12, n.3, p.254-248, set./dez. 2011.

FURTADO, Sérgio Ricardo. **Desenvolvimento de transdutores paramétricos de alta sensibilidade para detector de ondas gravitacionais Mario Schenberg**. Tese de Doutorado – INPE, São José dos Campos, 2009.

MACEDO. **Macedo Plásticos Industriais Ltda.** 2010. Disponível em: <http://www.macedoplasticos.com.br/acrilicos.html/>. Acesso em: 06 de maio de 2013.

MACHADO, Kleber Daum. **Teoria do eletromagnetismo** - volume 1. 3 ed. Ponta Grossa. UEPG, 2007.

MELO, José Luiz. **Sistemas de isolamento vibracional e de acoplamento antena-transdutores para o protótipo de um detector de ondas gravitacionais**. Tese de Doutorado – INPE, São José dos Campos, 2002.

NUSSENZVEIG, H. MOYSÉS. **Curso de Física Básica:** Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor - volume 2. 4 ed. Edgard Blucher LTDA, 2002.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 3 ed. Rio de Janeiro. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1998.

PEREIRA, Eduardo dos Santos. **Fundos estocásticos de ondas gravitacionais gerados por buraco negros pré-galácticos.** Dissertação de Mestrado – INPE, São José dos Campos, 2008.

RIBEIRO, Kilder Leite. **Estudo do sistema de transdução paramétrica para detectores de ondas**. Tese de Doutorado – INPE, São José dos Campos, 2003.

SOUZA, Sérgio Turano de. **O detector de ondas gravitacionais Mario Schenberg: uma antena esférica criogênica com transdutores paramétricos de cavidade fechada**. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

TAVARES, Denis Borgarelli. **Sinais de raios cósmicos em detectores de ondas gravitacionais**. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

VIDEIRA, Antonio Augusto Passos. Einstein e o eclipse de 1919. **Física na Escola**. v.6, n.1, p.83-87, 2005.

WEBER, J. Detection and generation of gravitational waves. **Physical Review**, vol.117, n.1, p.306-313, jan. 1960.