

Multi-Nested Pendula (MNP) - Um novo sistema criogênico de isolamento vibracional para o LIGO ADVANCED

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

Felipe Alves Blujos dos santos (ETEP - Faculdades, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: felipeblujos@hotmail.com

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

COLABORADORES

Mr. Marcio Constâncio (DAS/CEA/INPE)
Mr. Elvis Camilo (DAS/CEA/INPE)

Julho de 2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Santos, Felipe Alves Blujos dos.

Cutter

PARTICIPAÇÃO NO PROJETO DO MULTI-NESTED PENDULA:
UM NOVO SISTEMA CRIOGÊNICO DE ISOLAMENTO
VIBRACIONAL PARA LIGO ADVANCED/ Felipe
Alves Blujos dos Santos - São José dos Campos: INPE, 2016.
xvii + 63p;

Iniciação Científica em Engenharia Mecatrônica -
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016.
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

Para realização desse trabalho gostaria de fazer um agradecimento para Ms. Elvis Camilo, Ms. Marcio Constâncio, Dr. Odylio D. Aguiar , Odair Blujos, Rodrigo Blujos, CNPQ, Carina Gabriela, Adriana Aparecida Alves, Rosa Blujos e Mauro dos Santos, pois sem estes não seria possível sua conclusão.

RESUMO

Este trabalho, iniciado em agosto de 2015, tem como objetivo dar continuidade ao projeto de Astrofísica em andamento desde 2011. Trabalhamos na aplicação de um novo sistema de isolamento vibracional para o detector interferométrico de ondas gravitacionais LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave). Este sistema é composto por pêndulos e por molas dispostas de forma anti-geométrica (sigla GAS, em inglês para Geometric anti-springs). Inúmeras simulações foram realizadas e comparadas com medidas feitas usando-se um cristal piezo elétrico e um sensor óptico. Um modelo teórico de função de transferência foi realizado para uma mola vertical, utilizando dados empíricos de uma GAS. Os resultados obtidos até o momento mostram que estas molas podem ser uma solução ao problema de isolamento vertical do MNP.

PARTICIPATION IN THE MULTI-NESTED PENDULA PROJECT: A NEW CRIOGENIC VIBRATION ISOLATION SYSTEM FOR THE LIGO ADVANCED

ABSTRACT

This work started in August 2015, it aims to continue the Astrophysics ongoing project that started in 2011. We worked in the application of a new vibration isolation system for the LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave). This system is composed of a Multi-Nested Pendula and Geometric Anti-Springs (GAS). Countless simulations were performed and compared with measurements done using a piezoelectric crystal and an optical sensor. A theoretical transfer function model was performed for a vertical spring, using empirical data from a GAS. The results obtained so far show that these springs could be a solution to the problem of vertical MNP isolation.

LISTA DE FIGURAS

2.2.1-Estrelas espiralando imagem computadorizada	15
2.3.1-Interferometria a laser	16
2.5.1-Sistema MHS	17
3.2.1.1-Demonstração condução solida	21
3.2.1.2-Relação de condução solida em diferentes materiais	21
3.2.2.1-Diferença de Radiação térmica em alguns materiais	22
3.2.3.1-Constante de alguns gases que podem realizar condução gasosa	23
3.2.4.1-Exemplos de transferência de calor por convecção	24
3.3.1-Câmara criogênica a vácuo	24
3.3.2-Câmara criogênica a vácuo aberta	24
3.3.3-Tubulação câmara criogênica a vácuo	25
3.4.1-Cilindro em vista frontal e em corte	26
4.1.1-Sistema GAS	27
4.1.2-GAS conjunto	28
4.1.3-GAS conjunto	28
4.2.1-Função de transferência das GAS	30

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

LIGO - Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

OGs - Ondas Gravitacionais

MHS - Movimento Harmônico Simples

GAS - Geometric Anti-Springs

MNP - Multi-Nested Pendula

aLIGO - Advanced LIGO

SUMÁRIO

1-INTRODUÇÃO	13
2-FUNDAMENTAÇÃO.....	14
2.1 Principais fatores que emitem OGs	14
2.2 Porque detectar as ondas gravitacionais	15
2.3 Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory	16
2.4 Principais fontes de ruído e porque elas interferem.....	16
2.5 MHS - Sistema de movimento harmônico simples	17
3-METODOLOGIA	20
3.1 Desenhos técnicos.....	20
3.2 Isolamento térmico	20
3.2.1 Condução sólida	20
3.2.2 Radiação térmica	21
3.2.3 Condução gasosa	22
3.2.4 convecção	23
3.3 Câmara criogênica a vácuo	24
3.4 Sistema desenvolvido.....	25
3.5 Octave.....	26
3.5.1 Especificações técnicas.....	26
4-RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	27
4.1 Sistema GAS	27
4.2 Modelo espaço de estado.....	28

5-CONCLUSÕES.....31

6-REFERENCIA BIBLIOGRFICAS32

1 INTRODUÇÃO

A emissão de ondas gravitacionais por eventos espaciais podem ocorrer de diversos sistemas, tais como explosão de supernovas e fusão de sistemas binários formados por objetos compactos (estrela de nêutrons ou buracos negros). A detecção deste sinal permitirá conhecer melhor tais fenômenos astrofísicos. A grande dificuldade nesta tarefa é o nível de sensibilidade que os detectores possuem, podendo receber interferências por diversos eventos comuns do nosso dia a dia, o que necessita de um isolamento vibracional muito preciso e delicado.

Isso faz com que seja necessária a criação de um sistema de isolamento que seja capaz de filtrar ao máximo os outros ruídos para que seja perceptível apenas a onda gravitacional.

O projeto que possui a maior chance de realizar essa tarefa é o LIGO, que é o projeto no qual estou trabalhando. Ele utiliza um sistema de pêndulos como parte do isolamento vibracional dos espelhos, e sua detecção é por meio de interferometria laser. Esse projeto vem sendo desenvolvido desde 1992 e está situado nos EUA, onde atualmente está em funcionamento. A tarefa realizada pelo grupo do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), grupo em que faço parte, tem como objetivo aprimorar o sistema de filtragem para que em 2023, com o desligamento do aLIGO para manutenção, ele possa ser atualizado com o nosso sistema, que proporcionaria uma precisão maior em baixas frequências, melhorando a qualidade dos dados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Principais Fatores que emitem OGs.

- **Sistema de estrelas compactas espiralando:**
- **Coalescência ou choque de estrelas compactas:**
- **Buraco Negro:**
- **Supernovas:**
- **Hipernovas:**
- **Pulsares ou Estrelas de Nêutron e rotação:**
- **Outras Fontes:**

Talvez existam outras fontes espaciais que não foram descobertas.

2.2. Por que Detectar as Ondas Gravitacionais?

Ondas gravitacionais como as que estão sendo detectadas, tem origem nos mais potentes eventos conhecidos até hoje pelo homem. Isso permitirá que estudemos e analisemos o universo de uma maneira muito mais profunda, proporcionando uma expansão no conhecimento mundial sobre a física, astronomia e astrofísica. Até hoje os cientistas estudavam o universo apenas por meio da radiação eletromagnética. Agora também vamos poder fazê-lo com as OGs. Seguem os exemplos:

- **Luz, Raio-X, Micro-ondas, entre outras.**

Cada uma dessas faixas de frequência eletromagnética fornece aos cientistas um novo modo de enxergar o universo. Então, com a possibilidade de captar as ondas gravitacionais, que não são ondas formadas pelo eletromagnetismo, poderíamos observar o universo de uma outra forma completamente diferente.

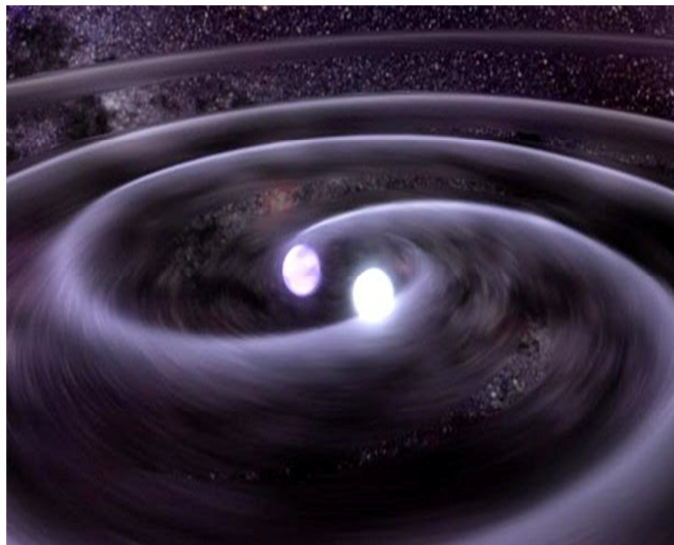


Figura 2.2.1 - Estrelas espiralando imagem computadorizada

2.3. Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO).

O LIGO é um detector que foi projetado com o objetivo da detecção das ondas gravitacionais, ele funciona a partir da interferometria laser conforme mostra a figura 2.3.1:

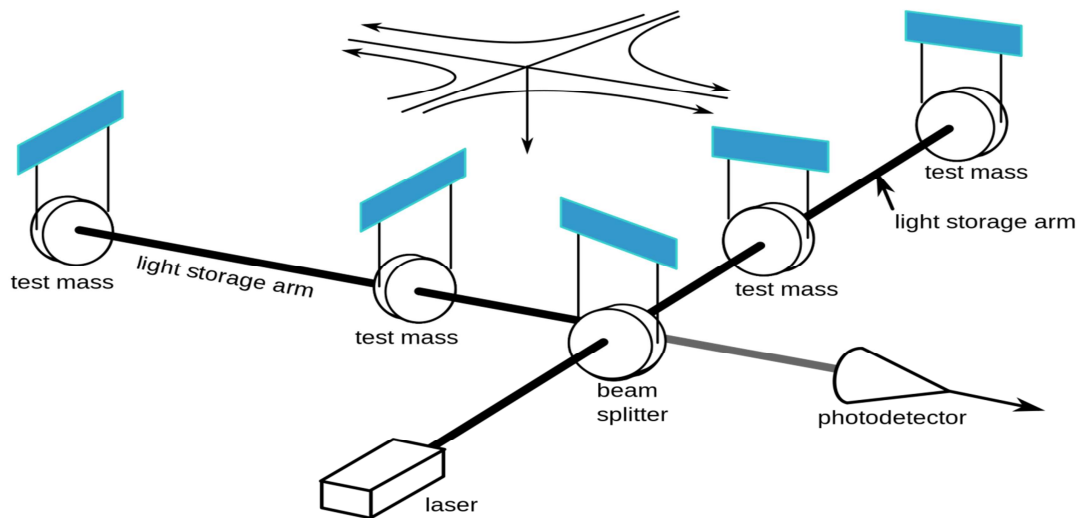


Figura 2.3.1 - Interferometria laser

Na figura 2.3.1 os objetos circulares são os espelhos direcionadores do feixe laser, a caixa retangular seria o emissor do laser e o cone, o receptor da interferência dos dois sinais lasers (produzidas pelas OGs), assim, podemos captar as ondas gravitacionais que seriam emitidas por diversos eventos no espaço.

2.4. Principais Fontes de ruídos e porque elas interferem?

Alguns dos principais ruídos que realizam essa interferência são:

- **Ruído Térmico**

Esse ruído é causado pela agitação das moléculas. Resfriando os componentes ele é muito amenizado em razão da agitação das moléculas que quando estão submetidas ao frio movimentam-se mais lentamente.

- **Vibrações Mecânicas**

São todas as formas mecânicas de vibração que existem. Podemos citar por exemplo: o bater do pé ao chão, que emite uma onda mecânica que causa interferência no sistema. Esses tipos de vibrações são mais fáceis de serem amenizadas com o uso de molas e amortecedores.

2.5. MHS - sistemas de movimentos harmônicos simples

Quando a aceleração e a força resultante agem de forma proporcional se opondo ao deslocamento obtemos um sistema MHS. Nesse sistema a massa esta disposta a oscilação através de mola(s), sempre sobre influência de um amortecimento.

Podemos observar esse efeito em uma massa fixa a uma mola que está ligada a um suporte que não possui movimentação, este suporte possui um fator de amortecimento como segue a imagem:

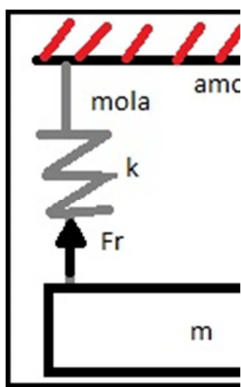


Figura 2.5.1 - Sistema MHS

k = constante da mola

c = constante de amortecimento

m = massa

F_r = força resultante

F_a = força de amortecimento

z_0 = deslocamento do solo

z_1 = deslocamento da massa

v = variação

$dv =$ diferencial da velocidade
 $dt =$ diferencial do tempo
 $dz =$ diferencial do deslocamento

Nesse sistema levamos em consideração o fator de amortecimento, no caso representado por (Fa) , se associarmos as fórmulas obtemos:

$$Fr = -Fmola - Fa$$

Realizando uma associação entre as leis de Newton e a lei de Hooke podemos aprofundar:

Lei de Newton

$$Fr = m * a$$

Lei de hooke

$$Fmola = k * (z1 - z0)$$

(como o sistema se encontra preso a um ponto utilizamos apenas z dispensando o movimento de onde ela se situa preso.)

$$Fmola = k * z$$

$$Fa = c * v$$

Após associarmos as formulas obtemos:

$$m * a = -k * z - c * v$$

Segundo a regra de derivadas aceleração é igual a derivada da velocidade pois:

$$a = \frac{dv}{dt}$$

$$v = \frac{dz}{dt}$$

Unindo-as obtemos:

$$a = \frac{d^2 * z}{t^2 * d}$$

Portanto a aceleração é igual a derivada segunda da posição no tempo , podemos representar por:

$$a = z''$$

$$v = z'$$

Unindo-as com a formula obtida anteriormente obtemos:

$$m * z'' = -k * z - c * z'$$

$$m * z'' + c * z' + k * z = 0$$

3 METODOLOGIA

3.1. Desenhos Técnicos

Os desenhos técnicos e simulações realizadas nesse trabalho foram constituídos através do software *Solidworks*.

A criação desse tipo de desenho permite realizar simulações e montagens entre as partes de um sistema, onde este realiza as análises através de malhas conectadas umas as outras por nós criados computacionalmente ao longo das partes.

Com a utilização desse software é possível alterar as dimensões, pontos de fixações, entre outros parâmetros geométricos de peças, podendo criar uma variedade de condições a serem simuladas ou ajustadas em uma montagem.

3.2. Isolamento Térmico.

3.2.1. Condução Solida

Nesse tipo de condução a energia térmica é transmitida ao longo do material.

Se uma barra sólida for submetida a uma diferença de temperatura ocorre a transferência de calor por meio da segunda lei de Newton:

$$Q_{cs} = -KA \frac{\Delta T}{L}$$

Q_{cs} = taxa de transferência

K = condutividade térmica

A = área da secção transversal

ΔT = variação de temperatura

L = comprimento

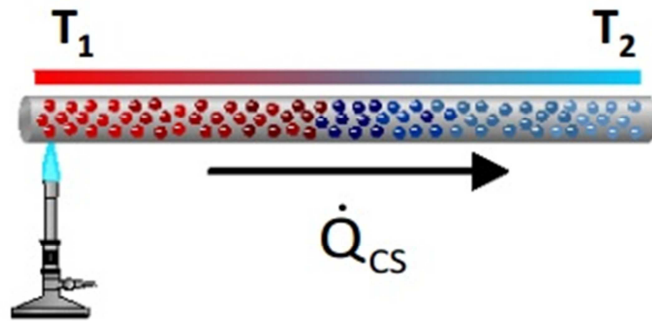


Figura 3.2.1.1 - Demonstração condução sólida

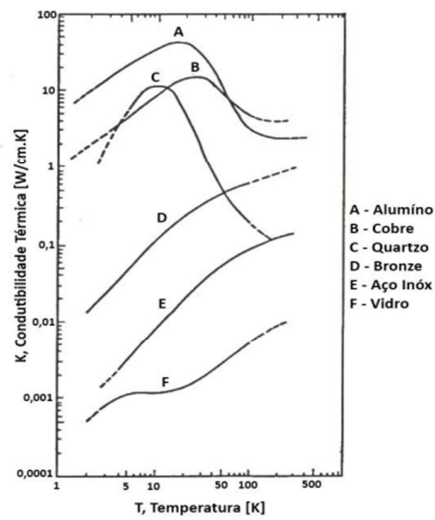


Figura 3.2.1.2 - Relação da condução sólida em diferentes materiais

3.2.2. Radiação Térmica

Não existe a necessidade de um meio material.

Observamos esse tipo de energia térmica na troca de calor entre corpos.

Para representarmos essa troca utilizamos a segunda lei de stefan-boltzman:

$$Q_{rad} = \sigma \cdot \epsilon \cdot A \cdot (T_2^4 - T_1^4)$$

Q_{rad} = taxa de transferência de calor

σ = constante de Stefan-Boltzmann ($5,61 \times 10^{-12} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^4)$)

ε = emissividade total média

A = área

T_1 e T_2 = temperaturas em kelvins dos corpos que realizam a troca de calor

MATERIAL	300K → 77K	300K	14K → 2K	293K → 90K	273K → 77K
	Fulk, Reynolds, Park 1955	Mc Adams 1954	Ramanathan 1952	Backman, Egerton Truger 1948	Ziegler, Cheung 1957
Folha fina polida e fina de Al	0,02	0,04	0,011	0,055	0,043
Placa de Alumínio Polida	0,03	0,03	-	-	-
Alumínio Altamente Oxidado	0,3	0,31	-	-	-
Latão polido e limpo	0,029	0,03	0,018	0,046	0,10
Latão altamente oxidado	-	0,6	-	-	-
Au polido e limpo	0,015-0,019	0,02	0,0062-0,015	0,019-0,035	-
Au altamente oxidado	-	0,6	-	-	-
Placa de Iridio	0,08	0,06	-	0,065	0,084
Folha fina de Au(Ouro)	0,010-0,023	0,02-0,03	-	0,026	-
Placa de Au	0,026	-	-	-	-
Monel (Liga Metálica)	-	0,2	-	-	0,11
Ni polido	-	0,045	-	-	-
Placa de Rh	0,078	-	-	-	-
Placa de Prata	0,008	0,02-0,03	-	0,023-0,036	-
Aços Inoxidáveis	0,048	0,074	-	-	-
Folha fina e limpa de Sn	0,013	0,06	0,013	0,038	-
Solda branca	0,03	-	-	-	0,047
Vidro	-	0,9	-	0,87	-
Metal Wood (Liga comercial)	-	-	-	-	0,16

Figura 3.2.2.1 - Diferença de radiação térmica em alguns materiais

3.2.3. Condução Gasosa

Ocorre a troca térmica através de gases com pressões baixas que permitem a absorção de calor.

Essa troca somente é possível acontecer por meio de regimes moleculares e é calculada através da equação de Corruccini:

$$Q_{vac} = \alpha \left[\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \sqrt{\frac{R}{8\pi \cdot T \cdot M}} \right] \cdot P \cdot (T_2 - T_1)$$

Q_{vac} = transferência de calor

α = coeficiente adimensional entre o gás e o cilindro

γ = razão entre as capacidades térmicas

R = constante universal dos gases perfeitos

M = peso molecular

T = temperatura absoluta

P = pressão do gás

Constantes para a equação de condução gasosa de Corruccini		
Gás	T_2 e T_1 [K]	Constante
N_2 (ar)	< 400	0,0159
O_2	< 300	0,0149
H_2	300 e 77 300 e 90	0,0528
H_2	77 e 20	0,0398
He	Qualquer	0,0280

Figura 3.2.3.1-Constantes de alguns gases que podem realizar condução gasosa.

3.2.4. Convecção

Ocorre através do movimento molecular por agitação ou diferença de densidades. Pode ser calculada através da equação de Newton:

$$Q_{conv} = h \cdot A \cdot (T_{00} - T_{sup})$$

Q_{conv} = transferência de calor

h = constante experimental

A = área

$T_{00} - T_{sup}$ = diferença de Temperatura

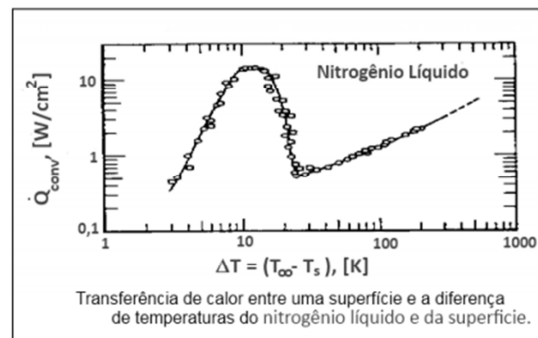
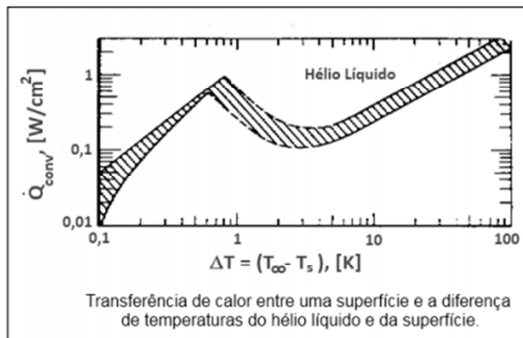


Figura 3.2.3.1- Exemplos de transferência de calor por convecção

3.3. Câmara Criogênica a vácuo

Com a instalação da Câmara criogênica a vácuo no laboratório, será possível realizar testes de isolamento em circunstâncias criogênicas a vácuo.

Ela trabalha por meio de transferência de calor por radiação térmica.

Para que ela entre nos parâmetros adequados para seu funcionamento são necessários diversos ajustes e manutenções nas quais estamos desenvolvendo.



Figura 3.3.1-Câmara Criogênica a vácuo



Figura 3.3.2 - Câmara Criogênica a vácuo aberta



Figura 3.3.3-Tubulações da câmara criogênica a vácuo

Na imagem 3.2.2 podemos observar a serpentina no qual o nitrogênio líquido passará resfriando seu produto interno através da radiação térmica , o nitrogênio será alimentado pelas tubulações mostradas na imagem 3.3.3.

Na imagem 3.2.1 podemos observar a câmara lacrada a vácuo, conforme ficara em experiências.

3.4. Sistema Desenvolvido.

Com o principal objetivo de tornar o LIGO cada vez mais sensível e capaz de captar mais ondas gravitacionais o grupo do INPE trabalha no desenvolvimento de um sistema pendular de multiestágios (que nós chamamos de MNP) conforme mostra as figuras 3.4.1

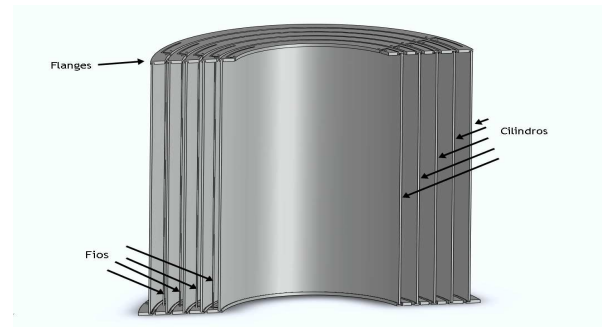


Figura 3.4.1 - Cilindro em vista frontal e em corte.

3.5. Octave

Octave é um software gratuito criado para a computação matemática, isso o faz muito útil para o desenvolvimento de projetos.

Esse software conta com interação através de linguagem de programação de nível elevado, o seu objetivo principal é a utilização deste em cálculos numéricos.

Ele fornece linhas que podem ser escritas com problemas lineares e não-lineares numericamente, além disso também pode ser utilizado como uma linguagem orientada por grupos pré-programados.

3.5.1. Especificações Técnicas

Sua linguagem é em C++.

Constituído com as bibliotecas STL (Standard Template library).

Pode ser expandido através de módulos pré-programados que serão carregados.

4 Resultados e Discussões.

4.1. Sistemas GAS

Para realizar a tarefa de isolamento do sistema citado na seção 3.4 foi criado um sistema de molas anti-geométricas conforme mostra a figura 4.1.1:



Figura 4.1.1-Sistema GAS

Pode se observar um conjunto de chapas que atuam através de força contrária ao peso colocado na haste central, ela possui dois estágios o superior e o inferior no qual permite mais precisão em ajustes para o peso necessário.

No momento essas molas estão sendo montadas e testadas no sistema, conforme mostra as figuras 4.1.2 e 4.1.3:



Figura 4.1.2-GAS conjunto



Figura 4.1.3-GAS conjunto

4.2. Modelo de espaço de estados.

Considerando um sistema massa mola, tal como mostrado na figura das molas AGP, cuja equação pode ser dada por:

$$m * z'' + c * z' + k * z = 0$$

para obtermos um gráfico montamos uma matriz seguindo a base:

$$x' = a * x + b * u$$

$$\begin{bmatrix} x1' \\ x2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{quantidade de } x1 & \text{quantidade de } x2 \\ \text{quantidade de } x1 & \text{quantidade de } x2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x1 \\ x2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix}$$



força solo

Associando essa base as formulas obtemos:

$$x1 = z$$

$$x_2 = z'$$

$$x_1' = z'$$

$$x_2' = z''$$

$$z'' = \left(-k * \frac{z}{m}\right) - \left(c * \frac{z'}{m}\right) + (\text{força solo})$$

Assim:

$$z'' = (-k * x_1/m) - (c * x_2/m) + (\text{força solo})$$

Não esquecendo da força de deslocamento na matriz:

$$z = c * x + d$$

$$z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Assim obtemos a formula do espaço de estado dessa mola:

$$\begin{bmatrix} x_1' \\ x_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k/m & -c/m \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/m \end{bmatrix}$$

Através do software Octave foi possível criar um programa no qual realize o calculo do espaço de estado das molas utilizadas no sistema, segue abaixo o programa:

m = 64; "(massa do cilindro)"

f = 6; "(frequência da mola)"

Q = 100 "(fator de qualidade mecânico)"

k = (m*((2*pi)*f)^2) "(constante da mola)"

c = ((sqrt(m*k))/Q) "(coeficiente de amortecimento)"

$A = [0,1;(-k/m),(-c/m)];$

$B = [0;(1/m)];$

$C = [1,0]$

$D = 0$

A

pkg load control "(ler pacote de controle)"

pkg load signal "(ler pacote de sinal)"

translate = ss(A,B,C,D)

bode(translate) "(criar gráfico)"

Esse programa demonstra o gráfico de função de transferência das molas(mostrado na figura 4.2.1), que permite com que projete-as de acordo com o peso adequado do sistema a ser utilizada, molas citadas na seção 4.1.

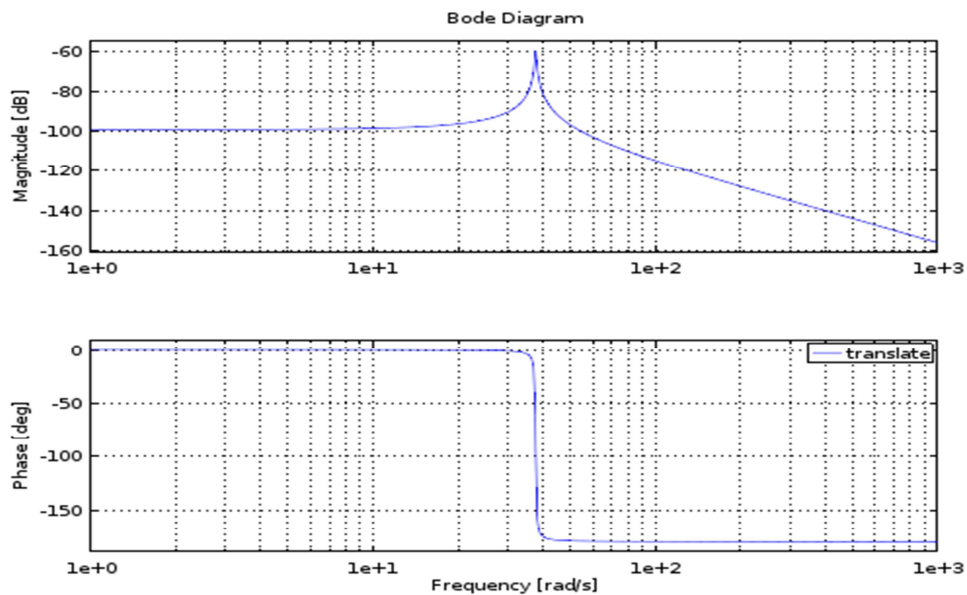


Figura 4.2.1-Função de transferência das GAS

5 Conclusões

O estudo para aprimorar a detecção de ondas gravitacionais está em constante desenvolvimento. As novas detecções mudarão nossa percepção sobre a natureza. Atualmente um dos maiores problemas nesse objetivo é a vibração sísmica provinda da Terra, mas, com o desenvolvimento de novos dispositivos, esse problema está tendo solução. Os programas Solidwork e Octave foram de grande importância para a realização dos trabalhos efetuados até o momento e deverão continuar sendo para os futuros, pois eles permitem estudar as peças ou conjuntos de peças tanto físico como matematicamente, como por exemplo a função de transferência da mola criada a partir do Octave.

Com o funcionamento da câmara criogênica a vácuo poderemos realizar estudos em baixas temperaturas e na ausência de ar de forma prática e acessível.

Os próximos trabalhos vão apresentar os resultados dos testes das molas GAS e se elas vão ser efetivas no isolamento vibracional vertical do nosso sistema.

6 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: 25 jul. 2016.

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: 25 jul. 2016

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: 25 jul. 2016.

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 25 jul. 2016.

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: 25 jul. 2016.

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.pnpnp.2012.08.001>>. Acesso em: 25 jul. 2016.

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.