



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



**PARTICIPAÇÃO NO PROJETO DO MULTI-NESTED PENDULA: UM NOVO
SISTEMA CRIOGÊNICO DE ISOLAMENTO VIBRACIONAL PARA VERSÕES
FUTURAS DO LIGO**

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

Allan Douglas dos Santos Silva
(UNESP – Campus Guaratinguetá, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: allan_2901gl@hotmail.com

Orientador: Dr. Odylio Denys de Aguiar
(DAS/CEA/INPE)
E-mail: odylio.aguiar@inpe.br

Colaboradores:
Ms. Márcio Constâncio Júnior (DAS/CEA/INPE)

Julho de 2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

SILVA, Allan Douglas dos Santos da.

Cutter PARTICIPAÇÃO NO PROJETO DO MULTI-NESTED PENDULA:
UM NOVO SISTEMA CRIOGÊNICO DE ISOLAMENTO
VIBRACIONAL PARA VERSÕES FUTURAS DO LIGO / Allan
Douglas dos Santos Silva - São José dos Campos: INPE, 2014.
xvii + 63p;

Iniciação Científica em Engenharia Mecânica -Instituto
Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.
Orientador: Odylio Denys de Aguiar.

1. Multi-Nested Pendula. 2. Isolamento vibracional. 4. Criogenia.
5. Detector Interferométrico. 6. LIGO. I. Título.

CDU

Copyright AAAA do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente no propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright AAAA by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming or otherwise, without written permission from the INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por todas as provisões, aos familiares e amigos por todo o apoio incondicional, ao INPE e ao CNPQ pela honrosa oportunidade, ao Dr. Odylio e Ms. Marcio por toda paciência e atenção prestados, a UNESP pelo desenvolvimento que me tem proporcionado. Um agradecimento especial à Jared Conway pela disposição em ajudar e pelas preciosas dicas que tornaram as simulações térmicas deste trabalho possíveis.

RESUMO

Este trabalho de iniciação científica realizado com o apoio do CNPQ, consiste no aprimoramento do sistema de isolamento vibracional *Multi-Nested Pendula* (MNP). Ele faz parte da colaboração científica internacional para a detecção de ondas gravitacionais. Estas ondas seriam perturbações no espaço-tempo se propagando por ele na velocidade da luz. Entretanto nenhuma detecção direta destas perturbações foi realizada ainda. Existem detectores espalhados ao redor do mundo todo; dentre eles destaca-se o detector interferométrico americano LIGO (Laser Interferometer Gravitational Waves Observatory), atualmente parado para seu aperfeiçoamento. Os ruídos externos combinados com a baixa amplitude das ondas gravitacionais e sua fraca interação com a matéria, mostram-se um grande desafio a ser superado para realizar a detecção. O grupo *GWINPE* portanto colabora com o LIGO desenvolvendo um sistema para o isolamento vibracional em baixas frequências, visando atenuar o efeito do ruído sísmico no detector. Foi realizado um ensaio térmico com o protótipo, no âmbito de estudar seu desempenho térmico em temperaturas criogênicas; visto que esta é uma condição que vem sendo proposta para gerações futuras do LIGO de modo a aumentar a performance do detector em relação ao ruído térmico. Além disso foram realizadas diversas simulações computacionais, de modo a reproduzir os resultados experimentais e assim obter um modelo de análise válido. Alguns componentes mais relevantes para o desenvolvimento do MNP foram modelados em CAD, e servem como um registro daquilo que é feito pelo grupo. Esta modelagem com o software utilizado neste trabalho, ainda possibilita executar análises de várias naturezas sobre os modelos (térmico, frequência). Foi através destas análises que iniciou-se o estudo de uma nova configuração para o MNP. Simulando variadas configurações para o MNP e comparando os parâmetros físicos e modais obtidos, pode-se obter um modelo cujas características são mais apreciáveis para sua aplicabilidade no aLIGO do que a configuração atual do MNP.

PARTICIPATION IN THE MULTI-NESTED PENDULA PROJECT: A NEW CRYOGENIC VIBRATION ISOLATION SYSTEM FOR THE FUTURE VERSIONS OF LIGO

ABSTRACT

This undergraduate research, which is been supported by CNPq, is related to the improvement of the vibration isolation of the Multi-nested Pendula (MNP). This research is part of the international scientific collaboration for the detection of gravitational waves. These waves would be disruption in the space-time propagating through itself at the speed of light. However, no direct detection of these disturbances was even held. There are several gravitational waves detectors around the world. Among them stands out the LIGO (Laser Interferometer Gravitational Waves Observatory), currently off-line for improvement. External noise combined with low amplitude of gravitational waves and their weak interaction with matter are a great challenge to be overcome to perform the detection of gravitational waves. The GWINPE group is collaborating with LIGO in the development of a system for vibration isolation at low frequencies aiming to attenuate the effect of seismic noise on the detector. The MNP prototype was submitted to a thermal test to study its thermal performance at cryogenic temperatures since cryogenics is a condition that has been proposed for future generations of LIGO (Advanced LIGO) in order to increase the performance of the detector with respect to thermal noise. Furthermore, several computer simulations were performed in order to reproduce the experimental results and thereby obtain a valid analysis model. Some of the most important components for the development of MNP were modeled in CAD, and is a record of what is done by the group. This modeling software used in this work, makes possible to perform analyzes of various natures on the model (thermal, frequency). It was through these analyzes that a study of a new configuration for the MNP has begun. Simulating various settings for the MNP and comparing the physical and modal parameters

obtained, one can obtain a model whose characteristics are more appreciable for its applicability in aLIGO than the current configuration of the MNP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Sistema massa mola oscilando ao longo do eixo x.....	3
Figura 2.2 - Gráficos da equação (2.2) para diferentes valores de b	5
Figura 2.3 - Interferômetro de Michelson	12
Figura 2.4 - Comparação das curvas de sensibilidade entre as corridas científicas do LIGO S1 a S5.	14
Figura 2.5 - Curva de sensibilidade do aLIGO.	14
Figura 2.6 - Corte Transversal do sistema MNP. Os flanges (em azul) estão ligados às cascas cilíndricas (em preto) e conectam um estágio ao outro através de hastes (vermelho).....	16
Figura 2.7 - Multi-Nested Pendula (MNP) montado no Laboratório de Ondas Gravitacionais Dr. Sérgio Ricardo Furtado. À esquerda, vista superior; à direita, vista lateral.....	17
Figura 2.8 - Molas de gás em processo de montagem	18
Figura 3.1 - Cilindros e flanges em frente à câmara de vácuo-térmica de 3x3 m.	20
Figura 3.2 - Tubo de Alumínio calandrado ao redor de um dos cilindros do MNP.	21
Figura 3.3 - Vista superior dos cilindros de cabeça para baixo, após serem parcialmente revestidos com fita Kapton.....	22
Figura 3.4 - Detalhe dos tubos de aço inox que conectam os estágios do MNP.	22
Figura 3.5 - Montagem do MNP na câmara, À direita: conjunto suspenso na câmara; em detalhe a representação do suporte de suspensão do conjunto. À esquerda, posicionamento da fonte no interior do cilindro mais interno.	24
Figura 3.6 - Potência x Tempo	25
Figura 3.7 - Modelo do MNP utilizado nas simulações térmicas. À direita esta uma plotagem térmica obtidas em uma das simulações.....	26

Figura 3.8 - Massas de teste do aLIGO, modeladas (esquerda) e reais (direita).	27
Figura 4.1 - Modelo inicial da câmara térmica.....	29
Figura 4.2 - Câmara térmica em 2D - Vista frontal e lateral em corte	29
Figura 4.3 - MNP com massas de teste. À esquerda, a vista inferior do conjunto; à direita, a vista de sua seção transversal.....	30
Figura 4.4 - Modelo do MNP visto em corte(A), de cima(B) e vista oblíqua inferior (C)	30
Figura 4.5 - Esquema de montagem das molas de gás	31
Figura 4.6 - Modelagem em ambiente 3D das molas de gás. À esquerda, a mola de gás montada; no meio, um corte transversal da mola e à direita, o posicionamento das molas sobre o MNP.	32
Figura 4.7 - Pressão na câmara x tempo	33
Figura 4.8 - Convenção adotada para nomear os cilindros.....	34
Figura 4.9 - Temperaturas dos cilindros ao longo do ensaio térmico	35
Figura 4.10 - Temperatura dos cilindros na segunda fase do ensaio.....	35
Figura 4.11 - Lâmpada dissipadora de calor. Da esquerda para direita:Lâmpada real e Modelo simulação.	40
Figura 4.12 - Experimento (linha cheia) e simulação (linha tracejada).....	41
Figura 4.13 - Experimento (linha cheia) x Simulação de um modelo alternativo de lâmpada (linha tracejada).....	41
Figura 4.14 - Estrutura tubular em fase de estudo, proposta para compor um novo sistema seriado. Peso da estrutura: 24 Kg. Em destaque: pontos de suspensão da estrutura.	46
Figura 4.15 - Ícone representativo do centro de massa dos modelos construídos no Solidworks.	46
Figura 4.16: Comparação entre as alturas do centro de massa do modelo atual (a) e de um possível modelo futuro (b).....	47
Figura 4.17 - Plotagem referente ao modo de ressonância da estrutura na frequência de 87,16Hz.	49

Figura 4.18 - Plotagem do modo de ressonância da estrutura tubular referente à frequência de 99,67 Hz.	50
Figura 4.19 - Estruturas de bases triangulares.....	51
Figura 4.20 - Estruturas de bases triangulares, com tubos cilíndricos.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Desvio percentual da temperatura dos cilindros calculada na simulação térmica.	43
Tabela 4.2 - Comparação entre a taxa de variação de temperatura dos cilindros no ensaio e na simulação.....	43
Tabela 4.3 - Comparação das frequências de ressonância das versões cilíndrica e tubular do MNP.	48
Tabela 4.4 - Frequências relevantes de ressonância em relação aos modelos de base triangular.....	53
Tabela 4.5 - Frequências relevantes de ressonância em relação aos modelos de base cilíndrica.	54
Tabela A.1 - Temperaturas experimentais dos cilindros (°C)	63
Tabela A.2 - Temperaturas dos cilindros na simulação (°C)	63

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

aLIGO	LIGO avançado
LIGO	Observatório de Ondas Gravitacionais de Interferômetro a Laser
MNP	Pêndulos Multi-Aninhados
T.V.	Taxa de variação
CAD	Desenho assistido por Computador
GWINPE	Grupo de Ondas Gravitacionais do INPE
LIT	Laboratório de Integração e Testes

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
2.1 Oscilações	3
2.2 Transferência de calor	6
2.2.1 Condução	6
2.2.2 Convecção.....	7
2.2.3 Radiação.....	7
2.3 Ondas gravitacionais	10
2.4 Detecção de ondas gravitacionais	11
2.5 Sobre o LIGO.....	13
2.6 Multi-Nested Pendula (MNP).....	15
3 METODOLOGIA	19
3.1 Modelagem em CAD.....	19
3.2 Ensaio Térmico.....	19
3.3 Simulação Térmica	26
3.4 Estrutura tubular	27
4 RESULTADOS E DISCUSSOES.....	28
4.1 Modelagem em CAD.....	28
4.1.1 Componentes para estudos térmicos.....	28
4.1.2 Montagem do MNP	30
4.1.3 Molas de gás	31
4.2 Ensaio Térmico.....	32
4.2.1 Resultados experimentais.....	33
4.2.2 Simulação	38
4.2.3 Comparação: Simulação x Ensaio	42
4.3 Resultados sobre as novas estruturas tubulares.....	45
4.4 Modos normais e medidas de isolamento vibracional do MNP.....	56
CONCLUSÕES	58
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
APÊNDICE A : DADOS USADOS PARA O COMPARATIVO ENTRE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTO.....	63

1 INTRODUÇÃO

Até o fim do século XIX, acreditava-se que a gravidade era uma interação instantânea entre os corpos, mas Albert Einstein comprovou por suas teorias da relatividade restrita e anos mais tarde pela teoria da Relatividade Geral, que o limite das interações entre as partículas era o da velocidade da luz no vácuo e a gravidade era consequência da curvatura do espaço-tempo.

Até hoje as teorias de Einstein se saem bem em todos os testes aos quais são submetidas. Porém há algo proposto por Einstein que ainda não possui evidências diretas de sua existência: as ondas gravitacionais. Segundo ele, estas ondas seriam perturbações do espaço-tempo que se propagam à velocidade da luz através do próprio espaço-tempo.

Por décadas elas não passaram de mera teoria e ainda hoje não há evidências diretas de sua existência. O indício da existência das ondas gravitacionais veio a público em 1975, através do trabalho de Joseph Taylor e Russell Hulse. Eles monitoraram o sistema binário PSR 1913+16 e verificou-se uma perda de momento angular do sistema ao longo dos anos. Os dados observados coincidiam com os dados teóricos da relatividade geral. A perda de momento angular seria uma consequência da emissão de ondas gravitacionais.

Desde então foram desenvolvidas diversas técnicas para realizar a detecção das ondas gravitacionais. Para tal, são necessários equipamentos extremamente sensíveis, uma vez que a amplitude de uma onda gravitacional é muito pequena e sua interação com a matéria é muito fraca. Somente eventos astrofísicos de grande magnitude seriam capazes de produzir sinais detectáveis.

São várias as técnicas de detecção, e há detectores instalados e sendo construídos por quase todo o mundo, e até fora dele, já que existe um projeto de um interferômetro espacial. O detector interferométrico aLIGO (Advanced LIGO) é um dos fortes candidatos a realizar a detecção a curto prazo. Trata-se de dois interferômetros terrestres, um situado em Hanford e o outro em Livingstone nos Estados Unidos, cada qual com braços de aproximadamente 4Km.

A detecção das ondas gravitacionais só será possível se a influência das fontes de ruídos no interferômetro for minimizada. O ruído sísmico é responsável por uma barreira na curva de sensibilidade do aLIGO em baixas frequências, porém, segundo previsões teóricas, nesta faixa de frequência também existiriam emissões vindas de pulsares, que são possíveis fontes de ondas gravitacionais (PRINCE, T. A. et al, 2009).

Para superar esta barreira sísmica, o *GWINPE* vem desenvolvendo um sistema de isolamento vibracional multipendular, o chamado *Multi-Nested Pendula (MNP)*. Este sistema integrará as gerações futuras do aLIGO. Neste trabalho, serão apresentados diversos estudos que vem sendo feitos a respeito de melhorias a serem implementadas no MNP, a saber: isolamento vibracional vertical, comportamento do sistema em temperaturas criogênicas e modelos alternativos ao MNP atual.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Oscilações

Uma partícula está em vibração quando oscila em torno de sua posição de repouso. Adotando o sistema de coordenadas cartesianas como referência, esta partícula possui 6 maneiras independentes de se movimentar: deslocamentos em X, Y e Z e, rotações em torno dos eixos X, Y e Z. A estas maneiras independentes chamamos de graus de liberdade. Os graus de liberdade de uma partícula nos dão as coordenadas necessárias para descrever o movimento da partícula em qualquer instante de tempo.

O movimento oscilatório de um corpo qualquer pode ser descrito por suas equações de movimento. O sistema massa mola, como esquematizado abaixo, servirá como exemplo para o entendimento destas equações.

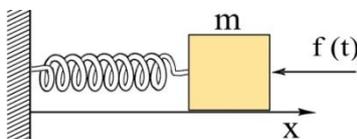


Figura 2.1 - Sistema massa mola oscilando ao longo do eixo x

Fonte: <http://phylos.net/matematica/edo/edo-cap-3/>
(Acesso em 11/07/2014)

Neste sistema, será levado em conta ainda o atrito entre a superfície e o bloco; assumindo que o bloco deslize suavemente sobre a superfície, supõe-se que a força de atrito seja proporcional à velocidade. Além disso considere também que $f(t)$ é uma força do tipo harmônica tal que $f(t) = F_0 \cos(\omega t)$. A equação de movimento do bloco é dada por:

$$m\ddot{x} + bx + kx = F_0 \cos(\omega t) \quad (2.1)$$

Em que:

- b é o fator de amortecimento
- k é a constante elástica da mola
- ω é a frequência angular da força externa que atua sobre o bloco.
- t é o tempo
- F_0 é uma constante relacionada a amplitude da força harmônica

Pode-se deduzir (PINTO NETO, 2003) que a amplitude máxima deste movimento (A) será :

$$A = \frac{F_0}{\sqrt{[m^2(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (b\omega)^2]}} \quad (2.2)$$

Sendo $\omega_0^2 = k/m$.

A amplitude máxima será obtida, diferenciando A em relação a ω e igualando a zero. Com isto obtém se que:

$$\omega^2 = \omega_0^2 - b^2 / 2m^2 \quad (2.3)$$

Plotou-se os gráficos da equação (2.2) para diferentes valores de b , fixando F_0 , $\omega_0, m = 1$ e com $A=A(\omega)$. As curvas obtidas são mostradas abaixo:

Observando estas curvas, nota-se picos cada vez mais acentuados quando ω se aproxima do valor 1 ($\omega \rightarrow \omega_0$); o mesmo ocorre quando $b \rightarrow 0$.

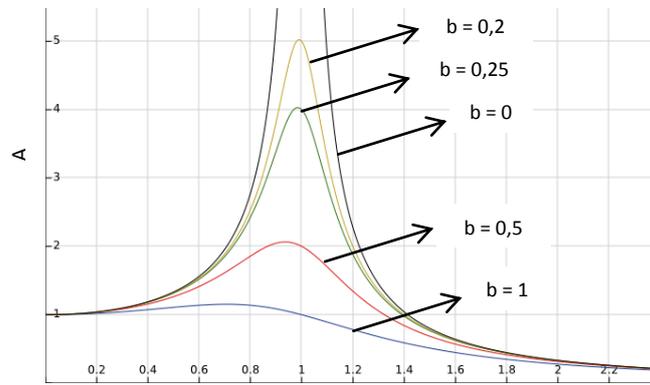


Figura 2.2 - Gráficos da equação (2.2) para diferentes valores de b

Quando $b = 0$, denota-se que a oscilação está livre de qualquer amortecimento. A solução geral da equação (2.1) para este caso especial é:

$$x(t) = A \cos(\omega_0 t - \delta) + \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \cos(\omega t) \quad (2.4)$$

Esta equação denota a superposição de dois osciladores harmônicos de frequências angulares ω e ω_0 , em que ω_0 é frequência natural de oscilação do bloco.

Por outro lado, igualando b à zero na equação (2.3), obtém se que:

$$\omega = \omega_0 \quad (2.5)$$

Chama-se de ressonância, o fenômeno de aumento da amplitude da oscilação de um corpo, a medida que a frequência angular (ω) da força externa se aproxima da frequência natural de oscilação (ω_0) do corpo.

Será abordado mais adiante como se espera realizar a detecção de uma onda gravitacional através de um detector interferométrico, bem como o nível de sensibilidade destes detectores para tal tarefa. É muito importante lidar com os modos de ressonância em todos os componentes do detector, de modo que as vibrações no conjunto sejam minimizadas nas faixas de frequências adequadas, e assim o sinal coletado pelo detector tenha o menor nível de ruído possível.

2.2 Transferência de calor

Será discutidos no decorrer deste trabalho o desempenho térmico do MNP mediante análises experimentais e análises simuladas. Destaca-se a seguir alguns conceitos importantes para o entendimento dos procedimentos realizados e dos resultados obtidos.

2.2.1 Condução

Transferência de calor através de uma substância, em função de seu gradiente de temperatura. É o modo de transferência mais comum nos sólidos.

Segundo a lei de Fourier, o calor por unidade tempo (fluxo de calor), trocado através da condução é dado por :

$$\phi = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.6)$$

Onde:

- k é condutividade térmica do material
- A é a seção transversal atravessada pelo fluxo de calor

- L é o comprimento de condução
- $\frac{dT}{dx}$ é o gradiente de temperatura na seção.

2.2.2 Convecção

Transferência de calor em decorrência do escoamento de matéria em um fluido. O fluxo de calor, segundo a lei do resfriamento de Newton, entre uma superfície e um fluido é:

$$\phi = hA\Delta T \quad (2.7)$$

Sendo:

- h o coeficiente de transferência de calor por convecção ou simplesmente coeficiente de película.
- A é a área da superfície onde o calor é trocado.
- ΔT é a variação de temperatura entre a superfície e o fluido.

2.2.3 Radiação

Transferência de calor entre dois corpos, que não necessita do contato entre eles ou de um a substância de envolvimento; ela está associada a energia emitida por um corpo em função de sua temperatura.

Usando o conceito de corpo negro pode-se calcular a energia por unidade de área na unidade de tempo (poder de emissão, E), emitida por ele para sua vizinhança, segundo a lei de Stefan-Boltzman:

$$E = \sigma T^4 \quad (2.8)$$

Onde:

- σ é a constante de Stefan-Boltzman e $\sigma=5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
- T é a temperatura absoluta (K ou R).
- A é a área da superfície irradiante.

Um corpo negro é um conceito estritamente teórico, em que tal corpo emite e absorve toda a radiação que recebe, e além disso, dados um comprimento de onda e temperatura específica, nenhum corpo emite mais energia do que um corpo negro. Este conceito é útil como um padrão de referência para comparar as características de radiação das superfícies reais.

A situação mais próxima da realidade é aquela que envolve corpos cinzas. Nestes corpos a energia trocada (absorvida ou emitida) representa uma fração daquela trocada por um corpo negro à mesma temperatura.

Das definições acima, vem por conseguinte a definição de emissividade (ε):

$$\varepsilon = \frac{E_c}{E_N} \quad (2.9)$$

A emissividade nada mais é então do que a razão do poder emissivo do corpo cinza com a do corpo negro. Isto quer dizer que na radiação entre duas superfícies cinzentas, nem toda a energia emitida pelo corpo irradiante é absorvida pelo outro corpo.

Uma outra questão a considerar é a respeito do quanto do calor irradiado por uma superfície i intercepta uma outra superfície j. Para quantificar esta quantidade é definido então um outro fator chamado de fator de forma.

Pode-se então rearranjar a equação (2.8) da lei de Stefan-Boltzman, de modo a incluir estes dois fatores na equação, adaptando-a para condições reais. Supondo que uma superfície i irradia calor para uma outra superfície j, o fluxo líquido de calor trocado de i para j é:

$$\phi = F_{ij}A_i\sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad (2.10)$$

Sendo F_{ij} o fator de forma da superfície i para a superfície j. Este fator leva em conta as características geométricas e a emissividade das superfícies envolvidas na radiação.

Existem técnicas de cálculos, tabelas, gráficos dentre outras, que são específicas para se estimar o fator de forma. Entretanto conforme aumenta a complexidade geométrica das superfícies envolvidas, mais difícil se torna determinar este fator.

Realizar o cálculo analítico, com precisão, do calor trocado entre as superfícies do MNP seria uma tarefa bastante árdua e pouco prática. Usando o *Solidworks*, tal tarefa é simplificada. O software subdivide os corpos em n elementos finitos através de uma malha. O usuário pode fornecer as condições de contorno da simulação, tais como temperaturas, potências e fluxos térmicos, tipos de contatos entre componentes, tempo que durará a análise e etc. O software então aplicará as condições de contorno a cada elemento da malha e solucionará o problema de acordo com estas condições; ele ainda calcula o fator de forma entre as superfícies irradiantes automaticamente. O programa devolve o resultado para cada elemento da malha, o que é mais uma grande vantagem em relação aos métodos analíticos mais comuns; uma vez configurada com êxito a simulação, podem ser realizadas novas análises de maneira prática e com resultados bem detalhados.

2.3 Ondas gravitacionais

Até o início do século XIX as únicas interações entre partículas conhecidas eram a eletromagnética e a gravitacional. Esta última, segundo o físico inglês Isaac Newton, acontecia de forma instantânea. Mais tarde porém, Albert Einstein com sua teoria da relatividade restrita, publicada em 1905 demonstrou que a maior velocidade em que as interações poderiam ocorrer seria a da luz, no vácuo. Em 1915, Einstein publicou a sua teoria da Relatividade Geral e a partir de então a gravitação passou a ser entendida como uma consequência da curvatura do espaço-tempo.

A teoria da Relatividade Geral não só alterou o entendimento da gravitação, mas previu a existência de algo até então desconhecido: as ondas gravitacionais. De acordo com a teoria, elas seriam perturbações que deformam o espaço-tempo e viajam por ele na velocidade da luz. Assim, como cargas aceleradas emitem radiação eletromagnética, massas aceleradas seriam capazes de emitir ondas gravitacionais. Entretanto as ondas gravitacionais e eletromagnéticas difeririam em sua polarização e amplitude. Esta última diferença tem se mostrado um grande desafio para sua experimentação, uma vez que as amplitudes de ondas gravitacionais são extremamente pequenas. Isto implica que:

- Seriam necessários experimentos extremamente sensíveis para realizar sua detecção direta;
- Somente eventos em escala astronômica seriam capazes de produzir ondas gravitacionais detectáveis.

Como as ondas gravitacionais são consequências direta da teoria da Relatividade Geral, a sua detecção traria uma prova maior ainda de sua veracidade. Além disso elas ofereceriam informações sobre o universo que até hoje estão ocultas.

As ondas gravitacionais detectáveis seriam oriundas do movimento de objetos extremamente massivos e de eventos colossais do Universo. Suas principais possíveis fontes (RILES, 2014) seriam:

- Supernovas do tipo II;
- Sistemas binários compactos;
- Pulsares;
- Eventos do universo Primordial.

As informações provenientes de tais fontes elevariam o nível de conhecimento humano sobre o universo. Por exemplo: haveria uma evidência direta da existência de buracos negros, permitiria estudar o interior de supernovas e daria pistas nunca antes descobertas sobre o Universo primordial, colocando à prova os modelos físicos propostos atualmente, além de possibilitar o estudo de eventos astrofísicos até então desconhecidos para a humanidade.

Durante décadas, as ondas gravitacionais não passaram de uma previsão teórica. Além das amplitudes das ondas gravitacionais serem extremamente pequenas, existe o fato de haver um fraco acoplamento entre onda e matéria. Realizar a detecção de uma perturbação com estas características requer aparatos tecnológicos altamente sensíveis ao passo que sofram o mínimo possível de interferências externas.

2.4 Detecção de ondas gravitacionais

O Físico americano Joseph Weber foi o pioneiro na busca por ondas gravitacionais. Em 1960 executou o projeto de um detector de massa ressonante, com uma barra rígida de 2 toneladas em uma câmara de vácuo isolada de vibrações. Apesar de seus esforços, os primeiros indícios sobre as ondas gravitacionais não vieram do experimento de Weber. Em 1975 Joseph Taylor e Russell Hulse publicaram um trabalho baseado na observação do

período orbital do sistema binário PSR 1913+16, que era composto por duas estrelas de nêutrons. Constatou-se uma queda no período orbital do sistema e os dados obtidos concordavam com as previsões teóricas feitas a partir da Relatividade Geral; a diminuição no momento angular do sistema seria devido à emissão de ondas gravitacionais

Desde então, os esforços para realizar uma medição direta de uma onda gravitacional foram intensificados. Entretanto até hoje nenhuma evidência direta de sua existência foi encontrada. O experimento proposto por Weber abriu caminho para os detectores de ondas gravitacionais.

Além dos detectores de massa ressonante existem também diversas outras técnicas de detecção de ondas gravitacionais. Uma das mais promissoras é a da detecção interferométrica. Esta ideia surgiu na década de 60 por diferentes estudiosos, dentre eles Joseph Weber.

O princípio de funcionamento de tais detectores é baseado no interferômetro de Michelson, conforme é mostrado na Figura 2.3.

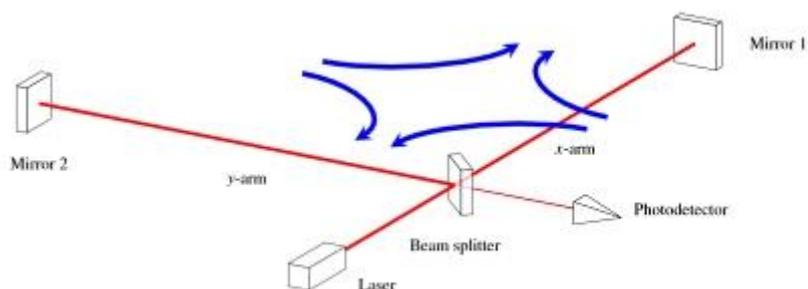


Figura 2.3 - Interferômetro de Michelson

Fonte: sci.esa.int

(Acesso em 16/07/2014)

Um feixe de luz que parte do laser incidirá sobre um espelho semitransparente que funciona como um divisor de feixe (beam splitter). O feixe é dividido em dois feixes aproximadamente iguais, que seguem caminhos perpendiculares entre si, indo em direção aos espelhos 1 e 2, onde serão refletidos e retornarão ao divisor de feixes. Ali os feixes serão recombinados, formando um padrão de interferência e o novo feixe recombinado seguirá em direção ao fotodetector.

Baseando-se nas polarizações possíveis para uma onda gravitacional, se o seu ângulo de incidência for normal ao plano do interferômetro (conforme mostrado na Figura 2.3), ocorrerá uma alteração no comprimento dos percursos percorridos pelos feixes divididos. Deste modo, ocorreria uma expansão do braço X e uma contração do braço Y. Estas flutuações nos comprimentos dos braços do interferômetro resultam na alteração da fase dos feixes divididos e conseqüentemente uma alteração no padrão de interferência inicial. Entretanto sinais aleatórios (ou simplesmente ruídos), podem prejudicar a leitura nos interferômetros e assim não permitir inferir que o padrão de interferência encontrado remete à passagem de uma onda gravitacional.

2.5 Sobre o LIGO

Um dos maiores detectores interferométricos já construídos é o LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory). Trata-se de um par de interferômetros cujos braços medem 4 km. Eles estão instalados em dois locais distintos dos Estados Unidos, separados por aproximadamente 3000 km. Um está localizado em Livingstone, no estado da Louisiana e o outro em Hanford, no estado de Washington.

As primeiras corridas do detector LIGO ocorreram entre 2002 e 2007. A cada corrida científica, resultados cada vez melhores de sensibilidade eram obtidos conforme pode ser visto na Figura 2.4.

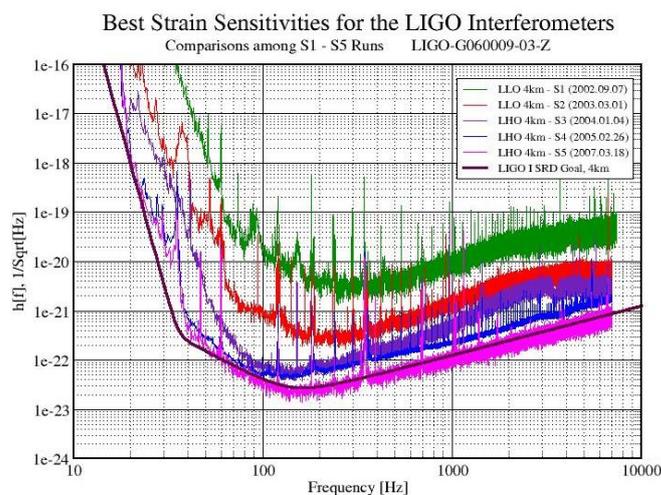


Figura 2.4 - Comparação das curvas de sensibilidade entre as corridas científicas do LIGO S1 a S5.

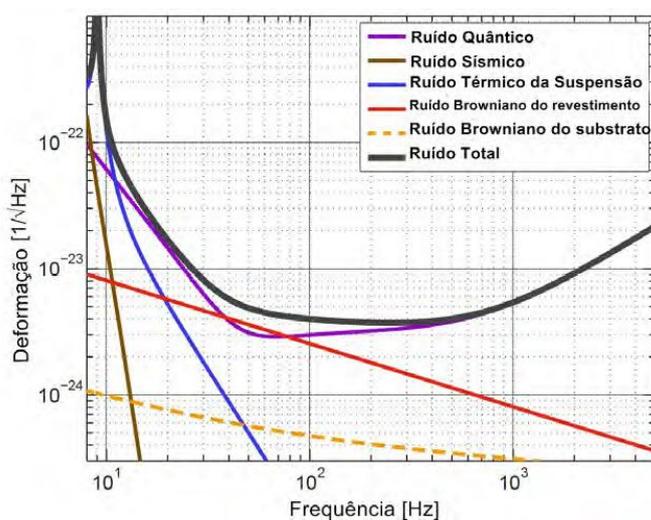


Figura 2.5 - Curva de sensibilidade do aLIGO.

Fonte: Adaptado de Fritschel (2003)

Como pode ser visto na Figura 2.5, a curva teórica final (em preto) resulta da combinação de várias outras curvas de ruídos inerentes à instrumentação empregada. Nesta figura, é possível ver a predominância de ruído térmico da suspensão entre 10 e 12 Hz (linha azul), do ruído browniano dos espelhos entre 40 Hz a \approx 80 Hz (linha vermelha) e do ruído quântico (linha roxa) em baixas e altas frequências, (ruído de pressão de radiação e de Poisson, respectivamente).

Outro ruído importante que afeta a sensibilidade do detector é o ruído sísmico. Este, representado pela linha marrom, forma uma 'barreira sísmica' pouco abaixo de 10 Hz, o que torna a sensibilidade nesta região bastante prejudicada. Contudo, essa é uma região de especial interesse aos cientistas, pois acredita-se que vários pulsares emitam ondas gravitacionais nesta faixa de frequência. Portanto é necessário pesquisar novos sistemas de isolamento vibracional capazes de reduzir tal barreira, aumentando a sensibilidade do detector também em baixas frequências.

2.6 Multi-Nested Pendula (MNP)

Com a finalidade de atenuar a barreira sísmica existente em baixas frequências (10 Hz) no LIGO, o GWINPE (Gravitational Waves Group of Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) vem desenvolvendo um novo sistema de isolamento vibracional. Trata-se do chamado *Multi-Nested Pendula (MNP)* e seria usado nas gerações futuras do aLIGO.

O MNP consiste em 5 cascas cilíndricas de diferentes diâmetros e alturas iguais dispostos de forma concêntrica e com suas faces alinhadas. Cada casca cilíndrica equivale a um estágio e possui 2 flanges: um na parte superior voltado para o seu interior e outro na parte inferior voltado para fora. A conexão entre os estágios é feita por meio de três hastes que estão separados por 120°.

As hastes conectam os braços superiores internos de um cilindro aos braços inferiores externos do cilindro de diâmetro imediatamente menor. Um esquema da montagem do sistema pode ser visto na Figura 2.6.

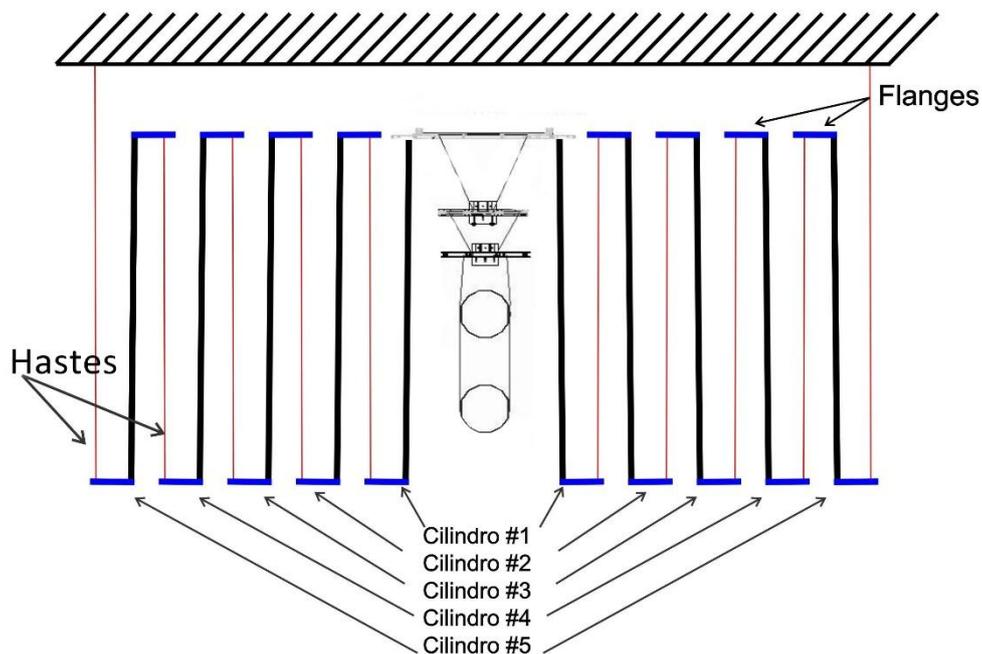


Figura 2.6 - Corte Transversal do sistema MNP. Os flanges (em azul) estão ligados às cascas cilíndricas (em preto) e conectam um estágio ao outro através de hastes (vermelho).

O protótipo do MNP foi desenvolvido visando o isolamento vibracional. Ele funciona de modo semelhante à um pêndulo em cascata de cinco estágios (CONSTÂNCIO JÚNIOR, 2013), e que cada estágio pendular possui 6 graus de liberdade. Conhecer então os modos como o MNP oscila em suas várias frequências naturais é básico para avaliar sua real efetividade. Uma vez que picos de ressonância no MNP em sua banda de frequência operacional podem comprometer tanto o seu desempenho como também afetar a curva de sensibilidade do próprio aLIGO, quando ele fizer parte do sistema de suspensão do detector.

Um protótipo do MNP foi montado no laboratório de Ondas Gravitacionais Dr. Sérgio Ricardo Furtado, no INPE, em São José dos Campos conforme mostrado na Figura 2.7. O movimento pendular dos estágios do MNP realizaria atenuação das oscilações horizontais e os braços dos flanges, as verticais. Entretanto os braços foram descartados pela dificuldade de se usar tais braços com a precisão requerida para sua utilidade no sistema.



Figura 2.7 - Multi-Nested Pendula (MNP) montado no Laboratório de Ondas Gravitacionais Dr. Sérgio Ricardo Furtado. À esquerda, vista superior; à direita, vista lateral.

Visando a atenuação das vibrações verticais, foram desenvolvidas suspensões pneumáticas para o MNP. Elas foram fixadas em todas as hastes sobre os flanges superiores de todas as cascas cilíndricas, substituindo assim os braços dos flanges. As suspensões são compostas por um fole de borracha com tampas de alumínio em suas extremidades. Na tampa superior da suspensão foi colocada uma válvula para entrada e saída de ar. Pelo interior deste conjunto passam um tubo flexível e uma mola, sendo este o caminho para a haste passar por entre a suspensão. O desenvolvimento das molas será descrito nas seções seguintes.

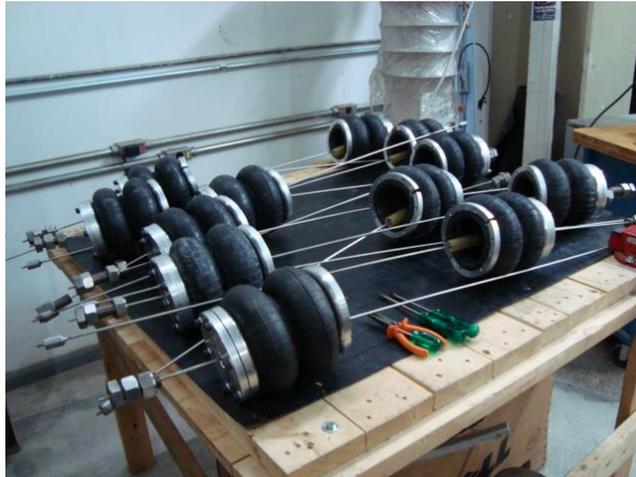


Figura 2.8 - Molas de gás em processo de montagem

Além do ruído sísmico, pode -se inferir da Figura 2.5, que outra fonte de ruído relevante em baixas frequências é o da suspensão das massas de teste. As massas de testes dos detectores são suspensas por um sistema de pêndulo quádruplo; estes por sua vez estão presos a plataformas de isolamento sísmico. Acontece que existe ruído térmico associado com o próprio sistema de suspensão. A operação da suspensão em temperaturas criogênicas, aumentaria em até um fator de 50 o desempenho da suspensão em relação ao ruído em questão na faixa de 10 Hz (HILDH; AMMOND, 2014). Este é um dos fatores que motiva o uso de criogenia nas gerações futuras do aLIGO. Por isso é importante delinear o desempenho do MNP mediante condições criogênicas. Para tanto, realizou-se um ensaio térmico com o sistema para investigar o seu comportamento em baixas temperaturas. O procedimento realizado para este experimento, bem como os resultados experimentais obtidos e os resultados obtidos em simulações serão discutidos ao longo deste trabalho.

3 METODOLOGIA

3.1 Modelagem em CAD

Todos os modelos em CAD apresentados neste trabalho, assim como as simulações realizadas, foram elaborados através do Software *Solidworks*.

A construção dos modelos em CAD além de ser um registro dos trabalhos já realizados, permite também executar simulações integradas com a montagem. O software divide a estrutura modelada em elementos discretos, através de uma malha. Os elementos discretos são conectados por nós e neles são aplicados os parâmetros da simulação fornecidos pelo usuário.

Isto permite variar a geometria à ser simulada, ao passo que também pode-se variar os parâmetros da simulação como, por exemplo, alterar os materiais dos componentes, alterar os pontos de fixação, condições de contato, aplicar cargas e etc.

3.2 Ensaio Térmico

Como citado na seção 2.6, lançar mão da criogenia é uma das alternativas para aumentar a sensibilidade dos detectores interferométricos em suas versões avançadas, além de outras como por exemplo usar espelhos massivos e a utilização de materiais de baixa perda mecânica. O sistema de isolamento vibracional que vem sendo desenvolvido pelo *GWINPE* deverá integrar as próximas gerações do aLIGO e por isso realizou-se um ensaio térmico para investigar o seu comportamento mediante às condições criogênicas.

Este ensaio foi realizado no Laboratório de integração e testes (LIT) do INPE que conta com uma câmara de vácuo-térmica projetada para simular temperaturas extremamente baixas (utilizadas para testar satélites) que atendem à faixa de temperatura e pressão de operação projetada para as gerações futuras do aLIGO.



Figura 3.1 - Cilindros e flanges em frente à câmara de vácuo-térmica de 3x3 m.

O ensaio realizado pode ser descrito em três fases distintas:

- 1º. Resfriamento: Resfriamento do sistema até 120K através do fluxo de N_2 líquido.
- 2º. O experimento em si: Interrupção do fluxo de N_2 por entre o MNP e aquecimento deste por uma lâmpada de aquecimento infravermelho colocada no centro do sistema; a câmara permaneceu resfriada nesta fase do ensaio.
- 3º. Finalização: Fim do resfriamento nas paredes da câmara. O ensaio termina quando a porta da câmara é aberta novamente.

Para permitir o fluxo de N_2 através do MNP, foi necessário adapta-lo. Calandrou-se em cada cilindro, tubos de alumínio com 1" de diâmetro por 3 mm de espessura deixando uma abertura central no tubo calandrado. Nesta abertura, os tubos foram dobrados de modo à saírem da face do cilindro em direção ao solo. As extremidades dobradas serviram como conexão para a passagem do fluxo de N_2 .

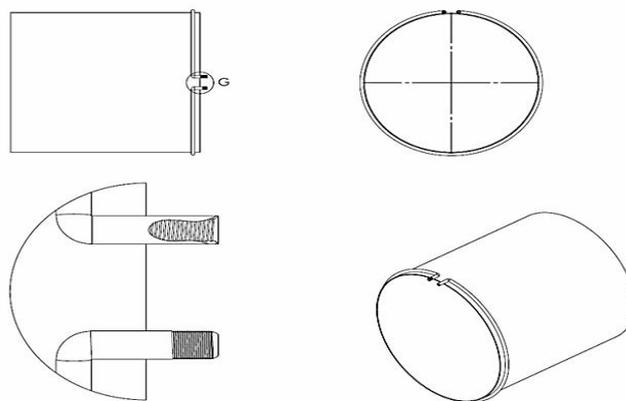


Figura 3.2 - Tubo de Alumínio calandrado ao redor de um dos cilindros do MNP.

Uma outra adaptação a ser executada foi no sentido de aumentar a eficiência com que o sistema iria absorver o calor proveniente da lâmpada. Essa lâmpada simularia o calor dissipado nas massas de teste (espelhos) do interferômetro. No ensaio a forma de transmissão de calor predominante entre a lâmpada de calor e os cilindros foi a radiação; como a lâmpada não tinha contato algum com o MNP, não houve transferência de calor por condução entre eles, além disso o ensaio foi realizado em condições de vácuo e a troca de calor por convecção também pôde ser desprezada.

A troca de calor por radiação em superfícies reais depende da emissividade das superfícies envolvidas. O Alumínio não absorve calor com tanta eficiência, visto que o valor de emissividade para ele é relativamente baixo. A solução encontrada foi revestir parcialmente as faces dos cilindros com fita Kapton; sua emissividade é maior que a do alumínio, ao passo que ela suporta as condições de pressão e temperatura do ensaio.



Figura 3.3 - Vista superior dos cilindros de cabeça para baixo, após serem parcialmente revestidos com fita Kapton.

As conexões entre os estágios do MNP foram feitas com tubos de aço inoxidável com diâmetro de 16mm por 0,5 mm de espessura. O conjunto foi disposto na câmara de modo que o N_2 fluísse do cilindro mais interno para o mais externo.



Figura 3.4 - Detalhe dos tubos de aço inox que conectam os estágios do MNP.

Através da circulação de nitrogênio líquido através do MNP, buscou-se resfriar o conjunto à -196° C em um vácuo de 10^{-3} Torr. Mas para isso, os componentes que foram encaminhados para o ensaio entraram na câmara térmica passaram por um rigoroso processo de limpeza. Além disso as partes críticas do conjunto foram submetidas a constantes verificações de estanqueidade, até que os vazamentos estivessem dentro dos níveis aceitáveis.

O conjunto montado foi então suspenso nas traves da câmara. Isto só foi possível graças aos suportes de Alumínio desenvolvidos especialmente para sua suspensão na câmara. A resistência de cobre foi suspensa também nas traves da câmara e colocada no centro do MNP.

Na parte central da face de cada cilindro foram fixados dois termopares para assim monitorar a temperatura dos estágios do MNP, além de toda a instrumentação fornecida pela equipe do LIT para monitorar os níveis de pressão e temperatura na câmara, bem como o controle do fluxo de N_2 durante a operação. Através dos sistemas de aquisição de dados do LIT pode-se acompanhar em tempo real a variação dos parâmetros citados acima, ao longo de todo o ensaio.

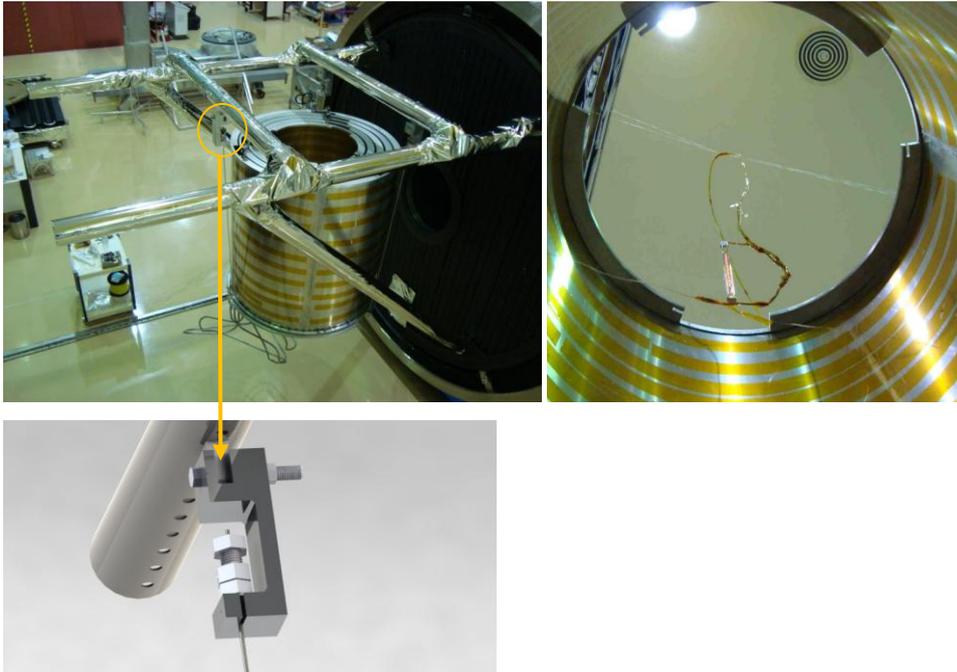


Figura 3.5 - Montagem do MNP na câmara, À direita: conjunto suspenso na câmara; em detalhe a representação do suporte de suspensão do conjunto. À esquerda, posicionamento da fonte no interior do cilindro mais interno.

Terminadas as etapas de montagem e preparação, foi dado início a primeira fase do ensaio. O sistema foi resfriado até aproximadamente 120 K no estágio mais externo e 80 K no estágio mais interno a fim de simular as condições de resfriamento no aLIGO. Quando a temperatura do cilindro mais externo chegou a 120K, o fluxo de N_2 através do MNP cessou, ao passo que o aquecimento do conjunto pela lâmpada começava. Uma corrente de valor ajustável atravessando a lâmpada, por efeito Joule, gerava o calor transmitido por ela. O gráfico abaixo mostra os valores de potência aplicados na lâmpada ao longo do ensaio.

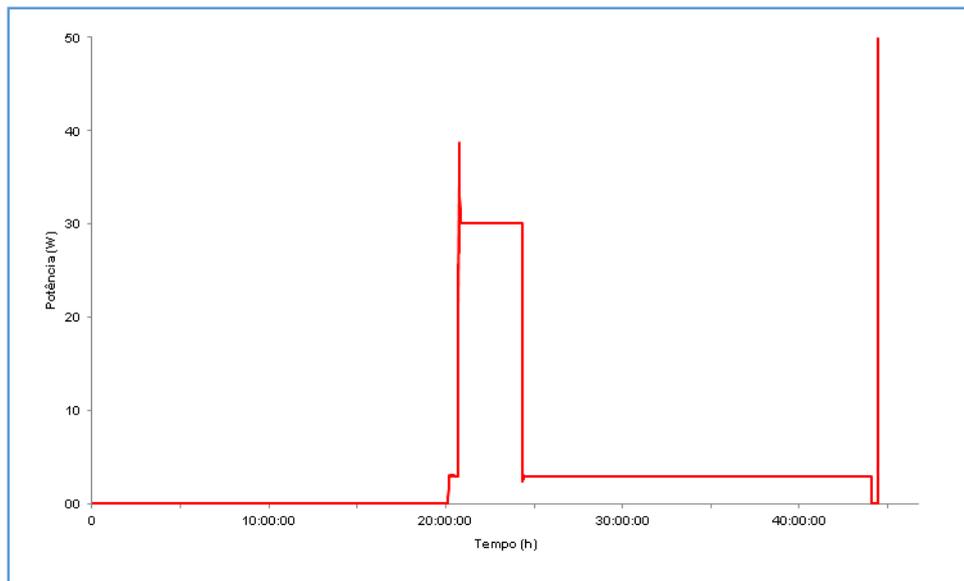


Figura 3.6 - Potência x Tempo

Esta fase do experimento foi a de maior relevância do ensaio, uma vez que esta colocaria a prova o sistema mediante as condições hipotéticas do aLIGO. Esta fase pode ser subdividida em três etapas:

- Etapa 1: A lâmpada é ligada e sua potência mantida próxima a 3W.
- Etapa 2: A lâmpada é aquecida a $\approx 30W$.
- Etapa 3: Após esse aquecimento o valor da potência é ajustado para próximo de 3W novamente.

O valor da potência da lâmpada foi ajustado propositalmente em 3W em duas etapas desta fase do ensaio, pois estima-se que é esta a potência emitida pelos espelhos do LIGO em função da incidência do laser em suas faces.

O fim desta segunda fase é marcado pelo fim do fluxo de N_2 nas paredes da câmara. Antes disso, a temperatura da câmara foi mantida próxima $-168\text{ }^\circ\text{C}$. Com o início da fase final do experimento, acompanhou-se o gradual aquecimento dos estágios do MNP consoante ao aumento de temperatura da câmara até o encerramento do teste, quando enfim a câmara foi aberta.

3.3 Simulação Térmica

Com os resultados experimentais do teste cujo procedimento foi descrito acima, foi realizada a modelagem da simulação visando reproduzir estes resultados. Usou-se as funcionalidades de simulação térmica do software *Solidworks* para definir as condições de contorno da análise, baseando-se na modelagem simplificada do MNP que foi elaborada. Foi simulada somente a segunda fase do experimento realizado no LIT, uma vez que o objetivo desta é descobrir como o MNP absorveria o calor emitido por um corpo aquecido e localizado em seu interior.

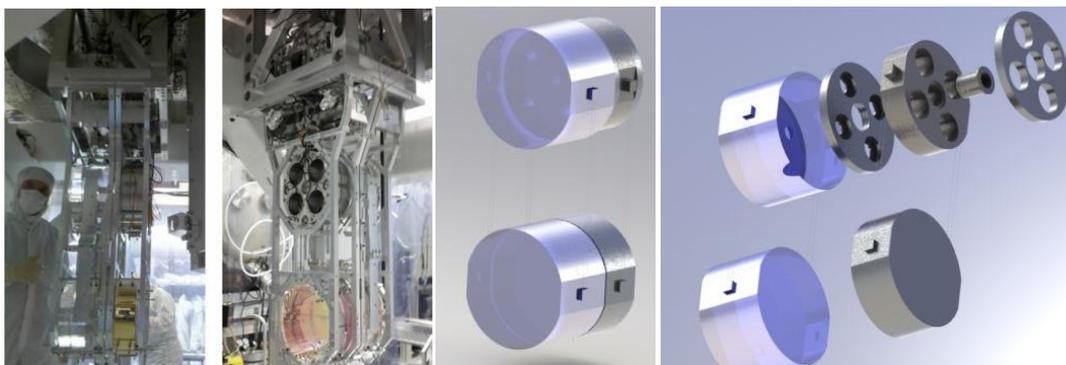


Figura 3.7 - Modelo do MNP utilizado nas simulações térmicas. À direita está uma plotagem térmica obtidas em uma das simulações.

Um dos parâmetros a se determinar foi a emissividade das faces dos cilindros. Uma vez que estes estavam parcialmente cobertos pela fita *Kapton*, *determinou-se* a porcentagem de superfície de cada cilindro coberta com a fita. Deste modo calculou-se uma média ponderada das emissividades do Alumínio e da fita *Kapton* em relação as porcentagens de área com e sem fita nos cilindros, obtendo assim um valor médio de emissividade para cada face de cada cilindro.

Definidas os parâmetros da simulação, executou-se a simulação repetidas vezes. Comparava-se então os resultados obtidos com os experimentais através de gráficos de temperatura versus tempo; até que os resultados simulados e experimentais convergissem.

Com os conhecimentos adquiridos nesta simulação, adaptou-se o modelo para reproduzir o calor gerado pelas massas de teste. Um modelo simplificado do último estágio da suspensão foi construído, com dimensões e geometria próximas aquelas a serem utilizadas no aLIGO.



*Figura 3.8 - Massas de teste do aLIGO, modeladas (esquerda) e reais (direita).
Fonte: Adaptado de Aston et al. (2012).*

A montagem dos espelhos foi inserida no modelo simplificado do MNP e permite que futuramente sejam realizadas novas simulações térmicas agora com as massas de testes servindo como fonte de calor.

3.4 Estrutura tubular

Visando aumentar a eficiência do MNP, novos modelos foram estudados e para tanto, é fundamental realizar a análise modal destes modelos. As novas estruturas foram modeladas e submetidas a simulações de frequência no *Solidworks*. Estas simulações permitiram conhecer os modos de ressonância dos modelos.

O mesmo software pode realizar a análise modal usando a técnica de análise de elementos finitos. Então após modelar as estruturas, realizou-se os estudos de frequência em cada modelo, extraindo assim seus parâmetros modais. No próprio software ainda pode-se determinar o peso das estruturas, seu volume e a localização do centro de massa de cada uma delas.

Com todos estes dados em mãos, foi possível então estabelecer uma comparação das estruturas modeladas até o momento.

4 RESULTADOS E DISCUSSOES

4.1 Modelagem em CAD

Nos tópicos deste item serão apresentadas as modelagens de alguns componentes do MNP, que de alguma forma se relacionaram com este projeto de iniciação científica.

4.1.1 Componentes para estudos térmicos

Foi iniciado o projeto de uma câmara térmica a ser instalada no Laboratório de Ondas Gravitacionais. O projeto ainda está em fase de desenvolvimento, mas já existe um projeto inicial de como esta câmara seria. Ela está representada através do modelo mostrado nas figuras abaixo. Na Figura 4.1 - Modelo inicial da câmara térmica., a direita está o conjunto montado da câmara, no centro é a vista do modelo em corte e à esquerda, a câmara sem sua parte móvel (tampa superior).

Esta câmara é extrema importância para o grupo pois permitirá que testes térmicos sejam realizados com maior agilidade.

Esta câmara funcionaria basicamente da seguinte maneira: Através da circulação de N_2 em torno do cilindro de cobre, as paredes deste são mantidas resfriadas e assim um corpo colocado em seu interior também pode ser resfriado, trocando calor com as paredes do cilindro por radiação. Ainda há a possibilidade de acelerar a troca de calor, através da condução. Para tanto, seriam usados os eletrodos imersos em um reservatório que contém material

criogênico. A pressão no ambiente interior às cápsulas fixa e móvel será controlada.

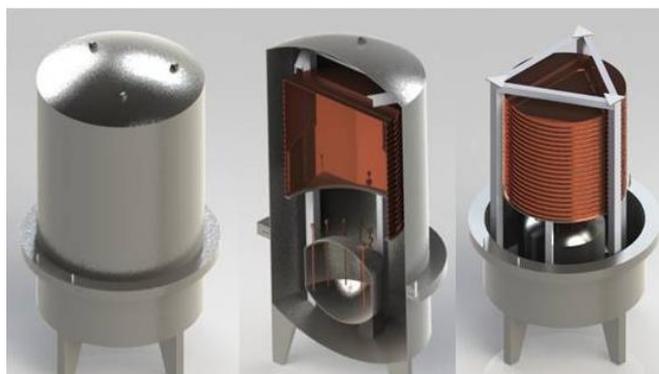


Figura 4.1 - Modelo inicial da câmara térmica.

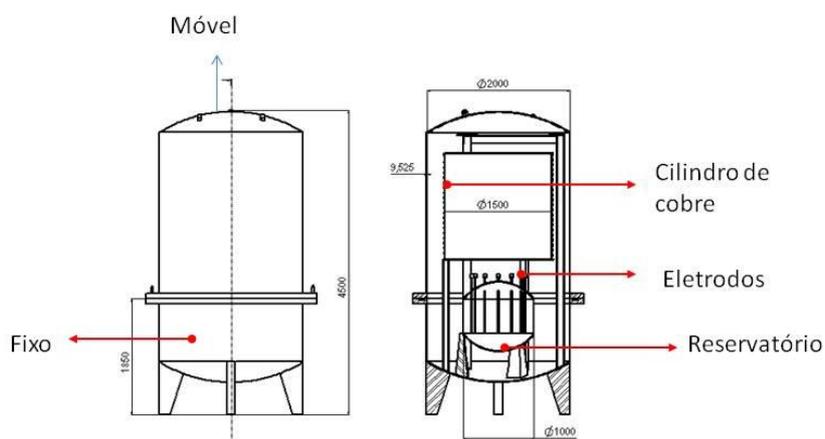


Figura 4.2 - Câmara térmica em 2D - Vista frontal e lateral em corte

Dando continuidade nos estudos sobre o desempenho térmico do MNP, foram feitos os desenhos das massas de teste do aLIGO e os modelos obtidos foram inseridos no modelo simplificado do MNP para simulação térmica (Figura 3.7). Os desenhos das massas de teste já foram apresentados na Figura 3.8. Na ilustração abaixo está a montagem dos espelhos no conjunto do MNP. Esta montagem segue a linha do modelo simulado do MNP; é um modelo simplificado visando tornar o processo de simulação o mais eficiente possível.

Este modelo servirá como base para futuros estudos de como o MNP absorveria o calor dos espelhos nas condições de operação do aLIGO.

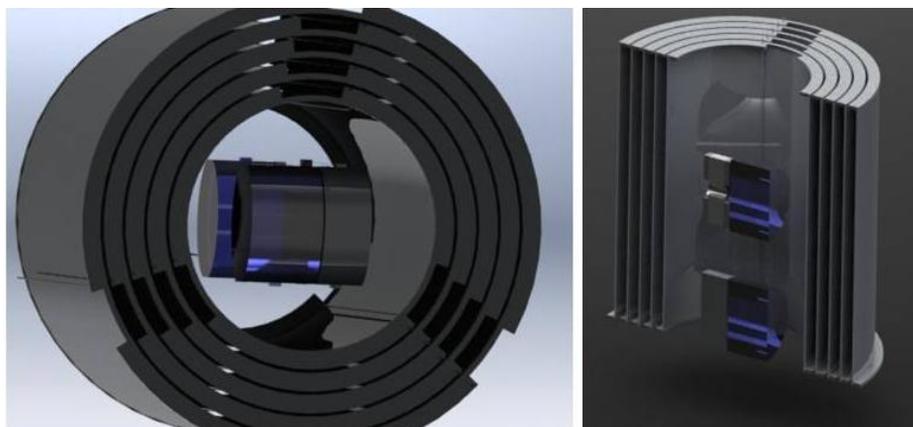


Figura 4.3 - MNP com massas de teste. À esquerda, a vista inferior do conjunto; à direita, a vista de sua seção transversal.

4.1.2 Montagem do MNP

Uma representação da modelagem em 3D do MNP pode ser vista na Figura 4.4. A partir deste modelo é que foram feitas as simulações térmicas e também a partir dele, podem ser configuradas novas análises de frequência com o modelo, variando a geometria e os parâmetros da simulação.

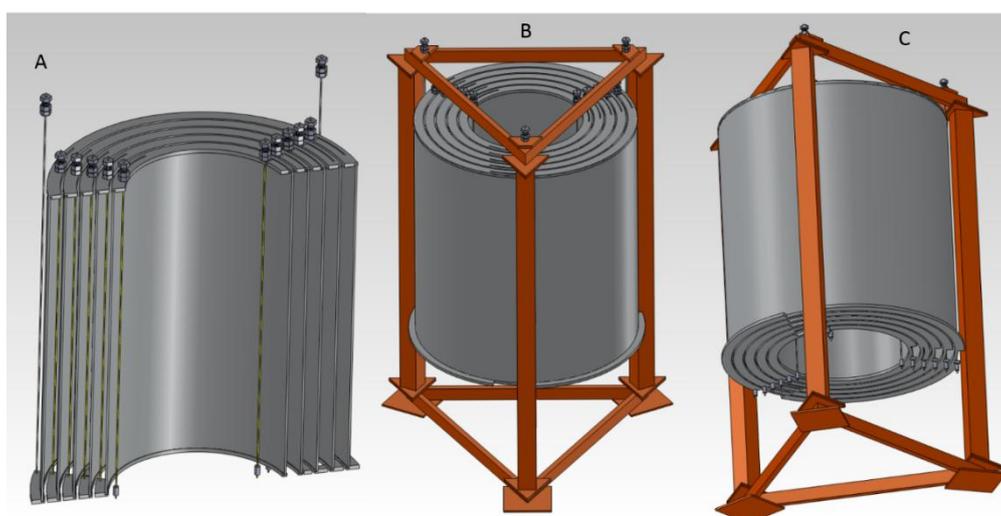


Figura 4.4 - Modelo do MNP visto em corte(A), de cima(B) e vista oblíqua inferior (C)

4.1.3 Molas de gás

Apesar de o padrão de interferência nos interferômetros ser alterado apenas pelo deslocamento horizontal do sistema, o acoplamento nas vibrações verticais do sistema pode resultar em oscilações horizontais.

Como citado anteriormente, a usinabilidade dos braços dos flanges foi um fator limitante para usa-los como suspensão vertical do sistema. Ao invés disso, foram usadas molas de gás para realizar esta função. Elas foram fixadas através das hastes, nos flanges superiores de todas as cascas cilíndricas, substituindo os braços dos flanges.

O conjunto das molas de gás é composto por um fole de borracha, com tampas de alumínio em suas extremidades, as quais contam com um furo central. Na tampa superior destas molas foi colocada uma válvula reguladora de pressão. Pelo interior deste conjunto passam um tubo flexível e uma mola metálica, sendo este o caminho para a haste. Este esquema está representado na Figura 4.5.

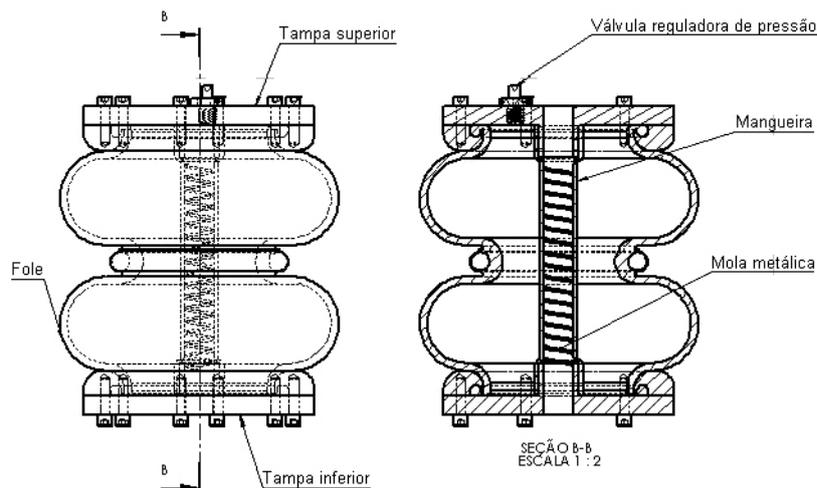


Figura 4.5 - Esquema de montagem das molas de gás

Esta configuração possibilitou controlar a constante de mola de cada uma das molas independentemente umas das outras, calibrando a pressão individualmente, de modo a encontrar o melhor ajuste para o sistema. A mangueira que atravessa a mola de gás é responsável pela vedação da mola, impedindo que o ar escape pelos orifícios das tampas. A mola de metal no centro da mangueira serve para que a mangueira não colapse sob pressão e, conseqüentemente, não toque a haste. Isto evita que a vibração dos flanges seja transmitida para a face superior da tampa metálica da mola; ela foi projetada para atenuar as vibrações apenas através de compressão.

A mola também foi modelada em ambiente 3D, e adicionada esquematicamente ao MNP. O modelo encontra-se na Figura 4.6.

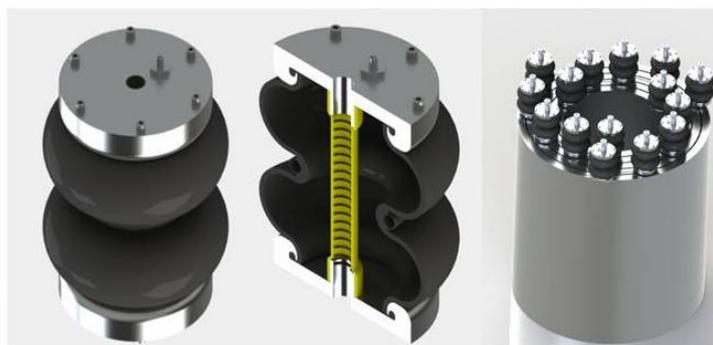


Figura 4.6 - Modelagem em ambiente 3D das molas de gás. À esquerda, a mola de gás montada; no meio, um corte transversal da mola e à direita, o posicionamento das molas sobre o MNP.

4.2 Ensaio Térmico

Nesta seção serão abordados os resultados experimentais e simulados do ensaio térmico. Vale lembrar que o ensaio térmico possui três fases distintas, a simulação por sua vez é referente a segunda fase do ensaio. Ao final compara-se os resultados obtidos nos dois métodos.

4.2.1 Resultados experimentais

O Ensaio térmico, desconsiderando o tempo gasto nas etapas de montagem e desmontagem levou 46 horas e 46 minutos.

O gráfico abaixo mostra os valores de pressão medidos na câmara durante o ensaio, em que "Edwards_Penning" e "Edwards_Pirani" são as bombas de vácuo utilizada no LIT.

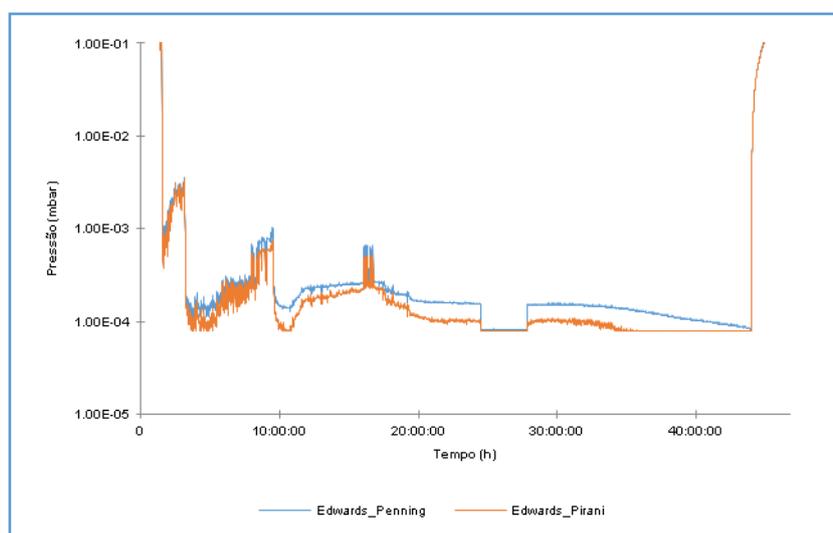


Figura 4.7 - Pressão na câmara x tempo

Apesar de o sistema ter passado nos testes prévios de estanqueidade, ainda assim a tubulação apresentou vazamentos e o fluxo de N_2 teve de ser reduzido, de modo à não prejudicar o vácuo na câmara.

Para mostrar a distribuição de temperatura entre os estágios do MNP adotou-se a seguinte convenção: A numeração dos cilindros seria feita contando do mais interno para o mais externo

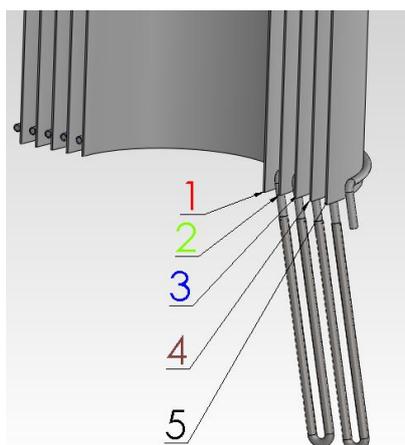


Figura 4.8 - Convenção adotada para nomear os cilindros

O gráfico de temperatura em função do tempo plotado a partir dos dados do experimento é mostrado na Figura 4.9. "TC n" indica a temperatura do cilindro de número "n" segundo a convenção explicitada acima; "T CAM" se refere a temperatura da câmara e "T (IN)" a temperatura de entrada do Nitrogênio líquido. As linhas pontilhadas delimitam as fases do ensaio; os textos na área do gráfico informam os eventos de cada fase.

Embora o fluxo de N_2 tenha sido restringido, ainda assim o sistema foi resfriado de maneira eficiente. Após 20 horas de circulação de N_2 por entre os tubos do MNP, o cilindro 1 (mais frio) atingiu $-187,47^\circ\text{C}$ e o cilindro 5 (mais quente) $-154,14^\circ\text{C}$. Para as gerações futuras do aLIGO, uma das propostas em estudo é resfriar as massas de teste à 120K ($-153,15^\circ\text{C}$); ou seja, com pouco mais de 20 horas de resfriamento, o MNP já estaria na faixa de temperatura dos espelhos do detector.

Com os cilindros então resfriados a quase 120K , é importante averiguar como o calor proveniente da lâmpada se dissipa por entre os cilindros. A Figura 4.10 é um detalhamento do gráfico da Figura 4.9 - Temperaturas dos cilindros ao longo do ensaio térmico em relação a segunda fase do ensaio. As linhas verticais separam o gráfico em três partes, onde se alternou valores de potência; estes valores são descritos na parte de cima do gráfico.

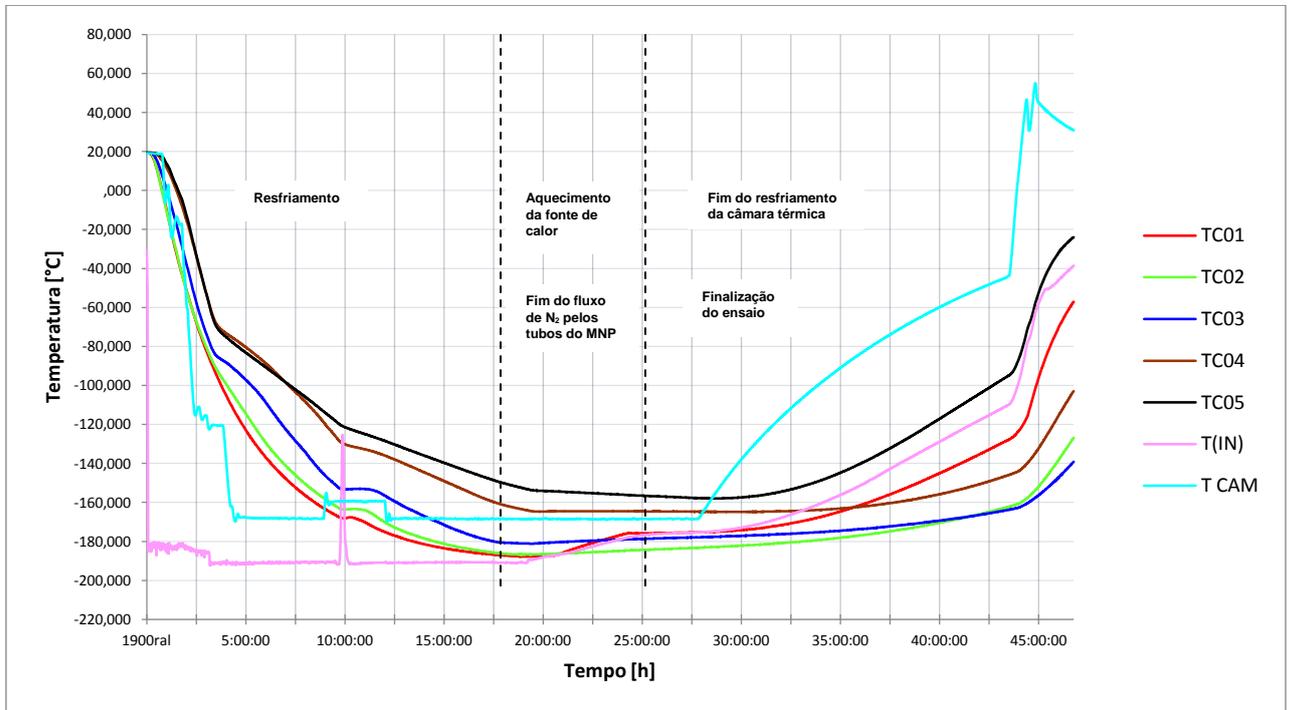


Figura 4.9 - Temperaturas dos cilindros ao longo do ensaio térmico

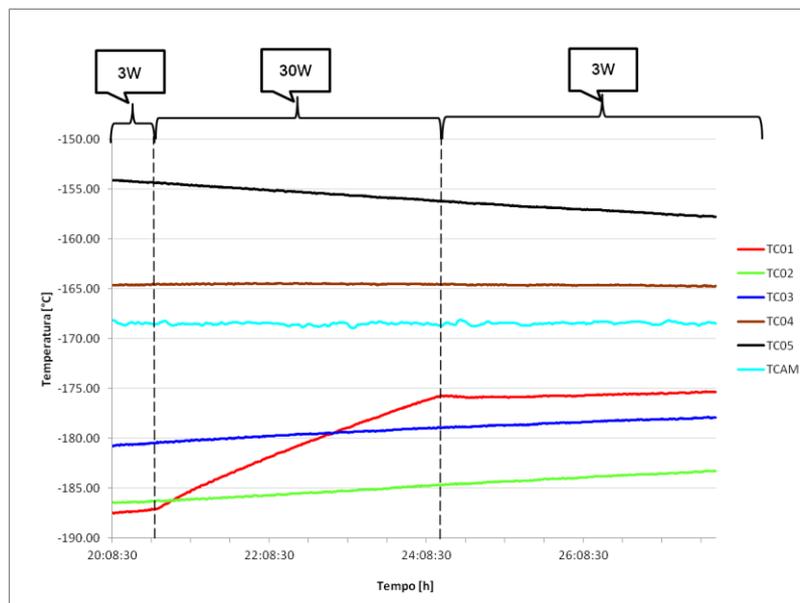


Figura 4.10 - Temperatura dos cilindros na segunda fase do ensaio

Os cilindros 4 e 5 não sofreram influência do calor proveniente da fonte nesta fase do ensaio; a temperatura do cilindro 5 caiu 3,72 °C enquanto a temperatura quase que permaneceu constante, diminuindo apenas 0,112°C. Isto mostra que os cilindros mais externos só podem ser afetados de maneira significativa por fontes de calor vizinhas ao MNP, considerando obviamente que a fonte de calor colocada no interior do MNP opere nos valores de potência desta etapa do ensaio.

Do gráfico das figuras (Figura 4.9) e (Figura 4.10) nota-se que o cilindro três tem a resposta mais lenta em relação à dissipação de calor. Mesmo com o aquecimento da lâmpada e com o aumento abrupto da temperatura da câmara quando o fluxo de N₂ cessou, a temperatura deste cilindro permaneceu estável; tanto é que ao fim do experimento este cilindro é aquele cuja a temperatura ficou menor dentre os 5 cilindros. Estas conclusões sobre os cilindros 3,4 e 5 são indícios que os 3 primeiros cilindros são uma espécie de “escudo” térmico de modo que o calor proveniente da lâmpada não pôde atingir os estágios mais externos do MNP.

A avaliação dos cilindros 1 e 2 será feita em cada etapa de potência da segunda fase do experimento.

- a) Etapa 1 (3W): Esta etapa inicial durou trinta e dois minutos e trinta segundos. Neste intervalo de tempo relativamente curto, a temperatura dos cilindros pouco variaram. Para o cilindro 1, a temperatura aumentou 0,35°C e para o cilindro 2, o aumento foi de 0,112°C.

- b) Etapa 2 (30W): Esta etapa durou pouco mais de três horas e meia. O cilindro 1 outrora o mais frio, agora tem temperatura maior do que a dos estágios subsequentes. O acréscimo na temperatura deste cilindro foi de 11,392°C. Para o cilindro 2, o acréscimo foi quase uma ordem de grandeza menor: 1,638°C.
- c) Etapa 3 (3W): Foi a etapa final da segunda fase do ensaio; durou também quase três horas e meia. A temperatura do cilindro 1 aumentou 0,384°C e a do cilindro 2 aumentou 1,409°C. A variação de temperatura do cilindro 2 agora foi maior do que no cilindro 1.

Uma comparação mais ampla é feita quando são analisadas taxas de variação da temperatura no tempo.

Taxa de variação da temperatura nos cilindros(°C/s)		
Etapa de Potência	Cilindro 1	Cilindro 2
Etapa 1 (3W)	$1,78 \times 10^{-4}$	$5,66 \times 10^{-5}$
Etapa 2 (30W)	$8,79 \times 10^{-4}$	$1,25 \times 10^{-4}$
Etapa 3 (3W)	$3,17 \times 10^{-5}$	$1,13 \times 10^{-4}$

Embora o valor de potência nas etapas 1 e 3 seja igual, as taxas de variações dos cilindros 1 e 2 não o foram. Acontece que por quase toda a segunda etapa, a temperatura do cilindro 1 se distanciou da do cilindro 2, e conseqüentemente o gradiente de temperatura entre eles também seguiu aumentando. Dos fundamentos teóricos apresentados na seção 2.2.3, sabe-se que a troca líquida de calor por radiação entre os cilindros é proporcional à diferença da quarta potência das temperaturas de suas temperaturas. Quando a potência da lâmpada retornou a 3W novamente, o cilindro 1 já estava a ceder calor para o cilindro 2 a uma taxa maior com que este último cedia para o cilindro 1 na

primeira etapa, visto que o gradiente de temperatura na etapa 3 foi muito maior do que o da etapa 1, o que resultou no aumento substancial de sua taxa de variação.

4.2.2 Simulação

Para modelar a simulação do ensaio térmico discutido na seção anterior, foram necessárias duas tarefas paralelas:

- Definição das condições de contorno da simulação
- Construção do modelo em CAD.

Unindo o fato de que o fluxo de N_2 não ter sido constante no ensaio, ao grande interesse na dissipação do calor da lâmpada por entre os estágios pendulares, optou-se por simular apenas a segunda fase do ensaio. Portanto, as primeiras condições de contorno são as temperaturas experimentais dos cilindros ao término da primeira fase do ensaio.

De acordo com a lei de Fourier (2.6), a transferência de calor por condução é proporcional à área de seção transversal (A) por onde flui o calor, ao passo que ela é também inversamente proporcional ao comprimento de condução (L). Para os cilindros, A é grande e L pequeno quando comparados com os respectivos valores nas hastes, flanges, tubos de Alumínio em torno dos cilindros e tubos conectores de inox; ou seja, o calor trocado por condução nos cilindros é muito maior do que nos outros componentes citados. Por isso estes componentes foram omitidos na simulação, a fim de simplificar o modelo ao máximo. Os flanges não foram omitidos na análise, pois embora a condução nos flanges não seja tão expressiva, eles afetam o fator de forma da radiação das superfícies dos cilindros para o ambiente.

Outra simplificação feita foi desprezar qualquer tipo de troca de calor por convecção. Se para que esta ocorra deve haver movimento do fluido da vizinhança, sob as condições de pressão em que o ensaio foi realizado, tal troca de calor não foi portanto considerada.

Logo a troca de calor preponderante no ensaio térmico foi a radiação. Deste modo a simulação consistiu em uma análise térmica transiente de um modelo simplificado do MNP. Esta simulação foi configurada para cobrir todo o tempo que perdurou a segunda fase do ensaio térmico, em que as superfícies dos cilindros e da lâmpada trocam calor entre si e com o ambiente, no caso o ambiente foi definido com a temperatura das paredes resfriadas da câmara.

As condições de contorno da simulação foram basicamente então as temperaturas iniciais da primeira fase do ensaio térmico do LIT, a temperatura ambiente da câmara, as emissividades e radiações das superfícies dos cilindros e a potência térmica emitida pela lâmpada.

Como citado anteriormente, na simulação somente foram considerados cilindros, flanges e a lâmpada. Isto porque além da pouca influência dos componentes omitidos no resultado final desta fase do ensaio, simplificar o modelo torna o processo de simulação mais eficiente. As simulações transientes e que envolvem radiação requerem grandes recursos computacionais, além do que consomem muito tempo; simulações que retornam resultados a cada 30 segundos levaram mais de 60 horas para o software solucioná-las. Por isso o modelo foi simplificado de modo a tornar a evitar complexidades desnecessárias no modelo e assim poupar tempo e recursos computacionais.

A lâmpada infravermelha possui uma geometria muito complexa e realizar a sua modelagem exata além de ser uma tarefa difícil, tornaria as simulações ainda mais demoradas. Sendo a lâmpada constituída de um filamento

helicoidal cilíndrico contido em um bulbo, a modelagem final da lâmpada no *Solidworks* consistiu em um corpo cilíndrico com os topos em perfil elipsoide. A imagem abaixo mostra a lâmpada real e o modelo construído em CAD.



Figura 4.11 - Lâmpada dissipadora de calor. Da esquerda para direita: Lâmpada real e Modelo simulação.

*Fonte: <http://www.heatrodshop.com/product/qts>
(Acesso em 14/07/2014)*

Porém os valores de potência experimentais são calculados como função da corrente elétrica que atravessa a lâmpada. Se na simulação aplicarmos somente a potência no corpo da fonte, o software leva em conta o tempo para aquecer todo o corpo, o que por sua vez resulta um atraso na resposta da curva simulada em relação a experimental. Este atraso se dá tanto no tempo para o aquecimento do corpo mediante ao aumento de potência, quanto na diminuição de sua temperatura quando a potência diminui. Para contornar este problema, aumentou-se a condutibilidade térmica do material e diminuiu-se seu calor específico, para deste modo tornar a resposta do corpo, mediante a potência térmica, instantânea.

O gráfico abaixo compara então os resultados obtidos na simulação em relação aos experimentais. As linhas tracejadas representam os resultados simulados e as linhas sólidas, os resultados experimentais.

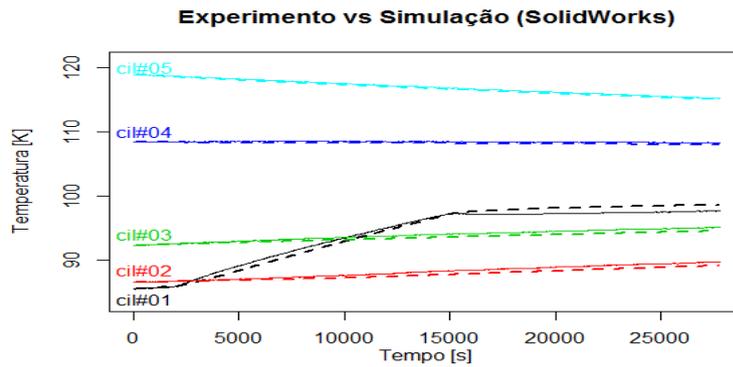


Figura 4.12 - Experimento (linha cheia) e simulação (linha tracejada).

Outros modelos foram testados, porém esta configuração foi a que se aproximou mais dos resultados experimentais. Um deles por exemplo, tinha como lâmpada não um corpo sólido, mas sim uma casca cilíndrica. O resultado obtido foi o seguinte:

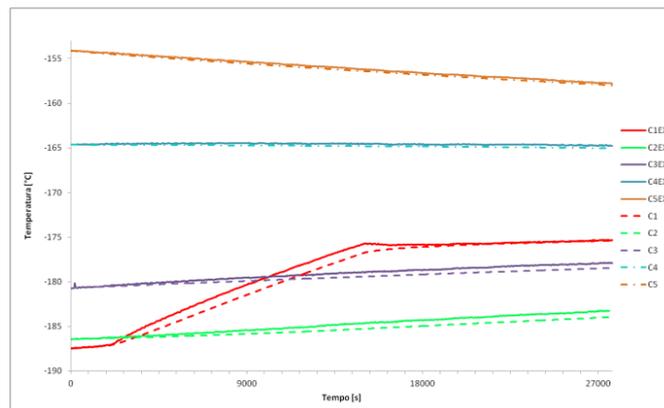


Figura 4.13 - Experimento (linha cheia) x Simulação de um modelo alternativo de lâmpada (linha tracejada)

Este modelo mostra-se inadequado porque inclui uma nova variável, que é a espessura da casca. Além disso a taxa de variação de calor na etapa de 30W, da curva simulada do cilindro 1 está menor do que a curva experimental do mesmo cilindro, muito embora nas etapas finais e iniciais as curvas estejam coincidentes.

Estes gráficos foram obtidos após sucessivas simulações, em que as condições de contorno foram ajustadas até obter os resultados mostrados acima. Apesar das simplificações e aproximações realizadas na simulação, ainda assim os resultados simulados não chegam a divergir 2°C dos resultados experimentais. Além do mais, deve-se ter em mente de que essas simulações são feitas no âmbito de verificar o quanto de calor que o MNP absorverá dos espelhos do aLIGO. Tem-se a disposição informações técnicas sobre a geometria do espelho e pode-se fazer a sua modelagem com relativa facilidade. Além disso tem dispõe-se também de informações técnicas dos espelhos, através das bases de dados da LSC, como curvas de calor específico e emissividade, que não se dispunham para caracterizar a lâmpada.

O que se tem agora é um modelo pronto para ser simulado com as massas de teste do aLIGO, além de todo o *Know-how* adquirido nas tentativas de reprodução dos resultados experimentais do ensaio do LIT. Os trabalhos desenvolvidos com as simulações até o momento permitem realizar novas simulações, agora com as massas de teste no lugar da lâmpada e em cima dos resultados obtidos, propor melhorias no MNP visando aumentar sua performance térmica.

4.2.3 Comparação: Simulação x Ensaio

As tabelas à seguir comparam os resultados obtidos nos pelos dois métodos. Deste modo pode-se fazer uma avaliação numérica das disparidades entre simulação e experimento. Os dados usados como base para calcular os valores desta tabela encontram-se no 4.4Apêndice A :

Na Tabela 4.1 constam os desvios percentuais, dos valores simulados em relação aos experimentais, nas temperaturas dos cilindros ao final de cada etapa da segunda fase do ensaio. A divergência é aparentemente mínima, não chegando a 1%. Isto porque os dados são referentes ao final de cada etapa e,

após certo tempo o sistema tende a alcançar o equilíbrio térmico; quando tal condição é alcançada as temperaturas também tendem a estabilizam. Mas quando o sistema ainda está no regime transiente os valores de temperatura oscilam mais; repetir exatamente todas as flutuações de temperatura nas condições do ensaio realizado seria demasiadamente complexo e desnecessário. Portanto os resultados simulados se tornam mais precisos à medida que o sistema se aproxima da condição de equilíbrio; levando em conta esta condição, pode-se inferir que a simulação foi configurada com êxito.

Tabela 4.1 - Desvio percentual da temperatura dos cilindros calculada na simulação térmica.

Etapa	C1	C2	C3	C4	C5
1	0.010%	0.003%	0.025%	0.040%	0.066%
2	0.420%	0.311%	0.265%	0.142%	0.104%
3	0.126%	0.366%	0.312%	0.166%	0.092%

Entretanto a tabela acima compara apenas valores isolados de temperatura; comparar a variação da temperatura dos cilindros, em um dado intervalo de tempo, possibilita uma avaliação mais geral do experimento. A taxa de variação (T.V.), que é apresentada na tabela seguinte, foi obtida calculando-se a razão da variação de temperatura pela variação de tempo, em cada cilindro, para todas as etapas desta segunda fase do ensaio. O termo "Exp" se refere aos dados experimentais e "Sim", aos da simulação.

Tabela 4.2 - Comparação entre a taxa de variação de temperatura dos cilindros no ensaio e na simulação.

Etapa	Dado	C1	C2	C3	C4	C5
1	T.V. Exp.	1.78E-04	5.66E-05	1.23E-04	3.03E-05	-1.33E-04
	T.V. Sim.	1.69E-04	5.35E-05	1.01E-04	-3.03E-06	-1.84E-04
	Desvio percentual	5.11%	5.36%	18.44%	110.00%	38.78%

2	T.V. Exp.	8.69E-04	1.25E-04	1.17E-04	1.38E-06	-1.43E-04
	T.V. Sim.	8.13E-04	8.18E-05	8.41E-05	-1.15E-05	-1.48E-04
	Desvio percentual	6.34%	34.68%	28.06%	933.33%	3.26%
3	T.V. Exp.	3.17E-05	1.13E-04	8.22E-05	-1.50E-05	-1.25E-04
	T.V. Sim.	1.07E-04	1.05E-04	7.58E-05	-1.82E-05	-1.24E-04
	Desvio percentual	239.15%	6.80%	7.78%	21.05%	1.13%

O cilindro 4 é aquele cujos desvios na T.V. foram maiores. Isto porque a variação de temperatura neste cilindro é da ordem de 0,1°C; na etapa 2 a variação de temperatura nele foi de 0,02 °C. O mesmo vale para o cilindro 1 na etapa 3, porque sua temperatura nesta etapa também começa a se estabilizar. Por isso então aparecem estes valores demasiadamente altos nos desvios, porque para a simulação reproduzir exatamente esta variação, seria necessário que o Software e todas as informações fornecidas à ele, tivessem uma precisão de décimos de graus Celsius.

Os cilindros 2 e 3 por sua vez tem um pico de desvio na etapa 2. Como outrora citado, a troca líquida de radiação é proporcional à diferença da quarta potência das temperaturas; ela torna-se mais significativa conforme a variação de temperatura aumenta. Este pico então pode ser proveniente de um erro pequeno nos valores de emissividades definidos na simulação para as superfícies dos cilindros, uma vez que os outros parâmetros de radiação o Software calcula automaticamente. Além disso definiu-se as emissividades como constantes, quando na realidade elas não o são. Então pequenos desvios nas emissividades definidas e a variação destas com a temperatura, podem ter originado este pico na Etapa 2.

O comportamento do cilindro 5 na simulação reforça afirmação feita nos parágrafos anteriores. Este cilindro não sofre qualquer influência significativa

do calor da lâmpada, ele troca calor com o ambiente e principalmente com o cilindro 4. Este último quase não tem sua temperatura variada e a câmara nesta fase do ensaio, permanece com temperatura próxima a $-168\text{ }^{\circ}\text{C}$. Conforme a temperatura do cilindro 5 se aproxima da temperatura da câmara (ou seja, entra em equilíbrio com ela), menor se torna o desvio na T.V. da temperatura na simulação.

As discrepâncias na Tabela 4.2 não desqualificam os resultados das simulações, pois em sua maioria elas estão dentro de valores aceitáveis e aquelas com valores exorbitantes, tem justificativas lógicas conforme as discussões dos parágrafos anteriores. Além disso, a plotagem dos gráficos não deixa dúvidas que o comportamento simulado do MNP retratou com boa aproximação a segunda fase do ensaio térmico.

4.3 Resultados sobre as novas estruturas tubulares

Como uma alternativa ao modelo apresentado até o momento, estuda-se um novo sistema de estrutura tubular em vez de cascas cilíndricas. A proposta é encontrar um sistema seriado de estruturas como as que são mostradas abaixo. Cada estrutura tubular comporia um dos estágios do sistema multipendular. Esta mudança permitiria melhorias importantes no âmbito da atenuação vibracional em baixas frequências.

Em um dos casos estudados, uma solução aplicada é a de aproximar o centro de massa do sistema aos pontos de suspensão inferior. Neste patamar estuda-se um componente para ser adaptado ao modelo, de modo a exercer uma função semelhante aos flanges do modelo de cilindros aninhados.

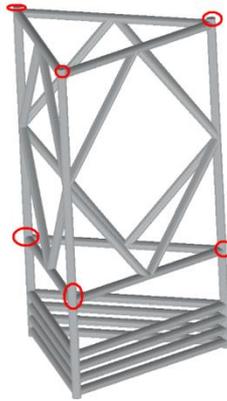


Figura 4.14 - Estrutura tubular em fase de estudo, proposta para compor um novo sistema seriado. Peso da estrutura: 24 Kg. Em destaque: pontos de suspensão da estrutura.

Através do *Solidworks* pode-se ilustrar o centro de massa dos modelos. Eles são representados pela tríade mostrada na Figura 4.15:

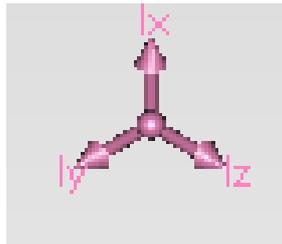


Figura 4.15 - Ícone representativo do centro de massa dos modelos construídos no Solidworks.

A Figura 4.16 permite comparar a altura dos centros de massa do MNP cilíndrico e de estrutura tubular, em relação aos seus respectivos pontos de apoio.

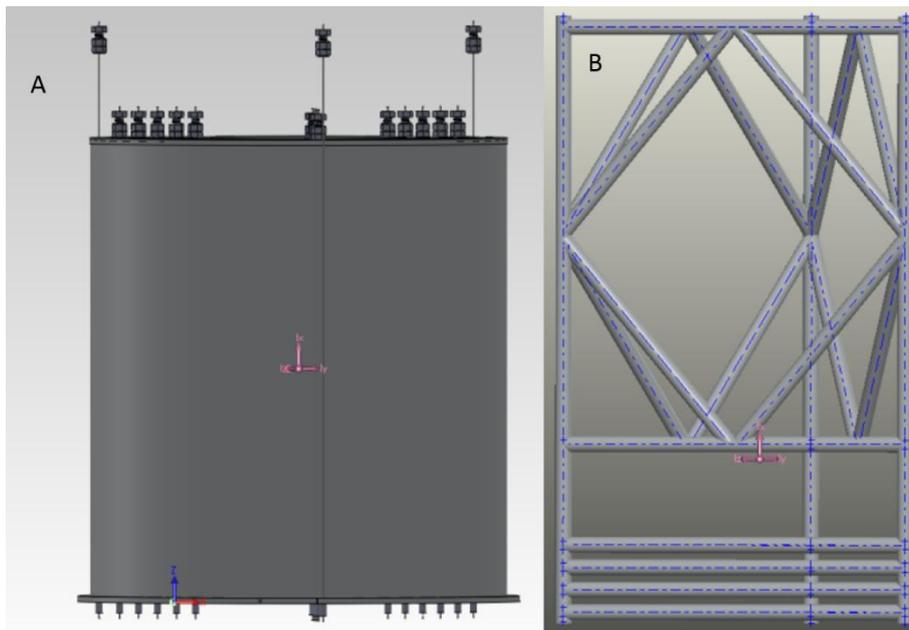


Figura 4.16: Comparação entre as alturas do centro de massa do modelo atual (a) e de um possível modelo futuro (b).

Adote-se um estágio pendular intermediário do MNP de cascas cilíndricas. O movimento pendular do estágio vizinho e imediatamente mais externo a este, acopla-se com os deslocamentos angulares do cilindro em questão em torno de seu centro de massa. Isto porque que há uma distância considerável entre o centro de massa do sistema e os flanges inferiores, que suspendem os cilindros. Porém ao aproximar o centro de massa do ponto de apoio, restringe-se a formação de tal acoplamento. Além disso, a estrutura tubular apresenta outras vantagens:

- É possível preencher os tubos de modo a atenuar os modos vibracionais da estrutura;
- Aumentar o isolamento vibracional através das molas, usando a estrutura tubular como um reservatório de gás. Deste modo seria possível aumentar a eficiência das molas de gás e assim atenuar as vibrações verticais;

Através das ferramentas do Solidworks, buscou-se um modelo com o menor número de modos de ressonância possíveis, ao passo que este ainda permita

os benefícios de uma estrutura tubular. Os dados obtidos, apresentados na permitem comparar os modos de ressonância das duas gerações do MNP Tabela 4.3. Estes dados permitem inferir que a estrutura tubular é equivalente à cilíndrica no que concerne aos modos de ressonância, comprovando assim a sua viabilidade como novo modelo. Entretanto da observação da curva de sensibilidade do LIGO, apresentada na Figura 2.5, nota-se que a sensibilidade máxima do sistema se estende na faixa entre 50 à \approx 500 Hz, ao passo que ainda há modos de ressonância da estrutura nesta banda de frequências. Essas ressonâncias são importantes pois o sistema não será eficiente se atenuar os ruídos sísmicos e ao mesmo tempo adicionar outras fontes de vibrações ao sistema.

Tabela 4.3 - Comparação das frequências de ressonância das versões cilíndrica e tubular do MNP.

Frequências de ressonância das estruturas (Hz)			
Estrutura cilíndrica	Estrutura tubular	Estrutura Cilíndrica	Estrutura Tubular
29,24	83.86 / 83.91 / 87.17	221,92	302,66
43,22	134,13 / 134,14	224,18	349,00
72,53	211,13	284,24	-
88,01	224,29	301,20	-
110,29	233,64	303,03	-

Vale ressaltar também que as frequências listadas acima correspondem às faixas de ressonância relevantes para o isolamento vibracional do sistema. Tais frequências geram deslocamentos nos pontos de suspensão da estrutura tubular e podem ser transmitidas para os demais estágios pendulares até afetar o estágio central, comprometendo a sensibilidade da detecção.

Nas figuras Figura 4.17 e Figura 4.18 são mostradas duas plotagens de modos de ressonância do sistema. Estas plotagens foram obtidas a partir das simulações realizadas no *Solidworks*. As peças simuladas são apresentadas em um gradiente de cores; em que cada cor corresponde a uma amplitude de deformação. À direita está uma escala que relaciona numericamente os deslocamentos com as suas respectivas cores.

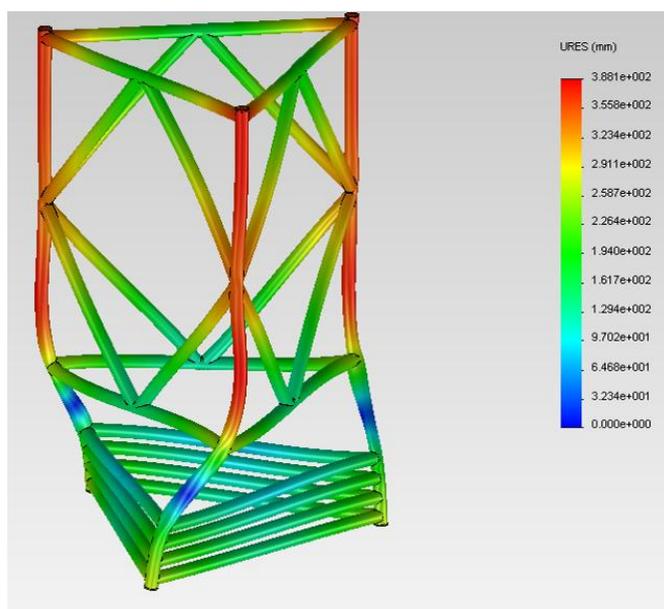


Figura 4.17 - Plotagem referente ao modo de ressonância da estrutura na frequência de 87,16Hz.

Nota-se que este modo resulta em deslocamentos significativos nos nós dos pontos de suspensão, já destacados na Figura 4.14.

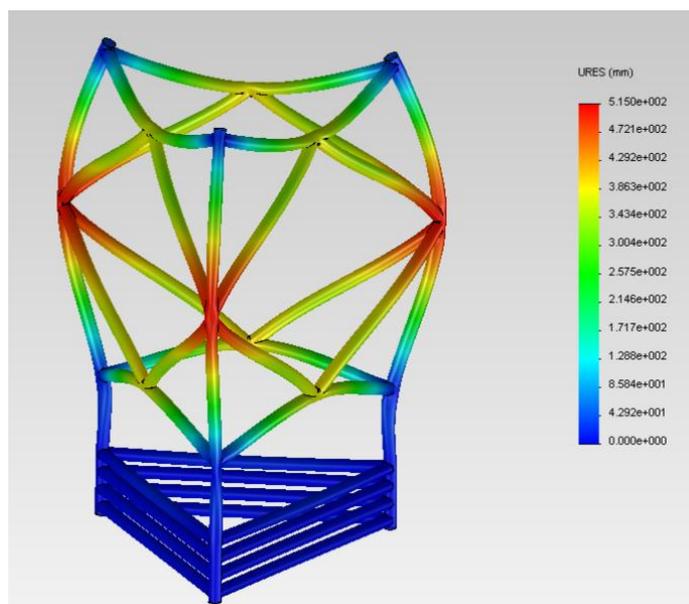


Figura 4.18 - Plotagem do modo de ressonância da estrutura tubular referente à frequência de 99,67 Hz.

Apesar de na frequência da plotagem acima, a estrutura sofrer deformações significativas, o mesmo não se pode dizer sobre os nós referentes aos pontos de suspensão do sistema. Sendo assim, modos como estes não são relevantes quanto aqueles que constam na tabela anterior.

Este modelo não é definitivo. Porém dentre todos os modelos ensaiados, este possui a melhor relação custo-benefício. A Figura 4.19 mostra algumas estruturas que também foram modeladas visando superar as dificuldades da configuração atual do MNP. O material escolhido dentro do software para estes modelos foi o Alumínio 5052-O.

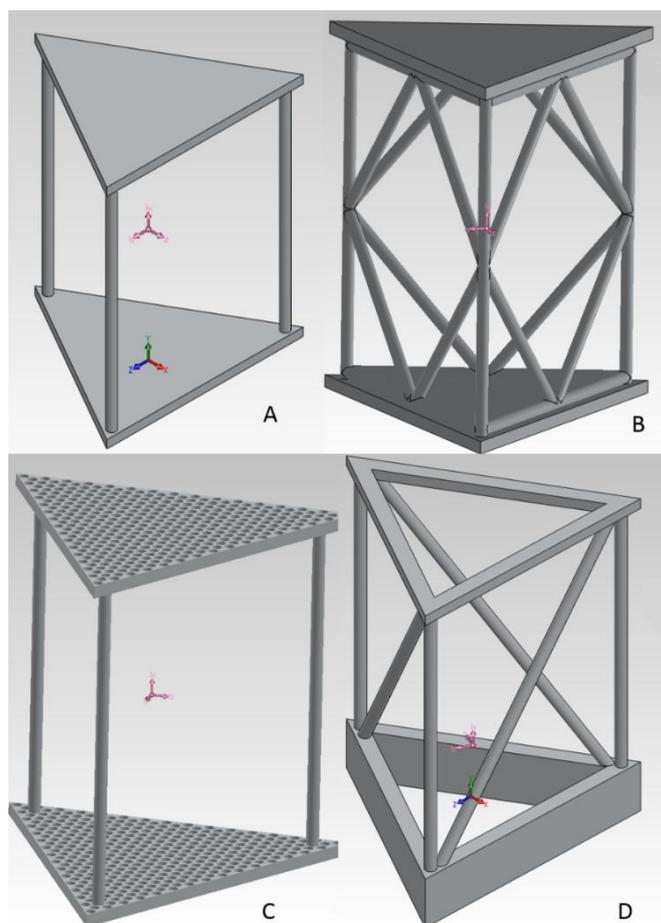


Figura 4.19 - Estruturas de bases triangulares

As massas e volumes dos respectivos modelos apresentados na Figura 4.19 são apresentadas a seguir:

- (a) 188,725 Kg e 70,419 dm³
- (b) 196,186 Kg e 73,205 dm³
- (c) 103,416 Kg e 38,588 dm³
- (d) 222,146 Kg e 82,891 dm³

Outras estruturas, de bases cilíndricas, também foram testadas e podem ser vistas na Figura 4.20.

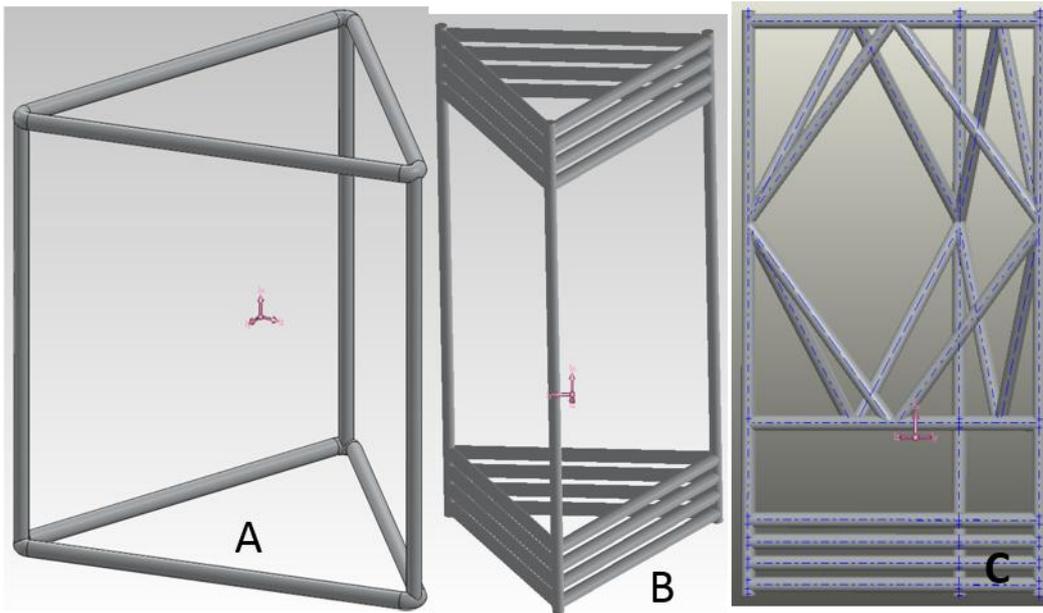


Figura 4.20 - Estruturas de bases triangulares, com tubos cilíndricos.

As massas e volumes das estruturas apresentadas na Figura 4.20 são apresentadas a seguir:

- (a) 24,200 Kg e 9,04 dm³;
- (b) 22,689 Kg e 8,466 dm³;
- (c) 23,941 Kg e 8,93 dm³;

Todos estes modelos passaram por ensaio de frequência para verificar quais frequências podem ser mais prejudiciais ao sistema. A Tabela 4.4 e a Tabela 4.5 contém para cada um dos modelos, as frequências de ressonâncias que afetam os pontos de suspensão das estruturas.

Tabela 4.4 - Frequências relevantes de ressonância em relação aos modelos de base triangular.

Frequências de ressonância das estruturas tubulares (Hz)

Figura 17

(a)	(b)	(c)	(d)
24,808	66,416	18,578	92,629
32,878/32,89	74,687	25,283/25,287	135,81
213,32	110,09/110,18	58,956	192,93
246,25/246,26	230,18	138,96	201,3
346,95	333,57/333,67	144,65/144,76	231,69
361,54/361,67	390,09	290,61	259,13
490,51/490,6		314,96 / 315,05	282,82
-	-	401,43	332,86
-	-	483,31	336,8
-	-	-	352,49
-	-	-	374,94
-	-	-	423,1
-	-	-	468,31

Tabela 4.5 - Frequências relevantes de ressonância em relação aos modelos de base cilíndrica.

Frequências de ressonância das estruturas tubulares (Hz)

Figura 18

(a)	(b)	(c)
15,29	21,007	83.86 / 83.91 / 87.17
18,647/18,748	30,135/30,174	134,13 / 134,14
83,508/83,54	130,27	211,13
85,429/87,404/87,558	163,09/163,15/165,44/165,55	224,29
128,99	172,85/172,94	233,64
243,77/245,51	245,42/245,5	302,66
255,25	292,39	349
286,51/286,55/287,75/287,82 / 289,14/289,17	296,32/296,51	-
413,51	341,28	-
450,69/451,05	347,9/347,94	-
-	357,05	-
-	435,11	-
-	440,52/441,16	-
-	483,59/484,18	-
-	494,45	-

Para avaliar todos os resultados obtidos, foram adotados 3 critérios:

- Distância entre os centros de massa e os possíveis pontos de suspensão;
- Peso e volume;
- Modos e frequências de ressonância;

Com estes critérios para a análise em questão, pode-se analisar quais modelos dentre os projetados, poderão ou não integrar as gerações futuras do aLIGO.

Com respeito à distância entre o centro de massa e os pontos de suspensão, todos os modelos, exceto o (d) da Figura 4.19 e o (c) da Figura 4.20, não seriam adequados; eles teriam o mesmo problema já explanado da configuração atual do MNP, sobre oscilações acopladas entre os estágios.

No que tange à massa e volume, os modelos de bases triangulares com tubos cilíndricos (Figura 4.20) são muito mais vantajosos do que os de bases triangulares, já que o mais leve destes pesa mais de 4 vezes mais ao modelo de base cilíndrica mais pesada. Deve-se ter em mente que estas estruturas seriam apenas um dos estágios do MNP, que atualmente conta 5 cilindros aninhados; modelos mais pesados implicariam em custos mais elevados para sua produção e dificuldades em sua montagem e suspensão.

Por fim, no que concerne os modos de ressonância, dentre os modelos ensaiados, dois podem ser destacados por terem o menor número de modos: o modelo (b) da Figura 4.19 e o modelo (c) da Figura 4.20.

Os resultados comprovam que dentre todas as estruturas tubulares projetadas pelo *GWINPE* até aqui, aquela mostrada no início deste capítulo e definida agora como (c) da Figura 4.20, é a mais eficiente. Ela é tão leve quanto as outras estruturas tubulares, permite alterações no seu projeto para minimizar a diferença de altura entre o seu centro de massa e os seus pontos de apoio e, ainda é a segunda estrutura com menos modos de ressonância, com apenas um modo a mais do que a primeira, o modelo (b) da Figura 4.19.

4.4 Modos normais e medidas de isolamento vibracional do MNP

Na seção 2.1 foi dada uma introdução sobre oscilações e o fenômeno da ressonância; a fim de demonstrar a importância dos modos normais do MNP para este trabalho. O MNP possui 30 graus de liberdade, ou seja, 30 equações distintas de movimento. E algumas destas ainda interferem umas nas outras, ou seja, são acopladas.

Para avaliar a capacidade de atenuação do sistema, é preciso calcular a sua função de transferência. Este cálculo consiste basicamente na razão entre o quanto de ruído que chega no cilindro mais interno e o ruído total que entrou de fato no sistema, isto é, sinal de saída sobre o sinal de entrada. Este cálculo seria feito através de cálculos analíticos e também experimentalmente, entretanto estas tarefas não foram cumpridas a tempo de integrarem os resultados finais deste trabalho de iniciação científica.

Para que os resultados das simulações estivessem em uma margem satisfatória, foram necessários os três meses que antecederam a entrega deste trabalho; não sobrando tempo hábil para realizar os cálculos analíticos.

O MNP precisou ser adaptado para o ensaio térmico. Para adequá-lo novamente a sua montagem ele precisou sofrer novas modificações. Além disso a nova montagem incorporou as molas de gás, e a confecção e montagem das 15 molas do sistema também demandaram mais tempo. Somase à isto também o atraso no fornecimento nos instrumentos de medição de vibração. Todos estes fatores impediram as medidas de vibração do sistema no período que durou esta iniciação científica. Por outro lado o sistema integrado com as suspensões pneumáticas já foi montado, como ilustrado nas seções anteriores. Também já estão disponíveis os aparelhos de medição, restando agora realizar a experimentação científica.

Com os dados analíticos em mãos em conjuntos com as medições experimentais, será possível em fim determinar a função de transferência do sistema e avaliar sua real eficiência no que concerne ao isolamento vibracional.

CONCLUSÕES

Os desafios do aLIGO para detectar ondas gravitacionais estão sendo trabalhados. Há a perspectiva de nas suas próximas corridas científicas aconteça a tão esperada detecção, o que poderia alterar a visão do ser humano sobre o cosmos. A barreira sísmica em baixas frequências é um destes desafios e vem sendo trabalhado pelo *GWINPE*, através do sistema de isolamento vibracional chamado *Multi-Nested Pendula* (MNP). O ruído térmico da suspensão dos espelhos também é significativo na faixa de 10 Hz e por isso foi avaliado também o desempenho térmico do conjunto.

A modelagem em CAD dos componentes do MNP foi importante como um registro dos trabalhos realizados, ao passo que especialmente os modelos do MNP abriram caminho para simulações com o MNP, através da análise de elementos finitos do *Solidworks*.

Em relação a este desempenho térmico, um passo importante dado. O experimento realizado com o sistema, permitiu inferir que ele possui uma ótima capacidade de isolamento térmico em, em que o calor absorvido no estágio mais interno é quase que totalmente dissipado no sistema, antes mesmo de atingir o estágio mais externo. A absorção do calor de uma fonte no centro do MNP é uma característica apreciável para o sistema, pois isso poderia melhorar a performance do conjunto de suspensão do LIGO em relação ao ruído térmico.

Para então aprofundar os estudos sobre o desempenho térmico do MNP, era necessário validar *Solidworks*, buscando reproduzir os resultados experimentais. Com boa aproximação, os resultados simulados de fato se aproximaram dos experimentais. Um próximo passo seria adaptar o modelo analisado para simular as condições que o MNP ficaria sujeito no LIGO. Além disso a construção de uma câmara térmica no Laboratório onde este trabalho

foi desenvolvido, permitirá acelerar o processo de experimentação térmica do MNP.

Foram realizadas também simulações de frequência em configurações alternativas do MNP, e assim obteve-se uma estrutura mais eficiente para o sistema. Tal estrutura pode resolver o problema entre as distâncias dos pontos de apoio e o centro de massa; além do fato da geometria tubular permitir o uso de seu interior para otimizar a mola de gás, servindo para ela como um reservatório de gás ou ainda o interior dos tubos ser preenchido com material para atenuação dos modos do sistema. Entretanto este modelo ainda não foi capaz de livrar a faixa de sensibilidade do aLIGO, situada na banda entre 50 e ≈ 500 Hz.

Resta saber agora a função de transferência do MNP. Usando cálculos analíticos para realizar a descrição teórica, será possível estimar a capacidade de atenuação do sistema. O conjunto foi montado novamente após o ensaio térmico e agora com a adição das molas de gás. Ele está pronto para ser medido e a partir de então poderão ser feitas avaliações mais efetivas da real efetividade do MNP.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTON, S. M. et al. Update on Quadruple suspension design for Advanced LIGO. **Classical and Quantum Gravity** v.29, n.23, p.235004. Oct 2012.

Disponível em: < <http://iopscience.iop.org/0264-9381/29/23/235004> >. Acesso em: 15 jul. 2014.

CATTANI, M. Gravitational waves III: Detecting systems. ArXiv:1004.2470v1 [gr-qc], 2010.

CONSTÂNCIO JÚNIOR, Márcio. **Multi-Nested Pendula: Um novo conceito em isolamento vibracional para a terceira e quarta geração do LIGO.** 2013.

85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Astrofísica, Inpe, São José dos Campos, 2013. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3DTKUBP>>. Acesso em: 07 fev. 2013.

DANZMANN, Peter Aufmuth And Karsten. Gravitational wave detectors. **New J. Phys.**, Hanover, v. 7, n.1, p.202, set. 2005. Disponível em:

<<http://iopscience.iop.org/1367-2630/7/1/202>>. Acesso em: 15 jul. 2014.

FRITSCHER, P. Second generation instruments for the laser interferometer gravitational wave observatory (ligo). **ArXiv:gr-qc/0308090**, p. 282{291, 2003.

HAMMOND, Giles; HILD, Stefan; PITKIN, Matthew. Advanced technologies for future ground-based, laser-interferometric gravitational wave detectors. **Journal Of Modern Optics**, London, v. 61, n. 1, p.10-45, 25 jun. 2014. Disponível em <

<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09500340.2014.920934>> Acesso em: 15 jul. 2014.

HILD, S. Beyond the second generation of laser-interferometric gravitational wave observatories. **Class. Quantum Grav**, [s.l.], v. 29, n. 12, p.124006-124015, jun. 2012. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/0264-9381/29/12/124006>>. Acesso em: 15 jul. 2014.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2008. 648 p.

NUSSENZVEIG, H. Moysés. Oscilações Amortecidas e Forçadas. In: NUSSENZVEIG, H. Moysés. **Curso de Física Básica: 2 - Fluidos, Oscilações e Ondas de Calor**. São Paulo: Edgard Blucher, 1981. p. 115-132.

PINTO NETO, Antônio. Oscilações. In: PINTO NETO, Antônio. **Notas de aula da disciplina mecânica teórica I**. São Luíz: Edufma, 2003. p. 24-36.

PRINCE, T. A. et al. The promise of low-frequency gravitational wave astronomy. **arXiv preprint arXiv:0903.0103**, 2009.

RILES, K.. Gravitational waves: Sources, detectors and searches. **Progress In Particle And Nuclear Physics**, [s.l.], v. 68, n. 0, p.1-54, jan. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.pnnp.2012.08.001>>. Acesso em: 15 jul. 2014.

ROWAN, Sheila; HOUGH, James. Gravitational Wave Detection by Interferometry (Ground and Space). **Living Reviews In Relativity**, Potsdam, v. 03, n. 03, p.01-40, jun. 2000. Disponível em: <<http://www.livingreviews.org/lrr-2000-3>>. Acesso em: 15 jul. 2014.

SHADDOCK, Daniel Anthony. **Advanced Interferometry for Gravitational Wave Detection**. 1997. 180 f. Tese (Doutorado) - Curso de Física, Departamento de Física, Australian National University, Canberra, 2000. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1885/48188>>. Acesso em: 15 jul. 2014.

SILVA, Samuel da. **Vibrações Mecânicas**. Foz do Iguaçu: [s.n], 2009. 151 p.

WHITCOMB, Stanley E. Ground-based gravitational-wave detection: now and future. **Classical and Quantum Gravity**, v. 25, n. 11, p. 114013, may. 2008.

Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/0264-9381/25/11/114013/>>. Acesso em: 07 fev. 14

APÊNDICE A : DADOS USADOS PARA O COMPARATIVO ENTRE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTO

As tabelas abaixo trazem as informações de temperatura no início e fim de cada etapa da segunda fase do ensaio térmico. Estes dados foram usados como base para os cálculos da seção 4.2.3. A tabela completa tem resultados a cada 30 segundo, cobrindo um período de quase 47 horas, o que torna impraticável a sua reprodução neste trabalho.

Tabela A.1 - Temperaturas experimentais dos cilindros (°C)

Etapa	Estágio	Tempo(s)	C1	C2	C3	C4	C5
1	Início	0.00	-187.444	-186.426	-180.709	-164.654	-154.125
	Fim	1980.00	-187.092	-186.314	-180.465	-164.594	-154.388
2	Início	1980.00	-187.092	-186.314	-180.465	-164.594	-154.388
	Fim	15060.00	-175.732	-184.676	-178.936	-164.576	-156.257
3	Início	15060.00	-175.732	-184.676	-178.936	-164.576	-156.257
	Fim	27720.00	-175.331	-183.249	-177.895	-164.766	-157.845

Tabela A.2 - Temperaturas dos cilindros na simulação (°C)

Etapa	Estágio	Tempo (s)	C1	C2	C3	C4	C5
1	Início	0.00	-187.444	-186.426	-180.709	-164.654	-154.125
	Fim	1980.00	-187.110	-186.320	-180.510	-164.660	-154.490
2	Início	1980.00	-187.110	-186.320	-180.510	-164.660	-154.490
	Fim	15060.00	-176.470	-185.250	-179.410	-164.810	-156.420
3	Início	15060.00	-176.470	-185.250	-179.410	-164.810	-156.420
	Fim	27720.00	-175.110	-183.920	-178.450	-165.040	-157.990

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.