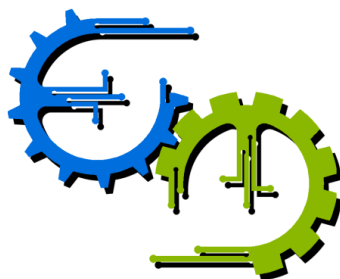


**TRABALHO DE GRADUAÇÃO**

**CONCEPÇÃO, PROJETO, IMPLEMENTAÇÃO E  
TESTE DE UM SISTEMA DE CONTROLE DE  
UMA VIGA SMAHC.**

Por,  
**Matheus Vinícius Ferreira de Figueiredo Teixeira**

Brasília, dezembro de 2013



**ENGENHARIA  
MECATRÔNICA**  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**CONCEPÇÃO, PROJETO, IMPLEMENTAÇÃO E  
TESTE DE UM SISTEMA DE CONTROLE DE  
UMA VIGA SMAHC.**

POR,

**Matheus Vinícius Ferreira de Figueiredo Teixeira**

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

**Banca Examinadora**

Prof. Edson Paulo da Silva, UnB/ ENM  
(Orientador)

\_\_\_\_\_

Prof. Flávio Levy Neto, UnB/ ENM

\_\_\_\_\_

Prof. Guilherme Caribé de Carvalho, UnB/ ENM

\_\_\_\_\_

Brasília, dezembro de 2013

## FICHA CATALOGRÁFICA

MATHEUS, TEIXEIRA

Controle de vibração em uma viga SMAHC,

[Distrito Federal] 2013.

xvii, 86p., 297 mm (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, 2013). Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

1. Material compósito

2. Liga com memória de Forma

3. Vibrações

4. Estrutura adaptativa

5. Sistema de Controle

I. Mecatrônica/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

TEIXEIRA, M. V. F. F., (2013). Controle de vibração em uma viga SMAHC. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG-nº ABC, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 105p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Matheus Vinícius Ferreira de Figueiredo Teixeira.

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: Controle de vibração em uma viga smahc, utilizando fonte elétrica controlada.

GRAU: Engenheiro

ANO: 2013

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Matheus Vinícius Ferreira de Figueiredo Teixeira  
QNL 10 Conjunto D casa 8 – Taguatinga Norte.  
72156-104 Brasília – DF – Brasil.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pelo dom da minha vida. E por toda a minha família pelo apoio e pela educação que me deram. Agradeço de modo especial ao Dr. Peter Faluhelyi, que foi imprescindível para a realização desse trabalho, ele me ajudou na realização de alguns experimentos, sacrificando, inclusive, dias de sábado e passou incontáveis horas no telefone, me dando apoio na teoria, especialmente, de vibrações; apoio moral e psicológico. Agradeço também a todas as pessoas que deram sua contribuição direta e indiretamente para a realização desse trabalho: Prof. Edson Paulo da Silva, Tadeu Costa da Silva, Thiago Barra, Marcus Eliseu Barroso Ferreira, Lucy Maria Alves Barroso Ferreira, Maria da Conceição Aparecida Ferreira, Luiz Mário Ribeiro da Silva, Jaffer de Oliveira Aréco, Luiz Curti, Lucas De Souza Oliveira, Pedro Doria Nehme, Luciana Lazaro.

*Matheus Vinícius Ferreira de Figueiredo Teixeira*

## RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo do comportamento dinâmico de uma viga compósita híbrida com memória de forma (SMAHC – do Inglês *Shape Memory Alloy Hybrid Composite*), submetida a vibrações forçadas.

Segundo Faluhelyi, As vigas SMAHC prismáticas utilizadas nesse trabalho, que foram fabricadas por ele, foram produzidas em um molde fechado, tipo macho-fêmea, com duas camadas de quatro fios de Ni-Ti unidirecionais cada uma, afastadas simetricamente o máximo possível do plano médio, e intercaladas por 17 camadas de mantas de fibras curtas de vidro-E, todas embebidas em matriz epóxi (Faluhelyi, 2013).

Esse tipo de componente (feito de SMAHC) apresenta um grande potencial de aplicação no desenvolvimento de estruturas adaptativas para controle de vibração em sistemas mecânicos.

O objetivo do trabalho é caracterizar a variação na frequência natural de vibração da viga, especialmente, na faixa de temperaturas em que o fio está em mudança de fase. Além disso, propõe-se a construção de um sistema de controle que controle a temperatura nos fios de SMA utilizando corrente elétrica (efeito Joule) como fonte de aquecimento.

Os resultados permitiram concluir que com apenas 2% de fração volumétrica de fio de SMA na viga SMAHC é possível alcançar-se uma variação na frequência natural de vibração de até 5%.

Palavras Chave: Material Compósito, Liga com memória de forma (SMA), Vibração, Estrutura Adaptativa, Sistema de Controle.

## ABSTRACT

This paper presents a study of the dynamic behavior a beam made of Shape Memory Alloy Hybrid Composite (SMAHC), subjected to forced vibrations.

According Faluhelyi, the prismatic SMAHC beams used in this work, which were made by him, were produced in a closed mold, male-female type, with two unidirectional layers of four wires of Ni-Ti, spaced as symmetrically as possible to the middle plan and interspersed by 17 layers of fiber of E-glass blankets, all embedded in epoxy matrix (Faluhelyi , 2013 ).

This type of component (made of SMAHC) has great potential application in the development of adaptive structures for vibration control in mechanical systems.

The objective is to characterize the variation in the natural frequency of vibration of the beam, especially in the temperature range in which the wire is in phase change. Furthermore, it is proposed to construct a control system that controls the temperature in the SMA wires using electric current (Joule effect) as the heating source.

The results showed that with only 2% volume fraction of the SMA wire SMAHC beam is possible to achieve a variation in the natural vibration frequency of up to 5%.

Keywords: Composite Material, shape memory alloy (SMA), Vibration, Adaptive Structure, Control System.

# SUMÁRIO

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>  | <b>3</b>  |
| 2.1      | Estruturas adaptativas  | 3         |
| 2.2      | Ligas com Memória de Forma  | 3         |
| 2.3      | Materiais compósitos  | 6         |
| 2.4      | Compositos Híbridos Com Liga Com Memória De Forma (Smahc)   | 7         |
| 2.5      | TEORIA DE CONTROLE  | 7         |
| 2.5.1    | Sistemas a malha aberta   | 7         |
| 2.5.2    | Sistemas a malha fechada  | 8         |
| 2.5.3    | Erro de estado estacionário e outras caracterizações de respostas temporais de sistemas de controle | 9         |
| 2.5.4    | Classificação de controladores  | 10        |
| 2.5.5    | Sistemas controlados por computador   | 13        |
| 2.6      | OUTROS CONCEITOS  | 14        |
| 2.6.1    | <i>Pulse Width Modulation</i> (PWM)   | 14        |
| <b>3</b> | <b>MODELO MATEMÁTICO DE VIBRAÇÕES SOBRE OS CORPOS DE PROVA</b>                                      | <b>15</b> |
| 3.1      | HIPÓTESES E CONDIÇÕES   | 15        |
| 3.2      | DIAGRAMA DE CORPO LIVRE   | 15        |
| 3.3      | EQUAÇÕES DE MOVIMENTO   | 15        |
| 3.4      | CONDIÇÕES DE CONTORNO E SOLUÇÃO ANALÍTICA DA EQUAÇÃO DE MOVIMENTO                                   | 17        |
| 3.5      | FRÊQUÊNCIAS NATURAIS  | 19        |
| <b>4</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>  | <b>21</b> |
| 4.1      | CORPOS DE PROVA   | 21        |
| 4.1.1    | Corpo de prova (CP 5)   | 21        |
| 4.1.2    | Corpo De Prova (Cp 11)  | 21        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 4.1.3    | A liga de NiTi.....  | 22        |
| 4.2      | A BANCADA DE TESTES .....                                  | 22        |
| 4.3      | CARACTERIZAÇÕES TÉRMICAS .....                             | 35        |
| 4.3.1    | Usando a fonte MARK 2.....                                 | 35        |
| 4.3.2    | Utilizando MARK 4 .....                                    | 37        |
| 4.4      | ENSAIOS DINÂMICOS.....                                     | 38        |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS E ANÁLISES.....</b>                          | <b>45</b> |
| 5.1      | Caracterizações termicas.....                              | 45        |
| 5.2      | Ensaio Dinâmico .....                                      | 46        |
| 5.2.1    | O que era esperado .....                                   | 46        |
| 5.2.2    | Vibrações Sobre Viga De Testes Sem A Presença De Niti..... | 47        |
| 5.2.3    | Vibrações sobre o corpo de prova CP 11 .....               | 48        |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÃO E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>  | <b>56</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                     | <b>58</b> |
|          | <b>ANEXOS .....</b>  | <b>60</b> |



## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Evolução do processo de transformação de fase das SMA. (CAMPO, 2012).....   | 4  |
| Figura 2: Diagrama de fases do Ni-Ti (CAMPO, 2012). .....   | 5  |
| Figura 3: Módulo de elasticidade versus temperatura (Castilho, 2008). .....   | 6  |
| Figura 4: Compósito híbrido com memória de forma SMAHC (CAMPO, 2012). .....   | 7  |
| Figura 5: Diagrama de blocos de sistema de controle a malha aberta (Nise, 2008).....  | 8  |
| Figura 6: Diagrama de blocos de sistema de controle a malha fechada (Nise, 2008). .....   | 8  |
| Figura 7: Exemplo de resposta de sistema de controle a um sinal de entrada do tipo rampa.<br>.....  | 10 |
| Figura 8: Curva de resposta a uma entrada em degrau unitário que mostra $t_d$ , $t_r$ , $t_p$ , $M_p$ , e $t_s$ . (Ogata, 2007). .....  | 10 |
| Figura 9: Esboço do comportamento de um sistema controlado por on/off. (a) variável controlada em função do tempo. (b) saída do controlador em função do erro atuante. ....                   | 11 |
| Figura 10: Esboço do comportamento de um sistema controlado por controle proporcional. (a) erro atuante em função do tempo. (b) saída do controlador em função do tempo. (Ogata, 2007). ..... | 12 |
| Figura 11: Esboço do comportamento de um sistema controlado por controle integral. (a) erro atuante em função do tempo. (b) saída do controlador em função do tempo. (Ogata, 2007). .....     | 13 |
| Figura 12: Funcionamento de um PWM. ....  | 14 |
| Figura 13: Diagrama de corpo livre de uma viga engastada-livre.....   | 16 |
| Figura 14: condições de contorno para diversos tipos de vínculos. (Abreu, 2012).....  | 18 |
| Figura 15: solução gráfica da Eq. 40. ....  | 20 |
| Figura 16: Corpo de prova CP 5.....   | 21 |
| Figura 17: Corpo de prova CP 11.....  | 21 |
| Figura 18: Esquemático da banca de testes. ....   | 22 |
| Figura 19: Shaker utilizado nos experimentos de vibração.....   | 23 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 20: Sistema de fixação de vigas no Shaker. À esquerda a parte superior, à direita a base do sistema de fixa.....   | 24 |
| Figura 21: Projeto do circuito da fonte de tensão regulada. ....  | 25 |
| Figura 22: Evolução do sinal de tensão ao longo do circuito da fonte MARK 2. (Souza)  | 26 |
| Figura 23: Fonte de alimentação, MARK 2 .....   | 27 |
| Figura 24: Detalhamento do circuito da fonte .....  | 27 |
| Figura 25: Projeto elétrico da fonte MARK 4 .....   | 29 |
| Figura 26: fonte MARK 4. ....   | 30 |
| Figura 27: Fonte MARK 5 .....   | 32 |
| Figura 28: fonte MARK 5. ....   | 33 |
| Figura 29: Detalhe demonstrando parte do fio exposto sobre a viga (à esquerda) e o posicionamento do termopar sobre o fio (à direita). ....                                   | 34 |
| Figura 30: Detalhe mostrando a fixação do termopar na ponta 2 da viga. ....   | 34 |
| Figura 31: Tela de configurações inicial do programa. ....  | 39 |
| Figura 32: montagem com CP 5.....   | 40 |
| Figura 33: Configuração 1 para experimentos com a viga SMAHC.....   | 41 |
| Figura 34: Configuração 2 para experimentos com a viga SMAHC.....   | 41 |
| Figura 35: Experimento evidenciando gradiente de temperatura ao longo do fio de SMA. Para esse experimento, ambos os termopares foram colocados sobre o fio de NiTi. ....     | 42 |
| Figura 36: Variação de posições em sequencia de experimentos preliminares.....  | 43 |
| Figura 37: Curva de controle de vibração seguida pelo acelerômetro de controle. ....  | 44 |
| Figura 38: Formas de vibração do primeiro, Segundo e terceiro modo de uma viga engasta-livre (Rodgers, 1959) .....  | 46 |
| Figura 39: Busca automática de frequências de ressonância entre as frequências de 10 a 1000Hz. ....   | 47 |
| Figura 40: Varredura de frequências entre 10 e 1000Hz. O nome do eixo das abcissas apresenta um erro em ambos conjuntos de gráficos, onde está escrito rad/s leia-se Hz. .... | 47 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 41: Varredura de frequências entre 10 e 1550 Hz à temperatura ambiente, monitorando o ponto 3 (terça parte da viga, a partir do ponto engastado).....              | 49 |
| Figura 42: Varredura de frequências entre 10 e 1550 Hz à temperatura ambiente, monitorando o ponto 4 (meio da viga, a partir do ponto engastado). ....                    | 50 |
| Figura 43: Varredura de frequências entre 10 e 1550 Hz à temperatura ambiente, monitorando o ponto 5 (2 terços a partir do ponto engastado). ....                         | 50 |
| Figura 44: Varredura de frequências entre 10 e 1550 Hz à temperatura ambiente, monitorando o ponto 6 (5 sextos a partir do ponto engastado). ....                         | 51 |
| Figura 45: Varredura de frequência, realizada com os fios de transmissão da fonte desconectados. Ensaio a temperatura ambiente. ....                                      | 51 |
| Figura 46: Varredura de frequência, realizada com os fios de transmissão da fonte conectados. Ensaio a temperatura ambiente.....  | 52 |
| Figura 47: Varredura de frequência, realizada com os fios de transmissão da fonte conectados. Ensaio a temperatura ambiente, com mudança nos parâmetros de controle. .... | 52 |
| Figura 48: Ensaio a temperatura de 52 °C. ....  | 53 |
| Figura 49: Ensaio a temperatura de 57 °C. ....  | 53 |
| Figura 50: Ensaio a temperatura de 61 °C. ....  | 54 |
| Figura 51: Ensaio a temperatura de 66 °C. ....  | 55 |
| Figura 52: Ensaio a temperatura de 72 °C. ....  | 55 |
| Figura 53: Data Sheet do acelerômetro de monitoramento das vibrações. ....  | 61 |
| Figura 54: Data Sheet do acelerômetro de Controle. ....   | 62 |
| Figura 55: Projeto de controle de temperatura PID utilizando a fonte MARK 5.....  | 68 |
| Figura 56: Projeto de controle de temperatura PID utilizando a fonte MARK 5.....  | 69 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1: Alguns dos zeros da Eq. 40. ....   | 20 |
| Tabela 2: Algumas características do CP 11. ....   | 21 |
| Tabela 3: Algumas características do CP 11. ....   | 22 |
| Tabela 4: Características da liga usada nos corpos de prova.....   | 22 |
| Tabela 5: Temperaturas de transformação para liga de NiTi utilizada na fabricação do CP 11, segundo (Faluhelyi, 2013)..... | 22 |
| Tabela 6: Lista de Materiais utilizados na fonte MARK 2.....   | 25 |
| Tabela 7: Características da Fonte MARK 2.....   | 26 |
| Tabela 8: Lista de Materiais utilizados na fonte MARK 4.....   | 28 |
| Tabela 9: Características da Fonte MARK 4.....   | 30 |
| Tabela 10: Lista de Materiais utilizados na fonte MARK 5.....  | 31 |
| Tabela 11: Características da Fonte MARK 5.....  | 33 |
| Tabela 12: previsões analíticas para os modos de vibração das vigas .....  | 46 |
| Tabela 13: Resultados do experimento de caracterização térmica da viga utilizando a fonte MARK 2.....                      | 63 |
| Tabela 14: Resultados do experimento de caracterização térmica da viga utilizando a fonte MARK 4.....                      | 65 |

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

|                      |   |                     |
|----------------------|---|---------------------|
| <b>A</b>             | Área  | [m <sup>2</sup> ]   |
| <b>a</b>             | aceleração  | [m/s <sup>2</sup> ] |
| <b>A<sub>f</sub></b> | Temperatura final de formação da austenítica      | [K]                 |
| <b>A<sub>s</sub></b> | Temperatura inicial de formação da austenítica    | [K]                 |
| <b>b</b>             | Largura   | [m]                 |
| <b>C</b>             | Capacitância térmica                              | [J/kg.K]            |
| <b>c<sub>v</sub></b> | Calor específico a volume constante               | [J/K]               |
| <b>E</b>             | Módulo de elasticidade efetivo                    | [Pa]                |
| <b>f</b>             | Frequência  | [Hz]                |
| <b>h</b>             | Altura  | [m]                 |
| <b>I</b>             | Corrente  | [A]                 |
| <b>J</b>             | Segundo Momento de Inércia                        | [m <sup>4</sup> ]   |
| <b>l</b>             | Comprimento                                       | [m]                 |
| <b>m</b>             | Massa   | [kg]                |
| <b>M</b>             | Momento fletor                                    | [kg*m]              |
| <b>M<sub>f</sub></b> | Temperatura final de transformação martensítica   | [K]                 |
| <b>M<sub>p</sub></b> | Máximo sobressinal                                | [%]                 |
| <b>M<sub>s</sub></b> | Temperatura inicial de transformação martensítica | [K]                 |
| <b>P</b>             | Potência  | [W]                 |
| <b>q</b>             | Peso por unidade comprimento                      | [N/m]               |
| <b>Q</b>             | Calor   | [J]                 |
| <b>R</b>             | Resistência                                       | [Ω]                 |
| <b>s</b>             | Deslocamento                                      | [m]                 |
| <b>T</b>             | Período   | [s]                 |
| <b>T<sub>d</sub></b> | Tempo derivativo                                  | [s]                 |

|       |                     |     |
|-------|---------------------|-----|
| $T_i$ | Tempo integrativo   | [s] |
| $t$   | Tempo               | [s] |
| $t_d$ | Tempo de atraso     | [s] |
| $t_r$ | Tempo de subida     | [s] |
| $t_p$ | Tempo de pico       | [s] |
| $t_s$ | Tempo de acomodação | [s] |
| $V$   | Tensão              | [V] |
| $V_m$ | Esforço Cortante    | [N] |
| $v$   | velocidade          | [v] |

$w$  função da posição na direção da espessura dependente da coordenada na direção do comprimento e do tempo. [m]

### Símbolos Gregos

|               |                       |                      |
|---------------|-----------------------|----------------------|
| $\rho$        | Densidade volumétrica | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $\varepsilon$ | Energia               | [J]                  |
| $T$           | Temperatura           | [K]                  |
| $\omega$      | Frequência angular    | [rad]                |

### Grupos Adimensionais

|          |                        |
|----------|------------------------|
| $e_{ss}$ | Erro estacionário      |
| $i$      | Unidade imaginaria     |
| $K_p$    | Constante proporcional |
| $\alpha$ | Constante              |
| $\Delta$ | Variação               |

### Subscritos

|            |           |
|------------|-----------|
| <b>abs</b> | absorvida |
|------------|-----------|

|            |            |
|------------|------------|
| <b>aus</b> | austenita  |
| <b>amb</b> | ambiente   |
| <b>in</b>  | entrada    |
| <b>mar</b> | martensita |
| <b>nes</b> | necessária |
| <b>out</b> | saída      |

### **Siglas**

AmpOp Amplificador Operacional

CI circuito integrado

DC *Direct Current* (Corrente contínua)

P Proporcional

PD Proporcional-Derivativo.

PI Proporcional-Integral.

PID Proporcional-Integral-Derivativo.

PWM *Pulse Width Modulation* (Modulação de largura de pulso)

SMA *Shape Memory Alloy* (Liga de Memória de forma)

SMAHC *Shape Memory Alloy Hybrid Compositete* (Composito Híbrido com Liga de Memória de forma)

# 1 INTRODUÇÃO

Em projetos de engenharia, é muito comum que as características dinâmicas das estruturas componentes sejam fatores determinantes para o correto funcionamento do sistema. Fenômenos como a ressonância podem ser muito desejáveis em algumas aplicações (como no funcionamento de um relógio de Quartz) e extremamente inconvenientes em outras (quando se trata, por exemplo, de estabilidade de pontes).

Soluções que permitam atuar nas características dinâmicas (e também outras características) de um sistema tornariam possíveis, por exemplo, a construção de prédios e pontes que se tornem mais estável para diferentes condições climáticas ou de amortecedores de veículos que se adaptem a terrenos adversos.

Para enfrentar esse paradigma tecnológico, foi criada uma nova classe de sistemas de materiais inteligentes ou estruturas adaptativas, inspirado em analogia com sistemas biológicos, que têm a habilidade de adaptar suas estruturas materiais à mudanças do ambiente natural à volta (Janocha, 1999). Uma das linhas de pesquisa nesse sentido envolve a utilização de compósito híbrido com liga de memória de forma (SMAHC).

Compósitos convencionais podem ser definidos como uma mistura de dois ou mais materiais, normalmente combinados macroscopicamente, para formar um novo material de engenharia com propriedades sinérgicas, que, em geral, os constituintes isoladamente não possuem (Faluhelyi, 2013).

As SMAs (Shape Memory Alloy) são definidas como uma classe de material que tem a capacidade de recuperar-se de uma deformação de até 8%, recuperando sua forma original, quando é aquecido acima de certa temperatura (Sandoval, 2010).

Os compósitos híbridos com memória de forma (SMAHC) foram criados por Rogers e Robershaw (1988) por combinações de matriz polimérica, normalmente termofixa, com e sem reforço de fibras de carbono, aramida e/ou vidro, acrescentada a SMA, em forma de lâminas, fios ou particulados. Entretanto, pode-se estender o conceito de SMAHC para matrizes cerâmicas e metálicas, que podem ter outras denominações na literatura (Faluhelyi, 2013).

A Universidade de Brasília já conta com um certo número de dissertações estudando vigas (elementos estruturais simples) feitas de SMAHC. Buscando apoio e visando dar continuidade a pesquisa já iniciada o presente trabalho apresenta como objetivo global:

- Demonstrar a possibilidade de se utilizar vigas SMAHC como estrutura adaptativa para controle de vibrações, explorando exclusivamente a variação do módulo de elasticidade de SMAs quando aquecidas.

A atenção será voltada para a faixa de temperaturas entre 25°C e 72°C.



O objetivo principal pode ser dividido em dois objetivos específicos:

1. Propor um sistema de controle de temperatura que seja adequado às exigências de estabilidade de temperatura.
2. Caracterizar, pelo menos de modo preliminar, a influência da temperatura (na região que a transformação de fase) sobre características vibracionais de vigas SMAHC, tais como: variação na frequência natural e no módulo de elasticidade da viga.

A metodologia utilizada será a seguinte:

1. Balizado pelas experiências já realizadas e princípios básicos da física, pelo método da tentativa e erro desenvolver-se-á uma fonte de energia controlável, que seja capaz de fornecer potência suficiente para alcançarem-se as temperaturas desejadas sobre o corpo de prova.
2. Utilizando-se uma bancada de testes compostas por Shaker e corpo de prova (viga fabricada em SMAHC) disponíveis no laboratório; pela fonte desenvolvida, e por sistema de aquisição de dados adequado, realizar-se-ão experimentos que forneçam dados que permitam a avaliação de características dinâmicas da supracitada viga.

Os experimentos consistirão de excitações senoidais em diversas frequências e para diferentes temperaturas na viga que estará engastada em uma das extremidades e livre na outra (viga cantilever).

O trabalho está dividido da seguinte forma: no capítulo 2 será apresentada breve revisão bibliográfica sobre assuntos relevantes para a realização, compreensão e análise do trabalho desenvolvido; o capítulo 3 apresentará um modelo matemático das vigas em questão com foco nas características de vibração do sistema; o capítulo 4 descreve o aparato experimental utilizado para os experimentos de vibração, expondo algumas características chave de todos os materiais utilizados e detalhando o projeto das partes projetadas pelo autor do trabalho, incluindo-se aí o projeto do sistema de controle de temperatura (fonte elétrica controlada); esse capítulo também expõe os procedimentos experimentais executados; o capítulo 5 evidencia os resultados obtidos ao mesmo tempo em que fornece uma breve análise de cada resultado; no capítulo 6, são sumarizadas as conclusões do trabalho e propõe sugestões de trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ESTRUTURAS ADAPTATIVAS

São conhecidas como estruturas adaptativas ou estruturas inteligentes, aquelas que têm a capacidade de perceber alterações nas condições operacionais ou ambientais através de sensores e promover adaptações através de atuadores, visando manter um comportamento satisfatório dentro de parâmetros pré-determinados (Castilho, 2008).

### 2.2 LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

Nas últimas décadas os materiais com propriedades inteligentes se tornaram uma solução tecnológica para novas aplicações com foco em sistemas adaptativos que exploram este tipo de propriedades, como por exemplo, as ligas com memória de forma (SMA). Estes materiais são capazes de se adaptar ao ambiente, alterando sua forma, rigidez e outras propriedades, tornando-os vantajosos para diversas aplicações tecnológicas, especialmente no aperfeiçoamento de processos com auxílio de sensores, atuadores e sistemas de controle (Sandoval 2010).

As SMAs (*Shape Memory Alloy*) são definidas como uma classe de material que tem a capacidade de recuperar-se de uma deformação de até 8%, recuperando sua forma original, quando é aquecido acima de certa temperatura. Trata-se de ligas capazes de recuperar a geometria inicial por meio do aquecimento (efeito de memória de forma) ou por meio da retirada de carga ou pressão (pseudoelasticidade) (Sandoval, 2010).

Particularmente, as ligas de maior importância são NiTi, CuZnAl e CuAlNi. As ligas de NiTi são as de maior potencial em aplicações comerciais porque combinam boas propriedades mecânicas com os fenômenos de memória de forma e biocompatibilidade. (Castilho, 2008)

As ligas NiTi básicas são um composto intermetálico, binário, equiatômico. Normalmente, se adiciona um excesso de níquel para diminuir a temperatura de transformação e aumentar o limite elástico da fase austenita. (Sandoval, 2010).

O fenômeno de transformação de fase é responsável pelas propriedades inteligentes de uma SMA. Essas transformações são processos não-difusivos envolvendo fases sólidas que ocorrem a velocidades muito elevadas (Sandoval, 2010).

As ligas de níquel-titânio possuem duas diferentes fases dependentes da temperatura martensita e austenita. Quando a liga está na fase martensita e é submetida a um processo

de aquecimento, ocorre uma mudança da fase da martensita para austenita, sendo  $A_s$  (*Austenite start*) e  $A_f$  (*Austenite finish*) as temperaturas de início e final de transformação austenítica. Do mesmo modo quando a liga está na fase austenita e é resfriada ocorre uma mudança de fase para martensita sendo  $M_s$  (*Martensite start*) e  $M_f$  (*Martensite finish*) as temperaturas de início e final da transformação martensítica.

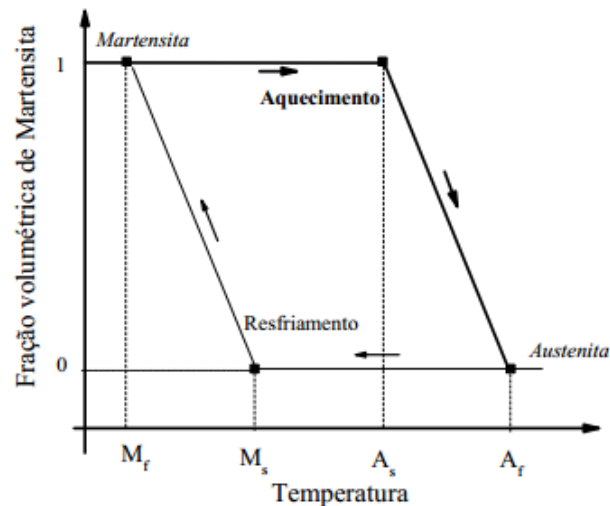


Figura 1: Evolução do processo de transformação de fase das SMA. (CAMPO, 2012)

No diagrama de fases da liga de Ni-Ti, pode ser observada a presença de uma região triangular denominada “Ni-Ti”, próxima da composição equiatômica. Esta fase tem estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), em temperaturas acima de 1090 °C, e uma estrutura cúbica ordenada B2 (fase austenita-cúbica) abaixo dessa temperatura. Se da região B2, uma liga é resfriada em água, ocorre uma transformação martensítica de B2 para B19’ (fase martensítica – monoclinica) abaixo da respectiva temperatura  $M_s$ . (CAMPO, 2012)

Uma das aplicações de SMA é o controle ativo de vibrações. Nestes casos, busca-se desenvolver sistemas de controle de vibração baseados na capacidade das SMA de recuperar uma forma previamente definida quando ativadas termicamente (Castilho, 2008).

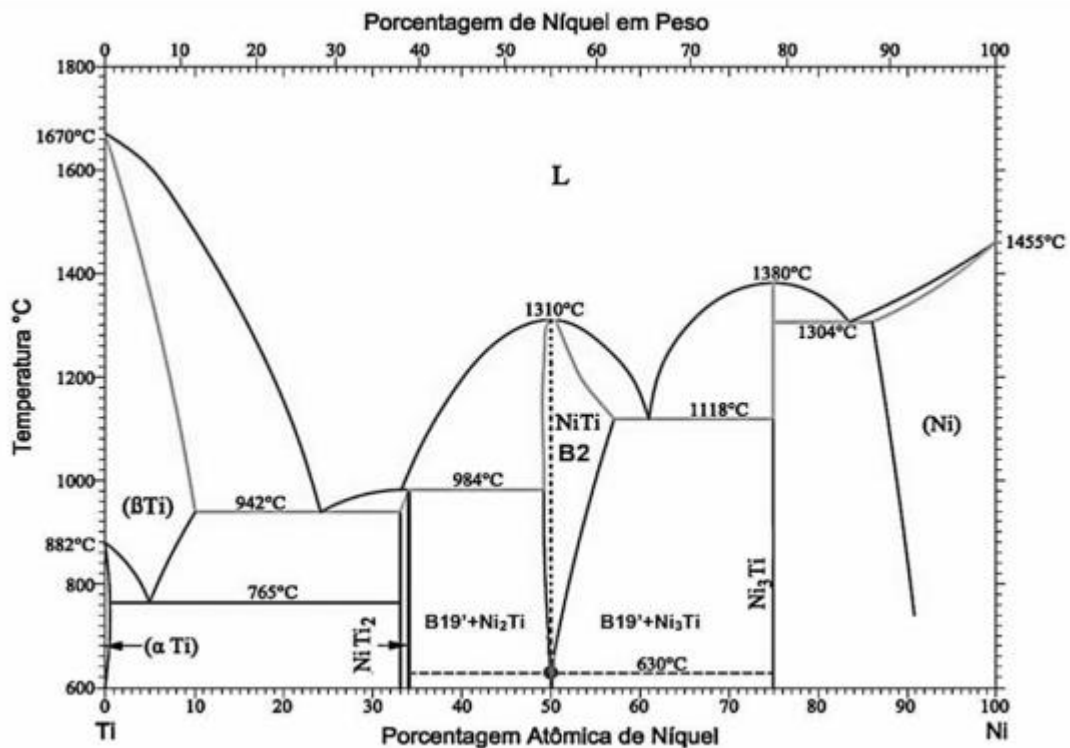


Figura 2: Diagrama de fases do Ni-Ti (CAMPO, 2012).

Outra linha de desenvolvimento é o de sistemas de controle passivo de vibração via SMA, que explora basicamente o comportamento pseudoelástico das mesmas (Castilho, 2008).

Além das aplicações que buscam explorar as SMA como atuadores têm-se ainda uma linha de pesquisa muito promissora que busca explorar exclusivamente a variação de elasticidade das SMA quando do aquecimento. O objetivo é desenvolver elementos de máquinas com rigidez variável. O módulo de elasticidade das SMA na fase austenítica é tipicamente três vezes maior do que o da fase martensítica sendo, portanto, possível controlar a rigidez da estrutura como um todo através do controle de rigidez do elemento de máquina baseado em SMA (Castilho, 2008).

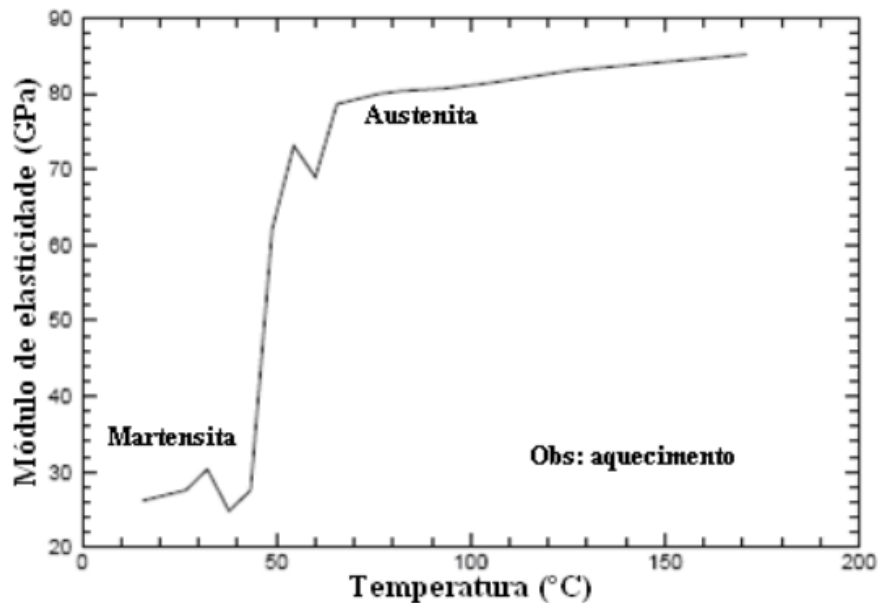


Figura 3: Módulo de elasticidade versus temperatura (Castilho, 2008).

Uma das principais aplicações desta categoria é o desenvolvimento de mancais com rigidez variável para o controle de máquinas rotativas. (Castilho, 2008). O comportamento termomecânico diferenciado das ligas com memória de forma tem motivado o seu emprego no controle de vibração também em estruturas civis (CATILHO, 2008).

## 2.3 MATERIAIS COMPÓSITOS

Um grande número de materiais compósitos, os quais consistem em mais de um tipo de material, têm sido engenheirado. A fibra de vidro é um exemplo familiar, onde fibras de vidro são incorporadas no interior de um material polimérico. Um compósito é projetado para exibir uma combinação das melhores características de cada um de seus materiais componentes. (Callister, 2006).

Os materiais compósitos são constituídos de duas fases: matriz e reforço. A matriz é o que confere a estrutura ao material compósito, preenchendo os espaços vazios que ficam entre os materiais reforços e mantendo-os em suas posições relativas. Os reforços são os que realçam propriedades mecânicas, eletromagnéticas ou químicas do material compósito como um todo. (Sandoval, 2010)

Um compósito reforçado com fibras relativamente novo é o do tipo híbrido, obtido utilizando-se dois ou mais tipos de fibras diferentes no interior de uma única matriz; os híbridos possuem melhor combinação global de propriedades do que os compósitos que contêm apenas um único tipo de fibra. (Callister, 2006). Na verdade, a variedade de compósitos híbridos que se pode produzir é imensa, onde podem ser utilizadas várias combinações de fibras e até fios metálicos na matriz. Os compósitos híbridos mais comuns

são obtidos pelo uso de fibras de carbono e de vidro inseridas numa matriz polimérica. (CAMPO, 2012)

## 2.4 COMPOSITOS HIBRIDOS COM LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA (SMAHC)

Uma nova classe de aplicação de materiais adaptativos surgiu quando se utilizaram ligas de Ni-Ti, com memória de forma, como atuadores embebidos ou incorporados em estruturas compósitas. Estes compósitos foram chamados na literatura como SMAHC (*Shape Memory Alloy Hybrid Composite*). Um exemplo dessas estruturas é apresentado na fig. 4, onde uma viga laminada híbrida vidro/epóxi tem fios de SMA embebidos com o propósito de controle de forma e/ou vibração (CAMPO, 2012).

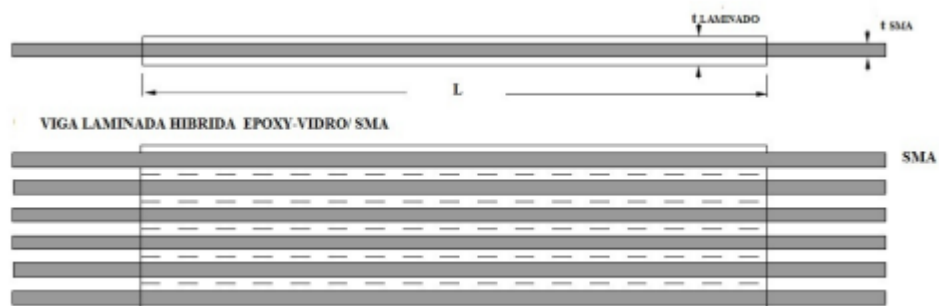


Figura 4: Compósito híbrido com memória de forma SMAHC (CAMPO, 2012).

## 2.5 TEORIA DE CONTROLE

Um sistema de controle consiste em subsistemas e processos reunidos com o propósito de controlar as saídas dos processos (Nise, 2008). Construímos sistemas de controle por quatro razões principais (Nise, 2008):

1. Amplificação de potência;
2. Controle remoto;
3. Facilidade de uso da forma de entrada;
4. Compensação de perturbações.

Existem duas configurações principais de sistemas de controle: controle em malha aberta e controle em malha fechada.

### 2.5.1 Sistemas a malha aberta

Um sistema de malha aberta genérico é mostrado na fig. 5. Consiste em um subsistema chamado transdutor de entrada, que converte a forma de entrada na que é usada pelo controlador. O controlador age sobre um processo ou planta. (Nise, 2008) Outros sinais,

como perturbações, são mostrados somados as saídas do controlador e do processo por meio de junções de adição (Nise, 2008). A característica que distingue um sistema a malha aberta é que este não pode compensar a ação de quaisquer perturbações que sejam adicionadas ao sinal atuante do controlador (Nise, 2008). A saída de um sistema a malha aberta é corrompida não apenas por sinais que se agregam aos comandos do controlador, mas também por perturbações na saída (Nise, 2008). Os sistemas a malha aberta, portanto, não corrigem os efeitos de perturbações e são comandados unicamente com base na entrada (Nise, 2008).

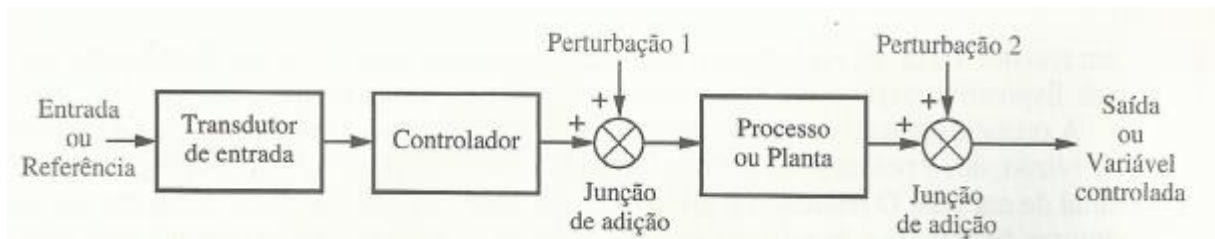


Figura 5: Diagrama de blocos de sistema de controle a malha aberta (Nise, 2008).

## 2.5.2 Sistemas a malha fechada

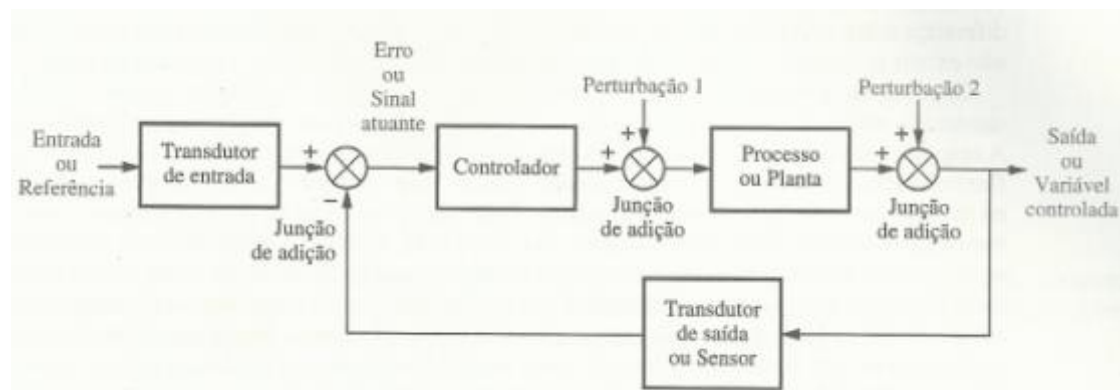


Figura 6: Diagrama de blocos de sistema de controle a malha fechada (Nise, 2008).

As desvantagens dos sistemas de malha aberta, especificamente a sensibilidade a perturbações e a incapacidade de corrigir os efeitos dessas perturbações, podem ser superadas nos sistemas a malha fechada (Nise, 2008).

O sistema a malha fechada compensa perturbações medindo a resposta da saída, retornando essa medição através de um canal de retroação e comparando essa resposta com a entrada na junção de adição. Se existir alguma diferença entre as duas respostas, o sistema age sobre a planta, por meio de um sinal atuante, para fazer a correção (Nise, 2008).

Os sistemas a malha fechada, por conseguinte, apresentam a vantagem óbvia de uma maior precisão que os sistemas de malha aberta (Nise, 2008).

### 2.5.3 Erro de estado estacionário e outras caracterizações de respostas temporais de sistemas de controle.

A resposta temporal de um sistema de controle é constituída de duas partes: a resposta transitória e a resposta estacionária. Por resposta transitória, entendemos aquela que vai do estado inicial ao estado final. Por resposta estacionária, entendemos o comportamento. Do sinal de saída á medida em que  $t$  tende ao infinito (Ogata, 2007).

Se o sinal de saída de um sistema de um sistema em regime permanente não coincidir exatamente com a entrada, diz-se que o sistema apresenta um erro estacionário. Esse erro é indicativo da precisão do sistema. Na análise do sistema de controle, deve-se examinar o comportamento da resposta transitória (Ogata, 2007).

Na especificação das características das respostas transitórias de um sistema de controle a uma entrada em degrau unitário, é comum se especificar o seguinte (Ogata, 2007):

1. Tempo de atraso,  $t_d$ : trata-se do tempo requerido para que a resposta alcance metade de seu valor pela primeira vez (Ogata, 2007).
2. Tempo de subida,  $t_r$ : [e o tempo requerido para que a resposta passe de 10% a 90%, ou de 5% a 95%, ou de 0% a 100% do valor final (Ogata, 2007).
3. Máximo sobressinal (ou apenas sobressinal),  $M_p$ : é o valor máximo de pico da curva de resposta, medido a partir da unidade. Se o valor final da resposta em regime permanente diferir da unidade, então é comum utilizar porcentagem máxima de sobressinal (Ogata, 2007).
4. Tempo de pico,  $t_p$ : é o tempo para que a resposta atinja o primeiro pico de sobressinal (Ogata, 2007).
5. Tempo de acomodação,  $t_s$ : é o tempo necessário para que a curva de resposta alcance valores em uma faixa (usualmente de 2% a 5%) em torno do valor final, aí permanecendo indefinidamente (Ogata, 2007).



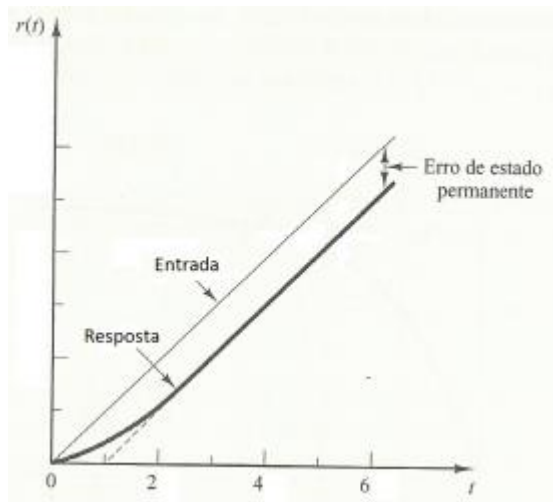


Figura 7: Exemplo de resposta de sistema de controle a um sinal de entrada do tipo rampa.

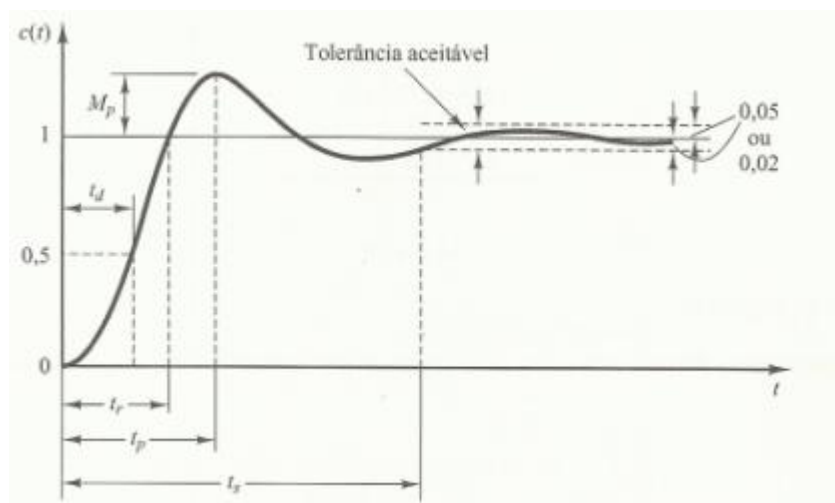


Figura 8: Curva de resposta a uma entrada em degrau unitário que mostra  $t_d$ ,  $t_r$ ,  $t_p$ ,  $M_p$ , e  $t_s$ . (Ogata, 2007).

### 2.5.4 Classificação de controladores

Considere que o sinal de saída do controlador é  $u(t)$  e o sinal de erro atuante é  $e(t)$ . Controladores podem ser classificados de acordo com suas ações de controle.

#### 1. Controlador de duas posições ou on-off

Em um sistema de controle de duas posições o elemento atuante tem somente duas posições fixas, que são, em muitos casos, simplesmente on e off. O controle de duas posições ou on-off é relativamente simples e barato (Ogata, 2007).

No controle de duas posições, o sinal  $u(t)$  permanece em um valor máximo ou em um valor mínimo, conforme o sinal de erro atuante for negativo ou positivo. Assim,

$$\begin{cases} u(t) = U_1 & \text{para } e(t) > 0 \\ u(t) = U_2 & \text{para } e(t) < 0 \end{cases} \quad (1)$$

Onde  $U_1$  e  $U_2$  são constantes. O valor mínimo  $U_2$  é normalmente zero ou  $-U_1$  (Ogata, 2007).

A figura 9, apresenta um esboço do comportamento desse tipo de sistema,



Figura 9: Esboço do comportamento de um sistema controlado por on/off. (a) variável controlada em função do tempo. (b) saída do controlador em função do erro atuante.

## 2. Controlador proporcional

Para um controlador com ação de controle proporcional, a relação entre saída do controlador  $u(t)$  e o sinal de erro atuante  $e(t)$  é:

$$u(t) = K_p e(t), \quad (2)$$

onde  $K_p$  é denominado ganho proporcional. (Ogata, 2007).

Para uma entrada em degrau unitário, o controle proporcional de um sistema sem integrador ocasiona um erro estacionário, dado por:

$$e_{ss} = \frac{1}{K_p + 1} \quad (3)$$

(Ogata, 2007). Esse erro residual pode ser eliminado se uma ação de controle integral for incluída no controlador (Ogata, 2007).

O erro estacionário,  $e_{ss}$ , pode ser reduzido aumentando o valor do ganho  $K_p$ . O aumento desse valor, entretanto, vai tornar a resposta do sistema mais oscilatória (Ogata, 2007). Note também que para um sinal de erro atuante igual a zero o sinal de saída do controlador também será zero.

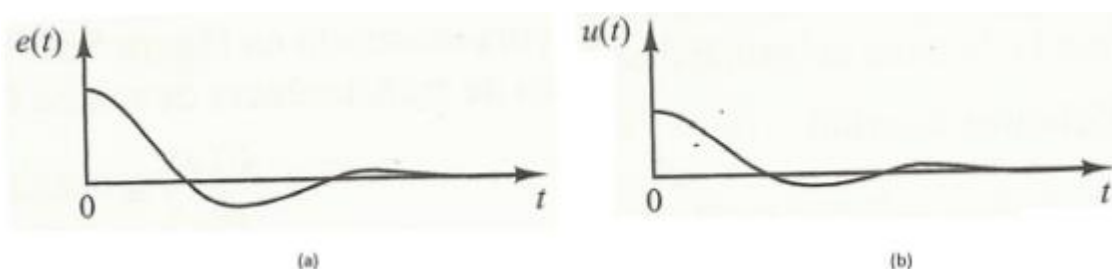


Figura 10: Esboço do comportamento de um sistema controlado por controle proporcional. (a) erro atuante em função do tempo. (b) saída do controlador em função do tempo. (Ogata, 2007).

### 3. Controlador integral

Em um controlador com ação de controle integral, o valor da saída  $u(t)$  do controlador é modificado a uma taxa de variação proporcional ao sinal de erro atuante. Ou seja,

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t), \quad (4)$$

ou

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt, \quad (5)$$

onde  $K_i$  é uma constante ajustável (Ogata, 2007).

Analisando-se a eq. 5 pode-se chegar a primeira conclusão importante sobre sistemas de controle com ação integral: esse tipo de sistema permite um sinal de saída do controlador não nulo, mesmo para os instantes de tempo em que  $e(t)$  é nulo.

Note que a ação de controle integral, embora remova o erro residual ou o erro estacionário, pode conduzir a uma resposta oscilatória (Ogata, 2007).

### 4. Controlador proporcional integral (PI)

É um controlador que “soma” as ações proporcional e integral. O sinal de saída desse controlador é dado por:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt, \quad (6)$$

onde  $T_i$  é chamado de tempo integrativo (Ogata, 2007). Os valores de  $K_p$  e  $T_i$  devem ser escolhidos cuidadosamente para garantir uma resposta temporal apropriada. Projetando de maneira adequado o controlador PI é possível fazer a resposta temporal à entrada em degrau exibir um sobressinal relativamente pequeno ou nenhum. A velocidade de resposta, contudo, fica muito lenta. Isso ocorre porque o controlador PI sendo um filtro passa-baixas, atenua os componentes de alta frequência do sinal (Ogata, 2007). Na sessão 2.3.10 encontrar-se-á um breve esclarecimento sobre filtros.

### 5. Controlador proporcional-derivativo (PD):

A ação de controle de um controlador proporcional derivativo é definida por:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (7)$$

onde  $T_d$  é chamado de tempo derivativo.

Uma ação de controle derivativo, quando acrescentada a um controlador proporcional, permite que se obtenha um controlador de alta sensibilidade. Uma vantagem em utilizar a ação de controle derivativo é que essa responde a uma taxa de variação do erro atuante e pode produzir uma correção significativa antes que o valor de erro atuante se torne muito elevado. Portanto, o controle derivativo prevê o erro atuante, inicia uma ação corretiva antecipada e tende a aumentar a estabilidade do sistema (Ogata, 2007).

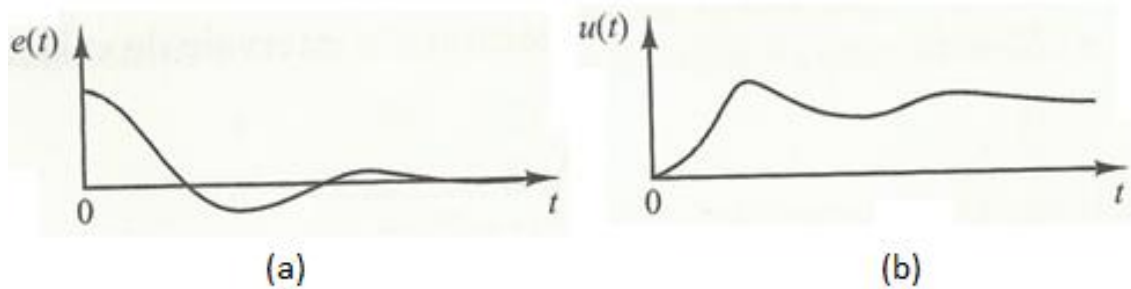


Figura 11: Esboço do comportamento de um sistema controlado por controle integral. (a) erro atuante em função do tempo. (b) saída do controlador em função do tempo. (Ogata, 2007).

#### 6. Controlador proporcional-integra-derivativo (PID)

A combinação das ações de controle proporcional, de controle integral e de controle derivativo é denominada ação de controle proporcional-integral-derivativo. Essa ação combinada tem as vantagens individuais de cada uma das três ações de controle. A equação de um controlador com essas ações combinadas é dada por:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt. \quad (8)$$

#### 2.5.5 Sistemas controlados por computador

Em muitos sistemas modernos, o controlador (ou compensador) é um computador digital. A vantagem de usar um computador é que se pode controlar ou compensar muitas malhas pelo mesmo computador através de forma compartilhada (time sharing). Além disso, qualquer ajuste requerido nos parâmetros do compensador para produzir uma resposta desejada pode ser feito através de mudanças no *software* e não no *hardware* (Nise, 2008).

## 2.6 OUTROS CONCEITOS

### 2.6.1 *Pulse Width Modulation (PWM)*

*Pulse Width Modulation*, ou PWM, é uma técnica para obtenção de resultados analógicos por meios digitais. Um controle digital é usado para criar uma onda quadrada, um sinal chaveado entre ligado e desligado. Esse padrão de liga-desliga pode simular tensões entre completamente ligado e desligado mudando a porção de tempo que o sinal fica ligado em relação ao tempo que ele fica desligado. O período de tempo em que ele fica ligado é chamado de largura de pulso. Para obter valores analógicos, você muda, ou modula, essa largura de pulso (Hirzel).

Segue agora um exemplo de como funciona um PWM. Imagine que o valor mínimo de um sinal PWM é zero e que o valor máximo é 10, se a frequência do sinal for suficientemente rápida e regulando a largura de pulso para 25% do ciclo de trabalho. A saída do sistema terá valor 2,5.

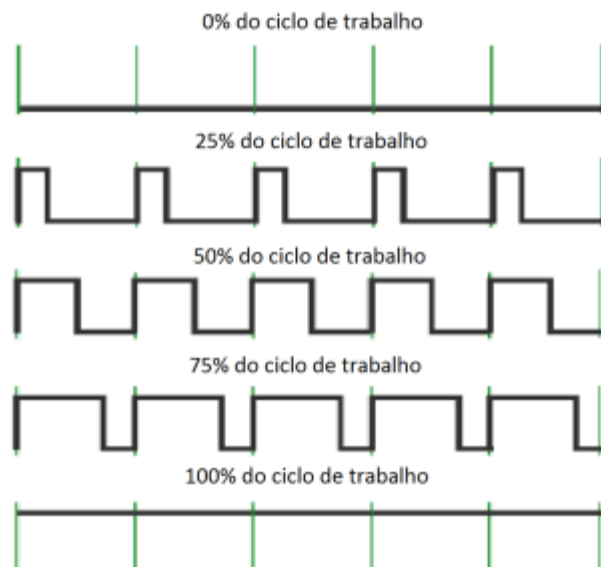


Figura 12: Funcionamento de um PWM.

# 3 MODELO MATEMÁTICO DE VIBRAÇÕES SOBRE OS CORPOS DE PROVA

## 3.1 HIPÓTESES E CONDIÇÕES

Será utilizado um modelo de viga compósita isotrópica equivalente de Euler-Bernolli, nas condições de contorno livre-engastada (cantilever). A viga hipotética tem comprimento ( $l$ ), largura ( $b$ ) e altura ( $h$ ), onde a razão do comprimento pela altura deve ser igual ou superior a 10.

Segundo Faluhelyi (2013), a expressão da frequência natural em função da geometria e propriedades mecânicas, partindo de uma viga de material homogêneo, serve para viga ortotrópica sob mesmas condições de carregamento, dimensionamento e de disposição simétrica de camadas em relação ao plano médio.

Para uma viga ser classificada como viga de Euler, ela deve ter dimensão da seção transversal pequena comparada com o seu comprimento; existência de uma linha neutra onde a viga não sofre deformação em tração nem em compressão; ser de material elástico e homogêneo; ter as seções planas, considerando que permanecem planas após a deformação e curvatura da viga ser assumida pequena; serem consideradas muito pequenas ou desconsideradas as deformações por cisalhamento, a resistência inercial e a aceleração em rotação (aceleração angular) das seções retas da viga (Abreu, 2012).

## 3.2 DIAGRAMA DE CORPO LIVRE

A modelagem matemática será baseada no diagrama de corpo livre apresentado na fig. 13. A linha tracejada representa a linha neutra do corpo em estudo.

## 3.3 EQUAÇÕES DE MOVIMENTO

Aplicando-se a segunda lei de Newton ao elemento de viga apresentado na fig. 13, obtém-se a eq. 9.

$$V_m(x, t) + \frac{\partial V_m(x, t)}{\partial x} \partial x - V_m(x, t) - q \partial x = \rho A \partial x \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2}, \quad (9)$$

onde  $A$  é a área da seção transversal,  $V_m$  é o esforço cortante,  $q$  é uma força distribuída qualquer,  $x$  é o comprimento da viga,  $\rho$  é a densidade volumétrica e  $w$  é a função

da posição na direção da espessura dependente da coordenada na direção do comprimento e do tempo.

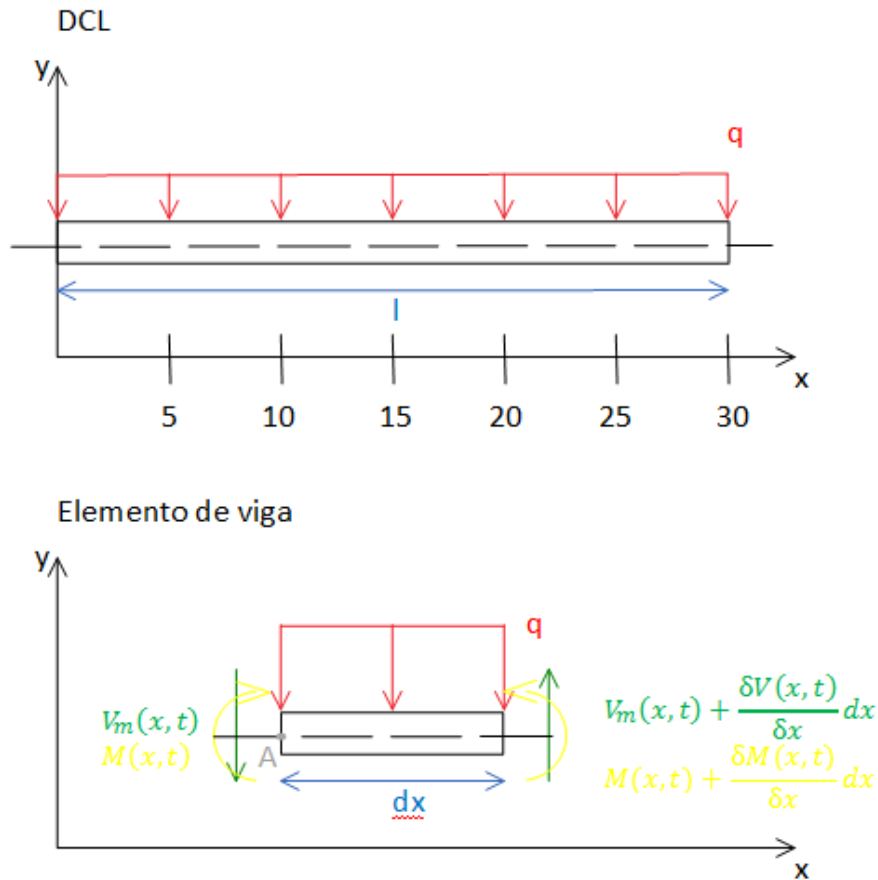


Figura 13: Diagrama de corpo livre de uma viga engastada-livre.

Pode-se obter a eq.10 calculando-se o somatório dos momentos entorno do ponto A do elemento de viga.

$$\left( M(x,t) + \frac{\partial M(x,t)}{\partial x} \partial x \right) - M(x,t) + \left( V_m(x,t) + \frac{\partial V_m(x,t)}{\partial x} \partial x \right) \partial x - q \partial x \frac{\partial x}{2} = 0. \quad (10)$$

Onde  $\mathbf{M(x,t)}$  é o momento fletor.

Simplificando as eq. 9 e eq. 10 e assumindo o valor  $(\partial x * \partial x)$  muito pequeno obtém-se, respectivamente eq. 11 e eq. 12.

$$\frac{dV}{dx} - \rho * A * \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} = q, \quad (11)$$

$$V(x,t) = - \frac{\partial M(x,t)}{\partial x}. \quad (12)$$

Diferenciando-se a eq. 12 e substituindo-a na eq. 11, obtém-se a eq. 13.

$$- \frac{\partial^2 M(x,t)}{\partial x^2} - \rho * A * \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} = q. \quad (13)$$

Segundo Faluhelyi (2013) a relação entre momento fletor e a função da posição na direção da espessura dependente da coordenada na direção do comprimento e do tempo.

é dado pela eq. 14.

$$M = E * J * \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2}. \quad (14)$$

A grandeza **E\*J** também é conhecida como rigidez flexural, onde **E** é o módulo de Elasticidade efetivo e **J** é o segundo momento de inércia. Diferenciando-se 2 vezes a eq. 14 e substituindo-a na eq. 13, chega-se a equação de movimento dada pela eq. 15.

$$-\frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} - \frac{\rho * A}{E * J} * \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} = \frac{q}{E * J}. \quad (15)$$

### 3.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO E SOLUÇÃO ANALITICA DA EQUAÇÃO DE MOVIMENTO

Visto que a equação de movimento é uma equação diferencial de 4ª ordem, sabe-se que serão necessárias 4 condições de contorno para a solução desse problema. A fig. 14 apresenta alguns exemplos de condições de contorno para diversos tipos de vínculos em vigas.

Para a solução da equação de movimento pode-se utilizar o método de separação de variáveis, selecionando-se **w(x,t)** como apresentado na eq. 16.

$$w(x, t) = Y(x)O(t). \quad (16)$$

Escolhendo-se o **O(t)** apresentado na eq. 17, onde  $\omega$  é a frequência em radianos, a eq. 15 reduz-se a eq. 18, onde  $g^4$  é dado pela eq. 19.

$$O(t) = e^{i\omega t} \quad (17)$$

$$-\frac{\partial^4 Y(x)}{\partial x^4} - g^4 * Y(x) = \frac{q}{E * J} \quad (18)$$

$$g^4 = \frac{\rho * A * \omega^2}{E * J} \quad (19)$$

Utilizando-se a teoria de equações diferenciais, sabe-se que para resolver-se a equação de movimento (eq. 17), deve-se obter a solução da equação homogênea (eq. 20), que tem solução analítica geral, conhecida, dada pela eq. 21. (Faluheiyi, 2013)

$$-\frac{\partial^4 Y(x)}{\partial x^4} - g^4 * Y(x) = 0, \quad (20)$$

$$Y(x) = \alpha_1 * \text{sen}(g * x) + \alpha_2 * \text{cos}(g * x) + \alpha_3 * \text{senh}(g * x) + \alpha_4 * \text{cosh}(g * x). \quad (21)$$

Para a determinação das constantes,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  e  $\alpha_4$ , utilizar-se-ão as condições de contorno. No problema abordado nesse trabalho, uma das extremidades da viga está engastada e a outra livre.



Utilizando-se a eq 21, suas derivadas de 1ª, 2ª e 3ª ordem e as condições de contorno para extremidade engastada e para extremidade livre, apresentadas na fig. 14, obtêm-se as eq. 22, 23, 24 e 25, que podem ser agrupadas em uma única equação matricial (eq. 37).





| Tipos de apoio  | Condições de contorno  |
|---|--|
| <p data-bbox="347 394 647 427">Extremidade Engastada</p>                 | <ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="927 409 1273 443">✓ Flecha no engaste é zero:<br/><math>w = 0</math></li> <li data-bbox="919 546 1283 580">✓ Rotação no engaste é zero:<br/><math>\frac{\partial w}{\partial x} = 0</math></li> </ul>  |
| <p data-bbox="357 730 636 763">Extremidade Apoiada</p>                   | <ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="858 719 1342 752">✓ Flecha no apoio do 2º gênero é zero:<br/><math>w = 0</math></li> <li data-bbox="834 855 1366 889">✓ Momento no apoio do 2º gênero é zero:<br/><math>EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0</math></li> </ul>                               |
| <p data-bbox="376 1072 617 1106">Extremidade Livre</p>                 | <ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="890 1039 1313 1072">✓ Momento na extremidade livre:<br/><math>EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0</math></li> <li data-bbox="898 1218 1305 1252">✓ Cortante na extremidade livre:<br/><math>EI \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} = 0</math></li> </ul>      |
| <p data-bbox="272 1411 724 1444">Extremidade com Apoio Deslizante</p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="866 1435 1337 1469">✓ Rotação no apoio deslizante é zero:<br/><math>\frac{\partial w}{\partial x} = 0</math></li> <li data-bbox="863 1581 1340 1615">✓ Cortante no apoio deslizante é zero:<br/><math>EI \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} = 0</math></li> </ul> |

Figura 14: condições de contorno para diversos tipos de vínculos. (Abreu, 2012).

$$Y(0) = \alpha_1 * \text{sen}(g * 0) + \alpha_2 * \text{cos}(g * 0) + \alpha_3 * \text{senh}(g * 0) + \alpha_4 * \text{cosh}(g * 0) = 0$$

$$\alpha_1 * 0 + \alpha_2 * 1 + \alpha_3 * 0 + \alpha_4 * 1 = 0, \quad (22)$$

$$Y'(0) = g * (\alpha_1 * \text{cos}(g * 0) - \alpha_2 * \text{sen}(g * 0) + \alpha_3 * \text{cosh}(g * 0) + \alpha_4 * \text{senh}(g * 0)) = 0$$

$$\alpha_1 * 1 - \alpha_2 * 0 + \alpha_3 * 1 + \alpha_4 * 0 = 0, \quad (23)$$

$$Y''(l) = g^2 * (-\alpha_1 * \text{sen}(g * l) - \alpha_2 * \text{cos}(g * l) + \alpha_3 * \text{senh}(g * l) + \alpha_4 * \text{cosh}(g * l)) = 0$$

$$-\alpha_1 * \text{sen}(g * l) - \alpha_2 * \text{cos}(g * l) + \alpha_3 * \text{senh}(g * l) + \alpha_4 * \text{cosh}(g * l) = 0, \quad (24)$$

$$Y'''(l) = g^3 * (-\alpha_1 * \text{cos}(g * l) + \alpha_2 * \text{sen}(g * l) + \alpha_3 * \text{cosh}(g * l) + \alpha_4 * \text{senh}(g * l)) = 0$$

$$-\alpha_1 * \text{cos}(g * l) + \alpha_2 * \text{sen}(g * l) + \alpha_3 * \text{cosh}(g * l) + \alpha_4 * \text{senh}(g * l) = 0, \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen}(g * l) & -\text{cos}(g * l) & \text{senh}(g * l) & \text{cosh}(g * l) \\ -\text{cos}(g * l) & \text{sen}(g * l) & \text{cosh}(g * l) & \text{senh}(g * l) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (26)$$

Da álgebra linear, sabe-se que se o primeiro termo da eq. 26 tiver determinante diferente de zero, a equação terá solução única. Nesse caso, a solução trivial dada pela eq. 27.

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Portanto, para que a eq. 26 tenha solução diferente da solução trivial (eq. 27) deve ser atendida a eq. 28.

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen}(g * l) & -\text{cos}(g * l) & \text{senh}(g * l) & \text{cosh}(g * l) \\ -\text{cos}(g * l) & \text{sen}(g * l) & \text{cosh}(g * l) & \text{senh}(g * l) \end{vmatrix} = 0. \quad (28)$$

Calculando-se o determinante da eq. 39, chega-se à equação característica apresentada (eq. 29).

$$1 + \text{cos}(g * l) * \text{cosh}(g * l) = 0. \quad (29)$$

Utilizando-se o *software* Wolframalpha da Wolfram Research obtém-se a solução gráfica apresentada na fig. 15. Os valores aproximados para alguns dos zeros da equação são apresentados resumidamente na Tab. 1.

### 3.5 FRÊQUENCIAS NATURAIS

Como demonstrado na secção anterior, para que a equação homogenia eq. 20 Tenha solução diferente da solução trivial o valor  $g * l$  deve ser alguma solução da eq. 29,  $(g * l)_n$ , ou seja:

$$g * l = (g * l)_n. \quad (30)$$

Pode-se isolar  $g$  na eq. 19 para fazer uma substituição na eq. 30, obtendo-se a eq. 31:

$$\sqrt[4]{\frac{\rho * A * \omega^2}{E * J}} * l = (g * l)_n. \quad (31)$$

Resolvendo-se a eq. 31 para  $\omega$ , obtém-se:

$$\omega_n = (g * l)_n^2 \sqrt{\frac{E * J}{\rho A l^4}} \quad (32)$$

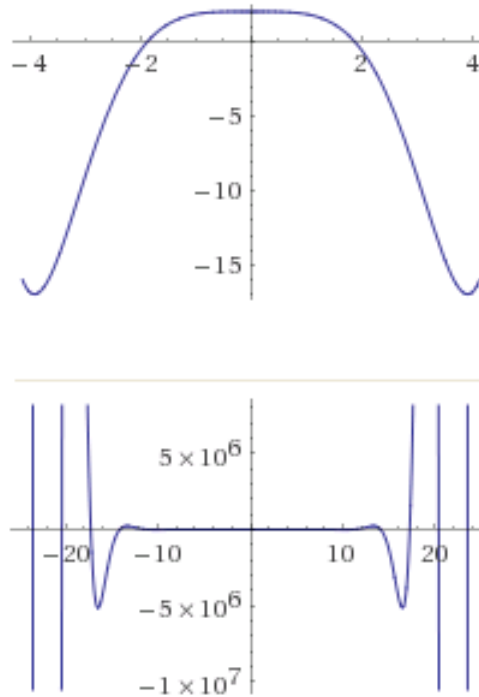


Figura 15: solução gráfica da Eq. 29.

Tabela 1: Alguns dos zeros da Eq. 29.

|             |         |
|-------------|---------|
| $(g * l)_1$ | 1,87510 |
| $(g * l)_2$ | 4,6940  |
| $(g * l)_3$ | 7,8548  |

Mas para uma viga de seção retangular (caso em questão)  $J$  é dado por:

$$J = \frac{A * h^2}{12}, \quad (33)$$

onde  $A$  é a área da seção transversal. Mas,

$$f_n = \frac{\omega_n}{2 * \pi}. \quad (34)$$

Onde  $f_n$  é a frequência natural de vibração em Hz. Logo, substituindo-se eq. 33 e eq. 34 na eq. 32 obtém-se:

$$f_n = \frac{(g * l)_n^2 * h}{4 * \pi * l^2} \sqrt{\frac{E}{3 * \rho}}. \quad (35)$$

Enfatize-se aqui que  $l$  na eq. 46 é o comprimento a partir do ponto de engaste!

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova são os mesmos usados por (Faluhelyi, 2013) em seus experimentos.

Segundo Faluhelyi, As vigas SMAHC prismáticas utilizadas nesse trabalho, que foram fabricadas por ele, foram produzidas em um molde fechado, tipo macho-fêmea, com duas camadas de quatro fios de Ni-Ti unidirecionais cada uma, afastadas simetricamente o máximo possível do plano médio, e intercaladas por 17 camadas de mantas de fibras curtas de vidro-E, todas embebidas em matriz epóxi (Faluhelyi, 2013).

A seguir estão sumarizadas as características mais importantes das vigas.

#### 4.1.1 Corpo de prova (CP 5)

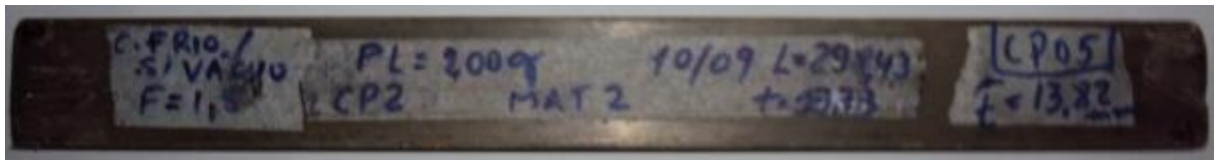


Figura 16: Corpo de prova CP 5.

Tabela 2: Algumas características do CP 5.

| h [m]                 | b [m]                 | l [m]                  | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | E [Pa]             |
|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------------|--------------------|
| $13,82 \cdot 10^{-3}$ | $31,55 \cdot 10^{-3}$ | $298,43 \cdot 10^{-3}$ | 1528                        | $11,45 \cdot 10^9$ |

#### 4.1.2 Corpo De Prova (Cp 11)



Figura 17: Corpo de prova CP 11.

Adotou-se nesse trabalho um padrão de nomenclatura em que se definiu como ponta 1 do CP 11 a ponta que aparece do lado direito na fig. 17. Esse é o lado que receberá as conexões com o sistema de aquecimento elétrico. A ponta 2 é a que aparece do lado esquerdo na fig. 17.

Tabela 3: Algumas características do CP 11.

| h [m]                 | b [m]                | l [m]                  | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $E_{mar}$ [Pa]    | $E_{aus}$ [Pa]     |
|-----------------------|----------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------|--------------------|
| $12,29 \cdot 10^{-3}$ | $31,4 \cdot 10^{-3}$ | $298,43 \cdot 10^{-3}$ | 1527                        | $9,53 \cdot 10^9$ | $10,25 \cdot 10^9$ |

### 4.1.3 A liga de NiTi

A tabela 4 apresenta as características da liga de NiTi utilizada na confecção dos corpos de prova. As informações foram retiradas de (Faluhelyi, 2013).

Tabela 4: Características da liga usada nos corpos de prova

| Composição |             |
|------------|-------------|
| Componente | Porcentagem |
| Ni         | 55,49       |
| Ti         | 44,5        |
| Impurezas  | 0.01        |

Segundo o fabricante, Memory-Metalle GmbH,  $A_s$  é 62 °C, mas experimentos realizados por (Faluhelyi, 2013) apontam para os valores indicados na tab. 5.

Tabela 5: Temperaturas de transformação para liga de NiTi utilizada na fabricação do CP 11, segundo (Faluhelyi, 2013).

| $M_f$ [°C] | $A_s$ [°C] | $M_s$ [°C] | $A_f$ [°C] |
|------------|------------|------------|------------|
| 35,6       | 46,30      | 48,7       | 59,00      |

## 4.2 A BANCADA DE TESTES

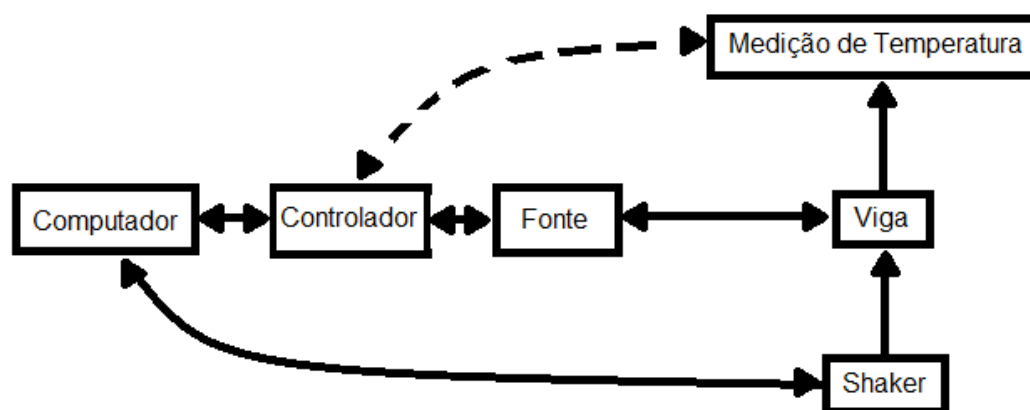


Figura 18: Esquemático da banca de testes.

O shaker utilizado foi o Electrodynamic Shaker, modelo ET-127, da LABWORKS INC.



Figura 19: Shaker utilizado nos experimentos de vibração.

Para o controle de vibração e aquisição de dados foi utilizado o processador de sinais Abacus e acelerômetros da PCB Piezotronics cujos *Data Sheets* encontram-se disponíveis no anexo A. Os acelerômetros vem acompanhados em suas embalagens de uma cera para fixação em conjunto com o software SignalStar Scalar Vibration Controller da Data Physics Corporation.

O *software* permite a plotagem dos gráficos de aceleração vs. tempo (ou frequência); velocidade vs. tempo (ou frequência); deslocamento vs. tempo (frequência). Além disso, permite o controle da vibração por deslocamento, velocidade ou aceleração; faz varreduras de frequência; busca de frequências naturais entre muitas outras coisas.

Para que fosse possível a realização dos experimentos de vibração foi necessário o projeto de um sistema de fixação que acoplasse a viga ao Shaker. O projeto desse sistema de fixação é bem simples. Ele foi construído na oficina do Laboratório de Engenharia Mecânica da UnB (SG 9).

O parafuso de  $\frac{1}{4}$ -20 soldado à base do dispositivo de fixação tem as dimensões corretas para ser rosqueado no furo central da parte superior do Shaker, que pode ser observado na fig. 19.

O corpo de prova é engastado no sistema de fixação utilizando-se uma configuração “sanduíche”, ou seja, a viga é espremida entre a parte superior e a base do sistema de fixação. Para espremer a viga entre as duas peças foram utilizados 4 parafusos que atravessam o furo passante na parte superior do suporte e se enroscam no furo roscado da base, para se conseguir um bom engaste, foram utilizados parafusos do tipo allen que permitem, facilmente, a aplicação de um torque maior.

O rasgo na base tem por objetivo ajudar no alinhamento das vigas de compósito. A parte superior tinha sido originalmente projetada com um rasgo menor, porque a intenção era utilizar a mesma peça para fazer ensaios com uma viga de aço cuja largura é de 25,4 mm, os experimentos com a viga de aço não chegaram a ser feitos, mas o rasgo na peça superior veio a calhar e serviu para acomodar os termopares.

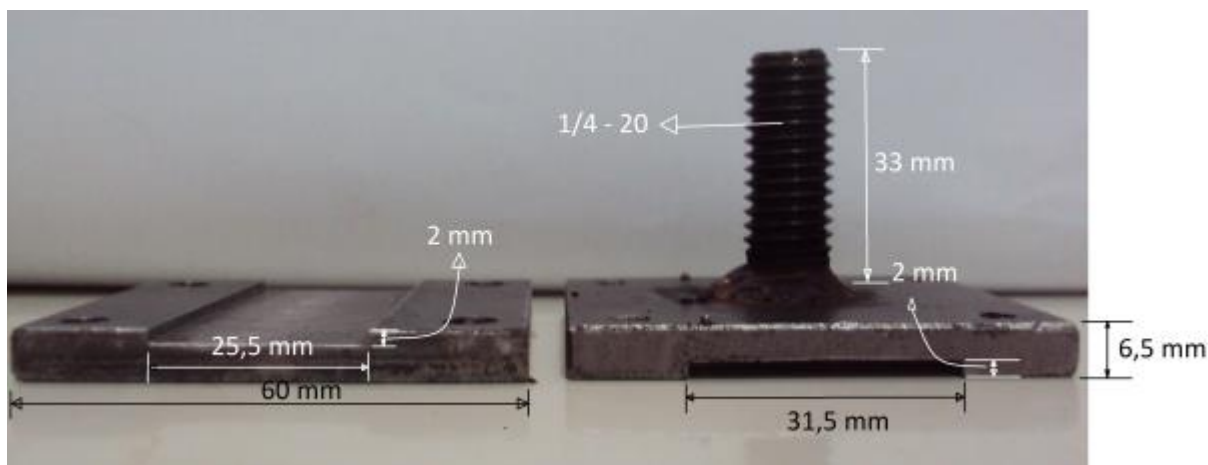


Figura 20: Sistema de fixação de vigas no Shaker. À esquerda a parte superior, à direita a base do sistema de fixa.

A medição de temperatura foi feita utilizando-se os multímetros ET-1110 e ET-1110A. Os multímetros ET-1110 e ET-1110A vêm acompanhados de um termopar de tipo K, a precisão do termopar para a faixa de temperaturas medida é de  $\pm 2.2$  °C. O multímetro da Fluke consegue suportar uma corrente de até 10 A continuamente com precisão de 0,2%, além disso é capaz de fazer leituras de valores de resistências bem baixos com resolução de 0,01  $\Omega$  e precisão de 0,2%

Além da medição feita com os multímetros tentou-se usar um termopar do tipo J em conjunto com o amplificador AD594AQ. Esse termopar seria o responsável por fechar a malha de controle.

Durante a realização dos trabalhos, vários projetos de fonte foram considerados, sendo cada novo projeto nomeado de MARK n, onde n é o número da versão. A seguir se exporão não todos os projetos, mas os que foram de maior interesse.

Um pré-teste foi feito com a colaboração do Sr. Tadeu Costa Nesse teste foi feita uma medida de resistência sobre os terminais da viga, que, aparentemente, era de 18 $\Omega$ . Com o uso da fonte de tensão variável do Tadeu verificou-se que a aplicação de, aproximadamente, 10V de tensão (limite da fonte dele) sobre os terminais da viga era seguro, mas não parecia ser suficiente para elevar a temperatura da viga a níveis superiores a 62 °C ( $A_f$  da liga de NiTi usada no experimento).

Utilizando as informações do pré-teste com o Sr. Tadeu e a equação (10) uma primeira fonte, com limite de carga de 1,5A, foi projetada, mas após o primeiro teste, verificou-se uma sobrecarga na fonte. Essa sobrecarga cortava o fornecimento de corrente impedindo o aquecimento adequado da viga. Por esse motivo a fonte que já estava construída sofreu algumas pequenas modificações, dando origem ao projeto MARK 2. Também nesse período, medias mais apuradas da resistência do fio foram feitas, utilizando-se para isso um

multímetro de melhor precisão. Nessas medidas verificou-se que, na verdade, a resistência dos fios parece variar entre  $4\Omega$  e  $8\Omega$ .

A MARK 2 é uma fonte de tensão contínua (DC) controlado por tensão. Essa fonte é uma fonte de controle manual. A fig. 21 e as tab. 6 e 7 resumizam seu projeto e características.

O potenciômetro é usado para controlar manualmente a tensão de saída da fonte, quanto maior a resistência entre os terminais do potenciômetro, maior será a tensão de saída da fonte. Sendo o valor mínimo de tensão entre os terminais de saída da fonte, de aproximadamente  $1,2\text{ V}$  e a tensão máxima de, aproximadamente,  $17\text{ V}$ .

O funcionamento da fonte é simples. Como o transformador utilizado tem derivação central é possível fazer uma retificação de onda completa utilizando-se apenas dois diodos. Em seguida é utilizado um capacitor de alta capacitância para fazer a filtragem do sinal e por último passa-se o sinal por um regulador de tensão para obter-se uma tensão DC regulada de, aproximadamente  $17\text{ V}$ . A figura 22 mostra esquematicamente o percurso do sinal elétrico através da MARK 2.

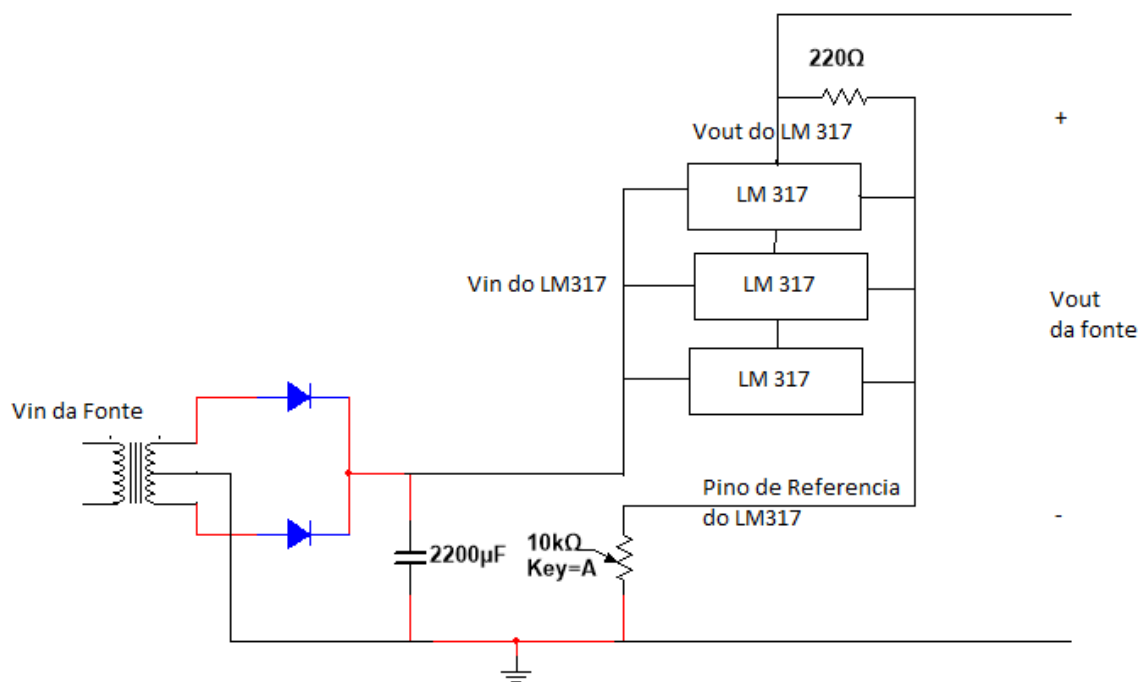


Figura 21: Projeto do circuito da fonte de tensão regulada.

Tabela 6: Lista de Materiais utilizados na fonte MARK 2

| Componentes   | Quantidade | Características   |
|---------------|------------|---|
| Protoboard    | 1          |   |
| Transformador | 1          | Tensão de entrada: 127 VAC (terminais preto e azul)<br>220 VAC (terminais preto e vermelho) |



|  |   |  |
|--|---|--|
|  |   | Tensão de saída: 0 VAC (entre os 2 terminais vermelhos)<br>12 VAC(entre um terminal vermelho e o preto)<br>Corrente Máxima: 2 <sup>a</sup> |
| Capacitor                                    | 1 | Capacitância: 2200µF<br>Tensão Máxima: 25V   |
| Diodos                                       | 2 | Corrente máxima: 6 A<br>Modelo utilizado: 6A10 JF  |
| Potenciômetro                                | 1 | Resistencia máxima: 10kΩ   |
| Resistor                                     | 1 | Resistência: 220Ω  |
| Regulador de Tensão                          | 3 | Corrente Máxima: 1,5A<br>Modelo utilizado: LM 317  |
| Dissipador de Calor para regulador de tensão | 3 | Feito usando-se latinhas de cerveja e refrigerante.  |

Tabela 7: Características da Fonte MARK 2

|                           |  |
|---------------------------|--|
| Tensão de entrada         | 127 VAC (terminais preto e azul)<br>220 VAC (terminais preto e vermelho) |
| Tensão de saída sem carga | Ajustável: 1,2 ~ 17 VDC  |
| Corrente Máxima           | 2 A  |

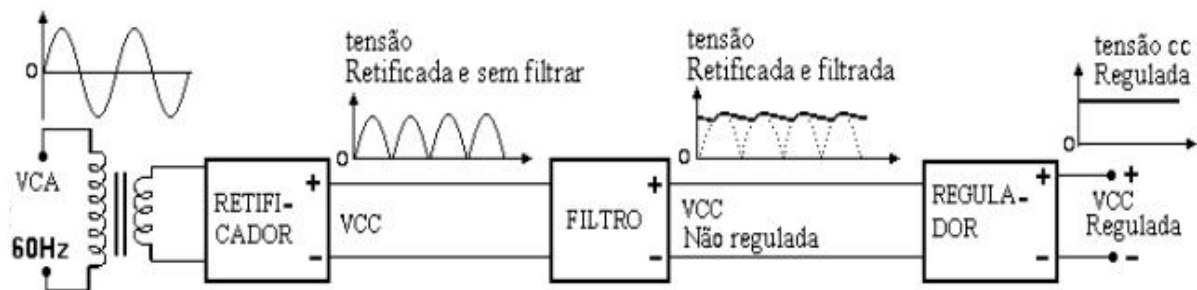


Figura 22: Evolução do sinal de tensão ao longo do circuito da fonte MARK 2. (Souza)

Para a regulação de tensão foram utilizados três LM 317 em paralelo, o intuito de usar-se 3 Circuitos Integrados (CI) foi dividir a corrente entre eles e assim não sobrecarregar os CIs quando a carga (fios de SMA) puxasse a máxima corrente que o transformado pode fornecer (2 A). Nessa configuração a corrente máxima em cada regulador seria 0,666 A, valor bem abaixo do que cada CI suporta individualmente (1,5 A).

O projeto de fonte MARK 2 é muito bom, mas só permite que o controle seja feito manualmente. Na intenção de construir um controle de temperatura que fosse automatizado e que permitisse aquisição de dados, como a potência fornecida a carga em cada momento e a temperatura medida no corpo de prova, novos projetos de fonte foram concebidos.

A fonte MARK 4 foi concebida como uma fonte de corrente controlada por tensão, não só pela facilidade de controlar eletronicamente uma fonte de corrente bastando para isso utilizar-se um transistor como amplificador, mas também porque esta forneceria uma estabilidade maior ao sistema de controle, já que a tensão da MARK 2 oscilava razoavelmente nas condições de teste.

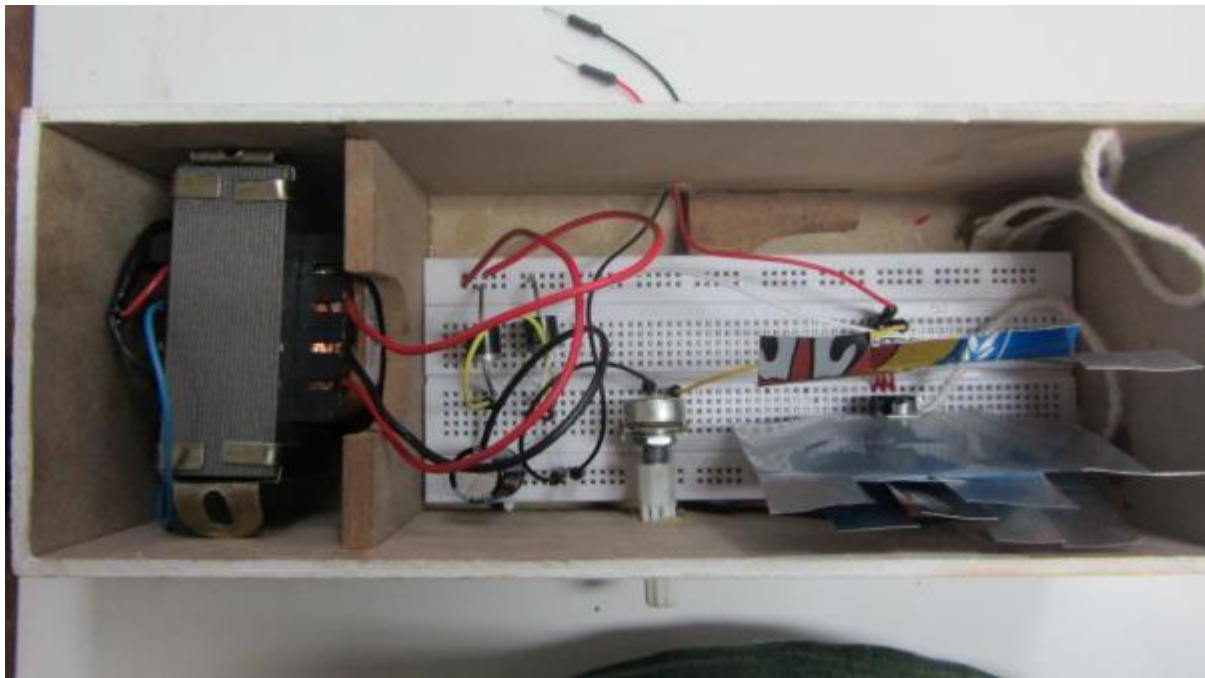


Figura 23: Fonte de alimentação, MARK 2

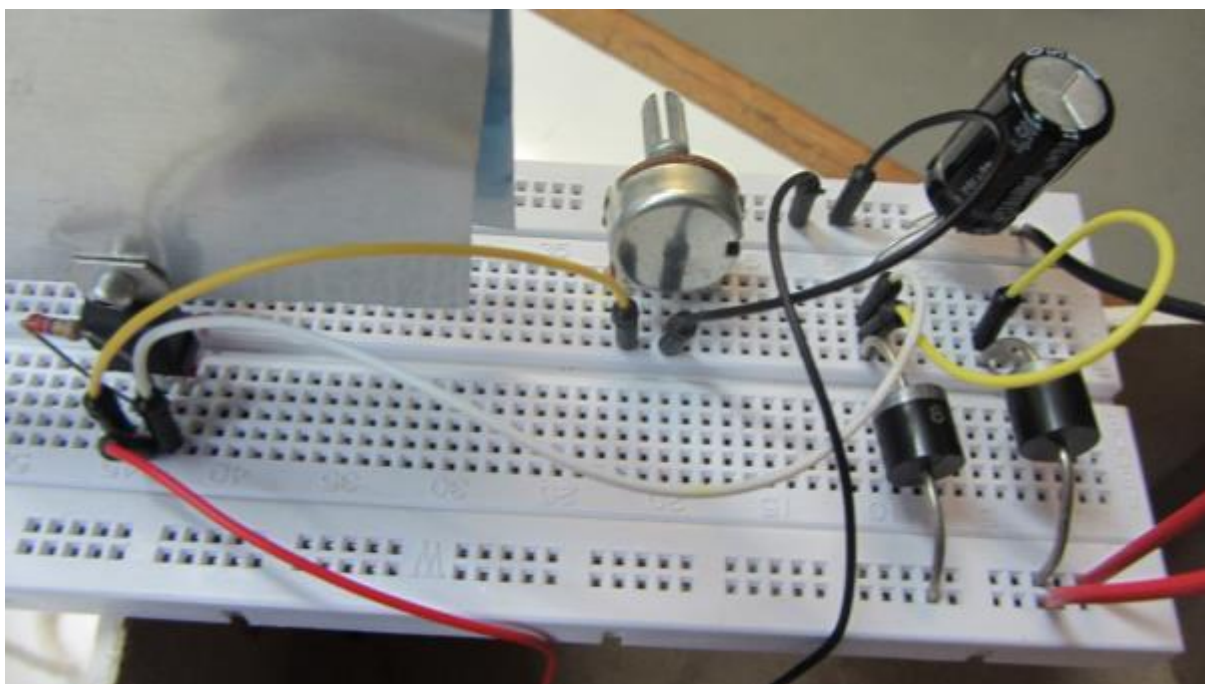


Figura 24: Detalhamento do circuito da fonte

A fonte MARK 4 não se preocupa em retificar o sinal. Ela usa um sinal de alimentação que já é DC e permite que através de um sinal de controle de baixa tensão o usuário defina

a corrente que passará pela carga. O projeto e características dessa fonte encontram-se resumidos na fig. 25 e nas tab. 8 e 9.

O resistor R1 e o capacitor C1 são uma implementação de filtro passa baixas. Esse filtro se faz necessário porque o sinal de controle que será utilizado vai ser do tipo PWM. O que nos interessa em um sinal PWM é somente seu valor médio. O valor médio de um sinal, como foi apresentado na revisão bibliográfica é a parte do espectro de frequências do sinal que tem frequência zero. Portanto, o valor médio pode ser extraído de um sinal se fazendo com que esse sinal passe por um filtro passa-baixa com frequência de corte muito pequena.

A saída de um filtro passa-baixa, implementado com um resistor e um capacitor, é a tensão sobre o capacitor. A frequência de corte desse filtro pode ser calculada de acordo com a eq. 36. Já o tempo de resposta ( $t_s$ ) de um sistema desse tipo pode ser aproximado pela eq. 37, onde **R** é o valor da resistência e **C** é o valor de capacitância. Por isso os valores do resistor e do capacitor foram escolhidos como um compromisso entre o tempo de resposta, que foi escolhido como menor que 0,2 s; e a frequência de corte, escolhida como menor do que 10 Hz, além disso, para o projeto real do sistema deve-se considerar os valores de componentes que se encontram no mercado, sendo assim os valores escolhidos de resistência e capacitância foram, respectivamente, igual a 150  $\Omega$  e 150  $\mu\text{F}$

$$f = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (36)$$

$$t_s = 5RC. \quad (37)$$

O transistor é um componente que pode ser utilizado em uma infinidade de aplicações. No caso particular dessa fonte, ele é usado como um amplificador de corrente, sua função é pegar a corrente que passa pelo resistor R9 e amplifica-la. O ganho do transistor varia de acordo com a temperatura, e quando em operação, especialmente, em altas correntes a temperatura do transistor sobe muito, por isso fez-se necessário a utilização de um dissipador de corrente, que além de proteger o circuito favorece a linearidade do sistema.

Foi verificado em simulação que a adição do resistor R2 também favorece a linearidade do sistema, quanto maior o valor dessa resistência mais linear o sistema será, mas como se deseja passar uma alta corrente nesse ramo do circuito e a tensão de alimentação é de apenas 19 V, o valor da resistência R2 é limitada a poucos ohms.

Tabela 8: Lista de Materiais utilizados na fonte MARK 4

| Componentes | Quantidade | Características  |
|-------------|------------|--|
| Protoboard  | 1          |  |
| Fonte DC    | 1          | Tensão de entrada: 100 ~ 240 VAC<br>Tensão de saída: 19 VDC<br>Corrente Máxima: 2.1 A<br>Modelo utilizado: carregador de computadores da Samsung |

|  |             |   |
|--|-------------|---|
| Transistor                                   | 1           | Corrente Máxima: 10 A<br>Modelo utilizado: TIP 122  |
| Capacitor                                    | 1           | Capacitância: 150 $\mu$ F<br>Tensão Máxima: 25 V  |
| Resistor 5 W                                 | 3<br>1      | Resistência: 0,56 $\Omega$<br>1 $\Omega$  |
| Resistor de 2 W                              | 1           | Resistência: 220 $\Omega$   |
| Resistor de ¼ W                              | 5<br>1<br>1 | Resistência: 10 k $\Omega$ $\pm$ 1%<br>Resistência: 2.2 k $\Omega$ $\pm$ 5%<br>Resistência: 150 $\Omega$ $\pm$ 5% |
| Ventoinha                                    | 1           | Corrente de entrada: 0,09 A   |
| Dissipador de Calor para regulador de tensão | 1           |   |

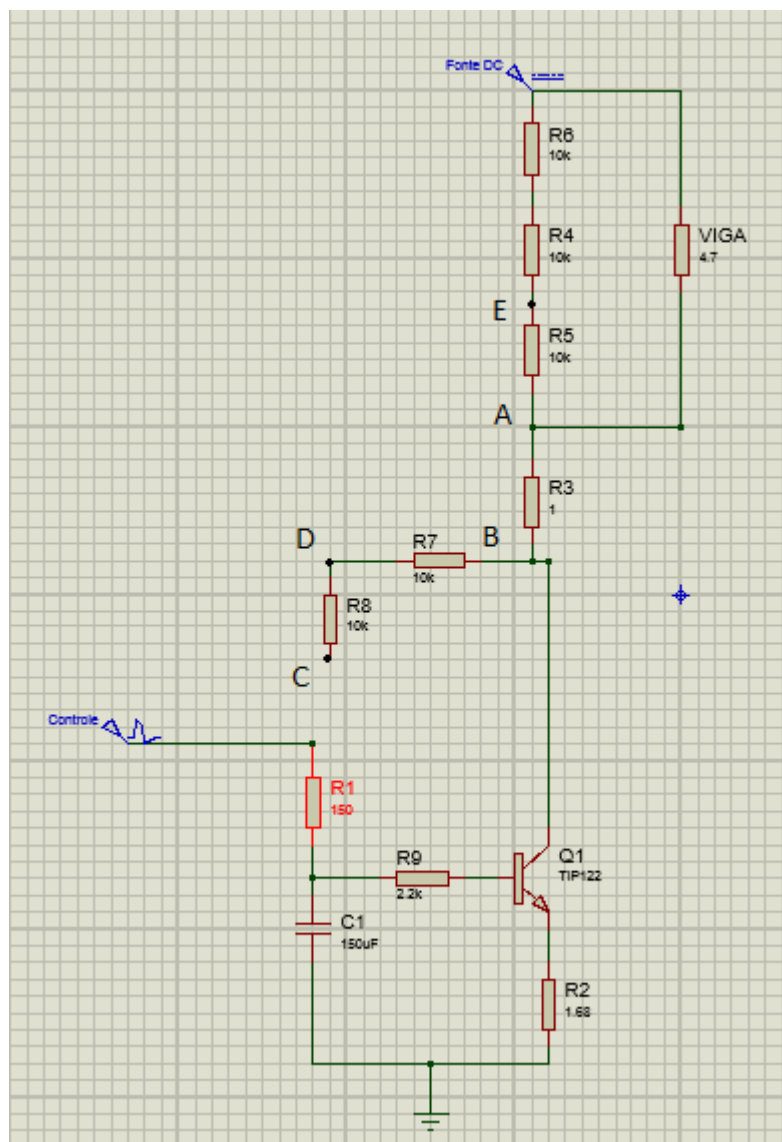


Figura 25: Projeto elétrico da fonte MARK 4

Tabela 9: Características da Fonte MARK 4

|                    |  |
|--------------------|--|
| Tensão de entrada  | 100 ~ 240 VAC  |
| Tensão de controle | 0 ~ 5 VDC  |
| Corrente de saída  | Ajustável de 0 ~ 1,9 A (para um sinal de controle entre 0 e 5 V) |

Para que a o transistor trabalhasse na faixa de corrente desejada,  $0 < I < 2$  A, o resistor R9 precisa ser escolhido de forma correta. Utilizou-se o simulador Proteus da Labcenter Electronics para determinar esse valor de resistência pelo método da tentativa e erro.

Os resistores R4, R5 e R6 formam um divisor de tensão que quando colocado em paralelo com o fio de SMA na viga permitem que um microcontrolador (que suporta entradas máximas de 5 V) consiga ler tensões grandes na carga (fio de SMA). Esses resistores devem ser escolhidos de tal modo que a resistência do divisor de tensão seja muito maior do que a resistência no fio, evitando assim que a corrente drenada da viga seja grande, o que alteraria o valor de tensão sobre ela. Os valores dessa resistência foram escolhidos como:

$$R4 = R5 = R6 = 10 \text{ k}\Omega. \quad (38)$$

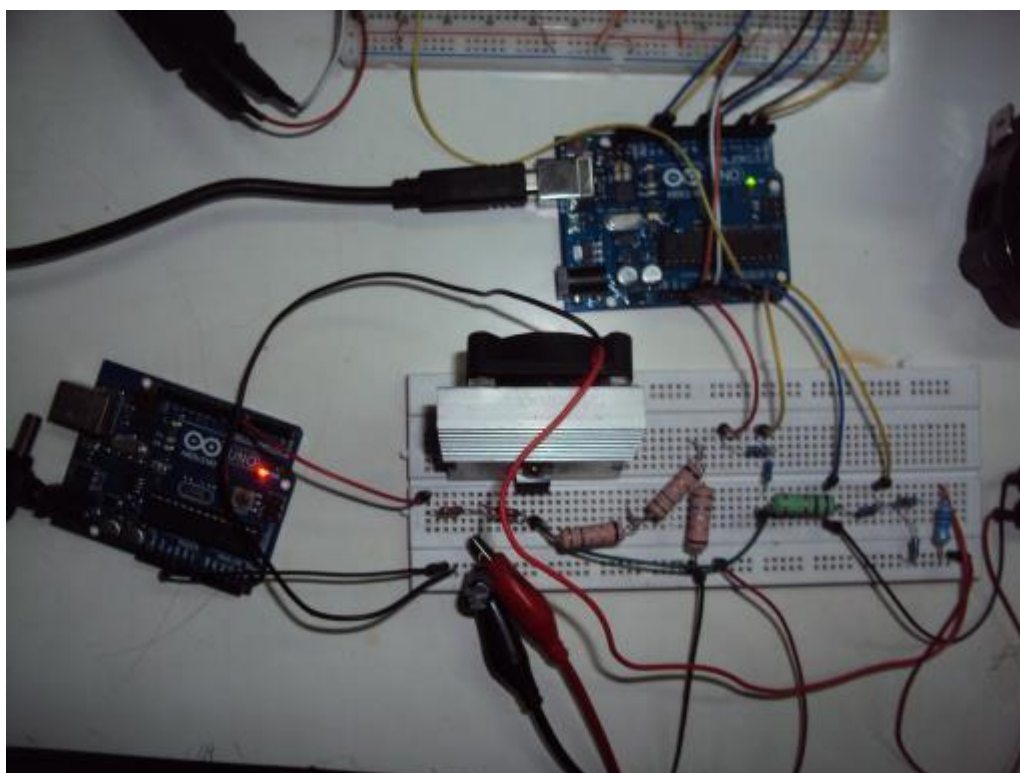


Figura 26: fonte MARK 4.

Dessa forma, a resistência do divisor de tensão é cerca de 6000 vezes maior do que a resistência do fio de SMA na viga (que foi aproximada como sendo de  $4,7 \Omega$ ). Utilizando-se esse divisor de tensão o microcontrolador pode ler uma tensão de até 15 V no fio de SMA,

basta que o micro controlador leia a diferença de tensão entre os pontos A e E, para saber o valor de tensão no SMA multiplica-se esse valor por 3.

O resistor R3 permite uma leitura da corrente que passa no fio de SMA que será aproximadamente igual a corrente que passa no resistor R3. Escolhendo se uma resistência de 1  $\Omega$  para o resistor R3 e utilizando-se a lei de Ohm, sabe-se que a tensão sobre esse resistor será igual a corrente que passa por ele. Por isso, para saber a corrente que passa no fio de SMA, basta que o controlador leia a diferença de tensão sobre o resistor R3.

As resistências R7 e R8 estão presentes aí para que um microcontrolador faça a leitura de tensão do ponto B em relação ao ponto A, que é uma tensão negativa já que o sentido da corrente é de A para B.

A fonte MARK 5 é muito semelhante a fonte MARK 4, mas para essa versão foi utilizada uma fonte DC de entrada com capacidade de fornecer mais potência, o circuito foi implementado em uma placa perfurada para conseguir suportar uma corrente bem mais alta, visto que a corrente máxima que uma protoboard aguenta é de 3 A.

A principal diferença entre a MARK 5 e a MARK 4, no entanto, é a substituição do resistor R9 por um amplificador operacional (AmpOp). Além de fornecer um melhor isolamento entre o sinal de controle e a parte de alta potência do circuito da fonte, o amplificador operacional confere uma estabilidade muito maior ao circuito e diminui drasticamente a dependência do circuito em relação ao transistor que é um componente de difícil caracterização. Entre dois transistores de mesmo modelo e fabricados pelo mesmo fabricante podem existir diferenças grandes de características. Ou seja, no caso de o transistor queimar, uma fonte com forte dependência do transistor tem que ser recalibrada.

O projeto e características da MARK 5 são apresentados na fig. 27 e nas tab. 10 e 11

O amplificador operacional é um componente que quando realimentado negativamente (quando o pino de saída, 1, está conectado de alguma forma a entrada negativa, pino 2), se encarrega de fazer a tensão no pino de entrada negativo, pino 2, ser igual a tensão no pino de entrada positivo, pino 3.

Fazendo a conexão do AmpOp, como mostrado na figura 28 a corrente passa a depender somente do valor da resistência R2 e da tensão de entrada. Além do mais, qualquer oscilação no circuito será corrigida pelo AmpOp.

Tabela 10: Lista de Materiais utilizados na fonte MARK 5

| Componentes     | Quantidade | Características   |
|-----------------|------------|---|
| Placa perfurada | 1          |   |
| Fonte DC        | 1          | Tensão de entrada: 100 ~ 240 VAC<br>Tensão de saída: 24 VDC<br>Corrente Máxima: 5 A |

|  |   |   |
|--|---|---|
|  |   | Modelo utilizado: Foram utilizadas duas fontes genéricas de 12 VDC e 5 A em série o motivo de se ter feito isso é que saia a metade do preço de se comprar uma fonte de 24 VDC 5 A. |
| Transistor                                   | 1 | Corrente Máxima: 10 A<br>Modelo utilizado: TIP 122  |
| Capacitor                                    | 1 | Capacitância: 150 $\mu$ F<br>Tensão Máxima: 25 V  |
| Resistor 10 W                                | 2 | Resistência: 1 $\Omega$   |
| Amplificador Operacional                     | 1 | Modelo: LM 324  |
| Ventoinha                                    | 1 | Corrente de entrada: 0,09 A   |
| Dissipador de Calor para regulador de tensão | 1 |   |

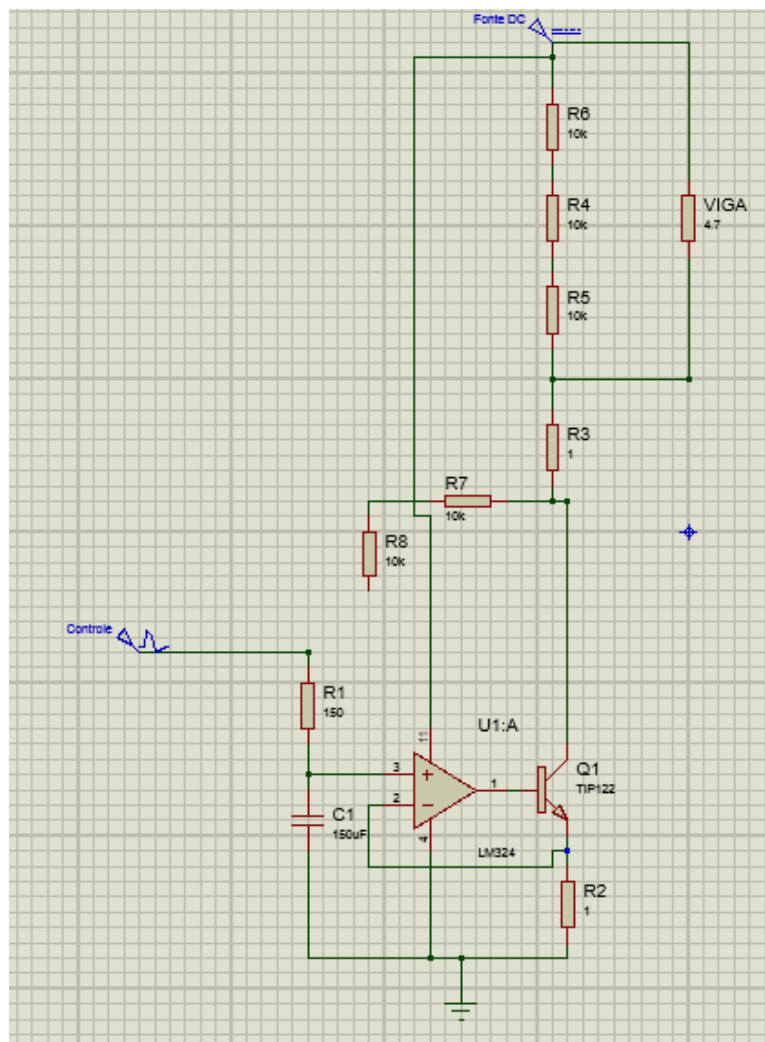


Figura 27: Fonte MARK 5

Tabela 11: Características da Fonte MARK 5

|                    |                         |
|--------------------|-------------------------|
| Tensão de entrada  | 100 ~ 240 VAC           |
| Tensão de controle | 0 ~ 5 VDC               |
| Corrente de saída  | Ajustável de 0 ~ 3,16 A |

Essa fonte é capaz de fornecer uma corrente de 3,16 A, mas o valor dessa corrente pode ser aumentado até 5 A (limite de fornecimento da fonte de alimentação DC) simplesmente trocando-se os resistores de 10 W por resistores que aguentem uma potência maior.

Os primeiros experimentos foram feitos com controle de temperatura manual, visto que a fonte MARK 2 não permitia um controle automático. Logo em seguida pensou-se em implementar um circuito de controle em malha fechada (PID) com parâmetros  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$  sintonizados experimentalmente, mas devido a diversos problemas na aquisição do sinal de temperatura usando o termopar do tipo J e devido a limitações de tempo, não se conseguiu fechar a a malha de controle. Portanto o controle da temperatura implementado para os experimentos finais de vibração foram feitos utilizando um controlador Arduino que, basicamente funcionou como um gerador de sinal PWM, sendo que o valor do sinal era facilmente ajustável utilizando-se programação que é realizada através de uma porta USB. Apesar de não ter dado certo o projeto do controle de malha fechada, o programa de aquisição de dados e o programa de controle encontram disponíveis no anexo 3, para facilitar um possível desenvolvimento futuro.

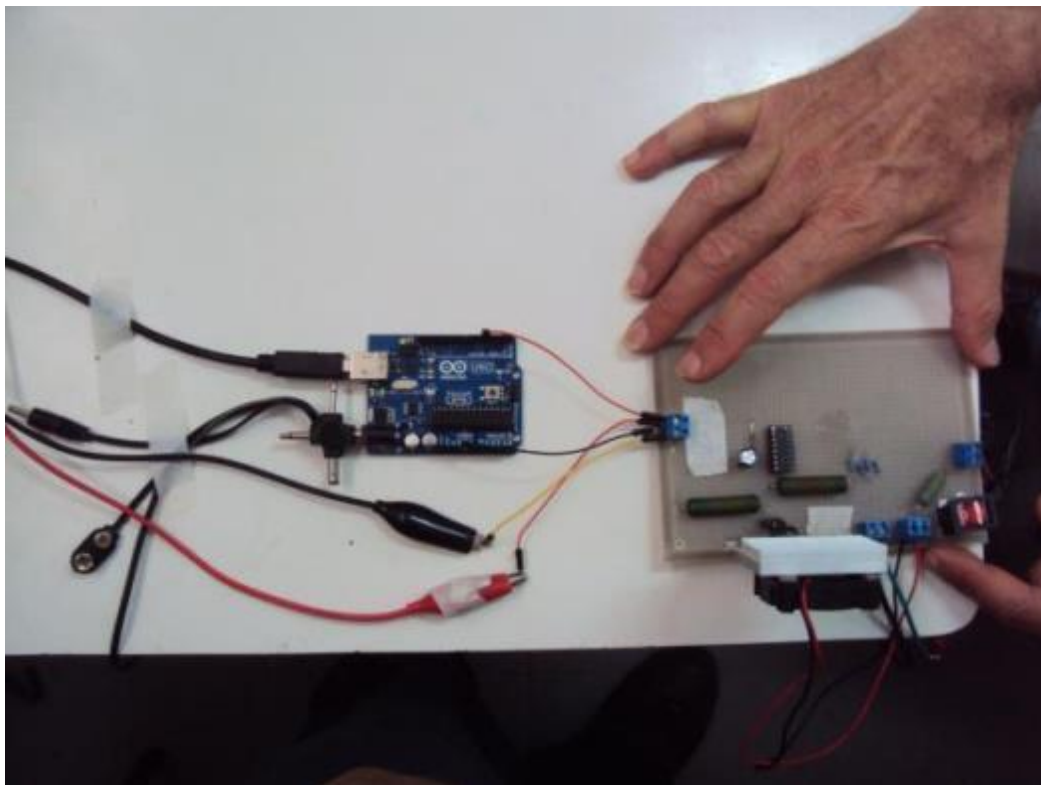


Figura 28: fonte MARK 5.



Para todos os procedimentos descritos a seguir foram consideradas 2 posições básicas para os termopares. Diretamente sobre o fio (Fig. 7) ou sobre o epóxi (Fig. 8)



Figura 29: Detalhe demonstrando parte do fio exposto sobre a viga (à esquerda) e o posicionamento do termopar sobre o fio (à direita).



Figura 30: Detalhe mostrando a fixação do termopar na ponta 2 da viga.

Na figura 30 pode-se observar 3 coisas: na região onde o termopar está fixado, não há parte do fio exposto, ao contrário do que se observa na fig. 29, portanto a temperatura medida é a temperatura na superfície do epóxi; a segunda coisa a se notar é o modo de fixação do termopar, para fazer o posicionamento inicial, utilizou-se fita crepe, mas (como ficará evidente em algumas figuras mais adiante) utilizou-se fita isolante, bem tensionada, para garantir um bom contato entre o termopar e a superfície de interesse. A fita isolante também ajuda no isolar o termopar do ar; por fim, pode se notar que a ponta 2 da viga tem 2 jumpers a mais o que favorece ao aquecimento desse lado da viga.

## 4.3 CARACTERIZAÇÕES TÉRMICAS

### 4.3.1 Usando a fonte MARK 2

Para as caracterizações térmicas o termopar foi sempre colocado sobre o fio (fig. 29).

O principal propósito desse experimento foi ter uma fonte de dados que ajudasse no controle da temperatura em desenvolvimentos mais elaborados da fonte de controle.

Esse experimento foi feito utilizando-se a fonte MARK 2, por isso a única variável a que realmente se tem acesso no sistema de controle da temperatura é a tensão entre os terminais da viga. Portanto, com esse experimento buscou-se caracterizar a relação entre a tensão e a temperatura sobre o fio de SMA, definindo-se assim a tensão necessária entre os terminais da viga para manter-se certa temperatura desejada.

Utilizando-se a lei da conservação de energia é razoável assumir que:

$$E_{in} - E_{out} = E_{abs}. \quad (39)$$

Onde  $E_{in}$  é a energia que entra no sistema,  $E_{out}$  é a energia que deixa o sistema e  $E_{abs}$  é a energia armazenada pelo sistema.

Mas sabendo que Energia e potência estão relacionadas pela equação 40:

$$P\Delta t = E. \quad (40)$$

Onde  $P$  é potência e  $\Delta t$  é a variação no tempo. A equação 39 reduz-se a:

$$(P_{in} - P_{out})\Delta t = E_{abs}. \quad (41)$$

Para esse experimento em particular também é razoável assumir-se que a viga, apenas, absorve e dissipa energia em forma de calor e que a potência de entrada é quase que exclusivamente devida a potência elétrica fornecida pela fonte de alimentação, portanto:

$$P = VI, \quad (42)$$

Onde  $V$  é a tensão elétrica sobre a viga e  $I$  é a corrente elétrica.

$$E_{abs} = c_p m \Delta T, \quad (43)$$

Onde  $c_p$  é o calor específico  $m$  é a massa e  $\Delta T$  é a variação da temperatura na viga.

Mas,

$$c_p m = C, \quad (44)$$

onde  $C$  é a capacitância térmica.

Logo,

$$E_{abs} = C \Delta T. \quad (45)$$

Substituindo-se eq. 45 em eq. 41, tem-se:

$$(P_{in} - P_{out})\Delta t = C\Delta T. \quad (46)$$

Donde se conclui que se a potência de entrada for igual a potência de saída (ou seja,  $P_{in} = P_{out}$ ) a variação de temperatura será nula. Portanto, se sabe-se o valor de  $P_{out}$ , sabe-se quanto de potência ( $P_{in}$ ) a fonte de alimentação deve fornecer a viga para que a temperatura desta não varie, e como  $P_{in}$  é dada pela eq. 42 saberemos quanto de tensão (parâmetro que conseguimos controlar) devemos aplicar entre os terminais da viga, isto é, a tensão necessária entre os terminais da viga para manter-se certa temperatura será dada por:

$$V_{nes} = \frac{P_{out}}{I}. \quad (47)$$

A ideia do experimento é simples, fornece-se uma potência  $P_{in}$  de valor conhecido,  $P_{in}$ , e cronometrasse o tempo para que a temperatura da viga varie 1 K. depois retirasse a fonte de potência (ou seja, faz-se  $P_{in} = 0$ ) e cronometrasse novamente o tempo para que a temperatura varie -1 K. Assim usando-se a eq. 46 ter-se-ão, respectivamente:

$$(P_{in} - P_{out})\Delta t_1 = C, \quad (48)$$

$$(0 - P_{out})\Delta t_2 = -C. \quad (49)$$

A partir de eq. 48 e eq. 49, pode-se inferir que:

$$P_{out} = \frac{P_{in}\Delta t_1}{\Delta t_1 + \Delta t_2}. \quad (50)$$

Como  $P_{in}$  é dado por eq. 52, temos que

$$P_{out} = \frac{VI\Delta t_1}{\Delta t_1 + \Delta t_2}. \quad (51)$$

Como, não estava a disposição um amperímetro que suportasse, por longos períodos, uma corrente de cerca de 2 A, assumindo-se que a liga de NiTi utilizada no experimento tivesse um comportamento, aproximadamente, ôhmico na faixa de temperatura trabalhada e que assim sua resistência não tivesse variações abruptas, utilizou-se a eq. 10 para chegar-se a:

$$P_{out} = \frac{(V^2/R)\Delta t_1}{\Delta t_1 + \Delta t_2}. \quad (52)$$

Verificou-se que, na realidade, a resistência ( $R$ ) entre os terminais da viga parece diminuir com o aumento da temperatura e a variação está confinada a uma faixa que parece ir de  $8\Omega$  a  $4\Omega$ , para uma variação de temperatura entre  $25^\circ\text{C}$  e  $65^\circ\text{C}$ . Mas para fins de simplificação de cálculos adotou-se um valor de  $R$  constante igual a  $4,7\Omega$ , que pareceu ser um valor razoável e tentou-se manter a tensão próximo de 8 V.

Como a  $P_{out}$  depende da diferença de temperatura entre a viga e o ar, listou-se uma série de valores de potência, uma para cada temperatura na faixa de  $25^\circ\text{C}$  e  $65^\circ\text{C}$  com

variações de 1°C. A partir desses valores de  $P_{out}$  e utilizando-se eq. 47 e eq. 42, pode-se calcular os diversos valores de tensão necessários para manter-se as diversas temperaturas como:

$$V_{nes} = \sqrt{P_{out}R}. \quad (53)$$

O experimento foi realizado da seguinte maneira:

- utilizou-se uma câmera para gravar os mostradores do termopar, fixado na viga, e do ohmímetro, instalado entre os terminais de alimentação da viga.
- Tentou-se manter uma tensão entre os terminais de alimentação da viga próximo de 8V.
- Esperou-se que a temperatura da viga variasse entre a temperatura ambiente (aproximadamente 25°C) até 65°C.
- Retirou-se a fonte de alimentação
- Esperou-se que a temperatura atingisse novamente a temperatura ambiente
- Analisou-se o vídeo anotando-se o momento em que a temperatura variou de 1°C.
- Programou-se as equações necessárias em uma planilha excel e inseriu-se os dados coletados.

O corpo de prova utilizado foi o 11 e os resultados obtidos estão apresentados em uma tabela no anexo 2.

Deve-se ressaltar que esse experimento pode ser ainda muito melhorado. Algumas das dificuldades encontradas foram: manter-se o valor de tensão entre os terminais da viga a um valor constante, os valores apresentados na tabela, são valores aproximados; além disso, os valores de resistência também são aproximados, já que se sabe que a resistência da liga varia com a temperatura e que é impossível fazer uma medida direta de resistência, se a resistência estiver conectada a um circuito.

Para contornar os problemas encontrados, foi que surgiu a ideia de fazer uma fonte de controle que permitisse a aquisição de dados como, tensão, corrente e temperatura exatas em um dado momento sobre o fio de SMA. Que viria a ser a fonte MARK 4 ou MARK 5.

#### **4.3.2 Utilizando MARK 4**

Seguindo a linha de raciocínio apresentado na seção 4.3.1 repetiu-se o experimento, mas dessa vez utilizando a fonte MARK 4 em conjunto com um microcontrolador Arduino, que foi programado para coletar os dados de tensão, corrente e temperatura com uma frequência de 0,2 segundos e gravá-los em um arquivo digital. Os arquivos, que colheram

mais de 20 mil dados, foram analisados e o resultado foi sumarizado em uma tabela, apresentada no anexo 2.

Devido as características da fonte e do sistema de aquisição de dados, foi possível calcular a potência utilizando-se diretamente a eq. 13, além disso, como tensão e corrente estavam sendo monitoradas, foi possível calcular-se a resistência real, no momento da aquisição de dados através da eq. 10.

Vale ressaltar ainda que esse experimento foi realizado utilizando se o termopar do tipo J citado no capítulo anterior e que até o momento não se havia percebido que o sistema de aquisição de temperatura projetado para receber informações desse termopar não estava retornando medidas confiáveis.

#### **4.4 ENSAIOS DINÂMICOS**

Os experimentos de vibração foram realizados no Shaker com auxílio do programa Signal Scalar. A figura 31 mostra duas das telas de configuração inicial, essas configurações foram utilizadas em todos os experimentos de vibração.

Antes de fazer-se os ensaios de vibração no corpo de prova de interesse (CP 11), foram feitos vários testes com uma viga de testes (CP 5), sendo a diferença básica entre esta e o CP 11 a não presença do elemento estrutural em liga de memória de forma.

As intensões principais dessa sequência de testes foram: identificar um bom modo de montagem; aprendizagem sobre o funcionamento do sistema de vibração; e achar alguns indicativos do comportamento esperado para os ensaios.

Nesse experimento os acelerômetros foram fixados nos lugares mostrados com auxílio de cera fornecida pelo fabricante. Foi utilizado um sinal de controle de aceleração constante igual a 1 g.

A configuração 1 é mostrada na fig. 33. A principal diferença entre essa configuração e a configuração 2, mostrada na fig. 34, é a posição de engastamento da viga. Na configuração 1, o engaste é feito na ponta 1 da viga, ao passo que, na configuração 2, o engaste é feito na ponta 2. Outra diferença a se notar é que na configuração 2, optou-se por não incluir um multímetro de monitoramento da tensão sobre a viga, por isso, na configuração 2 não aparecem as pontas de fio do tipo “jacaré”.

Inicialmente, optou-se por utilizar-se a configuração 1, mas uma das primeiras observações feitas foi a de que, quando percorrida por energia elétrica, a ponta 2 da viga naturalmente esquentava mais do que a ponta 1 (entre outros fatores isso se deve a presença de dois jumpers a mais na ponta 2). Isso gera um gradiente de temperatura de cerca de 30 °C (em altas temperaturas) ao longo do fio de NiTi. A presença desse gradiente foi

comprovada por um experimento à parte (fig. 11), nesse experimento os dois termopares foram fixados sobre o fio.

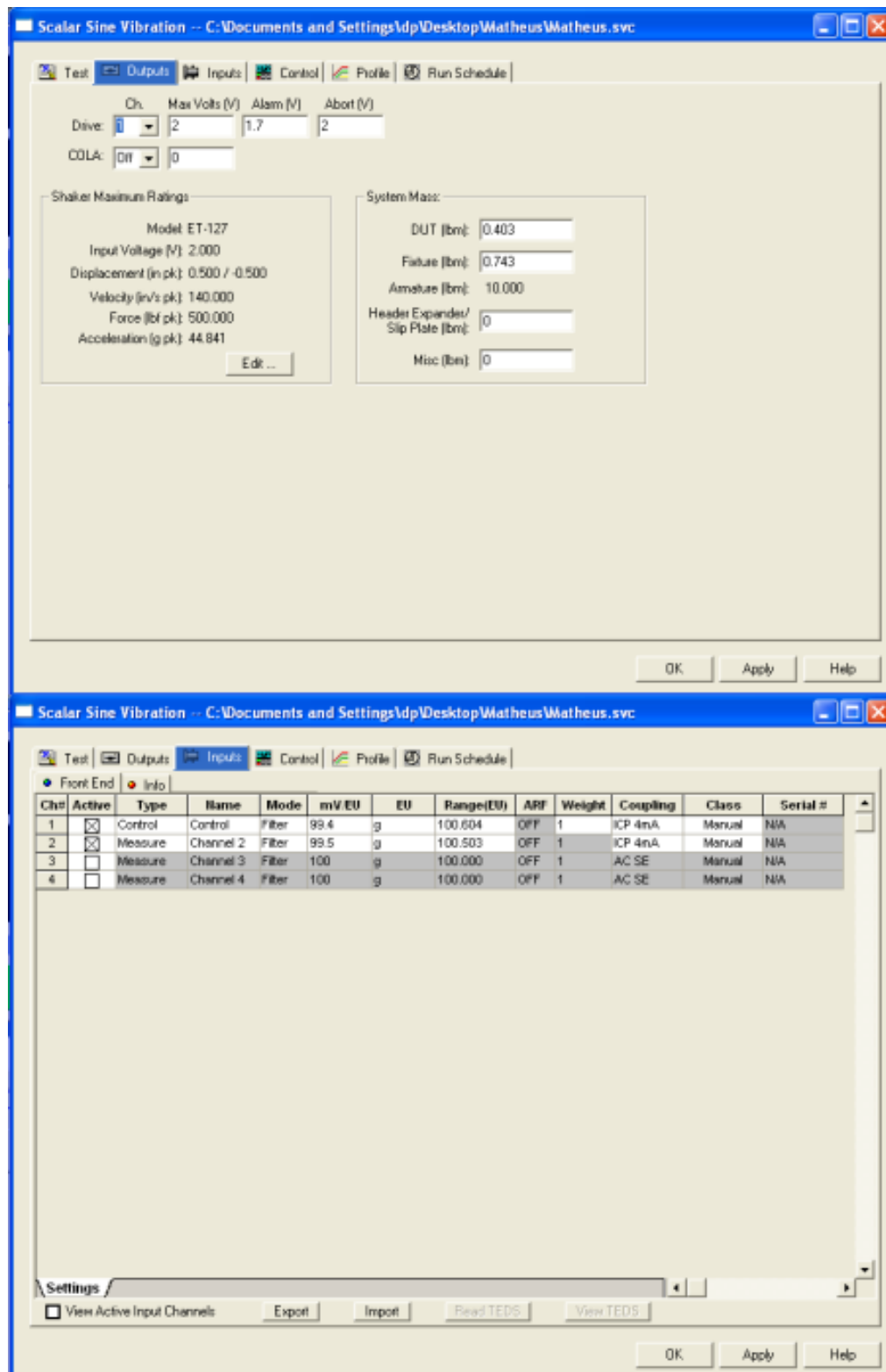


Figura 31: Tela de configurações inicial do programa.



Figura 32: montagem com CP 5.

Vale ressaltar que a presença de um gradiente de temperatura dessa magnitude atrapalharia de forma muito profunda um dos objetivos deste trabalho que é o de demonstrar de alguma maneira a possibilidade de utilizar-se uma viga SMAHC como estrutura adaptativa controlando-se a temperatura do fio com memória de forma.

Esse gradiente, extremamente desfavorável a transformação de fase no corpo de teste, é agravado quando utilizando a configuração 1, pois, nessa configuração, a peça metálica, utilizada para fazer a fixação da viga (que funciona como um dissipador de calor) e a ventilação provinda do sistema de refrigeração do Shaker ajudam a resfriar a ponta 1, que é a, naturalmente, mais fria. Em alguns testes, utilizou-se fita isolante no corpo da viga, como uma tentativa frustrada de equilibrar o gradiente de temperatura.

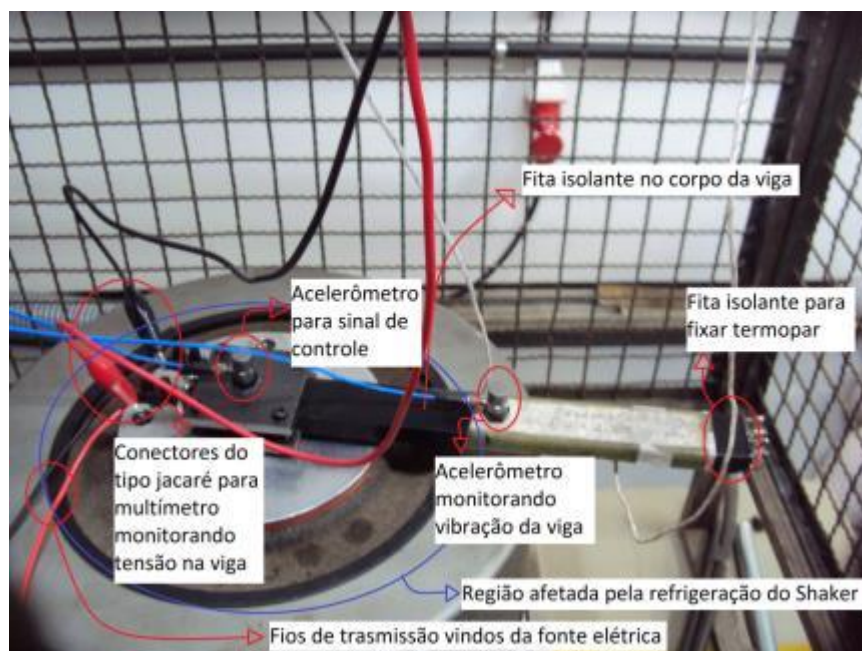


Figura 33: Configuração 1 para experimentos com a viga SMAHC.

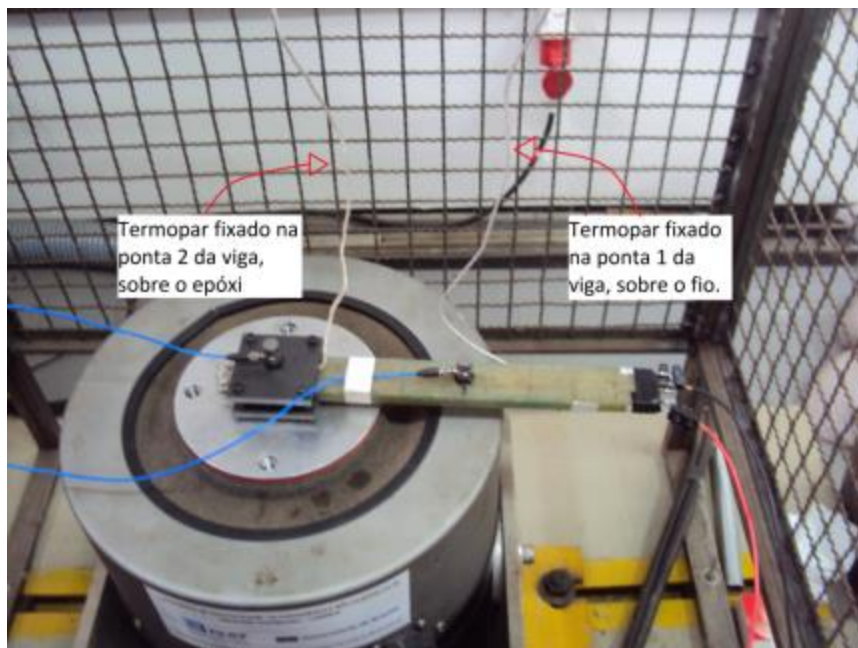


Figura 34: Configuração 2 para experimentos com a viga SMAHC.

Uma maneira inteligente de corrigir o problema com o gradiente de temperatura foi utilizar a configuração 2. Nessa configuração, a peça de fixação (dissipador de calor) e a ventilação provinda do sistema de refrigeração do Shaker ajudam a resfriar a ponta 2, que é a que esquenta mais. Os experimentos demonstraram que sobre essa configuração o gradiente de temperatura ao longo do fio de SMA é de apenas 2 °C, esse gradiente é pequeno o suficiente para ser menor do que o próprio desvio de medida dos termopares (2,2 °C), podendo ser, inclusive, formalmente considerados a mesma temperatura. A configuração 2, no entanto, apresenta também uma desvantagem: o fato de os fios de transmissão ficarem pendurados na ponta livre da viga.

Para esse experimento, ambos os termopares foram colocados sobre o fio de NiTi.

Visto que a configuração 1 não apresenta nenhuma desvantagem para medidas feitas à temperatura ambiente e apresenta a vantagem de não ter nenhum fio pendurado na ponta livre da viga, essa configuração foi utilizada para uma série de experimentos preliminares. Nesses experimentos, variou-se a posição do acelerômetro de monitoramento de vibração da viga; e foi utilizado como sinal de controle uma rampa de aceleração que varia de 1 g para a frequência de 10Hz a 6 g para a frequência de 1550 Hz.

Depois dessa sequência de experimentos foi feita uma nova série de experimentos, cada sequência de experimentos nos acrescentaram novas informações sobre o processo, nos permitindo entender como obter uma boa aquisição de dados até chegarmos a configuração em que foram realizados os testes finais.





Figura 35: Experimento evidenciando gradiente de temperatura ao longo do fio de SMA.

Os testes finais foram realizados com a exata montagem que aparece na fig. 34, a fonte utilizada foi a MARK 5; o controle de temperatura foi do tipo em malha aberta, realizado utilizando-se um Arduino como fonte de sinal PWM; foram utilizados ambos os termopares da minipa, sendo que um monitorava a temperatura sobre a superfície do epóxi, enquanto que o outro monitorava a temperatura no fio de SMA; o acelerômetro de controle foi fixado no centro de gravidade do sistema de fixação, e o acelerômetro de monitoramento foi fixado no ponto 4 da viga (vide fig. 36); ambos os acelerômetros foram fixados utilizando-se a cola “Hybrid adesivo universal” da locatite, pois como foi observado em experimentos intermediários a cera de fixação fornecida junto com os acelerômetros derretia em altas temperaturas, o que impedia a realização dos experimentos em altas temperaturas; a curva de controle de vibração utilizada foi a que aparece na fig. 37, exceto para a primeira e a segunda medida. A primeira parte dessa curva (frequências entre 30 Hz e 100 Hz) foi definida no controlador (Abacus) como um controle de deslocamento, foi pedido para que o controlador mantivesse um deslocamento na posição de controle de 0,2 mm. A segunda parte da curva (frequências entre 122 Hz e 600 Hz) foi definida como um controle de aceleração, foi pedido ao controlador que mantivesse a aceleração constante em 6 g, pois essa, como base nos resultados de experimentos intermediários, foi tomada como a aceleração máxima seguramente realizável pelo Shaker. Na primeira e segunda medida dessa sequencia de experimentos, a curva de controle utilizada foi bem semelhante a mostrada na fig. 37, a única diferença foi no valor absoluto utilizado tanto na parte de controle por deslocamento (frequências de 30 a 100 Hz), quanto na parte de controle por aceleração (frequências de 122 a 600 Hz), os valores utilizados foram respectivamente, 0,05 mm e 1,5 g. Esses valores foram escolhidos dessa maneira para evitar que a viga vibrasse

vigorosamente nas frequências de ressonância, pois em experimentos intermediários foi detectado que uma vibração muito vigorosa promove queda brusca na temperatura da viga.

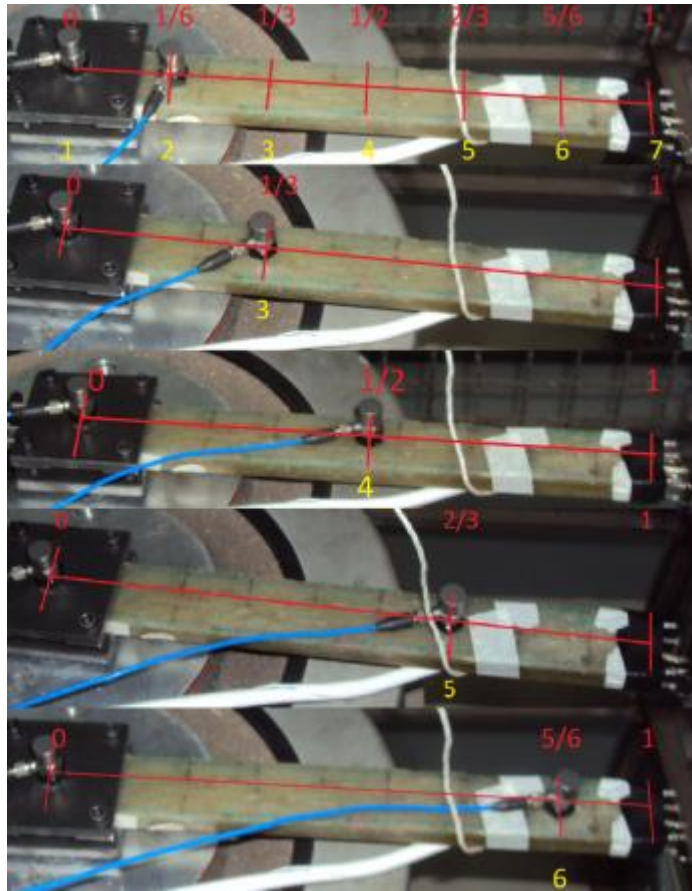


Figura 36: Variação de posições em sequência de experimentos preliminares.

A sequência de experimentos finais consistiram de 8 medidas em que todas as condições do sistema foram mantidos constantes, exceto por:

1. Na primeira medida, os fios de transmissão vindos da fonte estavam mecanicamente desconectados da viga.
2. Na segunda medida, os fios de transmissão foram reconectados e nada no sistema foi mais tocado.
3. Na terceira medida, os parâmetros de controle de vibração foram alterados como descrito acima. Os novos parâmetros de controle de vibração foram mantidos para todas as medidas realizadas depois desta.

A seguir apresenta-se um passo-a-passo do procedimento:

1. Foi feita a montagem mecânica do sistema, exatamente como mostrado na fig. 34, exceto pelos fios de transmissão que chegavam da fonte, que não foram conectados, nesse momento. Os acelerômetros foram fixados na posição mostrada utilizando-se a cola “Hybrid adesivo universal” da locatite.

2. Foi feita uma primeira medida (varredura de frequências).
3. Os fios de transmissão que chegavam da fonte foram conectados
4. Uma segunda medida foi feita a temperatura ambiente
5. Os valores de controle de deslocamento e de aceleração foram alterados
6. Uma terceira medida foi feita a temperatura ambiente
7. Aplicou-se uma corrente elétrica escolhida sobre os fios de SMA na viga.
8. Esperou-se que a temperatura do fio de SMA se estabilizasse.
9. Realizou-se uma varredura de frequência.
10. Repetiu-se os passos de 7 a 9 por mais 4 vezes, obtendo-se assim a varredura de frequências para 5 diferente temperaturas sobre o fio de SMA.

Teve-se o cuidado de variar a temperatura de pelo menos 5 °C entre cada medida para que a distancia entre uma medida de temperatura e sua subsequente fossem maior que duas vezes a precisão do equipamento de medida, podendo ser assim consideradas, formalmente, temperaturas diferentes.

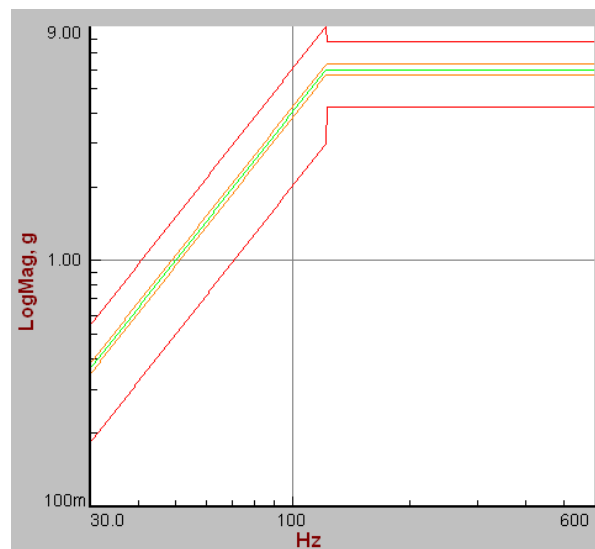


Figura 37: Curva de controle de vibração seguida pelo acelerômetro de controle.

# 5 RESULTADOS E ANÁLISES

## 5.1 CARACTERIZAÇÕES TERMICAS

O primeiro experimento, feito com a fonte MARK 2. Esse experimento tinha como objetivo dar uma ideia da relação entre a potência fornecida à viga e temperatura sobre os fios de SMA. Os resultados desses experimentos se apresentam na tabela 13, no Anexo 2.

As linhas que aparecem em vermelho são linhas que por algum motivo ficaram com informação faltante (a exemplo da linha de temperatura 30°C, da qual perdeu-se a informação de tempo de resfriamento) ou apresentam resultados duvidosos (a exemplo da linha de temperatura 33°C) que sugere que para se manter 33°C seja fornecida uma potência menor do que a potência para se manter 32°C.

Repare que o numerador da eq. 50 nada mais é que o valor de energia fornecida ( $E_{in}$ ), por isso esse dado também aparece na tabela. Observe ainda que de acordo com eq. 59 e sabendo que  $\Delta T=1^\circ C$  é possível calcular-se a capacitância térmica do corpo de prova pela simples multiplicação entre as colunas de tempo de resfriamento e de dissipação de potência. Um resultado concreto desse experimento foi o cálculo de um valor médio para essa grandeza (Capacitância Térmica do corpo). Os dados considerados duvidosos (vide paragrafo anterior) não foram utilizados no calculo da média, o resultado obtido foi de 116 J/K. Esse resultado, no entanto, deve ser olhado com cautela, pois, como fora supracitado o experimento tivera uma serie de limitações e foram consideradas varias aproximações, além disso, não há um resultado analítico que possa servir de comparação.

No experimento feito com a fonte MARK 4, o valor médio de capacitância térmica calculado foi de 55,5 J/K (47% do valor calculado no experimento anterior), no entanto, experimentos posteriores indicaram que o sistema de aquisição de valores de temperatura não estavam funcionando como esperado, isso gerou grandes suspeitas sobre os valores de temperatura apresentados na tabela 14 (no anexo 2).

Como o valor calculado de capacitância térmica depende fortemente dos valores de temperatura adquiridos, o valor calculado para a capacitância térmica, através desse experimento é pouco confiável, mas outra informação interessante pôde ser extraída desse experimento. Apesar de não haver-se a certeza dos valores de temperatura medidos, sabe-se que entre o inicio e o final do experimento a temperatura, realmente subiu. Sabe-se também que a aquisição de dados, no que diz respeito às grandezas elétricas (tensão e corrente), estava funcionando perfeitamente bem. A partir desses dados e da eq. 10 foi possível calcular-se os valores de resistência do fio durante o tempo de ensaio. Calcula-se que entre o início e o final do experimento houve uma redução de cerca 5,6% da resistência.

Nos experimentos de (Faluhelyi, 2013), no entanto, conseguiu-se uma variação de 87,5% da resistência. Portanto, é razoável assumir que durante os experimentos com a MARK4, de fato, não houve variação de temperatura suficiente para uma completa transformação de fase nos fios de SMA.

## 5.2 Ensaios Dinâmicos

### 5.2.1 O que era esperado

Utilizando-se a eq. 35 e os dados das tab. 1 a. 3 pode-se chegar a conclusões sobre o modo de vibração das vigas em estudo, que são apresentadas na tab. 12. Os cálculos realizados consideraram o ponto de engastamento como sendo no centro de massa do sistema de fixação da viga, portanto,  $l$ , na eq. 35 deve ser considerado como comprimento da viga menos metade do comprimento do sistema de fixação.

Tabela 12: previsões analíticas para os modos de vibração das vigas

| Modo de Vibração | Frequência de vibração esperada |           |           |
|------------------|---------------------------------|-----------|-----------|
|                  | No CP 5                         | No CP 11  |           |
|                  | -                               | $T < M_f$ | $T > A_f$ |
| 1                | 84,87                           | 68,88     | 71,43     |
| 2                | 531,13                          | 431,05    | 447,04    |
| 3                | 1487,56                         | 1207,27   | 1252,05   |

Espera-se que na região de temperaturas em que a SMA esta em transformação de fase, o módulo de elasticidade da viga aumente a medida que a temperatura aumenta. Desse modo, de acordo com a eq. 46, uma mudança na frequência natural de vibração deve ser percebida.

Sobre a forma de vibração é esperado que ela seja parecida com as previstas na fig. 38

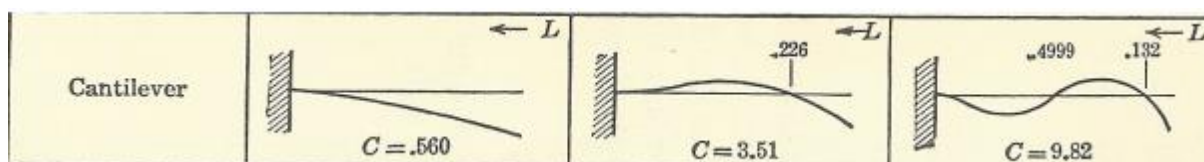


Figura 38: Formas de vibração do primeiro, Segundo e terceiro modo de uma viga engastada livre (Rodgers, 1959)

## 5.2.2 Vibrações Sobre Viga De Testes Sem A Presença De Niti

A figura 39 mostra um resultado de busca automatizada por frequências de ressonância disponível no *software* do sistema de vibração. Percebe-se, claramente, duas frequências de ressonância: uma a 77,83Hz e outra a 496,3Hz. E ainda algumas outras regiões do espectro que podem ser de interesse, como a região dos 149,5 Hz.

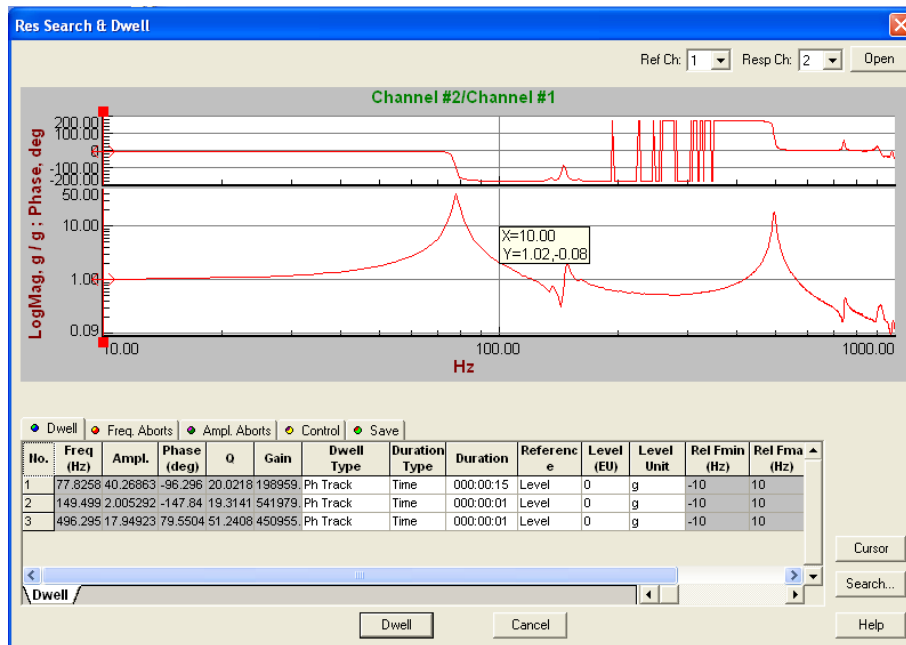


Figura 39: Busca automática de frequências de ressonância entre as frequências de 10 a 1000Hz.

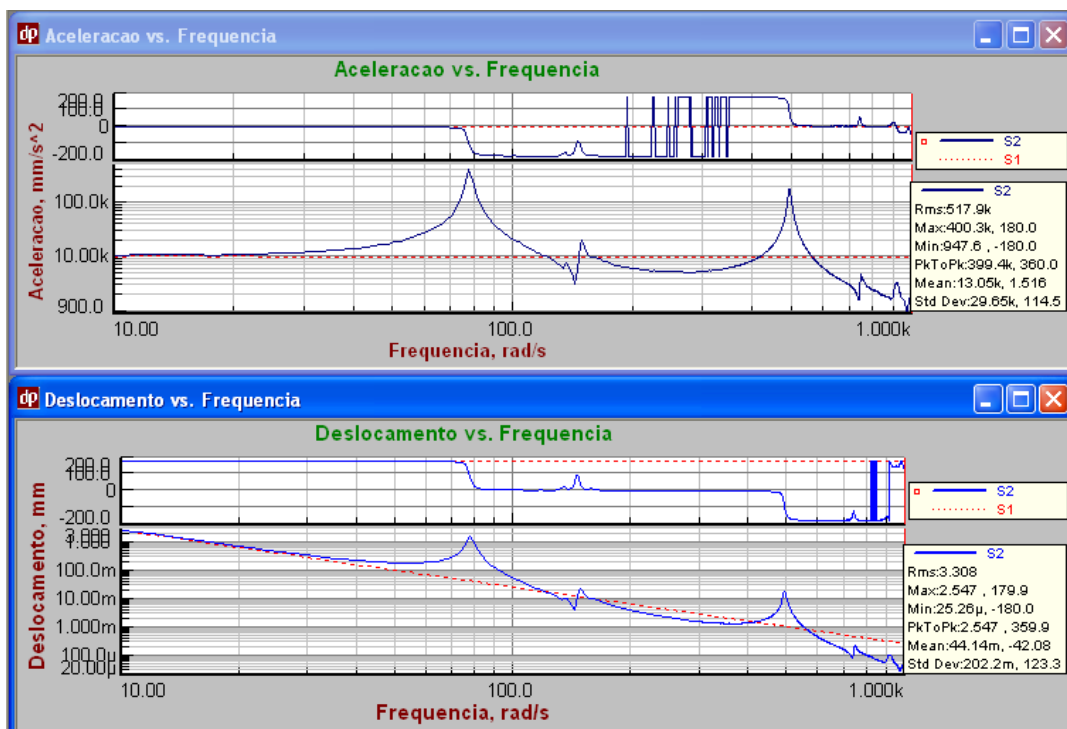


Figura 40: Varredura de frequências entre 10 e 1000Hz. O nome do eixo das abscissas apresenta um erro em ambos conjuntos de gráficos, onde está escrito rad/s leia-se Hz.

A fig. 40 apresenta a resposta de um ensaio de varredura com frequências de 10Hz a 1000Hz. A linha tracejada, em vermelho, representa a resposta do canal de controle (acelerômetro na ponta engastada da viga), que foi programado para manter a referência a uma aceleração constante de 1 g. A linha sólida, em azul, é a resposta do canal de medida (acelerômetro na ponta livre da viga). Nos gráficos da fig. 40 estão plotados: a resposta de aceleração (fase e magnitude do sinal) e a resposta de deslocamento (fase e magnitude do sinal). Devido a um erro de edição os eixos de abcissa que deveriam ter sido plotados em rad/s foram plotados em Hz, sendo assim leia-se Hz ao invés de rad/s, nos eixos de abcissas dos gráficos da fig. 40.

Ainda sobre a fig. 40, repara-se que a curva de deslocamento apresenta um decaimento, que pode ser explicado pelo breve desenvolvimento a seguir.

Resolvendo a eq. 18 para um período e para aceleração constante, tem-se:

$$v = \int_0^T a. dt = aT. \quad (54)$$

Onde  $v$  é a velocidade,  $a$  é a aceleração, e  $T$  é o período.

Mas:

$$T = \frac{1}{f}. \quad (55)$$

Logo,

$$v = \frac{a}{f}. \quad (56)$$

Mas,

$$s = vt. \quad (57)$$

Onde  $s$  é o deslocamento.

Substituindo-se eq. 57 na eq. 56 e isolando-se o deslocamento:

$$s = \frac{a}{f^2}. \quad (58)$$

Por tanto, para uma aceleração constante o deslocamento deve decair proporcionalmente ao inverso do quadrado da frequência.

### 5.2.3 Vibrações sobre o corpo de prova CP 11

Foram feitas uma série de pré-testes que nos permitissem “calibrar” o sistema antes para que fosse possível obter uma aquisição de dados adequada. Primeiramente, serão apresentados os resultados de alguns desses pré-testes e às conclusões as quais eles levam.

As figuras de 41 a 44 apresentam os resultados de uma série de experimentos utilizando a configuração 1 (vide fig. 33), sendo o sinal de controle uma rampa de aceleração que varia de 1 g para a frequência de 10Hz a 6 g para a frequência de 1550 Hz e mantendo todos os parâmetros do sistema constantes, exceto pela posição do acelerômetro de monitoramento de vibração (vide fig. 36). Esses experimentos nos permitem chegar a algumas conclusões importantes:

1. Eles nos permitem identificar com clareza 2 picos de ressonância, esses picos correspondem ao primeiro e ao segundo modo de vibração.
2. O terceiro modo de vibração, para essas condições de teste, é muito difícil de ser identificado.
3. Comparando-se as amplitudes dos picos nos 4 experimentos, percebe-se que o ponto 6 (vide fig. 36) é onde o primeiro modo de vibração fica mais evidente, já o segundo modo aparece de forma mais evidente nos pontos 3 e 4 (vide fig. 36). Essa conclusão está totalmente de acordo com a previsão de forma apresentada na fig. 38.
4. Comparando os valores das frequências, especialmente, a do primeiro modo de vibração, conclui-se que o valor de frequência de ressonância lido parece apresentar alguma sensibilidade em relação ao ponto em que o acelerômetro é fixado. Note que existe uma diferença de aproximadamente 5% da leitura, se comparar-se o pico de primeiro modo das fig. 41 e fig 42 com os pico do primeiro modo das fig. 42 e fig 43.

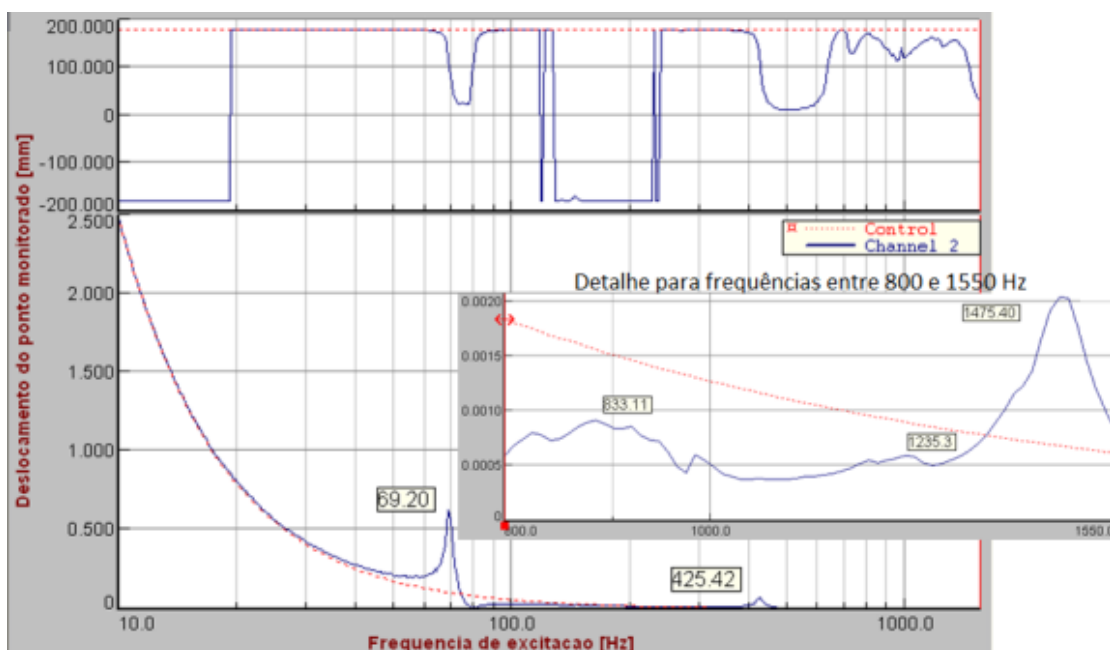


Figura 41: Varredura de frequências entre 10 e 1550 Hz à temperatura ambiente, monitorando o ponto 3 (terça parte da viga, a partir do ponto engastado).



As figuras 45 a 52 apresentam os resultados obtidos na bateria final de experimentos. Exceto para o experimento cujos resultados estão apresentados na fig. 45, todos os experimentos dessa bateria de testes foram realizados com os fios de transmissão da fonte conectados. Para os experimentos cujos resultados estão apresentados no gráfico da fig. 47 e para os experimentos subsequentes, os parâmetros de controle de vibração foram mantidos em 0,2 mm, para a região de frequências em que o controle de vibração foi feito por deslocamento e 6 g para a região de frequências em que o controle de vibrações foi feito por aceleração. As seguintes conclusões podem ser tiradas:

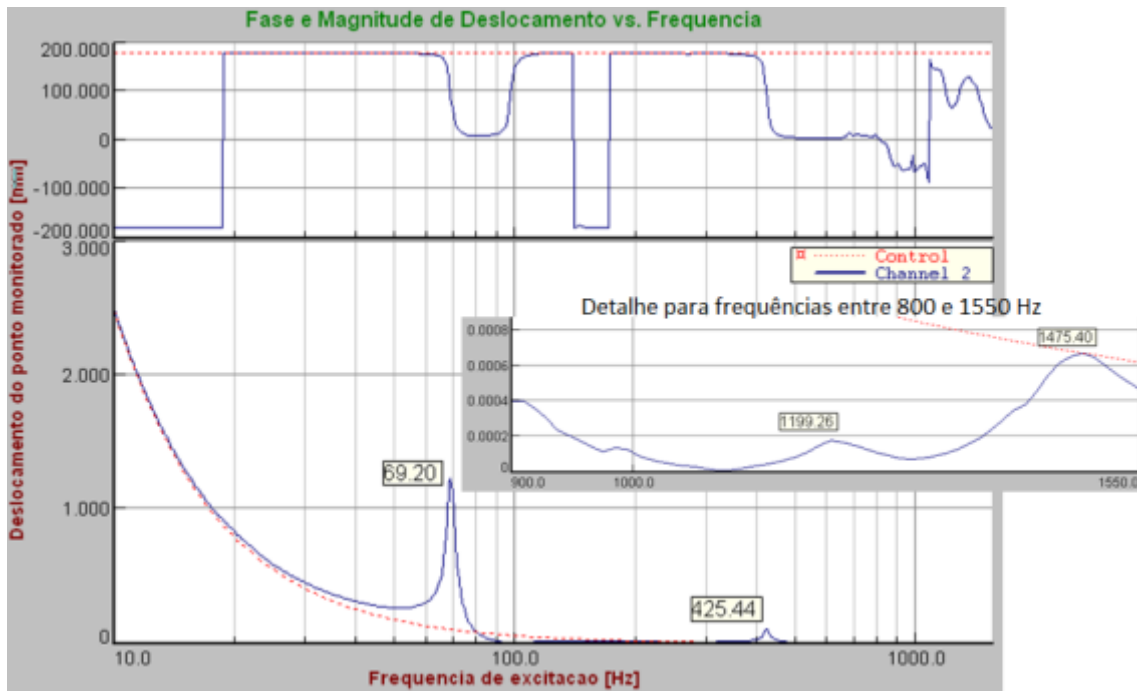


Figura 42: Varredura de frequências entre 10 e 1550 Hz à temperatura ambiente, monitorando o ponto 4 (meio da viga, a partir do ponto engastado).

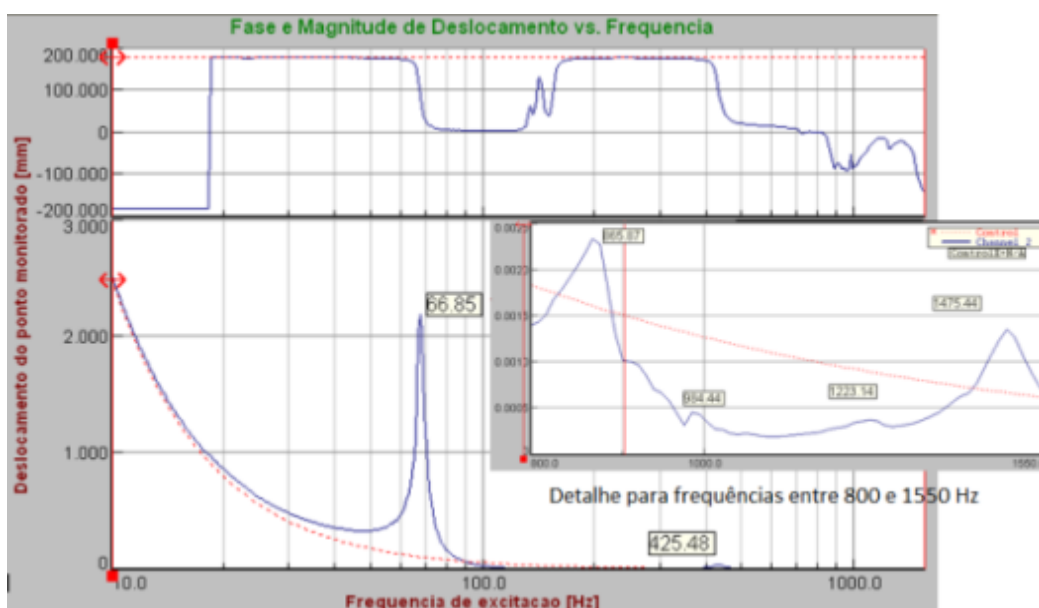


Figura 43: Varredura de frequências entre 10 e 1550 Hz à temperatura ambiente, monitorando o ponto 5 (2 terços a partir do ponto engastado).

1. Primeiro deve-se observar que em todas as medidas aparece, na região de frequências próxima de 57,8 Hz uma, forte oscilação no sinal de controle e essa oscilação é replicada na resposta de vibração da viga. Provavelmente essa oscilação aparece aí porque, segundo o fabricante, essa é a frequência natural do acelerômetro.

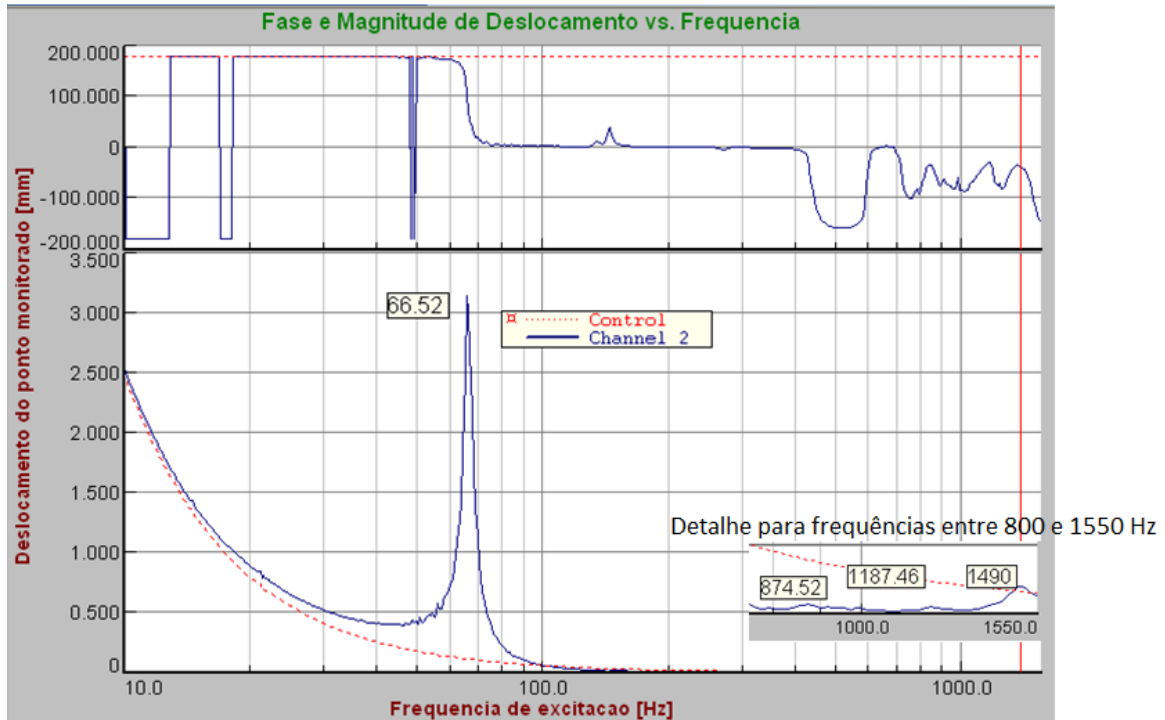


Figura 44: Varredura de frequências entre 10 e 1550 Hz à temperatura ambiente, monitorando o ponto 6 (5 sextos a partir do ponto engastado).

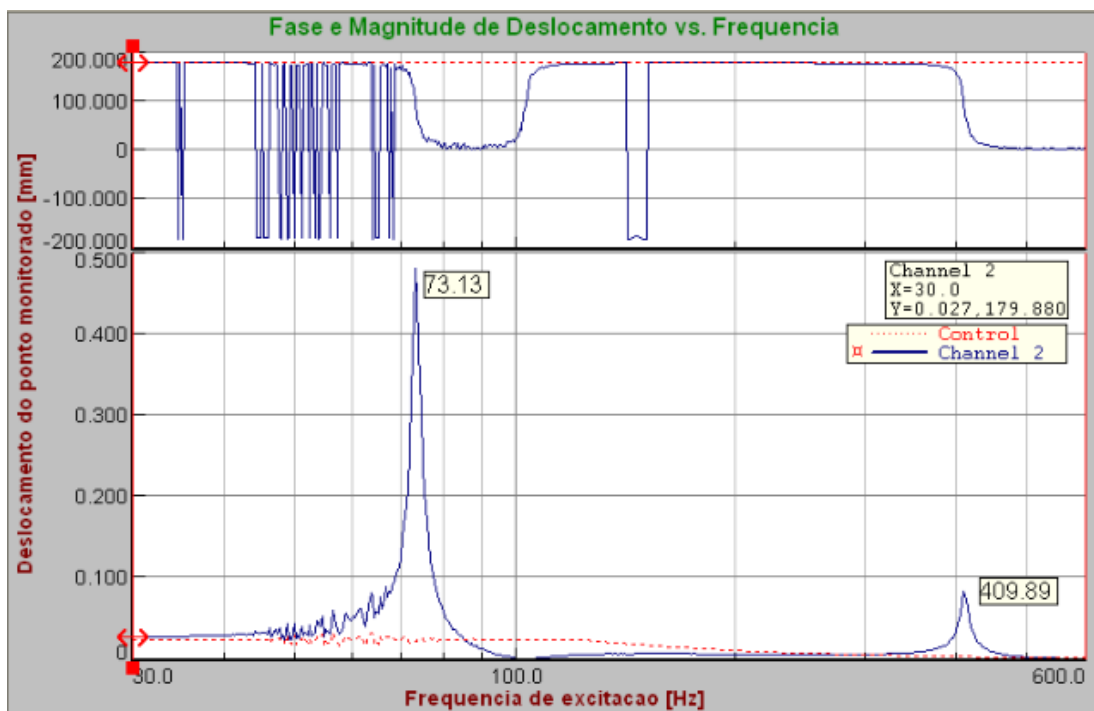


Figura 45: Varredura de frequência, realizada com os fios de transmissão da fonte desconectados. Ensaio a temperatura ambiente.

2. A utilização de controle de vibração por deslocamento na primeira parte da região de frequências (frequências entre 30 e 100 Hz) da curva fez o decaimento observado nas fig 41 a 44 desaparecer nessa região, facilitando a compreensão

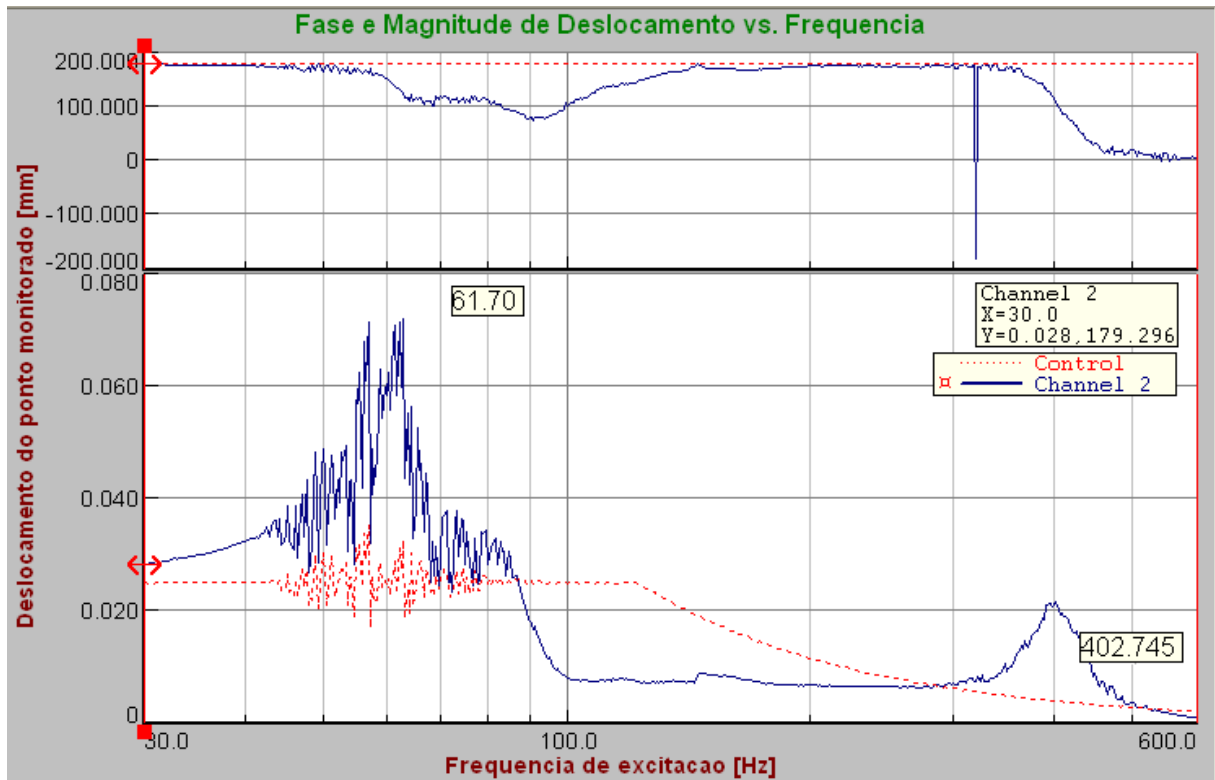


Figura 46: Varredura de frequência, realizada com os fios de transmissão da fonte conectados. Ensaio a temperatura ambiente.

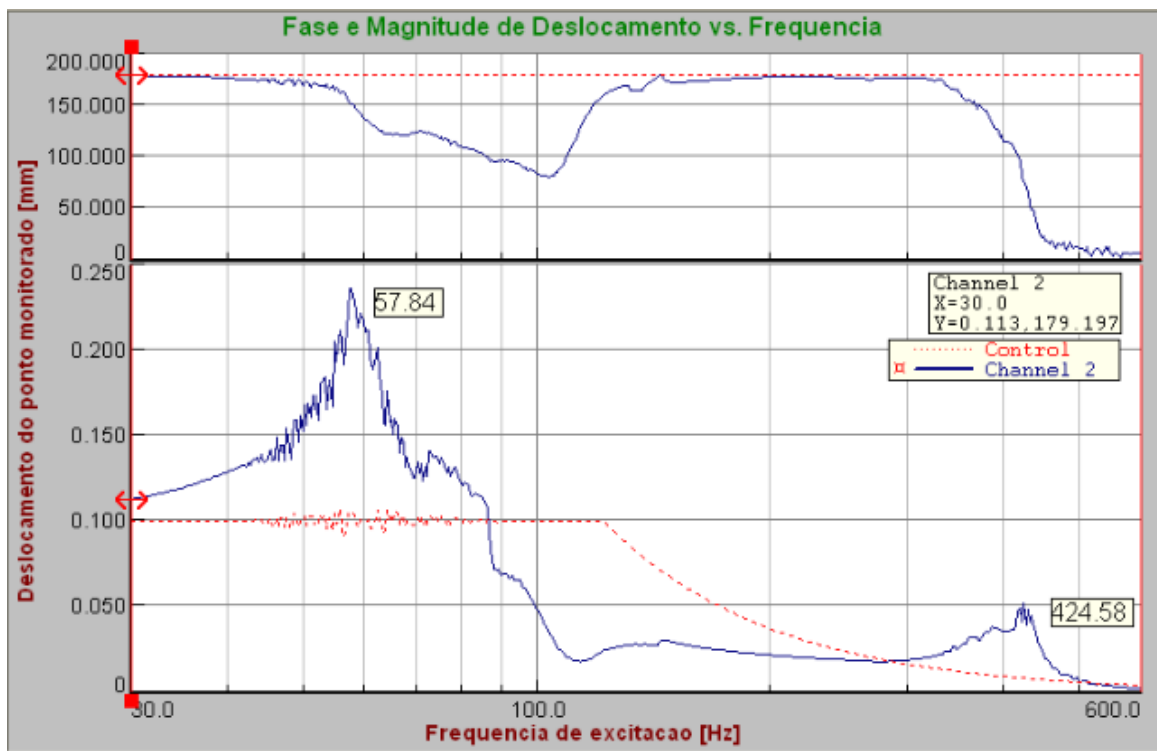


Figura 47: Varredura de frequência, realizada com os fios de transmissão da fonte conectados. Ensaio a temperatura ambiente, com mudança nos parâmetros de controle.

do gráfico. Por motivos de limitação do equipamento de vibração, no entanto, o decaimento ainda aparece na segunda região de frequências, que é controlado por aceleração.

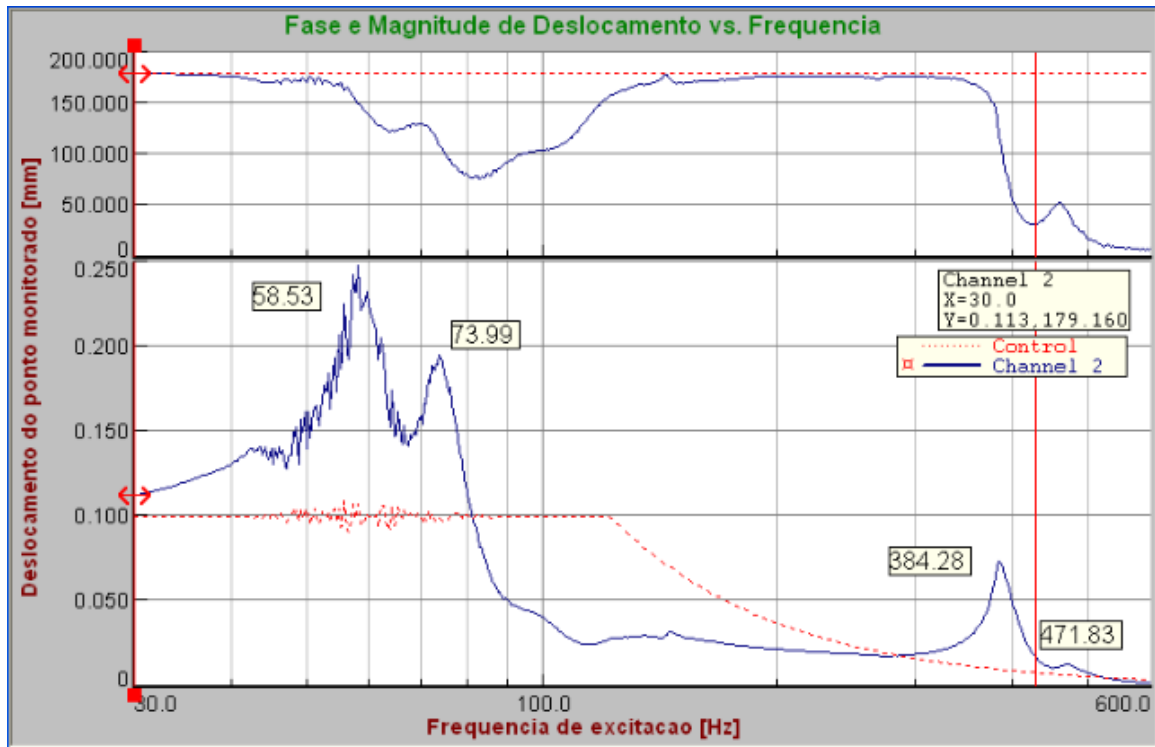


Figura 48: Ensaio a temperatura de 52 °C.

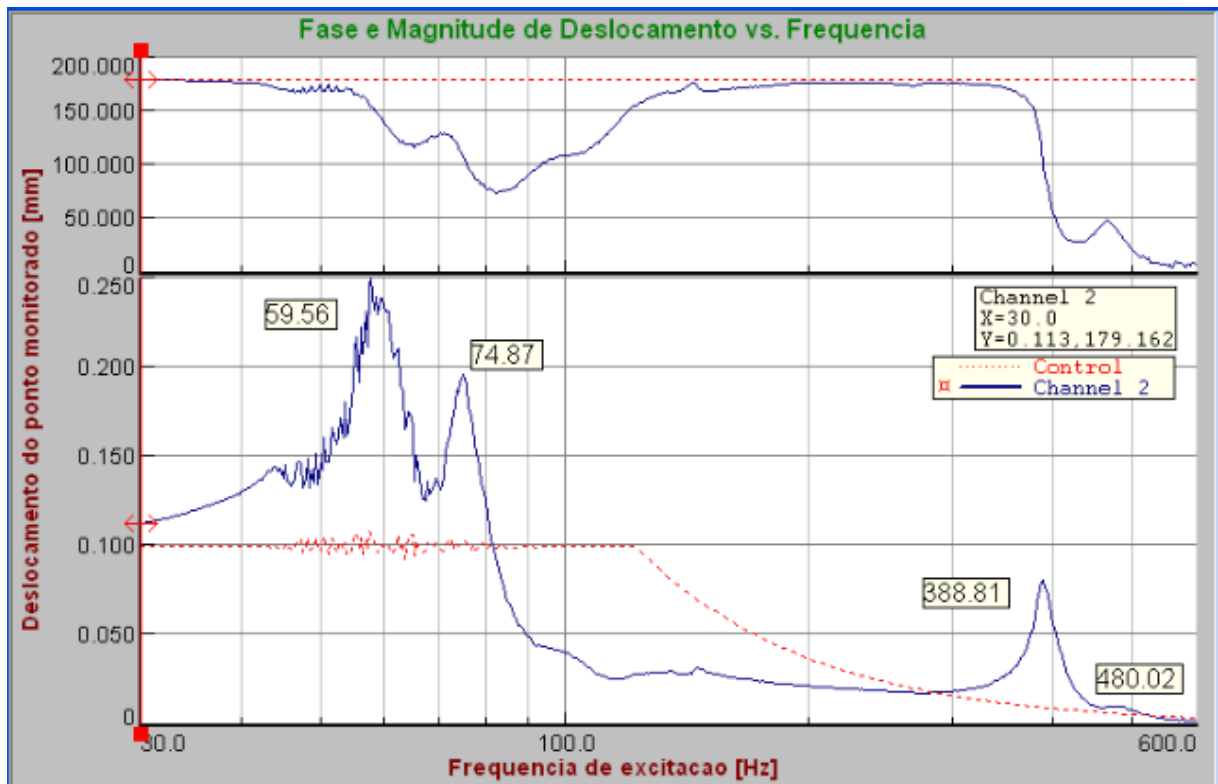


Figura 49: Ensaio a temperatura de 57 °C.

- Comparando-se as fig. 45 e 46 pode-se evidenciar que a presença do fio de transmissão vindo da fonte de alimentação pendurado introduz novas características de vibração que “mascaram” o primeiro e o segundo modo de vibração da viga quando o fio de SMA está na martensita. Na tentativa de tornar os modos de Vibração da viga novamente visíveis, os parâmetros de controle de vibração foram quadruplicados!

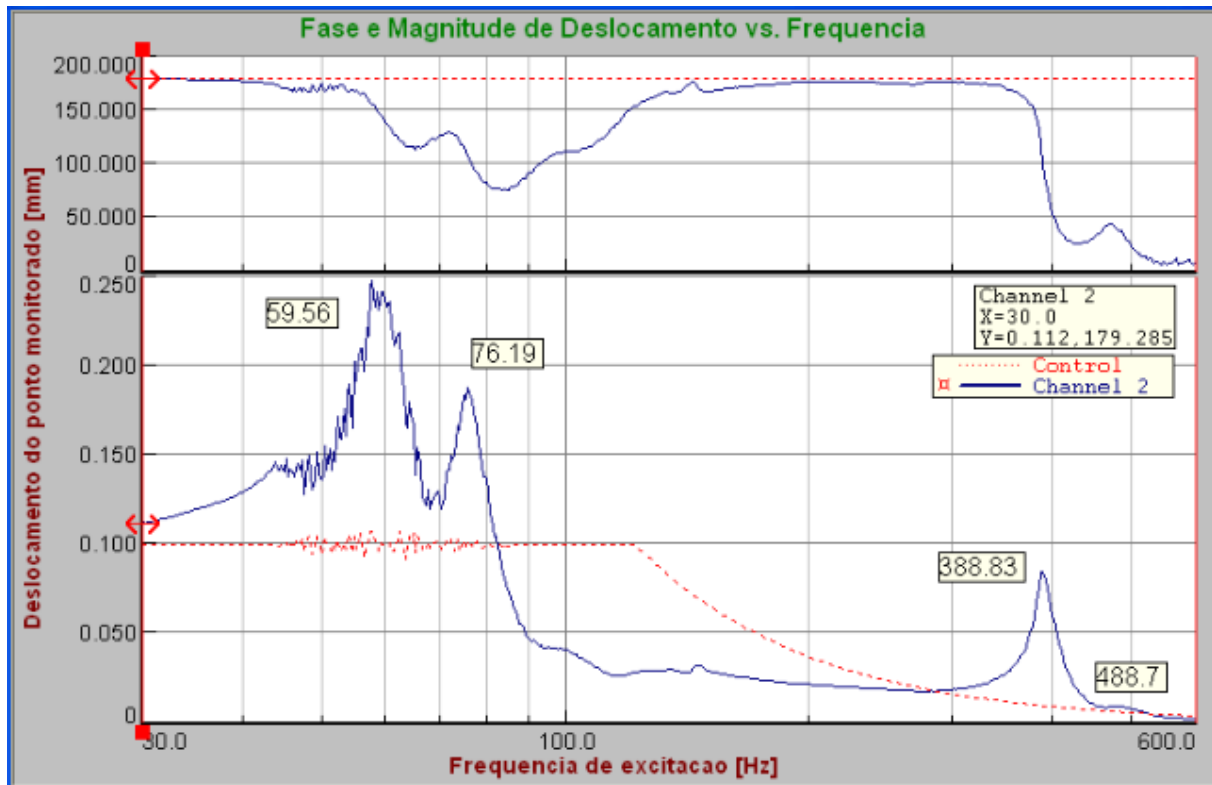


Figura 50: Ensaio a temperatura de 61 °C.

- Observando as fig. 47 a 52, observa-se que a medida que a temperatura é aumentada, a frequência natural de vibração em ambos os modos também aumenta e aos poucos vai sendo “desmascarada”.
- Ao se comparar as fig. 45 e 52 percebe-se que entre as temperaturas de 72 °C e ambiente há uma variação de cerca de 5% na frequência natural de vibração do primeiro modo, esse resultado é consistente com o que foi obtido no trabalho de Faluhelyi (2013) e também é consistente com o que previa a teoria.

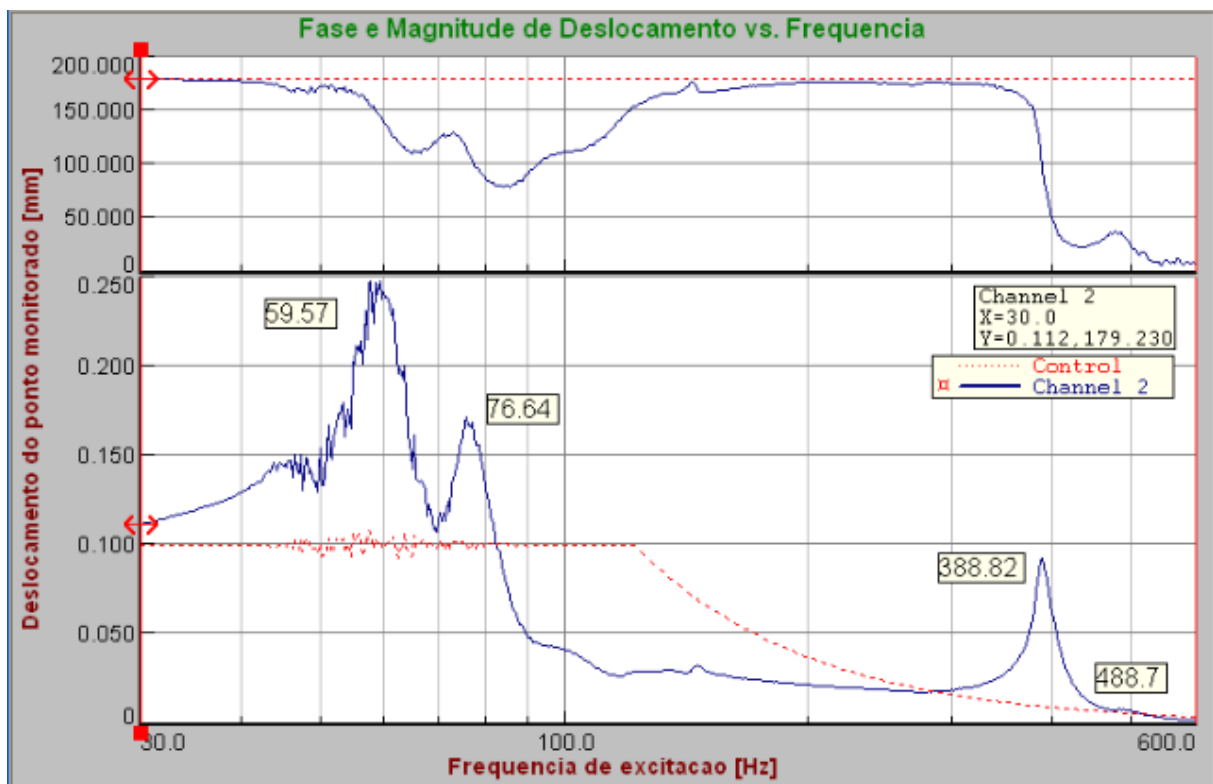


Figura 51: Ensaio a temperatura de 66 °C.

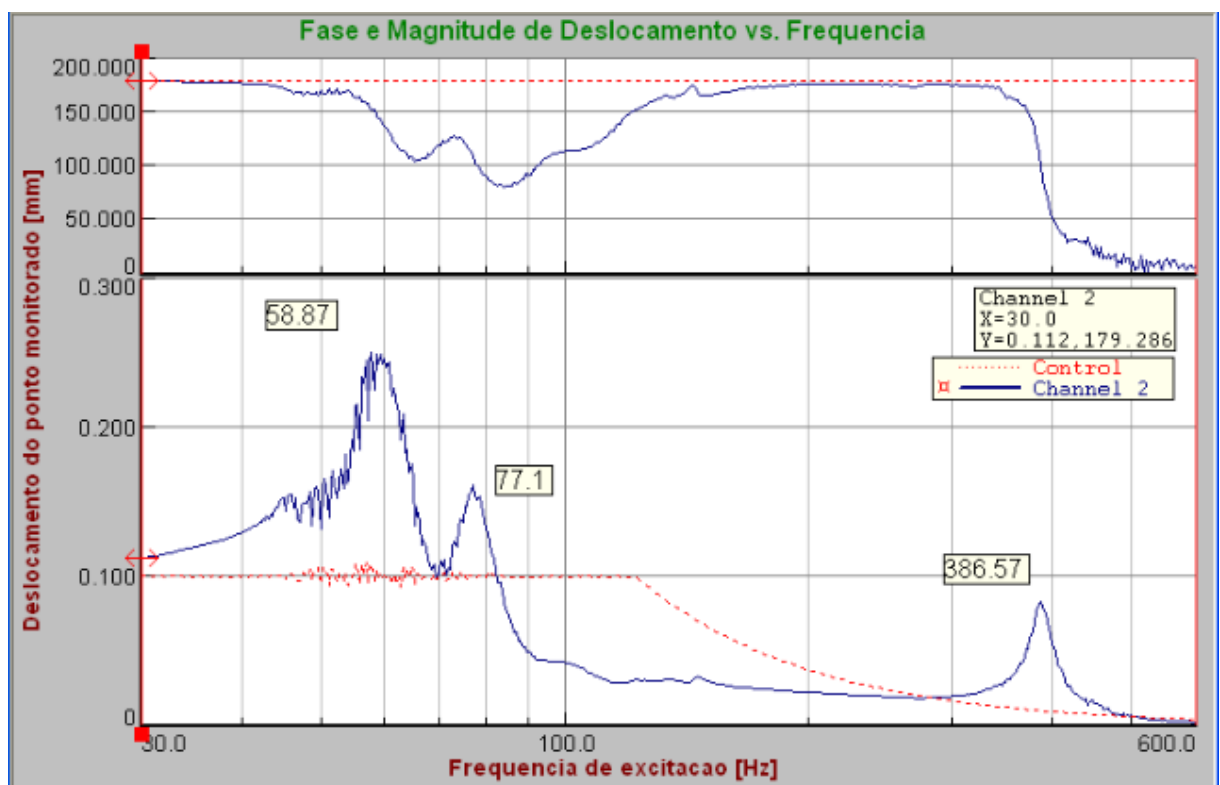


Figura 52: Ensaio a temperatura de 72 °C.

## 6 CONCLUSÃO E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Os experimentos demonstram que é possível controlar-se as características de vibração de SMAHCs utilizando-se um controle de temperatura, na região de temperatura de transformação de fase do SMA.

Com apenas 2% de SMA (em volume) conseguiu-se uma variação nas frequências naturais de vibração de cerca de 5%.

Apesar de os experimentos de vibração terem sido feitos utilizando-se um controle de temperatura em malha aberta, para essa aplicação esse tipo de controle se mostra mais adequado que o controle liga/desliga utilizado por Faluhelyi (2013), pois o controle liga/desliga utilizado naquele trabalho permite uma oscilação na temperatura de 2° C, ao passo que o sistema utilizado nesse trabalho após atingir a estabilidade (depois de  $t_s$ ), mantém a temperatura constante durante longos períodos de tempo.

Os desvios dentre o resultados experimentais e a previsão analítica foram menores do que 10% (no pior caso) no primeiro modo. Percebe-se nos experimentos que o valor de leitura de frequência de ressonância depende de muitos fatores, como: o local em que o acelerômetro de monitoramento é posicionado; os parâmetros de controle de vibração do Shaker entre outros fatores. Além disso, a frequência natural de vibração depende fortemente do posicionamento da viga no sistema de fixação, pois isso alterar o ponto de engaste da viga em poucos milímetros causa uma diferença considerável na frequência de vibração. Há de se considerar que da maneira como o experimento foi realizado é muito difícil realizar um posicionamento com acurácia tão grande. Ademais a intenção do experimento não era fazer uma medida da exata frequência de vibração do corpo, mas sim mostrar que era possível variar essa frequência utilizando para isso um simples controle de temperatura baseado em efeito Joule.

Ficou evidente que os jumpers conectando os fios de SMA na viga em série causam um acréscimo de temperatura na região, isso provavelmente se deve ao fato de esses fios serem mais finos do que o fio de SMA, o que os torna do ponto de vista elétrico uma resistência concentrada, aumentando assim o efeito Joule naquela região.

Concluiu-se ainda que uma fonte de 76W tem potência suficiente para aquecer o CP 11.

Para trabalhos futuros propõe-se:

1. Melhorias no sistema de aquisição de dados disponível na fonte MARK 5. Por exemplo, a adição de um sensor de corrente industrializado.

2. Um estudo mais profundo da relação entre potencia fornecida e temperatura no fio de SMA.
3. Construção de um sistema de controle de temperatura de malha fecha.
4. Melhora na conexão entre os fios de SMA da viga. Sugere-se que sejam utilizados jumpers com secção transversal muito maior do que a do fio de SMA, ou que, se possível, os fios de SMA sejam soldados diretamente, em série.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, R. H. V. **Análise do Comportamento Dinâmico em Vibrações Livre de Vigas pelo Método das Diferenças Finitas**. Belém: [s.n.], 2012. 172 p.

ANDRADE, V. S. **Análise Dinâmica de uma Viga Engastada Excitada por uma Fonte Não Ideal**. São Carlos: [s.n.], 2009.

CALLISTER, W. D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Abordagem Integrada**. 2a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 702 p.

CASTILHO, W. S. **Caracterização Termomecânica de Compósitos Híbridos com Memória de Forma**. Brasília: [s.n.], 2008. 100 p.

CEBALLOS, D. A. C. **Análise do Comportamento Elástico de Vigas Adaptativas com Ligas de Ni-Ti em Temperaturas Inferiores a Mf e Superiores a Af**. Brasília: [s.n.], 2012. 79 p.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**. 4a. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2012. 904 p.

FALUHELYI, P. **Fabricação e Comportamento Termomecânico de Compósitos Estruturais adaptativos com Filamentos de Liga de Ni-Ti**. Brasília: [s.n.], 2013. 219 p.

HIRZEL, T. PWM. **Arduino**. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Tutorial/PWM>>. Acesso em: 11 dezembro 2013.

IRWIN, J. D. **Análise Básica de Circuitos para Engenharia**. 7a. ed. Brasília: LTC, 2003. 558 p.

NISE, N. S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. 3a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 697 p.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4a. ed. São Paulo : Pearson Prentice Hall, 2007. 788 p.

ROGERS, G. L. **Dynamics of Framed Structures**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1959. 355 p.

SANDOVAL, D. M. **Desenvolvimento de uma Metodologia para a fabricação de Compósitos Híbridos com Memória de Forma**. Brasília: [s.n.], 2010. 118 p.

SOUZA, I. J. D. Circuitos retificadores. Disponível em: <[http://ivairsouza.com/circuitos\\_retificadores.html](http://ivairsouza.com/circuitos_retificadores.html)>. Acesso em: 12 agosto 2013.

THOMSON, W. T. **Teoria das Vibrações com aplicações**. Rio de Janeiro: Editora Interciência LTDA., 1978. 462 p.

# ANEXOS

|  |    |
|--|----|
| Anexo 1 – Data Sheets .....  | 64 |
| Anexo 2 – Resultados obtidos no primeiro experimento de caracterizações térmicas,<br>utilizando a fonte MARK 2 ..... | 66 |
| Anexo 3 – Proposta de um sistema de controle de temperatura em malha fechada .....                                   | 70 |

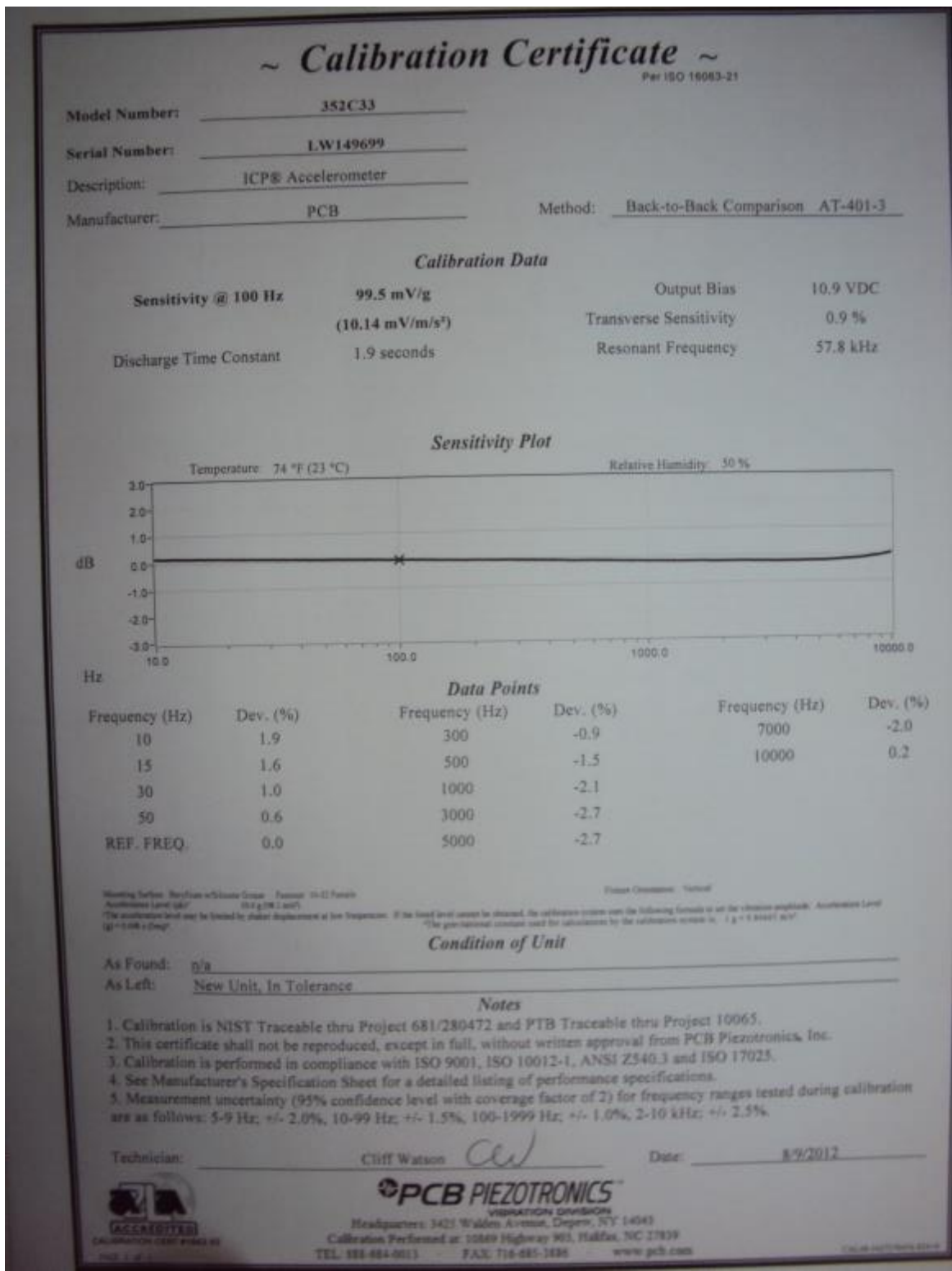


Figura 53: Data Sheet do acelerômetro de monitoramento das vibrações.

# ~ Calibration Certificate ~

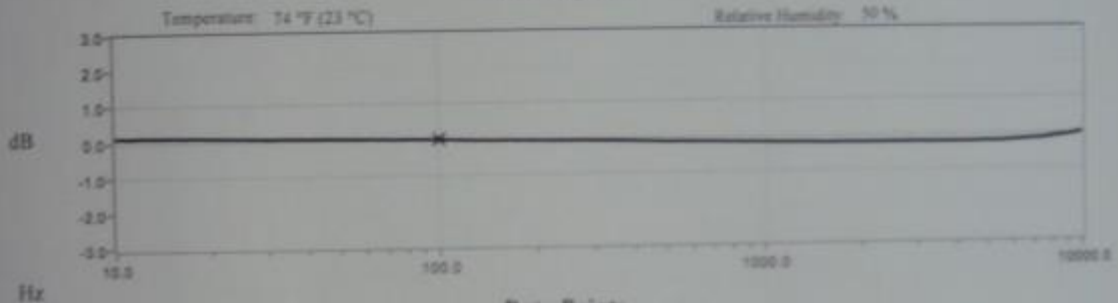
Per ISO 10012-21

Model Number: 352C33  
 Serial Number: LW149701  
 Description: ICP® Accelerometer  
 Manufacturer: PCB Method: Back-to-Back Comparison AT-401-3

### Calibration Data

|                         |   |                        |          |
|-------------------------|---|------------------------|----------|
| Sensitivity @ 100 Hz    | 99.4 mV/g<br>(10.14 mV/m/s <sup>2</sup> ) | Output Bias            | 10.9 VDC |
| Discharge Time Constant | 1.5 seconds                               | Transverse Sensitivity | 0.5 %    |
|                         |   | Resonant Frequency     | 58.6 kHz |

### Sensitivity Plot



### Data Points

| Frequency (Hz) | Dev. (%) | Frequency (Hz) | Dev. (%) | Frequency (Hz) | Dev. (%) |
|----------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|
| 10             | 1.5      | 300            | -1.1     | 7000           | -2.0     |
| 15             | 1.3      | 500            | -1.7     | 10000          | 0.0      |
| 30             | 0.7      | 1000           | -2.2     |                |          |
| 50             | 0.4      | 3000           | -2.7     |                |          |
| REF. FREQ.     | 0.0      | 5000           | -2.7     |                |          |

Measuring Surface: See Section 4 of General Order - Customer: 01-01-10000  
 Acceleration Level (g): 0.1 (10.14 m/s<sup>2</sup>)  
 The acceleration level may be limited by shaker displacement at low frequencies. If the stated level cannot be achieved, the calibration certificate will be adjusted accordingly. Acceleration Level (g) = 0.04 x (Hz)<sup>0.5</sup>  
 The government contract must be submitted for calibration for the calibration system is: 1.2 x 10<sup>-06</sup> m/s<sup>2</sup>

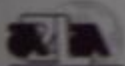
### Condition of Unit

As Found: 0/3  
 As Left: New Unit, In Tolerance

### Notes

1. Calibration is NIST Traceable thru Project 681/280472 and PCB Traceable thru Project 10065.
2. This certificate shall not be reproduced, except in full, without written approval from PCB Piezotronics, Inc.
3. Calibration is performed in compliance with ISO 9001, ISO 10012-1, ANSI Z540.3 and ISO 17025.
4. See Manufacturer's Specification Sheet for a detailed listing of performance specifications.
5. Measurement uncertainty (95% confidence level with coverage factor of 2) for frequency ranges tested during calibration are as follows: 5-9 Hz: +/- 2.0%, 10-99 Hz: +/- 1.5%, 100-9999 Hz: +/- 1.0%, 2-50 kHz: +/- 2.5%.

Technician: Chris Watson      Date: 8/9/2017



**PCB PIEZOTRONICS**

HEADQUARTERS: 3421 Walters Avenue, Dayton, OH 45424  
 Calibration Performed at: 10009 Highway 101, Raleigh, NC 27619  
 TEL: 919-681-0100      FAX: 734-482-3888      www.pcb.com

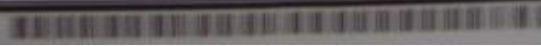


Figura 54: Data Sheet do acelerômetro de Controle.

ANEXO II: Resultados obtidos nos experimento de caracterizações térmicas

Tabela 13: Resultados do experimento de caracterização térmica da viga utilizando a fonte MARK 2

| Temperatura<br>a<br>[°C] | Aplicando Potencia |               |  |                                       |                             | Resfriamento,<br>sem<br>fornecimento de<br>potência | Dissipação<br>de Potência<br>( $P_{out}$ )<br>[W] | Tensão<br>necessária<br>para manter a<br>temperatura<br>em questão<br>[V] | Capacitancia<br>Térmica do corpo de<br>prova 11<br>(aproximada)<br>[J/K] |
|--------------------------|--------------------|---------------|--|---------------------------------------|-----------------------------|---|---|---|--|
|                          | $\Delta t$<br>[s]  | Tensão<br>[V] | resistencia<br>(Media)<br>[ $\Omega$ ] | Potência<br>Média<br>Fornecida<br>[W] | Energia<br>fornecida<br>[J] | $\Delta t$ [s]                                      |   |   |  |
| 25                       |                    | 8             | 4,7                                    | 13,61702128                           | 136,1702128                 | 396   | 0,343864174                                       | 1,271283452   | 136,1702128  |
| 26                       | 10                 | 7,8           | 4,7                                    | 12,94468085                           | 129,4468085                 | 254   | 0,49032882  | 1,518072941   | 124,5435203  |
| 27                       | 10                 | 8             | 4,7                                    | 13,61702128                           | 108,9361702                 | 38  | 2,269503546                                       | 3,265986324   | 86,24113475  |
| 28                       | 8                  | 8             | 4,7                                    | 13,61702128                           | 108,9361702                 | 290   | 0,365557618                                       | 1,310771073   | 106,0117093  |
| 29                       | 8                  | 8,3           | 4,7                                    | 14,65744681                           | 102,6021277                 | 117   | 0,820817021                                       | 1,964138488   | 96,03559149  |
| 30                       | 7                  | 8,3           | 4,7                                    | 14,65744681                           | 102,6021277                 |   | 14,65744681                                       | 8,3   | 0  |
| 31                       | 7                  | 8,2           | 4,7                                    | 14,30638298                           | 85,83829787                 |   | 12,26261398                                       | 7,591724818   | 0  |
| 32                       | 6                  | 8             | 4,7                                    | 13,61702128                           | 108,9361702                 | 72  | 1,396617567                                       | 2,562050461   | 100,5564648  |
| 33                       | 8                  | 7,9           | 4,7                                    | 13,2787234                            | 79,67234043                 | 68  | 1,048320269                                       | 2,219708373   | 71,28577828  |
| 34                       | 6                  | 7,9           | 4,7                                    | 13,2787234                            | 119,5085106                 | 58  | 1,867320479                                       | 2,9625  | 108,3045878  |
| 35                       | 9                  | 8,1           | 4,7                                    | 13,95957447                           | 139,5957447                 | 52  | 2,288454831                                       | 3,279594137   | 118,9996512  |
| 36                       | 10                 | 8,2           | 4,7                                    | 14,30638298                           | 157,3702128                 | 46  | 2,810182371                                       | 3,634261568   | 129,2683891  |
| 37                       | 11                 | 8,2           | 4,7                                    | 14,30638298                           | 171,6765957                 | 45  | 3,065653495                                       | 3,795862409   | 137,9544073  |
| 38                       | 12                 | 8,2           | 4,7                                    | 14,30638298                           | 143,0638298                 | 49  | 2,345308685                                       | 3,320082954   | 114,9201256  |
| 39                       | 10                 | 8,1           | 4,7                                    | 13,95957447                           | 153,5553191                 | 38  | 3,199069149                                       | 3,877579786   | 121,5646277  |
| 40                       | 11                 | 7,9           | 4,7                                    | 13,2787234                            | 159,3446809                 | 31  | 3,793920973                                       | 4,222727622   | 117,6115502  |
| 41                       | 12                 | 8,2           | 4,7                                    | 14,30638298                           | 200,2893617                 | 31  | 4,657892133                                       | 4,678898698   | 144,3946561  |

|       |    |     |     |             |             |    |             |             |             |
|-------|----|-----|-----|-------------|-------------|----|-------------|-------------|-------------|
| 42    | 14 | 8,2 | 4,7 | 14,30638298 | 185,9829787 | 34 | 3,87464539  | 4,267415299 | 131,7379433 |
| 43    | 13 | 8,1 | 4,7 | 13,95957447 | 167,5148936 | 28 | 4,085729113 | 4,382114424 | 114,4004152 |
| 44    | 12 | 8,1 | 4,7 | 13,95957447 | 181,4744681 | 29 | 4,426206539 | 4,561049302 | 128,3599896 |
| 45    | 13 | 8,1 | 4,7 | 13,95957447 | 181,4744681 | 35 | 3,780718085 | 4,215373649 | 132,325133  |
| 46    | 13 | 8   | 4,7 | 13,61702128 | 136,1702128 | 16 | 4,695524578 | 4,697761756 | 75,12839325 |
| 47    | 10 | 7,9 | 4,7 | 13,2787234  | 212,4595745 | 25 | 6,070273556 | 5,34137489  | 151,7568389 |
| 48    | 16 | 7,8 | 4,7 | 12,94468085 | 220,0595745 | 18 | 6,472340426 | 5,515432893 | 116,5021277 |
| 49    | 17 | 8,1 | 4,7 | 13,95957447 | 237,312766  | 17 | 6,979787234 | 5,727564928 | 118,656383  |
| 50    | 17 | 8,1 | 4,7 | 13,95957447 | 139,5957447 | 14 | 4,503088538 | 4,600490857 | 63,04323953 |
| 51    | 10 | 8,1 | 4,7 | 13,95957447 | 181,4744681 | 17 | 6,721276596 | 5,620498199 | 114,2617021 |
| 52    | 13 | 8   | 4,7 | 13,61702128 | 217,8723404 | 16 | 7,512839325 | 5,942250822 | 120,2054292 |
| 53    | 16 | 8   | 4,7 | 13,61702128 | 190,6382979 | 13 | 6,573734409 | 5,55846667  | 85,45854732 |
| 54    | 14 | 8   | 4,7 | 13,61702128 | 217,8723404 | 14 | 7,781155015 | 6,047431568 | 108,9361702 |
| 55    | 16 | 7,9 | 4,7 | 13,2787234  | 212,4595745 | 9  | 8,498382979 | 6,32        | 76,48544681 |
| 56    | 16 | 7,9 | 4,7 | 13,2787234  | 331,9680851 | 10 | 12,76800327 | 7,746587338 | 127,6800327 |
| 57    | 25 | 7,8 | 4,7 | 12,94468085 | 271,8382979 | 6  | 8,768977351 | 6,419828156 | 52,6138641  |
| 58    | 21 | 7,6 | 4,7 | 12,2893617  | 528,4425532 | 6  | 19,57194641 | 9,591045206 | 117,4316785 |
| 59    | 43 | 7,7 | 4,7 | 12,61489362 | 163,993617  | 8  | 3,215561118 | 3,887561865 | 25,72448894 |
| 60    | 13 | 7,7 | 4,7 | 12,61489362 | 479,3659574 | 9  | 21,7893617  | 10,11978261 | 196,1042553 |
| 61    | 38 | 7,7 | 4,7 | 12,61489362 | 491,9808511 |    | 12,9468645  | 7,800657867 | 0           |
| 62    | 39 | 7,7 | 4,7 | 12,61489362 | 227,0680851 |    | 5,822258592 | 5,231119898 | 0           |
| 63    | 18 | 7,7 | 4,7 | 12,61489362 | 290,1425532 |    | 16,11903073 | 8,703990145 | 0           |
| 64    | 23 | 7,7 | 4,7 | 12,61489362 | 479,3659574 | 11 | 14,09899875 | 8,140349754 | 155,0889862 |
| 65    | 38 | -   | 4,7 |             |             | -  | -           |             |             |
| Média |    |     |     |             |             |    |             |             | 116,6759037 |

Tabela 14: Resultados do experimento de caracterização térmica da viga utilizando a fonte MARK 4

| Temperatura | Aplicando Potencia |              |                     |                          |                   | Resfriamento, sem fornecimento de potência | Dissipação de Potência | Corrente necessária para manter a temperatura em questão | Capacitancia Térmica (aproximada) |
|-------------|--------------------|--------------|---------------------|--------------------------|-------------------|--|------------------------|--|-----------------------------------|
|             | $\Delta t$ (s)     | Tensão Média | resistencia (Media) | Potência Média Fornecida | Energia fornecida | $\Delta t$ (s)                             |                        |  |                                   |
| 25          |                    |              | 1                   | 0                        | 0                 | 1  | 0                      | 0  | 0                                 |
| 26          |                    |              | 1                   | 0                        | 0                 | 1  | 0                      | 0  | 0                                 |
| 27          | 5,079              | 8064,616     | 4,428048494         | 14,6860585               | 74,5904911        |  | 14,68605851            | 1,821153039  | 0                                 |
| 28          | 4,268              | 8022,414     | 4,422726067         | 14,5588616               | 62,13721949       |  | 14,55886156            | 1,814340051  | 0                                 |
| 29          | 2,997              | 7969,394     | 4,405161963         | 14,4216279               | 43,22161856       |  | 14,42162792            | 1,809365074  | 0                                 |
| 30          | 3,466              | 7965,99      | 4,41471575          | 14,3731366               | 49,81729255       |  | 14,37313658            | 1,804365037  | 0                                 |
| 31          | 2,654              | 7940,375     | 4,402527669         | 14,3224393               | 38,01175447       |  | 14,32243928            | 1,80367152   | 0                                 |
| 32          | 2,421              | 7928,385     | 4,39638963          | 14,2980512               | 34,61558197       | 231,0899999                                | 0,14823962             | 0,183625952  | 34,25669385                       |
| 33          | 2,424              | 7917,351     | 4,391425854         | 14,2757094               | 34,60432005       | 195,9760001                                | 0,174416936            | 0,199292772  | 34,1815334                        |
| 34          | 2,425              | 7878,807     | 4,374548038         | 14,1953225               | 34,42365638       | 117,2160001                                | 0,287724579            | 0,256461328  | 33,72592429                       |
| 35          | 2,769              | 7858,682     | 4,36293799          | 14,1595249               | 39,2077251        | 102,25                                     | 0,373339349            | 0,292524579  | 38,17394843                       |
| 36          | 2,539              | 7829,28      | 4,354037629         | 14,0784121               | 35,74508537       | 94,41400003                                | 0,368684676            | 0,290992272  | 34,80899505                       |
| 37          | 3,92               | 7833,144     | 4,360199276         | 14,074771                | 55,17310353       | 97,63399982                                | 0,543288335            | 0,35298969   | 53,04341322                       |
| 38          | 3,351              | 7694,608     | 4,356428751         | 13,6087854               | 45,60304078       | 71,85000014                                | 0,606415349            | 0,373095306  | 43,57094291                       |
| 39          | 3,69               | 7655,726     | 4,361458595         | 13,4390829               | 49,59021651       | 55,38100004                                | 0,839501895            | 0,438727607  | 46,49245447                       |
| 40          | 4,502              | 7661,404     | 4,362772805         | 13,4548388               | 60,57368248       | 46,63599992                                | 1,184514114            | 0,521061303  | 55,24100011                       |
| 41          | 4,497              | 7635,385     | 4,341145552         | 13,4235951               | 60,36590693       | 49,39599991                                | 1,120106638            | 0,507957658  | 55,3287874                        |
| 42          | 4,042              | 7607,593     | 4,328889532         | 13,3784883               | 54,07585063       | 44,55900002                                | 1,112648928            | 0,506979998  | 49,5785236                        |
| 43          | 5,653              | 7595,189     | 4,316362365         | 13,3637691               | 75,545388         | 22,91300011                                | 2,644591032            | 0,782745017  | 60,59551459                       |
| 44          | 4,964              | 7588,742     | 4,31136807          | 13,3593257               | 66,31569266       | 30,39899993                                | 1,875284699            | 0,659517091  | 57,00677943                       |



|       |        |          |             |            |             |             |             |             |             |
|-------|--------|----------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 45    | 6,692  | 7606,085 | 4,32940738  | 13,3634953 | 89,42850964 | 28,66700006 | 2,529158339 | 0,764317464 | 72,50338226 |
| 46    | 7,73   | 7546,018 | 4,290213613 | 13,2742325 | 102,6098175 | 31,89499998 | 2,589522207 | 0,776909374 | 82,59281075 |
| 47    | 7,962  | 7470,146 | 4,255816758 | 13,1120526 | 104,3981617 | 29,93700004 | 2,754641598 | 0,804527865 | 82,46570561 |
| 48    | 8,077  | 7450,951 | 4,250231281 | 13,0638667 | 105,5168528 | 18,76699996 | 3,930742527 | 0,961680959 | 73,76824486 |
| 49    | 7,618  | 7439,164 | 4,247290565 | 13,0280667 | 99,24781268 | 19,11100006 | 3,71311356  | 0,935003269 | 70,96131347 |
| 50    | 8,885  | 7440,833 | 4,244561046 | 13,0453151 | 115,9076245 | 19,8039999  | 4,04014169  | 0,975622722 | 80,01096562 |
| 51    | 9,346  | 7427,115 | 4,244450386 | 12,997333  | 121,4730732 | 19,46000004 | 4,216936514 | 0,996753572 | 82,06158472 |
| 52    | 10,154 | 7400,294 | 4,243118664 | 12,9101822 | 131,0899907 | 14,27799988 | 5,365503891 | 1,124508308 | 76,60866391 |
| 53    | 13,27  | 7350,932 | 4,230236928 | 12,7746504 | 169,5196105 | 13,2420001  | 6,394070987 | 1,229437288 | 84,67028866 |
| 54    | 15,348 | 7255,322 | 4,222133647 | 12,468611  | 191,3682396 | 11,28399992 | 7,185650401 | 1,304568998 | 81,08287855 |
| 55    | 16,617 | 7348,338 | 4,268678076 | 12,6492317 | 210,1922836 | 11,28400016 | 7,533503519 | 1,328470136 | 85,0080549  |
| 56    | 12,23  | 7366,62  | 4,27502291  | 12,6930676 | 155,2362171 | 8,977999926 | 7,319700938 | 1,308511204 | 65,71627447 |
| 57    | 9,695  | 7387,328 | 4,269092473 | 12,7830308 | 123,9314823 | 8,638999939 | 6,759653278 | 1,258329647 | 58,39664426 |
| 58    | 12,46  | 7386,502 | 4,267097432 | 12,7849696 | 159,3007218 | 6,447000027 | 8,425489039 | 1,405177798 | 54,31912806 |
| 59    | 15,347 | 7391,601 | 4,259203431 | 12,8282863 | 196,8757113 | 6,676000118 | 8,939549979 | 1,448750626 | 59,68043671 |
| 60    | 16,731 | 7384,464 | 4,250567047 | 12,8295986 | 214,6520137 | 6,217999935 | 9,353436527 | 1,483413292 | 58,15966772 |
| 61    | 15,811 | 7358,37  | 4,224617563 | 12,816308  | 202,638644  | 5,295000076 | 9,600997088 | 1,507524812 | 50,83728031 |
| 62    | 18,345 | 7355,894 | 4,215918141 | 12,8346011 | 235,4507568 | 4,378999949 | 10,36132534 | 1,56769499  | 45,37224314 |
| 63    | 18,928 | 7326,297 | 4,20035547  | 12,7799629 | 241,8991379 | 4,832999945 | 10,18051171 | 1,556832112 | 49,20241254 |
| 64    | 21,576 | 7295,092 | 4,197481036 | 12,6787678 | 273,5570931 | 3,457000017 | 10,92785895 | 1,613515602 | 37,77760859 |
| 65    | 26,194 | 7287,845 | 4,188427138 | 12,681079  | 332,1681847 | 3,10800004  | 11,3360243  | 1,645147727 | 35,23236399 |
| 66    | 30,117 | 7316,51  | 4,18935363  | 12,7781664 | 384,8400394 | 2,875999928 | 11,66429361 | 1,668613338 | 33,54650757 |
| 67    | 29,658 | 7331,452 | 4,202586432 | 12,7899554 | 379,3244974 | 2,650000095 | 11,7408845  | 1,671444963 | 31,11334504 |
| 68    | 30,118 | 7318,443 | 4,197811284 | 12,7597535 | 384,2982573 | 2,649999857 | 11,72785213 | 1,671466918 | 31,07880647 |
| 69    | 25,037 | 7296,273 | 4,176432661 | 12,7468658 | 319,1432778 | 2,531000137 | 11,57658433 | 1,664897412 | 29,30033653 |
| Média |        |          |             |            |             |             |             |             | 55,45977525 |

Esse projeto chegou a ser implementado, mas não foi muito bem documentado, pela razão óbvia de não ter dado certo. O problema com o projeto foi que não conseguiu fechar-se a malha. Apesar de o termopar do tipo J ter sido calibrado 3 vezes, as constantes mudanças de projeto, na tentativa de tornar o sistema estável acabaram mudando os parâmetros do sistema de aquisição de temperaturas, além disso, suspeitasse que o amplificador AD594AQ utilizado para a amplificação do sinal do termopar possa estar com algum defeito, sem mais tempo para fazer novas calibrações ou adquirir novo amplificador (que é um componente caro) e termopar visto que ambos não são vendidos no comércio local de Brasília decidiu-se abandonar o projeto em malha fechada. A figura 55 mostra um esboço do projeto completo do controle de temperatura PID utilizando a fonte MARK 5, já a fig. 56, propõe melhoramentos para o projeto apresentado na fig. 55.

Ao longo do trabalho foram desenvolvidos vários programas para as fontes. Logo depois das fig. 55 e 56, são apresentados dois desses códigos, os mais promissores.

O primeiro código, escrito em python foi feito para ser instalado em um computador que quando conectado ao arduino seria capaz de receber as informações coletadas por este e gravá-las em um arquivo, esse programa está em plenas condições de uso para usá-lo basta ter o Python instalado em sua máquina, a biblioteca PySerial e selecionar a porta "COM" certa, o padrão é a porta "COM9".

O segundo está escrito em linguagem própria do arduino (muito similar à C), esse seria o programa que implementaria o controlador, esse programa não está completamente desenvolvido, mas é uma boa ideia de começo.

É fato que as funções integral e derivada são muito complexas para serem implementadas diretamente em um microcontrolador, para contornar esse problema sugere-se que essas funções são implementadas por aproximações bem aceitas no meio científico. Para a integral pode-se utilizar a aproximação de Tustin:

$$\int_0^{kT} f(t) = u(t) = u(kT - T) + \frac{f(kT-T) + f(kT)}{2} T \quad (59)$$

Já a derivada pode ser implementada utilizando-se a aproximação de Euler:

$$\frac{df(t)}{t} = \frac{f(kT) - f(kT-T)}{T} \quad (60)$$

# Projeto de controle de temperatura PID. I

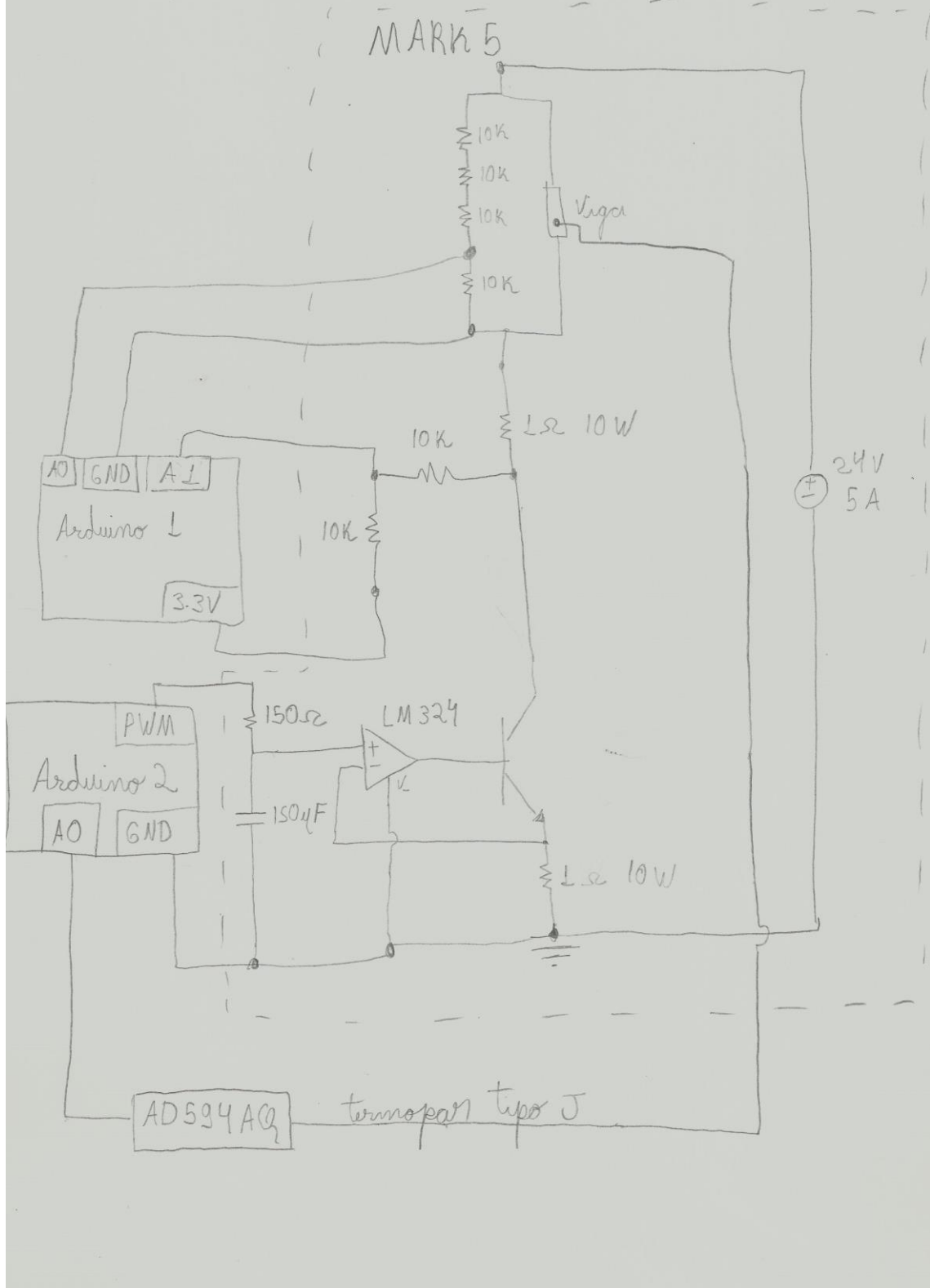


Figura 55: Projeto de controle de temperatura PID utilizando a fonte MARK 5.

# Projeto de Controle PID 2.

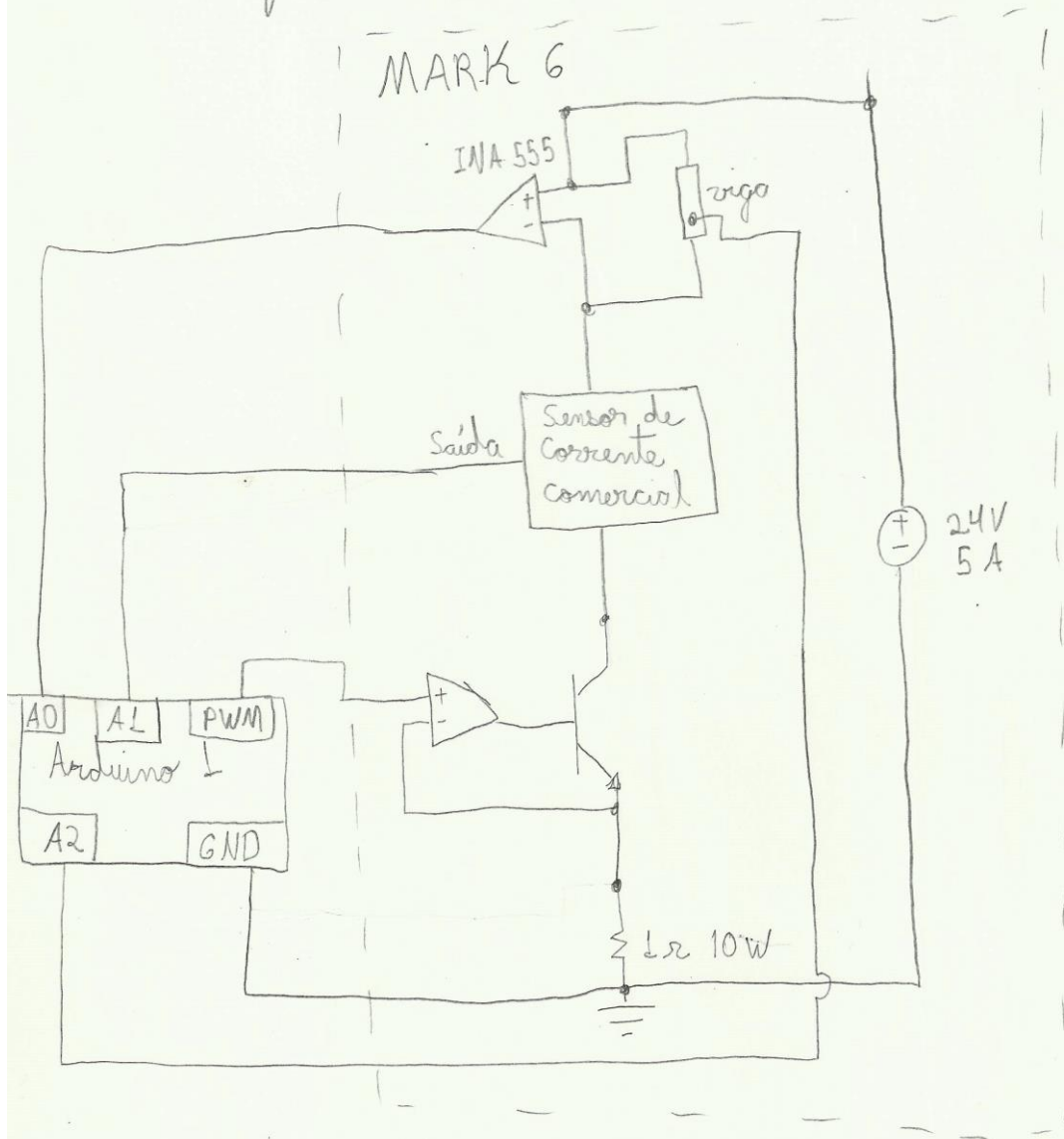


Figura 56: Projeto de controle de temperatura PID utilizando a fonte MARK 5

## PROGRAMA EM PYTHON PARA AQUISIÇÃO DE DADOS

```
#!/bin/env python
```

```
"""
```

```
AUTHOR:    Matheus Vinicius Ferreira de Figueiredo Teixeira
```

```
"""
```

```
version = 20131029
```

```
releasestatus = 'beta'
```

```
# =====
```

```
# Libraries
```

```
# =====
```

```
from serial import Serial
```

```
import os
```

```
import datetime
```

```
import sys
```

```
import time
```

```
# =====
```

```
# Class
```

```
# =====
```

```
class Board:
```

```
    """
```

```
        Represents an arduino board
```

```
    """
```

```
#=====#
```

```
# board methods
```

```

#-----#
def __init__(self, port='COM7', baudrate=9600,
             parity='N', stopbits=1, timeout=1, bytesize=8,
             comments=""):
    self.portname = port
    self.comments = comments
    self.baudrate = baudrate
    self.parity = parity
    self.stopbits = stopbits
    self.timeout = timeout
    self.bytesize = bytesize

def initialize(self):
    """
    Run the initialization routines. This is separate from
    __init__ because there are instances where we'd like to
    create the TRead object, perform some other actions, and
    then initialize the communications with the board.
    """

    self.outputfilename = self.getoutputfilename()
    self.outputfile = open(self.outputfilename, 'w')
    self.printhead()
    self.initializeport()

def __del__(self):
    try:
        self.outputfile.close()
        print "Closed data file..."

```

```

        self.connection.close()

        print "Closed serial connection..."

    except AttributeError, NameError:

        pass

    print "Destroyed board. Board object."

def getoutputfilename(self):
    """
    Determines the filename of the next file.
    """
    pwd = os.getcwd()
    filelist = os.listdir(pwd)
    count = 0
    now = datetime.datetime.now()
    prefix = 'DATA_' + now.strftime("%Y-%m-%d")
    for filename in filelist:
        if filename.startswith(prefix):
            count += 1

    filename = (prefix + '_{count}.dat'.format(count=count))
    return filename

def initializeport(self):
    """
    Initializes the serial port to a known state. Turns off
    data transmission from the board, clears the input
    buffer, and tests the serial connection. Raises an
    InitializationError if this fails.
    """

```

```
try:
    self.connection.close()
except AttributeError:
    pass
self.connection = self.openport()
```

```
def openport(self):
    """
    Initializes and opens the connection to the serial port.
    """
    ser = Serial()
    ser.port = self.portname
    ser.baudrate = self.baudrate
    ser.parity = self.parity
    ser.stopbits = self.stopbits
    ser.timeout = self.timeout
    ser.bytesize = self.bytesize
    ser.open()
    return ser
```

```
def read(self):
    """
    """
    currenttime = 0
    string = ""
    char = ""
```



```

        # This for readings are for cleaning the buffer. I don't know why, but taking
        # those out mess things up.

char = self.connection.read(1)
char = self.connection.read(1)
char = self.connection.read(1)
char = self.connection.read(1)

print "\n\tBoard not inicialized! \n"
while char != "s":
    char = self.connection.read(1)

start = time.time()
print "\tBoard initialized!"

while True:
    char = self.connection.read(1)
    if char == "c":
        while char != "\t":
            char = self.connection.read(1)
            string = string + char
        string = float(string)
        string = '{:12.2f}\t'.format(string)
        self.outputfile.write(string)
        string = "

    if char == "a":
        while char != "\t":
            char = self.connection.read(1)

```

```
    string = string + char
string = float(string)
string = '{:10.2f}\t'.format(string)
self.outputfile.write(string)
string = "
```

```
if char == "v":
```

```
    while char != "\t":
        char = self.connection.read(1)
        string = string + char
    string = float(string)
    string = '{:10.2f}\t'.format(string)
    self.outputfile.write(string)
    string = "
```

```
if char == "!":
```

```
    currenttime = time.time() - start
    aux = "\n" + '%.10f' % currenttime + "\t"
    self.outputfile.write(aux)
```

```
#=====
```

```
# File I/O
```

```
#-----#
```

```
def printhead(self, comment='#'):
```

```
    """
```

```
    Print the header to the file.
```

```
    """
```

```
try:
```

```

# Write the file header

now = datetime.datetime.now()

header = '-'*60 + "\n" +\

"SOURCE: gravacao " + str(version) +\

'.' + str(releasestatus) +\

"\nSTART TIME: " + str(now) +\

"\n" + '-'*60 + "\n" +\

'{:14s}\t'.format('time') + "{:12s}\t".format("temperature") +\

'{:10s}\t'.format("current") + "{:10s}\n".format("voltage")

print header

self.outputfile.write(header)

```

except:

None

```
# =====#
```

```
# Miscellaneous Functions
```

```
#-----#
```

```
if sys.platform.startswith('win'):
```

```
import msvcrt
```

```
def readInput(timeout = 2):
```

```
    start_time = time.time()
```

```
    input = "
```

```
    while True:
```

```
        if msvcrt.kbhit():
```

```

        chr = msvcrt.getche()

        input += chr

    if (time.time() - start_time) > timeout:

        break

    if len(input) > 0:

        return input

    else:

        return ""

# =====#

# "Main Function"

#-----#

if __name__ == "__main__":

    # =====#

    # If windows

    #-----#

    if sys.platform.startswith('win'):

        board = Board()

        board.initialize()

        board.read()

```

## PROGRAMA DE CONTROLE DO ARDUINO

```
////////////////////////////////////
```

```
/*          HEADER          */
```

```
/* AUTHOR:   Matheus Vinícius Ferreira de Figueiredo Teixeira   */
```

```
/* DESCRIPTION: Used to aquire DATA          */
```

```
/* VERSION:  1.0          */
```

```
/* DATE:     15_11_2013          */
```

```
////////////////////////////////////
```

```
#include <LiquidCrystal.h> //Biblioteca para Display LCD
```

```
////////////////////////////////////
```

```
/*          INICIALIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS GLOBAIS          */
```

```
////////////////////////////////////
```

```
LiquidCrystal lcd(2, 4, 7, 8, 12, 13); // cria objeto lcd e atribui pinos
```

```
// Pinos de entrada
```

```
  //temperatura
```

```
int pinoLM35 = A0; //pino de entrada do LM35.
```

```
float offsetpL = 0; //2.5607;
```

```
int pinoTermopar = A1; //pino de entrada do termopar.
```

```
float offsetpT = 0; //2.5489;
```

```
  //medicoes eletricas
```

```
int pinoAmp = A2; //pino de entrada de corrente.
```

```
float offsetpA = 2.5573;
```

```
int pinoVolt = A3; //pino de entrada de tensao.
```

```

float offsetpV = 2.5657;

// Variaveis logicas
//temperatura
float valLM35 = 0; //valor lido do LM35 (ADC).
float temperaturaLM35 = 0; // Temperatura, no LM35 (Celsius).

float valTermopar = 0; //valor lido do termopar (ADC).
float offsetTermopar = 1.29688; // (b da reta) + offset do pino de entrada
float mvTermopar = 0; //Temperatura, no termopar (Celsius).
float temperaturaTermopar = 0; //Temperatura, no termopar (Celsius).
float sensTermopar = 0.096774; //Sensibilidade Termopar (a)

//medicoes eletricas
float corrente;
float correntev;

float tensao;
float tensaov;

// outras variaveis
//variaveis de tempo
int loopfreq = 200; //"Frequencia" do loop ms.

//contadores
int cont = 0; //contador de interacoes, eh "zerado" na funcao ladder.

float aux;

```

```

//variaveis da funcao filtro

int limiarinf = -32000; //abaixo desse valor as medidas sao jogadas fora.

int mediaref = 5000; //numero de leituras consideradas.

//variaveis da funcao conversao

float resistencia = 0.4; //resistencia dos fios utilizados para conectar a barra

// ***** VARIAVEIS DE CONTROLE *****

// Pinos de saida

//PWM

int PWMp = 5;

int VetorControle[3];

int contVetor = 0;

float minT = 80;

float maxT = 0;

float ultimaT;

float mediaT;

float referenciaT = 40;

//max e min absoluto

int amaxVsaida = 250;

int aminVsaida = 80;

int maxVsaida = 250;

int minVsaida = 80;

```

```

int Vsaida = 250;

int tempo = 0;

// ***** VARIAVEIS DE CONTROLE *****

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////

/*          SETUP          */

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////

void setup(){
    int i = 0;

    // Inicializacao da porta serial
    Serial.begin(9600);
    Serial.print("s");
    Serial.print(Vsaida);

    // Inicializacao LCD
    lcd.begin(16, 2); //Definindo o LCD com 16 colunas e 2 linhas
    lcd.clear();    //função para apagar a tela LCD

    // Inicializacao vetor de controle
    for (i=0; i<3; i++){
        VetorControle[i] = minVsaida;
    }

    // aquecimento rapido
    analogWrite(PWMP, Vsaida);
    while (temperaturaTermopar < referenciaT - 1){

        valLM35 = analogRead(pinoLM35) + offsetL;
    }
}

```



```

valTermopar = filtro();    //a aquisicao do termopar deve ser filtrada.
// mV = ADC * Tensao/ADC + offsetTermopar[mV]
mvTermopar = valTermopar * 5000/1023;
// Celcius = Tensao * Celcius/Tensao
temperaturaTermopar = mvTermopar * sensTermopar + offsetTermopar;

temperaturaLM35 = valLM35 * 5000/1023 * 1/10;

if (temperaturaTermopar < minT){
    minT = temperaturaTermopar;
}

if (temperaturaTermopar > maxT){
    maxT = temperaturaTermopar;
}

lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("termopar=");
lcd.print(temperaturaTermopar,1);
lcd.write(B11011111); //função para geração do símbolo grau °
lcd.print("C ");

lcd.setCursor(0,1);
lcd.print(temperaturaLM35);//Vsaida);

// lcd.setCursor(0,1);
// lcd.print("Min=");
// lcd.print(minT,1);

```

```

//
// lcd.print("Max=");
// lcd.print(maxT,1);

    delay(loopfreq);
}
ultimaT = int(temperaturaTermopar * 10);
Serial.print(ultimaT);

analogWrite(PWMP, Vsaida);
delay(1000);
mediaT = temperaturaTermopar;
}

/////////////////////////////////////////////////////////////////
/*                LOOP                */
/////////////////////////////////////////////////////////////////

void loop(){
    Serial.println(temperaturaTermopar,1);

    valTermopar = filtro();    //a aquisicao do termopar deve ser filtrada.

    // mV = ADC * Tensao/ADC + offsetTermopar[mV]
    mvTermopar = valTermopar * 5000/1023;
    // Celcius = Tensao * Celcius/Tensao
    temperaturaTermopar = mvTermopar * sensTermopar + offsetTermopar;

```

```

if (temperaturaTermopar > referenciaT + 0.3){
  if (maxVsaida = minVsaida){
    minVsaida = aminVsaida;
  }
  if( int(temperaturaTermopar*10) > ultimaT){
    maxVsaida = Vsaida;
    Vsaida = 0; //(minVsaida + Vsaida)/2;
    analogWrite(PWMP, Vsaida);
//   delay(8000);
  }
}

if (temperaturaTermopar < referenciaT - 0.3){
  if (maxVsaida = minVsaida){
    maxVsaida = amaxVsaida;
  }
  if( int(temperaturaTermopar*10) < ultimaT){
    minVsaida = Vsaida;
    Vsaida = 166; //(maxVsaida + Vsaida)/2;
    analogWrite(PWMP, Vsaida);
//   delay(8000);
  }
}

ultimaT = int(temperaturaTermopar * 10);

// analogWrite(PWMP, Vsaida);
//
// Vsaida = Vsaida + 10;

```

```

//
// if (Vsaida > 250){
//   Vsaida = 0;
// }

    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("termopar=");
    lcd.print(temperaturaTermopar,1);
    lcd.write(B11011111); //função para geração do símbolo grau °
    lcd.print("C ");

    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Tensao=");
    lcd.print(temperaturaLM35); //Vsaida);
    lcd.print(" ");

// lcd.print("Max=");
// lcd.print(maxT,1);

// lcd.setCursor(0,1);
// lcd.print("Min=");
// lcd.print(temperaturaTermopar);
// lcd.write(B11011111); //função para geração do símbolo grau °
// lcd.print("C ");
//
// lcd.print("Max=");

```

```
// lcd.print(temperaturaTermopar);  
  
// lcd.write(B11011111); //função para geração do símbolo grau °  
  
// lcd.print("C ");  
  
  
// aquisicao(); //Pega informacoes.  
  
// conversao(); //Converte valores ADC para respectivas unidades.  
  
// imprime(); //Manda informacoes para USB.  
  
  
delay(loopfreq);  
  
cont++;  
  
}
```