

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**CONTROLE DA POSIÇÃO DE UMA MOLA DE
LIGA DE MEMÓRIA DE FORMA COMO
ATUADOR PARA UMA PRÓTESE ROBÓTICA**

Cleberson Lael Assis Melo
Ingyrd Quintanilha Guimarães

Orientadores: Prof. Sergio de Almeida
Oliveira
Prof. Alessandro Rosa
Lopes Zachi

**Rio de Janeiro
Março de 2022**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

CONTROLE DA POSIÇÃO DE UMA MOLA DE LIGA DE MEMÓRIA DE FORMA COMO ATUADOR PARA UMA PRÓTESE ROBÓTICA

Projeto final apresentado em cumprimento às normas do Departamento de Educação Superior do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia De Controle e Automação e Engenharia Mecânica.

Cleberon Lael Assis Melo
Ingryd Quintanilha Guimarães

Orientadores: Prof. Sergio de Almeida Oliveira
Prof. Alessandro Rosa Lopes Zachi

**Rio de Janeiro
Março de 2022**

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

M528 Melo, Cleberson Lael Assis
Controle da posição de uma mola de liga de memória de forma
como atuador para uma prótese robótica / Cleberson Lael Assis Melo
[e] Ingrid Quintanilha Guimarães. — 2022.
85f. : il.(algumas color). ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2022.
Bibliografia : f. 80-85
Orientadores: Sergio de Almeida Oliveira [e] Alessandro Rosa
Lopes Zachí

1. Engenharia mecânica. 2. Engenharia de controle e automação.
3. Materiais inteligentes. 4. Ligas com memória de forma. 5. Prótese
– Projetos e construção. 6. Robótica na medicina. I. Guimarães,
Ingrid Quintanilha. II. Oliveira, Sergio de Almeida (Orient.). III. Zachí,
Alessandro Rosa Lopes (Orient.). IV. Título.

CDD 621

Elaborada pela bibliotecária Tania Mello – CRB/7 nº 5507/04

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos do Cleberson

Esta tese foi escrita em meio a pandemia da Covid-19, que ceifou milhares de vidas, incluindo familiares e amigos nossos. Para aqueles que nunca tiveram o desprazer de vivenciar um momento histórico como este, saibam que a luz que iluminou a humanidade e salvou bilhões de vidas foi o conhecimento científico. A Ciência foi e é construída por homens e mulheres que ousam desafiar o *status quo*. O conhecimento científico, quando utilizado em defesa da vida, possibilitou avanços incríveis e inimagináveis para a humanidade e é a ciência que possibilita a construção deste trabalho. Espero que o conhecimento científico presente nesta tese seja um pequeno passo na longa jornada científica para a melhoria da qualidade de vida da humanidade. Por isso sou grato à Ciência e à capacidade do ser humano de ser disruptivo e inovador.

Gostaria de agradecer a todos os familiares e amigos que me apoiaram para a construção desse trabalho. Sem essa base com certeza não conseguiria chegar até aqui. Uma dessas grandes amigas é a minha parceira de tese, Ingryd Quintanilha. Nossa amizade começou através da equipe Venturi Aerodesign, a qual tive o prazer de trabalhar com ela e a qual sou imensamente grato por todo o conhecimento e apoio durante a construção desta tese.

Quero agradecer em especial aos notáveis professores orientadores deste trabalho, Sergio de Almeida e Alessandro Zachi. Eles demonstraram grande empenho, apoio e afincamento para a construção deste trabalho.

Meus agradecimentos também se direcionam a toda equipe do Laboratório de Sistemas e Estruturas Inteligentes (LASEI), do CEFET/RJ, em especial ao Brenno Duarte e Adriel de Moraes que nos apoiaram imensamente. Outro laboratório que gostaria de direcionar meus agradecimentos é o MECANON, da UFRJ, e toda a sua equipe, em especial o Vanderson Dornelas.

Agradecimentos da Ingryd

Agradeço primeiramente à Deus, aos meus familiares que me deram apoio e força para prosseguir sempre, apesar das dificuldades que iam surgindo no caminho e diante das perdas de alguns entes queridos no decorrer da construção desse trabalho.

Agradeço também, aos nossos orientadores pelo empenho, apoio, paciência e por contribuir para realização dos testes experimentais nos laboratórios, em conjunto com alguns amigos como o Brenno Duarte e Vanderson Dornelas, que ajudaram na execução dos testes nos equipamentos, além da interpretação dos resultados, e mesmo diante de restrições da pandemia do COVID-19, sempre respeitando os protocolos de segurança.

Aos professores do corpo docente da Engenharia Mecânica e Engenharia de Automação por terem contribuído com os conhecimentos ao longo de todo o curso de graduação, nos permitindo ter uma formação diferenciada para o mercado de trabalho.

E especialmente agradecemos à Venturi Aerodesign que foi onde passamos a maior parte do nosso tempo na faculdade, fizemos amigos de diversas áreas e aprendemos diariamente na construção do aeromodelo e apresentações dos relatórios. Além de sermos gratos à direção e departamentos do CEFET-/RJ - Maracanã que nos permitiram que esse projeto de extensão fosse possível ocorrer a cada ano durante a competição da SAE BRASIL em São José dos Campos.

RESUMO

O presente trabalho aborda o projeto e a utilização de uma mola de liga de memória de forma como atuador de força em um protótipo de prótese robótica. O protótipo consiste em uma mão mecânica composta por cinco dedos articulados. Como abordagem inicial, este trabalho concentra a atenção na atuação de um dedo deste protótipo para imitar o movimento natural dos dedos. Os movimentos das articulações de cada dedo são gerados por uma mola de aço convencional e uma mola de SMA, acionadas por um circuito eletrônico baseado em um microcontrolador comercial. São apresentados neste trabalho os detalhes sobre o projeto eletrônico, a montagem do protótipo e os resultados experimentais obtidos em laboratório. Os resultados obtidos demonstram que existem grandes vantagens na utilização deste material em próteses robóticas.

Palavras-chave: Materiais Inteligentes. Liga de Memória de Forma. Prótese Robótica. Atuadores SMA.

ABSTRACT

The present work addresses the design and use of a shape memory alloy spring as a force actuator in a robotic prosthesis prototype. The prototype consists of a mechanical hand made up of five articulated fingers. As an initial approach, this work focuses attention on the performance of a finger of this prototype to reproduce their natural movement. The movements of the joints of each finger are generated by one conventional steel spring and one shape memory alloy spring, driven by an electronic circuit based on a commercial microcontroller. In this work, details about the electronic project, the prototype assembly and the experimental results obtained in the laboratory are presented. The results obtained demonstrate that there are great advantages in the use of this material in robotic prostheses.

Keywords: Smart Materials. Shape Memory Alloy. Robotics Prosthesis. SMA Actuators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relação desempenho/peso de diferentes atuadores.	6
Figura 2 - Estruturas flexíveis de SMAs multi-atuadas: (a) Asa e Flap típicos (b) Dobradiça de liga de memória de forma no Flap (c) Modelo de Avião da Força Aérea dos Estados Unidos (USAF).	7
Figura 3 - Roda robótica inspirada em estruturas origami. (a) Alta velocidade,baixa força. (b) Baixa velocidade, alta força.	8
Figura 4 – Modelo 3D simplificado do robô (a). Robô SMARoll com 12 de unidirecional do atuador de SMA na posição de repouso (b).....	9
Figura 5 - Sistema de amortecedor utilizando SMA;(a): Esquemático do amortecedor montado em uma plataforma offshore; (b): Desenho detalhado do amortecedor....	10
Figura 6 - Válvula SMA Protótipo. (1) Base de acetato; (2) Mola de aço inoxidável; (3) NiTi fio do atuador.....	10
Figura 7 - Hastes de SMA usadas como válvulas inteligentes para fechar/abrir válvulas.	11
Figura 8 - Protótipo de uma mão contendo SMA.	12
Figura 9 - Protótipo do dedo com o atuador de SMA.	13
Figura 10 - Prótese de dedo com aplicação biologicamente inspirada.	13
Figura 11 - Diagrama de tensão-deformação convencional e real.....	15
Figura 12 - A transformação martensítica em ligas de memória de forma.....	17
Figura 13 - Características do efeito de memória de forma One-way.	18
Figura 14 - Características do efeito de memória de forma Extrinsic Two-way.....	20
Figura 15 - Diagrama de fases com carregamento mecânico a temperatura nominal.	21
Figura 16 - Efeito da liga de memória de forma pseudoelástica tridimensional.	22
Figura 17 - Comparativo da entrada de um sistema com impulso e a resposta dele.	24
Figura 18 - Diagrama de blocos do sistema.	25
Figura 19 - Deslocamento para a resposta ao impulso com ganho (K_p) igual a 5. ..	26
Figura 20 - Deslocamento para a resposta ao impulso com ganho (K_p) igual a 20..	26
Figura 21 - Deslocamento para ondas triangulares com a frequência de 0.05 Hz. ..	27
Figura 22 - Deslocamento para ondas triangulares com a frequência de 0.1 Hz.	27
Figura 23 - Deslocamento para as ondas senoidais com a frequência de 0.064 Hz.	28
Figura 24 - Deslocamento para as ondas senoidais com a frequência de 0.16 Hz. .	28
Figura 25 - Diagrama do projeto.....	30
Figura 26 - Simulação do aquecimento da mola SMA.....	30
Figura 27 - Resultado da transformação de fase com a ausência de um controle. ..	31
Figura 28 - Resultado da transformação de fase com um controle PID de temperatura.	31
Figura 29 - Resultado da transformação de fase com um controle PID de força.	31
Figura 30 - Molas utilizadas no projeto. (a) Mola de Aço. (b) Mola de SMA.	32

Figura 31 - Arduino Mega 2560 R3.....	33
Figura 32 - Imagem do Encoder KY-040.....	34
Figura 33 - Polia de Nylon maior.	34
Figura 34 - Polia de Nylon menor.	35
Figura 35 - Montagem inicial da bancada do experimento.....	36
Figura 36 - Montagem inicial da bancada com foco nas polias (a) e na mola de SMA (b).....	37
Figura 37 - Montagem final da bancada feita em Solidworks com vista superior (a) e perspectiva isométrica (b).....	37
Figura 38 - Imagem da ISOMET do LAMAT.....	39
Figura 39 - Imagem da prensa de cadinho com a amostra de SMA.	40
Figura 40 - Imagem da DSC do MECANON.....	40
Figura 41 - Máquina de ensaio de tração.....	41
Figura 42 - Resultado do teste experimental de DSC para a amostra de SMA.	43
Figura 43 - Ensaio de tração para a mola de SMA.....	44
Figura 44 - Ensaio de tração para a mola de aço convencional.	45
Figura 45 - Curva de força (N) em relação ao deslocamento (mm) da mola de SMA.	45
Figura 46 - Distribuição da tensão de cisalhamento em toda seção transversal do fio de uma mola linear.....	46
Figura 47 - Curva de força (N) em relação ao deslocamento (mm) da mola de aço convencional.....	47
Figura 48 - Curva de deslocamento (mm) em relação ao tempo (ms) da mola de sma.	48
Figura 49 - Análise de resposta transitória da resposta ao degrau.....	49
Figura 50 - Análise do comportamento da planta real e da planta teórica.....	51
Figura 51 - Diagrama de malha fechada com o controlador.	52
Figura 52 - Sinal de tempo discreto.....	57
Figura 53 - Uma versão contínua amostrada do sinal f.	58
Figura 54 - Método de diferenciação Backward Euler e Forward Euler.....	60
Figura 55 - Diagrama de um controlador sendo implementado em um computador. 60	
Figura 56 - Resposta ao degrau da planta discretizada no Arduino.....	63
Figura 57 - Resposta do sistema com a implementação do Controlador PID.....	64
Figura 58 - Resposta do Controlador PID.	66
Figura 59 - Resposta do sistema com Kp reduzido.....	67
Figura 60 - Resposta do sistema com 2.0 Amperes.....	68
Figura 61 - Resposta do sistema com 1.75 Amperes.....	69
Figura 62 - Resposta do sistema com mudança de referência com 2.5 Amperes....	70
Figura 63 - Resposta do sistema com mudança de referência com 2 Amperes.	71
Figura 64 - Resposta do sistema com mudança de referência com ciclo completo com 2.5 Amperes.....	72

Figura 65 - Resposta do sistema com mudança de referência com ciclo completo com 2.5 Amperes.	73
Figura 66 - Resposta com a prótese para deslocamento de 3,76 milímetros.	74
Figura 67 - Resposta com a prótese para deslocamento de 5,02 milímetros.	74
Figura 68 - Resposta com a prótese para deslocamento de 6,28 milímetros.	75
Figura 69 - Resposta do sistema a um ciclo completo de referências.	76

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO	2
1.2	JUSTIFICATIVA	3
1.3	OBJETIVOS	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	APLICAÇÕES EM ATUADORES	7
2.2	APLICAÇÕES EM PRÓTESES ROBÓTICAS	12
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
3.1	COMPORTAMENTO DA ESTRUTURA CRISTALINA	16
3.2	EFEITO MEMÓRIA DE FORMA	17
3.2.1	Efeito memória de forma One-Way	18
3.2.2	Efeito memória de forma Extrinsic Two-Way	19
3.2.3	Efeito memória de forma Intrinsic Two-Way	20
3.2.4	Pseudoelasticidade	21
3.3	CONTROLADORES PARA ATUADORES SMA	23
4	O PROJETO DO ATUADOR DE UMA MÃO ROBÓTICA DE MATERIAIS DE MEMÓRIA DE FORMA	32
4.1	MICROCONTROLADOR E SENSOR	32
4.2	MONTAGEM DO SENSOR DE DESLOCAMENTO LINEAR	34
4.3	MONTAGEM DO EXPERIMENTO	36
5	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	39
5.1	RESULTADOS DO TESTE DE DSC	42
5.2	RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO	43
6	CONTROLE E MODELAGEM	48
6.1	FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA	49
6.2	CONTROLADOR	52
6.3	DISCRETIZAÇÃO DO CONTROLADOR	57
7	RESULTADOS DO CONTROLE	62
7.1	RESPOSTA DO CONTROLADOR EM UMA PLANTA SIMULADA	62
7.2	RESPOSTA DO CONTROLADOR NA PLANTA REAL DO PROJETO	65
7.3	RESPOSTA DO CONTROLADOR NA PRÓTESE ROBÓTICA	73
8	CONCLUSÃO	77
9	PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS	78
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80

1 INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, graças aos avanços conquistados nas áreas de ciência e tecnologia, o conhecimento acerca do comportamento de diversos materiais alcançou um novo patamar. Este fenômeno, impulsionado pelas descobertas no que tange a microestrutura desses materiais tornou possível o desenvolvimento de novas ligas, que apresentam propriedades até então pouco exploradas. Dentre dessa nova classe de materiais, surgem os materiais inteligentes, que vem preencher uma demanda por materiais mais versáteis, possibilitando soluções mais leves, resistentes e com propriedades funcionais (térmicas, elétricas, magnéticas, etc.) (LAGOUDAS, 2008).

Um outro setor que também cresceu nas últimas décadas graças aos avanços da ciência e da tecnologia foi a robótica. Suas aplicações são estudadas e implementadas em diversas áreas. Uma delas é o auxílio aos seres humanos, no que remete às funções que estes não conseguem desempenhar.

Diante disso, uma área com destaque que visa unir a engenharia e a robótica é denominada de engenharia de reabilitação, cujo objetivo é aplicar a ciência e tecnologia diante de métodos de engenharia, projetos e construções de dispositivos para recuperação de determinada habilidade. Essa área está inserida dentro da engenharia biomédica. (ANTÔNIO, 2004)

Conforme mencionado por Garrido (2008), o estudo de próteses para membros superiores é uma linha de pesquisa bastante complexa da engenharia de reabilitação por possuir a dedicação de maior área do cérebro do paciente.

No desenvolvimento desse tipo de prótese, o grande limitador tem sido o estado atual da tecnologia (PONS et al., 2005). Apesar dos avanços de próteses robóticas em equipamentos e atuadores eletrônicos, ainda assim ocorre a rejeição por diversos usuários tanto em questões de tamanho, ruído, peso, preço, baixa agilidade, etc. Portanto, para resolver essa questão alguns pesquisadores e engenheiros têm

optado por utilizar outros dispositivos que possuam a tecnologia em materiais inteligentes (*Smart Materials*).

Isto porque, ao contrário dos sistemas convencionais de mecanismo de servomotores e servo válvulas hidráulicas, a atuação desses materiais inteligentes possui melhores características intrínsecas, como a transmissão direta de força/torque, design simples e um baixo consumo de energia (CHOI, 2006).

Esses materiais referem-se a Liga de Memória de Forma (do inglês *Shape Memory Alloy* - SMA), que pertence a classe dos materiais inteligentes quando aplicado a uma determinada temperatura, e possui a habilidade de restabelecer seu formato previamente "memorizado". A partir dessa capacidade, suas aplicações se tornam imensamente abrangentes, indo desde a biomedicina até a aeronáutica. Além disso, trouxeram alguns benefícios especificamente na área de engenharia de reabilitação, pois permitem o controle de posição (TAI E AHNZ, 2010), mudança de forma (ZHANG et al., 2014; DONG et al., 2008) e sobretudo soluções para problemas relacionados com a medicina (VILLARINHO, 2010).

Com isso, despertou-se o interesse de diversos pesquisadores, visando a aplicação de um tipo de força ou trabalho mecânico que contenha redução do ruído de acionamento, isto é, em busca de ser um mecanismo mais silencioso, além de se ter mais leveza do que comparado com sistemas de atuação convencionais como servomotores e/ou servo válvulas hidráulicas que são mais barulhentos e mais pesados. Além disso, o que mais em atraído também é a capacidade do SMA estar relacionada ao fenômeno de efeito memória de forma simples ou duplo, que por sua vez, pode condicionar forças de recuperação intensa atreladas a deslocamentos (oriundos do trabalho mecânico).

1.1 MOTIVAÇÃO

Um dos aspectos mais importantes de um sistema robótico biologicamente inspirado, consiste na relação de atuação-movimento (COLORADO et al., 2011). E atualmente, questões como a minimização de componentes aparecem de forma

regular e frequente, os atuadores disponíveis no mercado encontram limites no seu tamanho, formato e peso.

O atuador é um dispositivo que converte energia em movimento. Cada vez mais, estão sendo empregados atuadores menores e mais eficientes através do uso das Ligas de Memória de Forma que proporcionam um funcionamento mais silencioso com uma alta força e dimensionável, para a relação de tamanho (LANGE et al., 2015).

Entretanto, o controle dos atuadores de SMA se faz necessário para a sua utilização em sua forma mais eficiente e ótima. Pai et al., 2016 apontam que devido ao seu comportamento extremamente não-linear e histerético, um controlador de posição para um atuador não é algo trivial e na literatura encontramos diversas formas de controladores propostos. Os trabalhos realizados por (ELAHINIA et al., 2002; PRICE, 2007; DA SILVA, 2007; GORBET, 2009), se mostram bastante eficazes para controlar o deslocamento de Liga de Memória de Forma. No entanto, outros já utilizam técnicas mais sofisticadas de controle não linear com a utilização de lógica Fuzzy, redes neurais e modos deslizantes (SHI, 2014; NIKDEL, 2014; LEE, 2013).

Sendo assim, esses são os aspectos que motivam esta dissertação a explorar as características das Ligas de Memória de Forma e uma forma de controlar seu posicionamento.

1.2 JUSTIFICATIVA

A atuação em próteses robóticas é um dos seus aspectos mais importantes. Os maiores problemas dos atuadores disponíveis estão relacionados ao seu formato, peso e tamanho. Este problema pode ser facilmente sanado com um atuador de Liga de Memória de Forma, assegurando menor ruído e forma. Além disso, essas Ligas possuem a capacidade de retornar uma forma previamente memorizada através do rearranjo atômico.

Esses materiais inteligentes possuem características adaptativas podendo modificar suas propriedades físicas mediante a aplicação de um estímulo adequado, além de realizar um acoplamento entre meios físicos diferentes.

O material possui também a capacidade de alterar a forma, rigidez, simulações de frequências naturais em virtude da variação da temperatura, tensão, ou ainda da energia dissipada.

Pode-se perceber que essas ligas são utilizadas comumente para diversas aplicações devido a estas propriedades fascinantes, suas aplicações encontram-se em vários campos de ciências e engenharia, como elementos de fixação, vedantes, conectores e grampo, e estão presentes inclusive em fixadores auto-atuantes, interruptores de atuador térmico e vários dispositivos de bioengenharia.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é realizar o controle da atuação da mola de SMA utilizando um controlador PID (Proporcional-Derivativo-Integrativo), para obter uma resposta satisfatoriamente rápida e concisa ao atuar uma prótese robótica.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esse trabalho está dividido em nove capítulos. Sendo o primeiro capítulo composto pela breve descrição sobre o assunto, a metodologia, a justificativa e os principais objetivos. Já o segundo capítulo aborda a revisão bibliográfica contendo diversos artigos e estudos sobre os tipos de atuadores utilizando ligas com Memória (SMA) e os tipos de próteses robóticas.

No terceiro capítulo é apresentada a fundamentação teórica salientando a partir da perspectiva de aportes teóricos com um estudo do comportamento termomecânico aplicado a atuadores com Memória de Forma (SMA), contendo os fenômenos de transformações de fase. Além da análise dos tipos de controles e formas que podem ser utilizados nesse projeto.

O quarto capítulo apresenta o projeto do atuador de uma mão robótica de materiais de memória de forma, contendo os componentes utilizados para montagem da bancada de testes experimentais, bem como o estudo e o desenvolvimento de uma

prótese controlada por uma mola de aço e uma mola de Liga de Memória de Forma com aplicação de um circuito controlador de corrente.

O capítulo cinco envolve os procedimentos experimentais, contendo os testes experimentais para caracterização termomecânica da SMA, diante da obtenção das temperaturas de transformação de fase (DSC) e ensaios de tração da liga com memória de forma e a de aço convencional. O capítulo seis remete ao controle e modelagem, diante da aplicação e uso da função de transferência e demais análises de controle.

Já o capítulo sete apresenta os resultados do controle utilizado no projeto, contendo a comparação da resposta do controlador em uma planta simulada, a resposta do controlador em uma planta real e a resposta do controlador na prótese robótica. O capítulo oito aborda a proposta de trabalhos futuros diante de outros meios de controle. E por fim o último capítulo remete à conclusão de todo o estudo realizado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Atualmente, as Ligas de Memória de Forma (SMA) devido às suas notáveis características são amplamente exploradas e possibilita uma melhor aplicação em vários tipos de pesquisas. Assim, com o avanço e crescimento dessas pesquisas e publicações, faz-se necessário evidenciar que ao mesmo tempo em que anseiam miniaturizar os dispositivos, também estão em busca do alto desempenho atrelado com baixo volume, isto é, o baixo volume das dimensões uma vez que são recorrentes exigências do mercado para projetos mecânicos eficazes e eficientes com produtos mais leves, compactos, simples, silenciosos e com menores custos associados (KIM et al., 2006; PICCINI et al., 2006; NAMAZU et al., 2007; OLIVEIRA, 2008; MONTEIRO et al., 2013; SILVA et al., 2015).

Dessa forma, a Figura 1 ilustra a vantagem que as Ligas de Memória de Forma apresentam em relação de desempenho/peso, o que demonstra que essa categoria de materiais tem alto potencial de miniaturização, e que por isso tem sido bastante empregado no desenvolvimento de atuadores (NESPOLI et al., 2010).

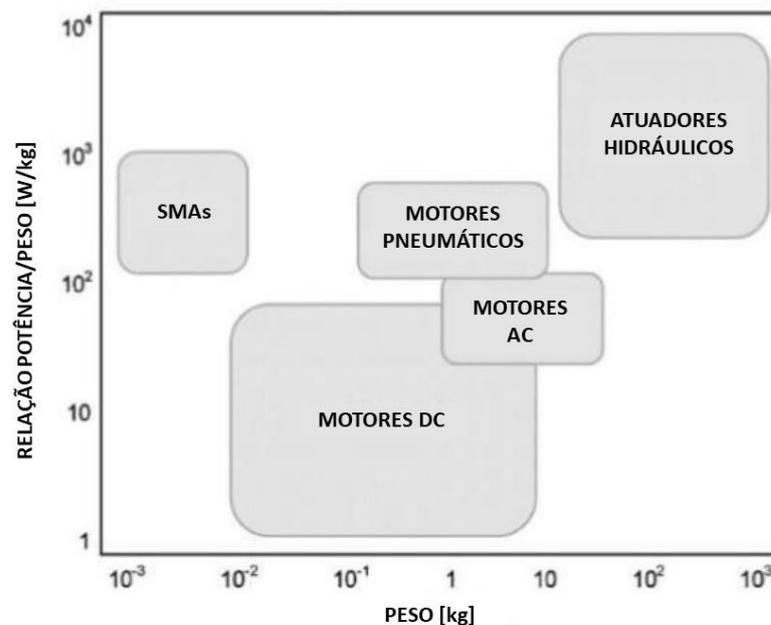


Figura 1 - Relação desempenho/peso de diferentes atuadores.

Fonte: NESPOLI et al., 2010. Figura adaptada da versão original em 2022.

Assim, pode-se observar que essas ligas de memória de forma estão à frente de outros sistemas, já que a quantidade de potência por peso em relação ao seu peso total é relativamente menor se comparados aos outros sistemas. Portanto, alguns pesquisadores relatados nessa tese, vêm atuando para aprofundar o conhecimento dessas ligas e para proporcionar uma melhor utilização, uma vez que está sendo amplamente útil no mundo científico.

2.1 APLICAÇÕES EM ATUADORES

As propriedades da Liga de Memória de Forma vêm atraindo interesse de diversas áreas da ciência e engenharia (MACHADO et al, 2003). Por conta da sua versatilidade suas aplicações são imensas em diversos setores descritos a seguir.

Uma a utilização de atuadores de SMAs para estruturas flexíveis multi-atuadas que podem ser aplicadas em aerobarcos ou em asas. Rediniotis et al. (2002) apresentam um protótipo de um atuador hidrodinâmico, onde fios de SMAs são externamente acionados por uma fonte de aquecimento elétrico e estão ilustrados na Figura 2.

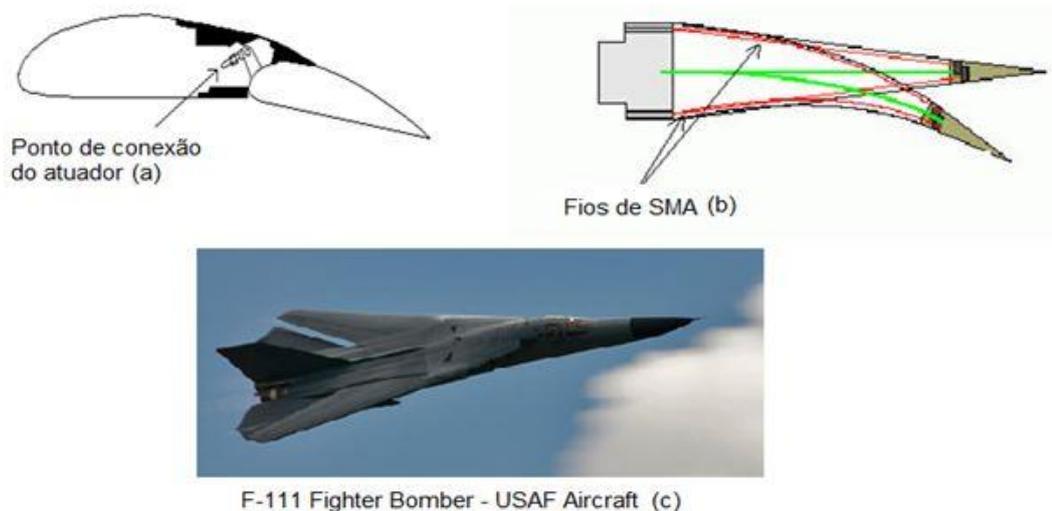


Figura 2 - Estruturas flexíveis de SMAs multi-atuadas: (a) Asa e Flap típicos (b) Dobradiça de liga de memória de forma no Flap (c) Modelo de Avião da Força Aérea dos Estados Unidos (USAF).

Fonte: Rediniotis et al., 2002.

Lee et al. (2014) sugeriram um projeto baseado em rodas de estruturas robóticas inspiradas em elementos origami, cujas características envolvem alteração da transmissão de torque-força através da mudança do raio da roda. Essa mudança é feita por um atuador inteligente, que é aquecido por efeito Joule, e está demonstrado na Figura 3.

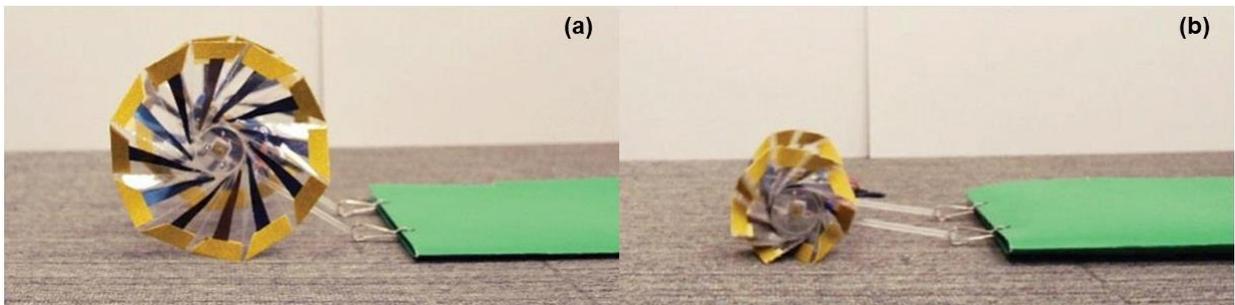


Figura 3 - Roda robótica inspirada em estruturas origami. (a) Alta velocidade, baixa força. (b) Baixa velocidade, alta força.

Fonte: Lee et al., 2014.

Assim, verifica-se que a característica única do origami de obter estruturas tridimensionais a partir de materiais bidimensionais tem atraído atenção de vários campos como na educação (ANDREASS, 2011) e matemática (ALPERIN, 2000; GLASSNER, 1996).

Atualmente, a arte japonesa tem inspirado a engenharia no desenvolvimento de novas estruturas que usam do processo de dobra para criar sistemas inteligentes com capacidade de aumentar ou reduzir seu tamanho, se deslocar por movimentos peristálticos ou se curvar. Elementos com formas ou processos de confecção baseados em origami já são empregados em arquiteturas e decorações, devido à beleza das formas geradas.

A versatilidade do SMA permite a criação das mais variadas formas de movimentação ou deslocamento de um objeto, bastando apenas uma organização adequada no posicionamento das Ligas de Memória de Forma e uma estrutura condizente. Uma amostra dessa incrível versatilidade que produz o deslocamento de um objeto ou uma estrutura é o robô de rolamento, usando atuadores de SMA modulados unidirecionalmente (Mansour, N. A., et al, 2020). Esse robô, chamado de

SMARoll, imita o comportamento de rolamento de alguns animais. A movimentação de SMARoll é mostrada na Figura 4.

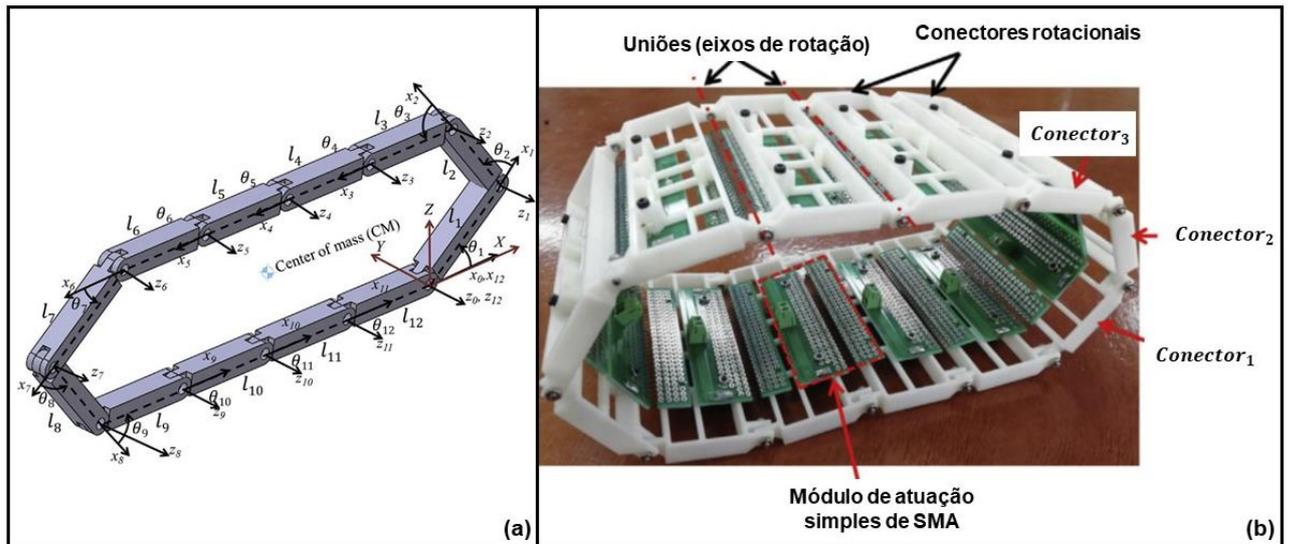


Figura 4 – Modelo 3D simplificado do robô (a). Robô SMARoll com 12 de unidirecional do atuador de SMA na posição de repouso (b).

Fonte: Mansour adaptado, 2020.

A locomoção de rolamento ocorre através da repetição do formato padrão da posição de repouso em etapas sucessivas. Ao longo de cada etapa, um novo conjunto de conexões é apoiado no chão. O trecho **I9** da Figura 4 acima rotaciona se afastando da superfície, enquanto o trecho **I1** se movimenta em direção a superfície, seguindo esta sequência de movimento, e esse por sua vez segue o código de atuação.

A aplicação das Ligas de Memória de Forma na indústria petroquímica vem sendo permanentemente pesquisada pela sua imensa possibilidade de aplicações. Uma de suas aplicações propostas foi de um controlador de vibrações de uma plataforma offshore (Ghasemi, M. R.; Shabakhty, N.; Enferadi, M. H., 2019). A alta capacidade de dispersar energia motivada pela superelasticidade de uma SMA se torna um dos pontos principais desse trabalho mostrado na Figura 5. Sua principal função é atuar como um amortecedor para controlar toda a vibração induzida por ondas em uma plataforma offshore.

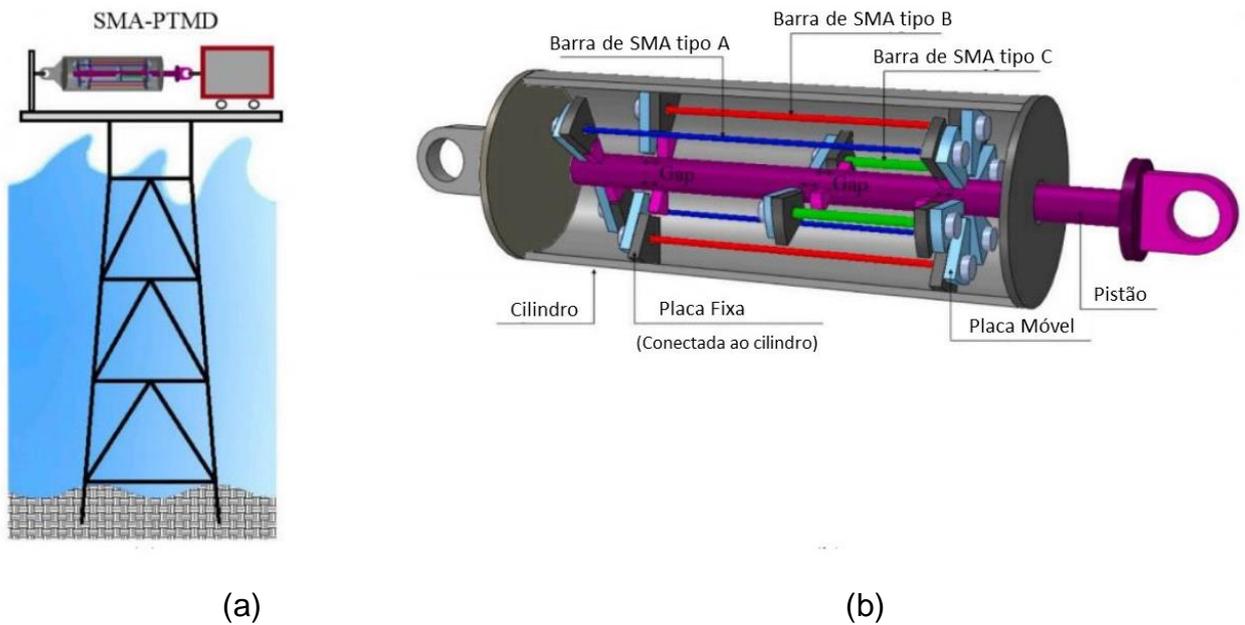


Figura 5 - Sistema de amortecedor utilizando SMA; (a): Esquemático do amortecedor montado em uma plataforma offshore; (b): Desenho detalhado do amortecedor.

Fonte: Ghasemi, M. R, Shabakhty, N., Enferadi, M. H., 2019. Figura adaptada da versão original em 2022.

Uma outra aplicação na indústria petroquímica é o acionamento inteligente de válvulas de offshore a seguir. A Figura 6 demonstra o protótipo de uma válvula offshore que foi desenvolvido a partir de um Ni-Ti equiatômico. A válvula fica em uma base de acetato (1) que encaixa no equipamento de teste de canal em miniatura. O corpo principal da válvula e o responsável pela obstrução quando fechada é uma lâmina de aço inoxidável curvado de 127 μm de espessura (2). Inserido na lâmina de aço um fio atuador de Ni-Ti de 0,4 mm com uma temperatura A_f de 40 $^{\circ}\text{C}$.

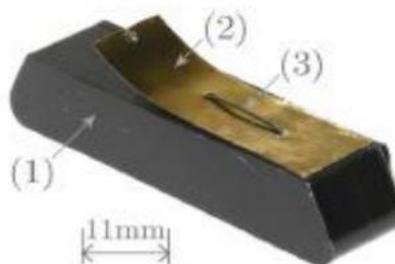


Figura 6 - Válvula SMA Protótipo. (1) Base de acetato; (2) Mola de aço inoxidável; (3) NiTi fio do atuador.

Fonte: WADDELL et al., 2015.

A válvula, normalmente fechada, é aberta pela SMA quando aquecida. Como o propósito da válvula na aplicação final era modificar o fluxo de refrigerante, não foi necessário selar o canal quando totalmente fechada. Para permitir o fluxo quando totalmente fechada, a válvula foi afinada deixando os dois lados seções livres (WADDELL et al., 2015).

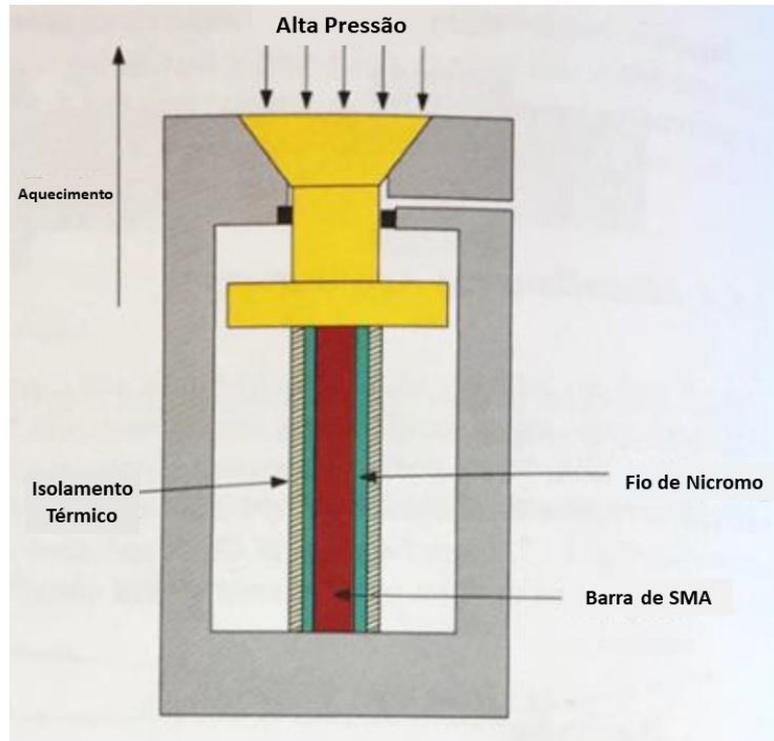


Figura 7 - Hastes de SMA usadas como válvulas inteligentes para fechar/abrir válvulas.

Fonte: Song, G.; Patil, D.; Kocurek, C.; Bartos, J., 2010. Figura adaptada da versão original em 2022.

Na Figura 7 observa-se outro exemplo de válvulas inteligentes acionadas por hastes de SMA no núcleo que são cercadas por fios de NiCr para aquecimento resistivo. Em temperaturas mais baixas, as hastes SMA são inativas e, com o aquecimento das hastes SMA, resulta em geração de força de recuperação suficiente para fechar/abrir as válvulas, dependendo do projeto.

2.2 APLICAÇÕES EM PRÓTESES ROBÓTICAS

A aplicação de SMA em próteses robóticas é com certeza uma de suas aplicações mais pesquisadas e desejadas, por proporcionar um atuador silencioso, leve, resistente e com suas dimensões ajustáveis. Dentre essas pesquisas podemos citar o desenvolvimento de micromanipuladores e atuadores de robótica para imitar os movimentos suaves de músculos humanos.

Sendo assim, Kaplanoglu (2012) projetou dedos acionados diante do acionamento de um tendão com a ajuda das molas SMA, com o desenvolvimento de uma mão protética antropomórfica híbrida, conforme mostra a Figura 8. Foram selecionados atuadores de mola SMA por serem leves, silenciosos e rápidos em resposta durante seu aquecimento. As desvantagens nesta aplicação incluem nível de deslocamento restrito, baixa frequência operacional e dificuldades de controle. Os dedos foram modelados com base em dedos humanos e foram fabricados usando Sinterização Seletiva a Laser (SSL conhecida por Selective Laser Sintering - SLS) de polímero reforçado com fibra.

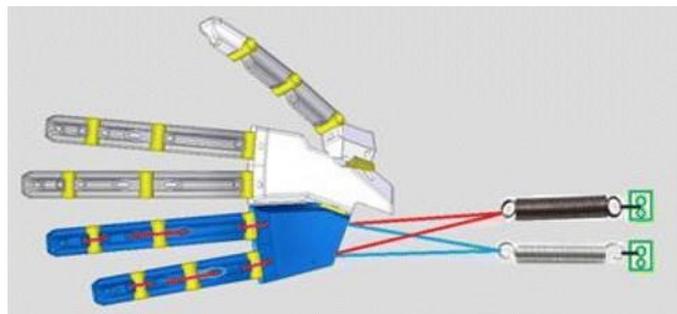


Figura 8 - Protótipo de uma mão contendo SMA.

Fonte: Kaplanoglu, 2012.

Além de uma aplicação somente utilizando SMA como um atuador, existem pesquisas da sua utilização em próteses robóticas utilizando diversas formas de controle para atingir um movimento dos dedos e da mão de forma precisa e que possa conceder ou possuir condição mais humana possível. Para realizar tal tarefa diversas

formas de controle já foram utilizadas, inclusive diversas variações desses controles já foram aplicadas para gerar um controle mais refinado. Uma dessas formas de obter o controle é através da geração de um controlador PID.

Lange et al., (2015) propõe uma opção para controlar uma Liga de Memória de Forma em comparação ao controle de Loop Fechado, para controlar uma mão robótica. O dedo desta mão com o atuador é mostrado na Figura 9.

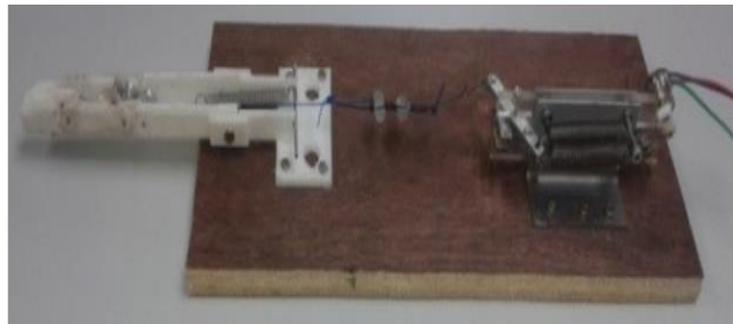


Figura 9 - Protótipo do dedo com o atuador de SMA.

Fonte: Lange, et al., 2015.

Ko, et al. (2011) propõe uma forma diferente de fazer esse controle e um aprofundamento maior em uma prótese mais biologicamente inspirada, mediante o comportamento de ativação de pares de músculos antagonistas do Sistema Nervoso Central (SNC) do corpo humano. Ko, et al (2011) aplicaram em sua prótese uma co-contracção derivado de uma co-ativação de atuadores de SMA antagonistas, utilizando um controlador PWM-PID (Pulse-Width-Modulated Proportional-Integral-Derivative) com uma lógica Fuzzy. O protótipo dessa pesquisa pode ser vista na Figura 10.

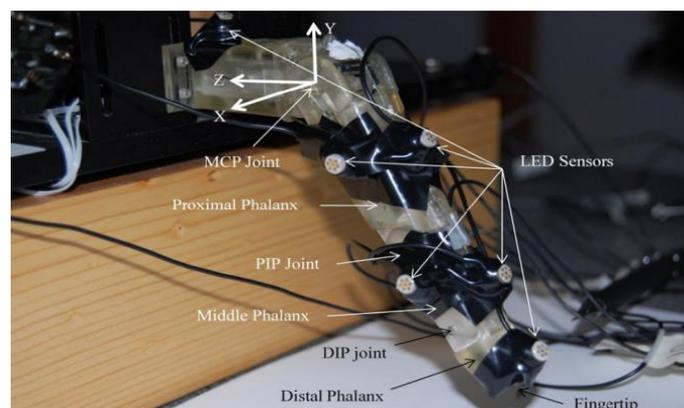


Figura 10 - Prótese de dedo com aplicação biologicamente inspirada.

Fonte: Ko, et al., 2011.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Apesar do Efeito da liga de memória de forma ter sido observado pela primeira vez nos anos 30, sua utilização comercial deve ser remetida ao início dos anos 60, quando o pesquisador Willian F. Buehler desenvolveu uma liga metálica com memória de forma de composição aproximadamente equiatômica de níquel e titânio. Esta liga foi denominada Nitinol, um acrônimo relativo à sua composição (Ni-Ti) e ao Naval Ordinance Laboratory (NOL), nos EUA, onde a liga foi criada (ANDREASS, 1978; BARRAS e MYERS, 2000).

As ligas a base de NiTi são as mais utilizadas em aplicações comerciais por combinar as propriedades associadas com boas propriedades mecânicas, além de apresentar biocompatibilidade. O Nitinol pode ser usado em dispositivos de alto desempenho com deformações recuperáveis na faixa de 6%. Existem várias outras Ligas de Memória de Forma com composição diferente, mas que apresentam deformações recuperáveis menores, dentre estas podemos citar a liga CuZnAl que apresenta deformações recuperáveis de aproximadamente 2%, por exemplo (LAGOUDAS, 2008).

A maior parte dos materiais metálicos apresentam um comportamento elástico no qual, dentro de certos limites, a deformação causada é diretamente proporcional à força aplicada. Toda deformação provocada por uma força em um material é totalmente recuperada assim que a força é retirada, desde que não se exceda um determinado valor máximo. Tal deformação é denominada por deformação elástica. Acima deste limite máximo, entretanto, a força provoca no corpo uma deformação permanente, que na maioria dos materiais não pode ser recuperada. Essa deformação é conhecida por deformação plástica. (REIS, 2001).

Já as Ligas de Memória de Forma, após o final da deformação elástica apresenta uma transformação devido a mudança de fase do material, seguida de uma deformação elástica da nova fase.

Para ilustrar esse comportamento elástico e plástico, na Figura 11 é apresentado o diagrama de tensão-deformação convencional e real para um material dúctil (aço).

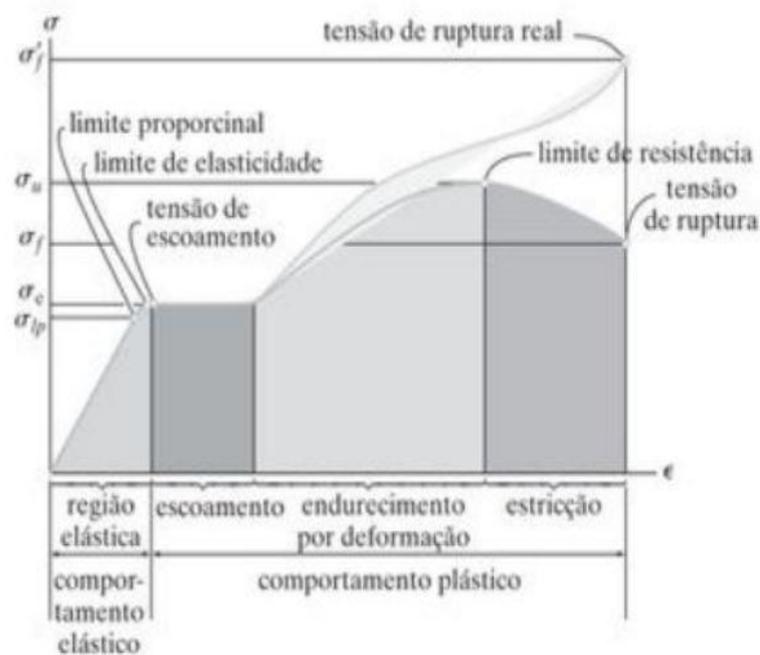


Figura 11 - Diagrama de tensão-deformação convencional e real.

Fonte: Hibbeler, 2010.

As características mais importantes apresentadas pelas SMAs são a capacidade de recuperar a geometria original, ou de desenvolver consideráveis forças de restituição ao se restringir sua recuperação, por meio da imposição de um campo de temperatura e/ou de tensão, devido às transformações de fase induzidas no material. As ligas com memória de forma apresentam uma série de comportamentos termomecânicos particulares. (SAVI, 2004).

3.1 COMPORTAMENTO DA ESTRUTURA CRISTALINA

Para entender de que modo ocorre o fenômeno de memória de forma, torna-se indispensável observar que as SMAs possuem diferentes propriedades.

Basicamente, as ligas com memória de forma apresentam duas fases cristalográficas: a austenita (A) e a martensita (M). As transformações de fase ocorrem na fase austenítica, no estado livre de tensões e nas altas temperaturas, para as diversas variantes da fase martensítica estáveis a baixas temperaturas. A transformação martensítica que ocorre nas ligas com memória de forma produz uma martensita termoelástica e pode apresentar até vinte e quatro variantes e sua estrutura depende do tipo de transformação sofrida pelo material (AGUIAR, 2013; PAIVA et al., 2003).

A transformação da Austenita em Martensita não ocorre pela difusão atômica, mas conforme a distorção da rede de cisalhamento, uma vez que a Austenita é cúbica de corpo centrado e a Martensita é tetragonal, ortorrômbica e adifusional.

A Figura 12 representa o esquema dessas transformações de fase a partir da deformação em relação à temperatura, em que inicialmente é feito um resfriamento da austenita (a) para a martensita maclada ou *twinned martensite* (b), que se forma devido a uma auto-acomodação das variantes martensíticas exibida em (b), e em seguida através do deslocamento das interfaces, sofre deformação e torna-se martensita não-maclada ou *detwinned martensite* (c), que retrata a reorientação em que a variante de orientação específica é dominante. Após essa transformação essa martensita não-maclada (c) sofre aquecimento e retorna para a austenita (a) evidenciando um ciclo. Esse efeito é caracterizado como efeito memória de forma.

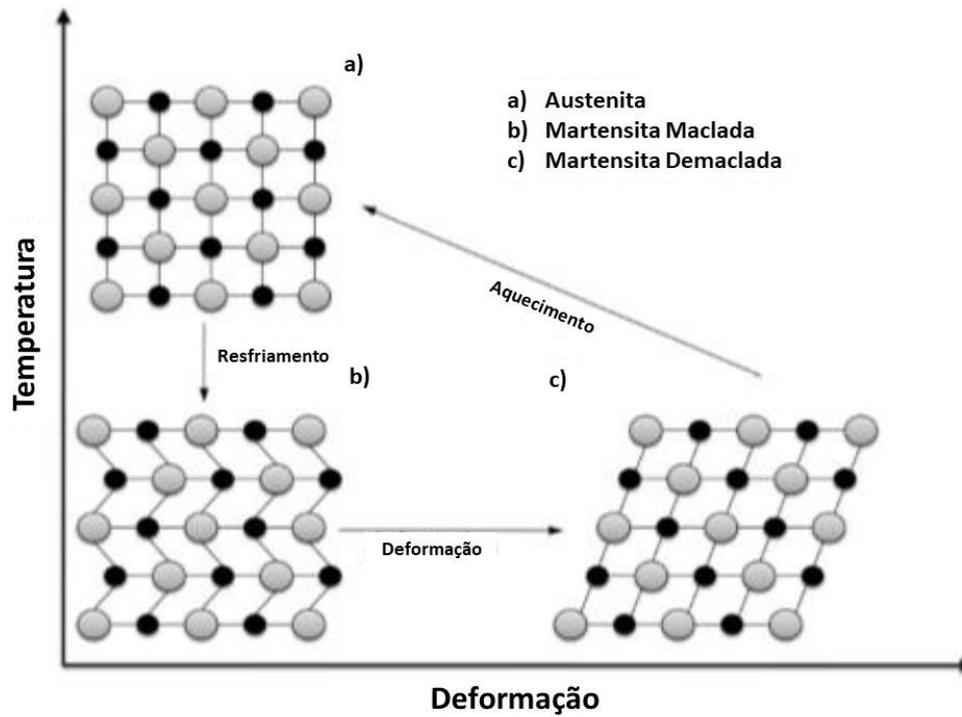


Figura 12 - A transformação martensítica em ligas de memória de forma.

Fonte: Czechowicz e Langbein, 2015. Figura adaptada da versão original em 2022.

3.2 EFEITO MEMÓRIA DE FORMA

Com as características das ligas de memória de forma já descritas podemos deduzir que a sua utilização não está restrita a apenas um tipo de comportamento.

Dessa forma, os estudos das Ligas de Memória de Forma revelam-se complexos e demonstram esses comportamentos contendo uma forte dependência de diversos fatores como variação da temperatura e da taxa de carregamento (LAGOUDAS, 2008).

3.2.2 Efeito memória de forma Extrinsic Two-Way

O comportamento de efeito de memória de forma Extrinsic Two-Way é caracterizado por durante todo seu processo estar continuamente sobre carregamento mecânico.

De acordo com o gráfico apresentado na Figura 14, no ponto A, as molas de SMA se encontram em uma mistura de fases de martensita não maclada e martensita maclada. Nesta posição as molas de SMA estão com um carregamento mecânico (posição 1).

A partir do ponto A, as molas de compressão começam a carregar as molas de SMA com uma tensão até atingir o ponto B (posição 2). Neste ponto há uma transformação da martensita maclada em martensita não maclada. Seguindo o carregamento termomecânico, as molas de SMA são aquecidas até uma temperatura de início de transformação austenítica (A_s), onde começa a transformação da fase da martensita não maclada para a fase austenita (ponto C). Quando o carregamento termomecânico atinge o ponto D, a temperatura final de transformação da austenita (A_f) é atingida. Neste ponto, toda a fase de martensita não maclada é transformada na fase austenítica. A partir deste momento, as molas de SMA são resfriadas devido a troca de calor com o ambiente onde o carregamento termomecânico retorna ao ponto A.

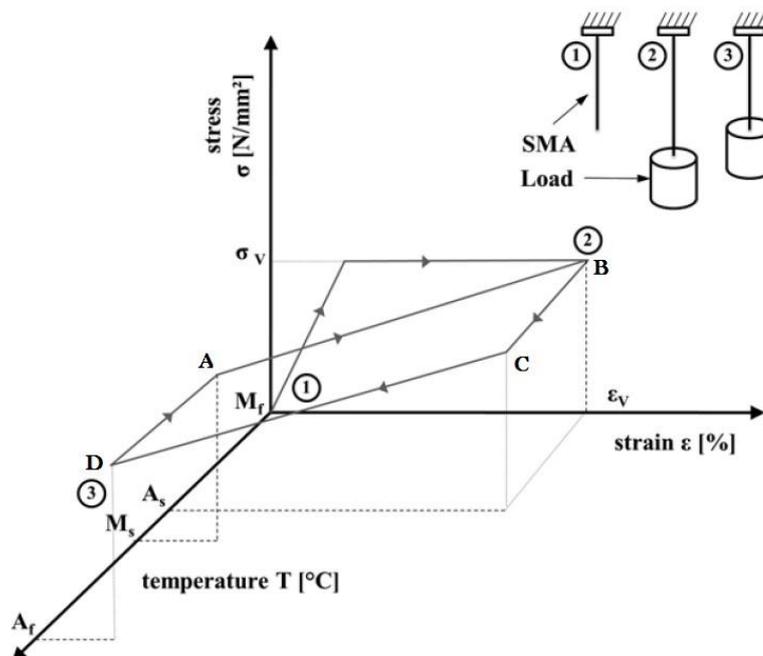


Figura 14 - Características do efeito de memória de forma Extrinsic Two-way.

Fonte: Czechowicz e Langbein, 2015.

3.2.3 Efeito memória de forma Intrinsic Two-Way

No efeito de memória de forma Intrinsic Two-Way permite realizar a transformação de fase do SMA tanto durante o aquecimento quanto durante o resfriamento. Esse efeito é obtido por meio de “treinamento” da liga de memória de forma, que por sua vez, se dá por meio de um tratamento termomecânico.

Durante o treinamento o material é deformado até sua tensão máxima de escoamento em ambas as fases, tanto martensítica como austenítica. Devido a deformação plástica do material, são gerados e estabilizados as discontinuidades e os defeitos na estrutura cristalina do material. Isso garante a retenção de tensão residual, que não se degrada mesmo após as transformações de fase futuras. Após aproximadamente vinte e cinco ciclos, um comportamento de efeito de memória de forma bidirecional intrínseco pode ser observado. (CZECHOWICZ e LANGBEIN, 2015).

3.2.4 Pseudoelasticidade

O comportamento pseudoelástico nestas ligas é caracterizado pela transformação de fase induzida por tensão. Em temperaturas acima da temperatura final de transformação austenítica (A_f), ela gera uma deformação devido a aplicação de uma carga e logo após sua retirada ela recupera a deformação que possuía antes da deformação pela tensão.

A Figura 15 demonstra o processo de pseudoelasticidade, no qual começando no ponto A com a temperatura acima da temperatura final de transformação austenítica (A_f), onde só existe o estado austenítico, a carga começa a ser aplicada até chegar ao próximo ponto que será o B, onde com uma tensão de início da transformação da austenita em martensita não-maclada (σ^{Ms}) tem-se o início da transformação para a martensita demaclada. Quando a tensão chega a - tensão da completa transformação da austenita em martensita não-maclada (σ^{Mf}), onde temos o ponto C, teremos a liga totalmente em estado de martensita demaclada. A tensão é retirada a partir do ponto D e quando chega no ponto E inicia a tensão inicial da transformação austenítica (σ^{As}) necessária para a transformação reversa a qual irá terminar quando chega no ponto F, onde a tensão é igual tensão final da transformação austenítica (σ^{Af}), e se encontra o estado totalmente austenítico.

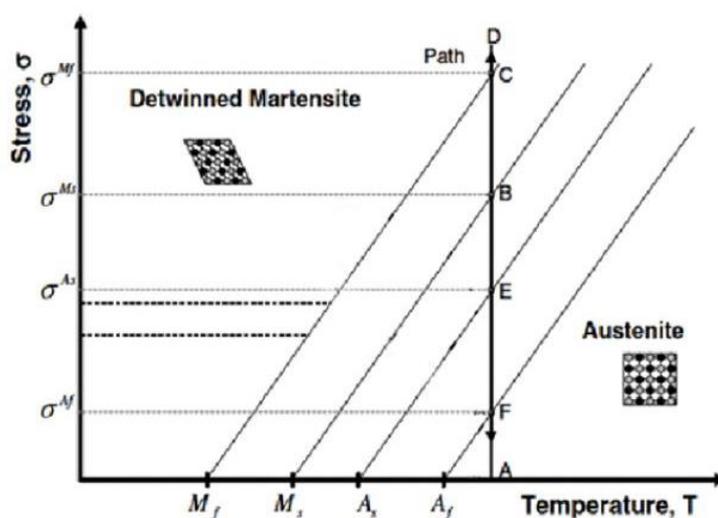


Figura 15 - Diagrama de fases com carregamento mecânico a temperatura nominal.

Fonte: Czechowicz e Langbein, 2015.

Logo, pode-se considerar que a superelasticidade e o efeito memória de forma são formados pelas seguintes etapas, de acordo com Mendelson (1975) a primeira seria o crescimento de placas de martensita e contração de outras, a segunda está relacionada a maclagem no interior das placas de martensita e demaclagem de outras e a terceira remete a transformação para uma nova estrutura martensítica tridimensional.

Dessa forma, o comportamento dessa liga pode ser observado no diagrama de temperatura-tensão-deformação de uma liga pseudoelástica da Figura 16. De acordo com Czechowicz e Langbein (2015) o momento em que é aplicado um carregamento aos elementos pseudoelásticos, e por isso o material fica alongado. E em consequência ocorre o alívio da liga, o fio superelástico reassume sua forma original.

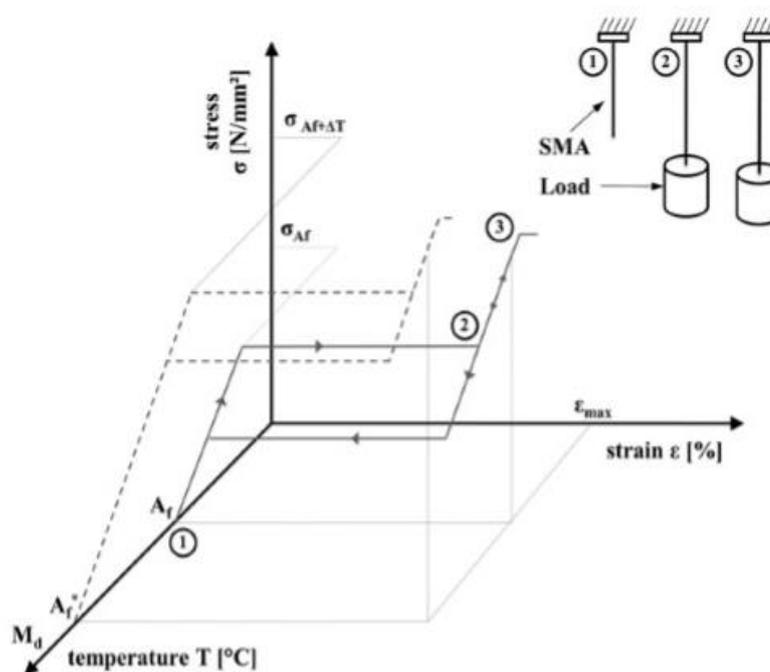


Figura 16 - Efeito da liga de memória de forma pseudoelástica tridimensional.

Fonte: Czechowicz e Langbein, 2015.

Se o material for carregado mecanicamente, ele alcança um estado em que a deformação do material aumenta com a tensão mecânica quase constante, ou seja,

ocorre uma deformação de tensão-deformação aproximadamente linear. Essa região chamada de platô de tensão da curva permite deformações altamente flexíveis. Quando a transformação induzida pela tensão é completa, a curva tensão-deformação aumenta novamente de forma linear. (CZECHOWICZ & LANGBEIN, 2015, p. 29).

A quantidade exata da tensão do platô depende da temperatura do material. Isso pode ser alterado por comportamento termomecânico. Com o aumento das temperaturas dos materiais, é necessário introduzir mais energia mecânica para iniciar uma transformação de fase. Em geral, os efeitos do alongamento das ligas de memória de forma pseudoelásticas podem atingir até 8% do seu comprimento inicial. Em comparação, a força de elasticidade situa-se aproximadamente em 0,5%. (CZECHOWICZ e LANGBEIN, 2015, p. 29).

3.3 CONTROLADORES PARA ATUADORES SMA

Desenvolver um controlador de posição para um Liga de Memória de Forma, não é algo simples e nem trivial. Devido a seu comportamento histerético e não linear, muitos controladores já foram confeccionados para tal propósito.

A transformação de fase de uma SMA se dá pela tensão aplicada sobre ela e a sua temperatura. Por essa liga metálica ser condutora, pode-se favorecer do efeito Joule, ou seja, durante o aquecimento do material de SMA, que conseqüentemente influencia em sua transformação. A maioria dos controles desenvolvidos se utiliza desse artifício para fazer um controle de posição para uma LMF.

Um controle muito instrutivo para demonstrar o comportamento do material de SMA levando em conta seu deslocamento de acordo com a corrente aplicada no tempo foi desenvolvido por Silva (2007). Ele desenvolveu um controlador proporcional para observar o deslocamento da SMA de acordo com a resposta ao impulso, entrada de ondas triangulares e senoidais com diferentes ganhos e frequências. O controlador proporcional será melhor abordado ainda nesta seção, junto com as propriedades do

controlador PID, porém para breve entendimento pode ser considerado como um ganho que adicionado ao sistema.

A resposta ao impulso é uma das metodologias responsáveis por verificar a resposta de um sistema (resposta da planta) a uma força intensa em um período muito curto. O físico Paul Dirac sugeriu que tal força poderia ser representada pelo conceito matemático de um impulso unitário $\delta(t)$, com as propriedades expostas nas Equações 3.1 e 3.2 (FRANKLIN, 2013).

$$\delta(t) = 0 \quad t \neq 0, \quad (3.1)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (3.2)$$

Considerando, por exemplo, a entrada de um sistema sendo $R(s)$, a resposta ao impulso seria definida por $R(s) = 1$. Franklin (2013), mostra ainda em seu trabalho a Figura 17, a qual podemos ter um comparativo entre a entrada do sistema com um impulso e o comportamento que temos em sua saída.

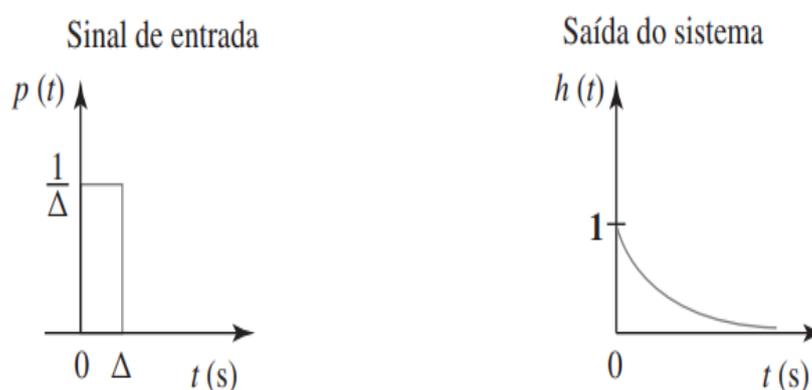


Figura 17 - Comparativo da entrada de um sistema com impulso e a resposta dele.

Fonte: Franklin, 2013.

O diagrama do sistema está representado na Figura 18. Com ele obtemos a função do controlador, na Equação 3.3. Onde K_p é o ganho proporcional.

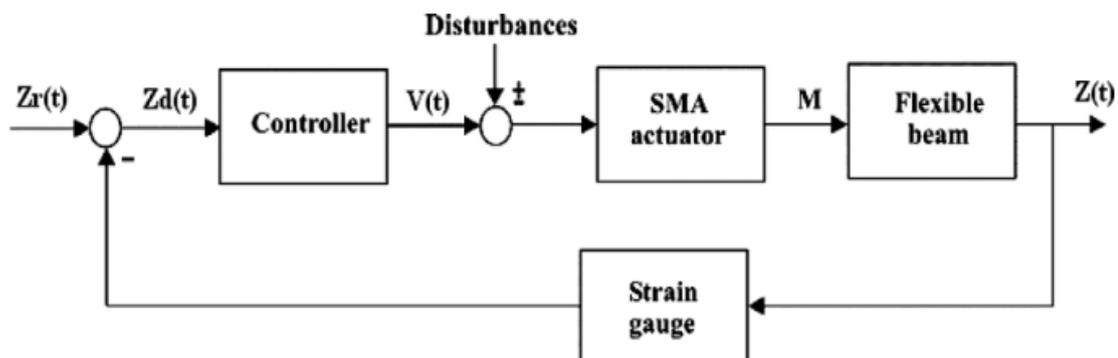


Figura 18 - Diagrama de blocos do sistema.

Fonte: Silva, 2007.

$$V(t) = K_p[Z_r(t) - Z(t)] \quad (3.3)$$

Silva (2007) concluiu que para a resposta ao impulso com um significativo aumento no ganho tem-se uma melhora substancial relacionada a performance do sistema, o erro do controle é praticamente eliminado, porém resulta em um *overshoot* de 6% para $K_p = 5$ e um *overshoot* de aproximadamente 10% para $K_p = 20$, como mostra a Figura 19 e 20 respectivamente. O *overshoot* é definido por quanto o valor da saída do sistema superou a referência desejada.

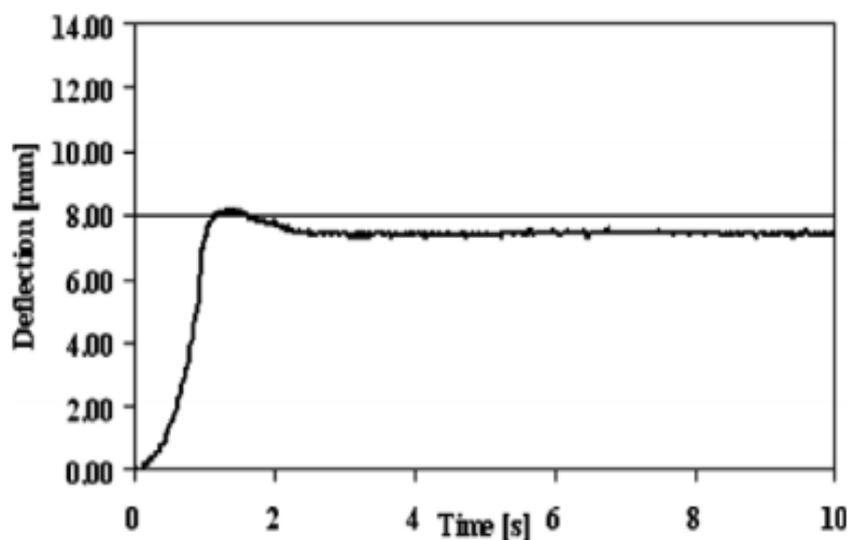


Figura 19 - Deslocamento para a resposta ao impulso com ganho (K_p) igual a 5.

Fonte: Silva, 2007.

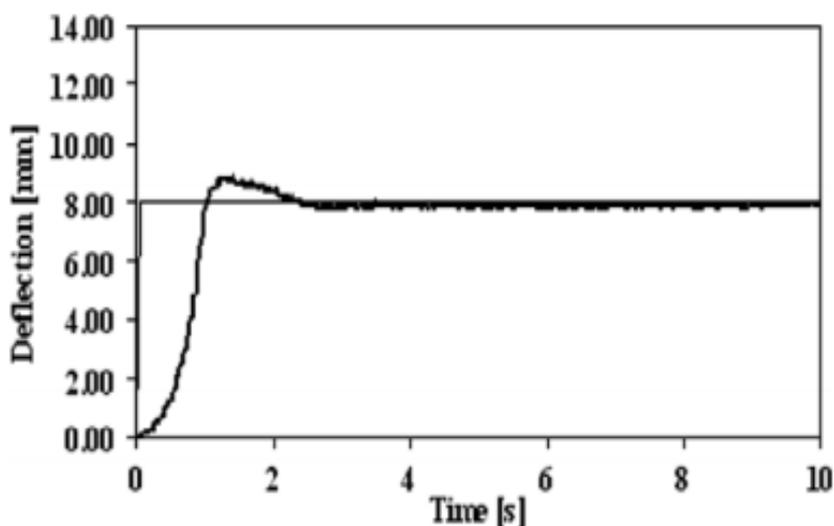


Figura 20 - Deslocamento para a resposta ao impulso com ganho (K_p) igual a 20.

Fonte: Silva, 2007.

Considerando a refrigeração do sistema pela temperatura ambiente, Silva (2007), mostra que para a entrada de ondas triangulares e senoidais, que representam ciclos da ativação do material de SMA, quanto maior a frequência, maior se torna o erro na descida da curva, correspondente ao retorno do material a sua posição inicial. As Figuras 21 e 22, mostram os ciclos de ativação com ondas triangulares em

diferentes frequências e as Figuras 23 e 24 também mostram os ciclos de ativação em diferentes frequências porém com ondas senoidais.

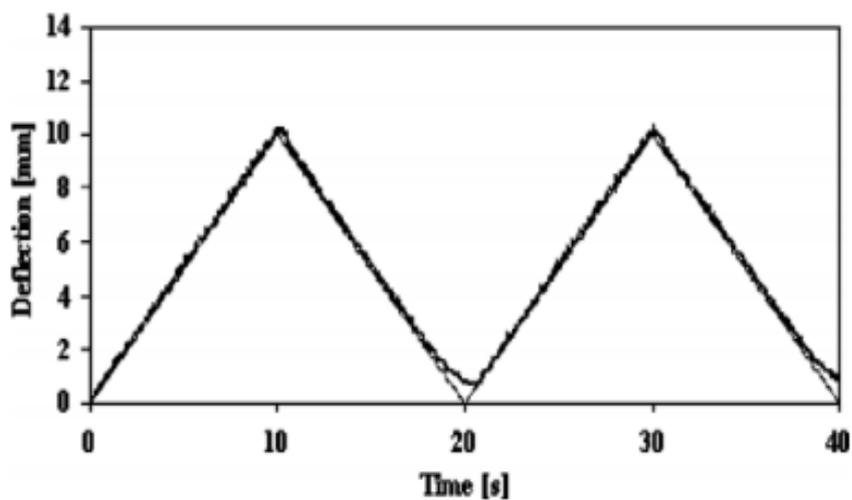


Figura 21 - Deslocamento para ondas triangulares com a frequência de 0.05 Hz.

Fonte: Silva, 2007.

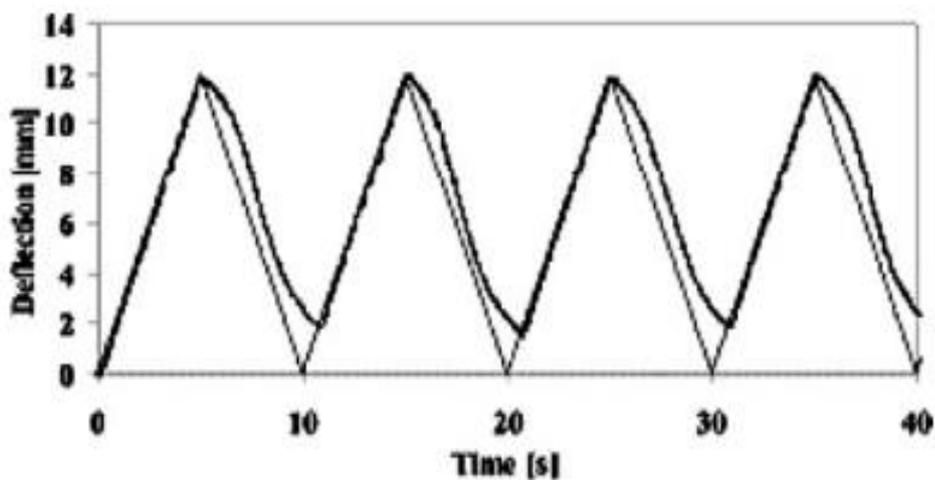


Figura 22 - Deslocamento para ondas triangulares com a frequência de 0.1 Hz.

Fonte: Silva, 2007.

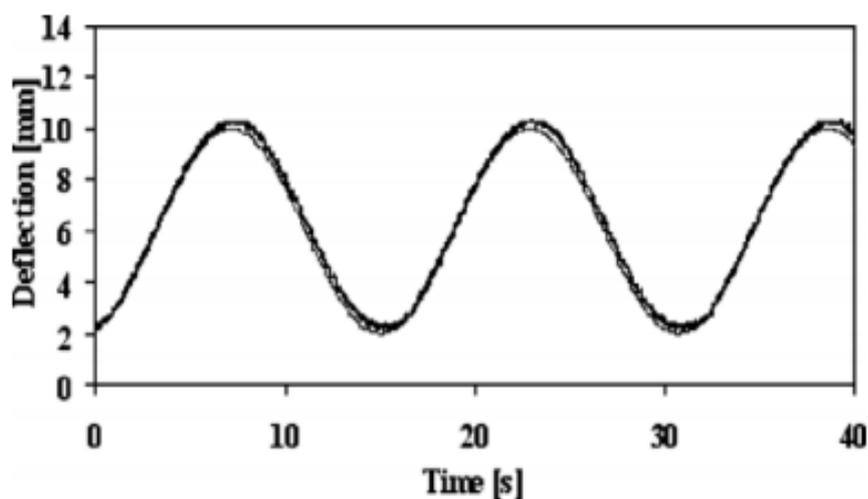


Figura 23 - Deslocamento para as ondas senoidais com a frequência de 0.064 Hz.

Fonte: Silva, 2007.

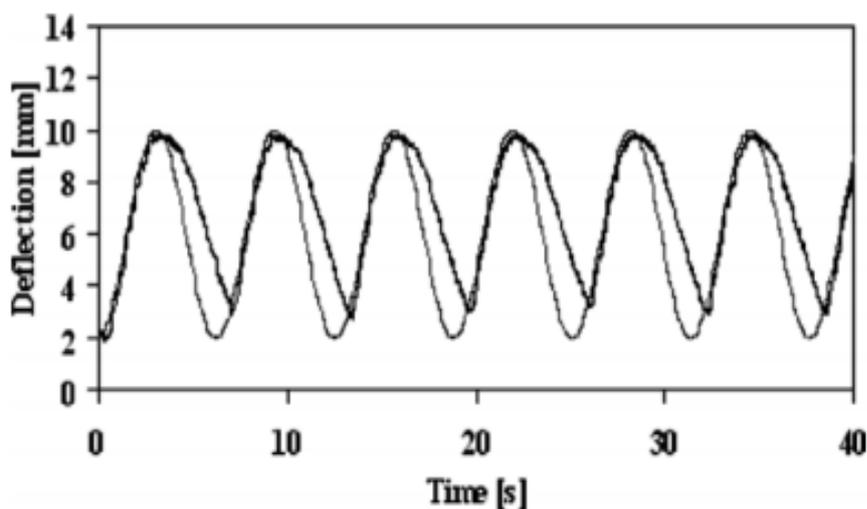


Figura 24 - Deslocamento para as ondas senoidais com a frequência de 0.16 Hz.

Fonte: Silva, 2007.

O desenvolvimento de um controlador PID (Proporcional, Integrativo, Derivativo) para controlar a temperatura e força de uma mola SMA, como o apresentado por Roshan et al., (2018), se mostrou imensamente promissor, demonstrando mais uma vez, a possibilidade de controlar um material de Liga de Memória de Forma com uma precisão significativa.

Um controlador PID possui a função de transferência demonstrada pela Equação 3.4, onde k_p é o termo proporcional, k_i é o termo integral e k_d é o termo derivativo.

$$D(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \quad (3.4)$$

Para explicar o controle PID, devemos separá-lo, primeiro explicando o controlador proporcional (P), depois o controlador proporcional integrativo (PI) e por último a função essencial que o termo derivativo realiza no controlador.

O controlador proporcional gera um sinal linearmente proporcional ao erro do sistema, gerando assim uma realimentação proporcional. Podemos expressá-lo então da seguinte forma demonstrada na Equação 3.5. Onde $U(s)$ é a saída do controlador e $E(s)$ é o erro, expresso entre a diferença da referência com a saída do sistema.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = k_p \quad (3.5)$$

Na união entre o controle proporcional e o controle integral temos o controle proporcional integral (PI), expresso na Equação 3.6 e a sua função de transferência expressa na Equação 3.7. A introdução do termo integral pode rejeitar totalmente perturbações constantes, fazendo com que erros estacionários sejam eliminados e que o sistema convirja para a sua referência e conseqüentemente convergindo para o erro igual a zero.

$$u(t) = k_p e + k_i \int_{t_0}^t e(\tau) d\tau \quad (3.6)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (3.7)$$

O termo derivativo é responsável por suavizar a resposta, atenuando assim a sua amplitude o que conseqüentemente pode aumentar o tempo de resposta.

Roshan et al., (2018) utilizam uma célula de carga para medir a força exercida pela mola e um termopar para medir a sua temperatura. Um ponto interessante em

seu trabalho é que a mola de Nitinol, confeccionada por ele, é submersa em um líquido que é aquecido por uma resistência externa, fazendo assim com que a mola alcance as suas transformações de fase. A Figura 25 traz um diagrama do projeto de Roshan et al., (2018) e a Figura 26 mostra uma simulação do aquecimento da mola por essa resistência externa.

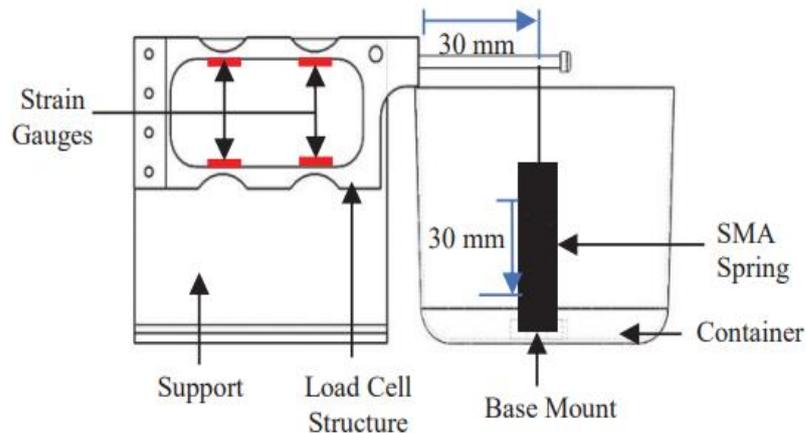


Figura 25 - Diagrama do projeto.

Fonte: Roshan, 2018.

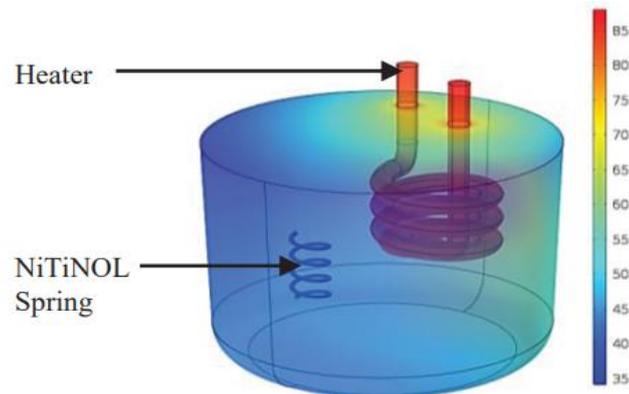


Figura 26 - Simulação do aquecimento da mola SMA.

Fonte: Roshan, 2018.

O resultado de uma ausência de um controle pode ser acompanhado na Figura 27, o qual o sistema apresenta uma resposta livre. Roshan et al., (2018) mostra a diferença entre essa inexistência de um controlador e o sistema com um controlador de temperatura e de tensão, mostrados na Figura 28 e 29. Percebe-se um controle com relação ao ciclo de cada referência ao longo do tempo em detrimento a Figura 27, que só apresenta um único ciclo sem nenhuma referência.

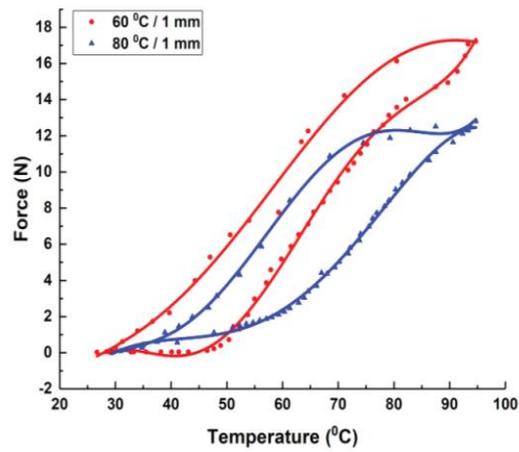


Figura 27 - Resultado da transformação de fase com a ausência de um controle.

Fonte: Roshan, 2018.

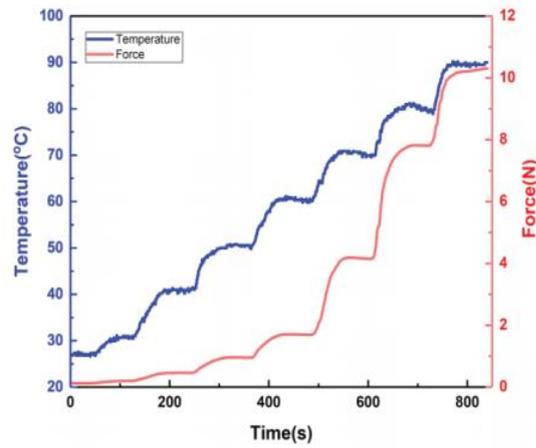


Figura 28 - Resultado da transformação de fase com um controle PID de temperatura.

Fonte: Roshan, 2018.

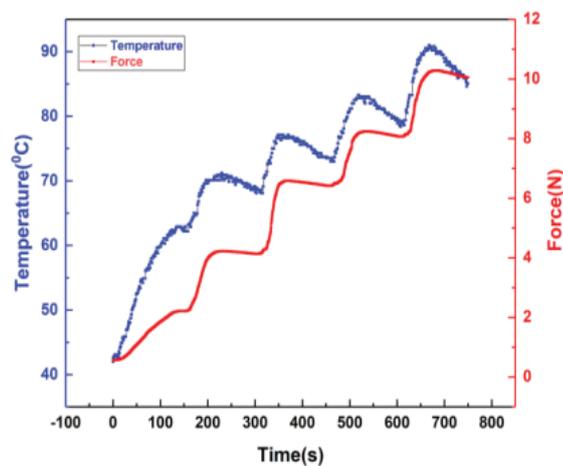


Figura 29 - Resultado da transformação de fase com um controle PID de força.

Fonte: Roshan, 2018.

4 O PROJETO DO ATUADOR DE UMA MÃO ROBÓTICA DE MATERIAIS DE MEMÓRIA DE FORMA

Este projeto visa desenvolver o controle de uma mola de SMA que será utilizada como um atuador em uma prótese robótica, aproveitando o comportamento do Efeito de memória de forma Extrinsic Two-Way apresentado na seção 3.2.2.

Para a realização do projeto foram utilizadas uma mola de aço e uma mola de SMA ilustradas na Figura 30. O papel da mola de aço consiste em retornar a mola de SMA para sua posição inicial, tornando possível utilizar o SME através da transformação de fase.



(a)

(b)

Figura 30 - Molas utilizadas no projeto. (a) Mola de Aço. (b) Mola de SMA.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2021.

4.1 MICROCONTROLADOR E SENSOR

Com a realização de estudos para mensurar o deslocamento promovido durante a atuação das molas SMA foi utilizado um microcontrolador Arduino Mega representado na Figura 31, juntamente com o Encoder KY-040.

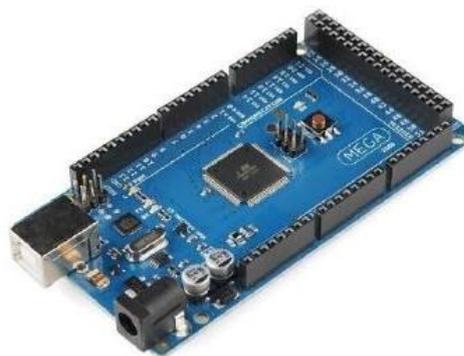


Figura 31 - Arduino Mega 2560 R3.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2021.

O Arduino Mega 2560 R3, ilustrado na Figura 31, é uma placa de desenvolvimento eletrônico comercial, baseada no microcontrolador ATmega2560 (Microchip Technology Inc.). Trata-se de um microcontrolador de 8 bits que funciona em uma velocidade de processamento de até 16MHz. Esta placa foi escolhida por possuir uma grande praticidade em seu manuseio, vasta documentação na literatura, uma boa compatibilidade com diversos sensores disponíveis comercialmente. Além disso, são disponibilizadas várias ferramentas de *softwares* para diferentes sistemas operacionais, que o tornam uma ferramenta de desenvolvimento eletrônico bastante versátil. A codificação dos programas (*firmwares*) é baseada em linguagem C.

No protótipo deste projeto, utiliza-se também o *encoder* modelo KY-040, representado na Figura 32. Trata-se de um componente eletrônico desenvolvido com a finalidade de converter movimentos rotativos ou lineares, dependendo de sua aplicação, em pulsos elétricos de onda quadrada.

Através de um sistema de polias, o utilizamos para medir os deslocamentos da mola SMA. Como esse modelo produz em sua saída 30 pulsos digitais ('1' e '0') por volta, isso nos dá uma resolução de 12^o graus por pulso. Esta medição angular é então transformada em medição linear, realizando-se o cálculo pela geometria do protótipo que é conhecida. Além disso, o KY-040 funciona tanto no sentido horário como no sentido anti-horário, se tornando perfeito para aplicação no atual projeto.



Figura 32 - Imagem do Encoder KY-040.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2021.

4.2 MONTAGEM DO SENSOR DE DESLOCAMENTO LINEAR

Para amplificar e condicionar as medidas de deslocamento angular do *encoder*, utiliza-se um conjunto de polias, conforme ilustrado na Fig 33 e 34. E para isso, foi necessário ter uma relação de transmissão de 3/1 entre as polias.

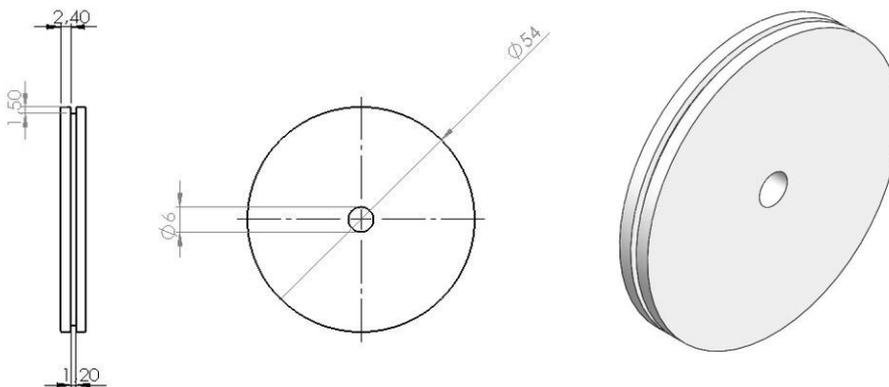


Figura 33 - Polia de Nylon maior.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2021.

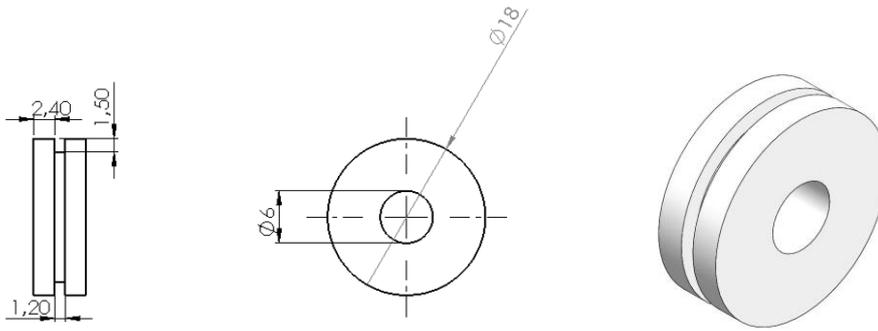


Figura 34 - Polia de Nylon menor.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2021.

Juntamente com o Encoder KY-040, o sistema de polias refina e aumenta a nossa resolução para a leitura do deslocamento da mola de SMA.

Considerando que o diâmetro da polia 1 de 18 mm onde encontra-se o encoder e a relação de transmissão sendo de 3/1, isto é, com a polia maior de diâmetro de 54 mm. Foi calculado experimentalmente e teoricamente o valor do comprimento de cada passo que o encoder faz, sendo 360° uma volta completa dele, dividindo por 30 passos (total desse modelo) equivale 12° por passo. Logo, para descobrir a resolução do nosso sensor, sendo esse o comprimento deslocado da mola por cada passo do encoder, temos:

$$d_1 = \text{diâmetro da polia maior}$$

$$L = \frac{d_1}{2} \times \theta, \text{ sendo } L \text{ o deslocamento e } \theta \text{ o angulô em radianos,}$$

$$\theta_{\text{encoder}} = \left(\frac{2 \times \pi}{30}\right) \times p, \text{ sendo } p \text{ a quantidade de passos,}$$

Como temos uma relação de 3/1 entre as polias, a resolução do sistema fica:

$$\theta_{\text{encoder}} = 3 \times \theta_{\text{polia maior}}$$

$$\theta_{\text{polia maior}} = \frac{\theta_{\text{encoder}}}{3}$$

$$L = \frac{d_1}{2} \times \theta_{\text{polia maior}}$$

$$L = \frac{d_1}{2} \times \frac{\theta_{encoder}}{3}$$

$$L = \frac{d_1}{2} \times \frac{\left(\left(\frac{2 \times \pi}{30}\right) \times p\right)}{3}, \text{ sendo } p = 1$$

$$L = \frac{\pi}{5}, \text{ considerando } \pi = 3,1415$$

$$L = \frac{3,1416}{5}$$

$$L = 0,6283 \text{ mm}$$

Portanto, o comprimento de cada passo é de 0,6283 milímetros.

4.3 MONTAGEM DO EXPERIMENTO

Conforme representado nas Figuras 35, 36 e 37, o experimento foi montado em uma tábua de madeira com as polias usinadas em nylon, as molas de aço convencional e a mola de SMA acoplada entre as terminações dos cabos de uma fonte, um fio de pesca de Kevlar vermelho, um pedaço de elástico amarelo e o sensor *encoder* para auxiliar na medição do deslocamento.



Figura 35 - Montagem inicial da bancada do experimento.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2021.

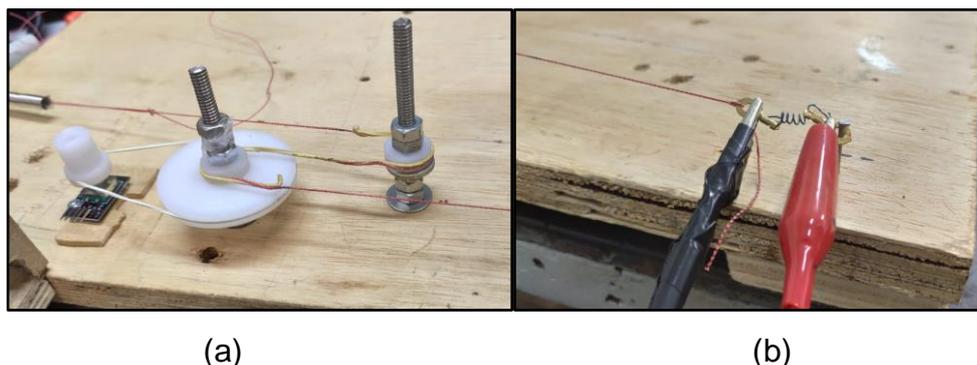


Figura 36 - Montagem inicial da bancada com foco nas polias (a) e na mola de SMA (b).

Fonte: Elaborado pelos autores, 2021.

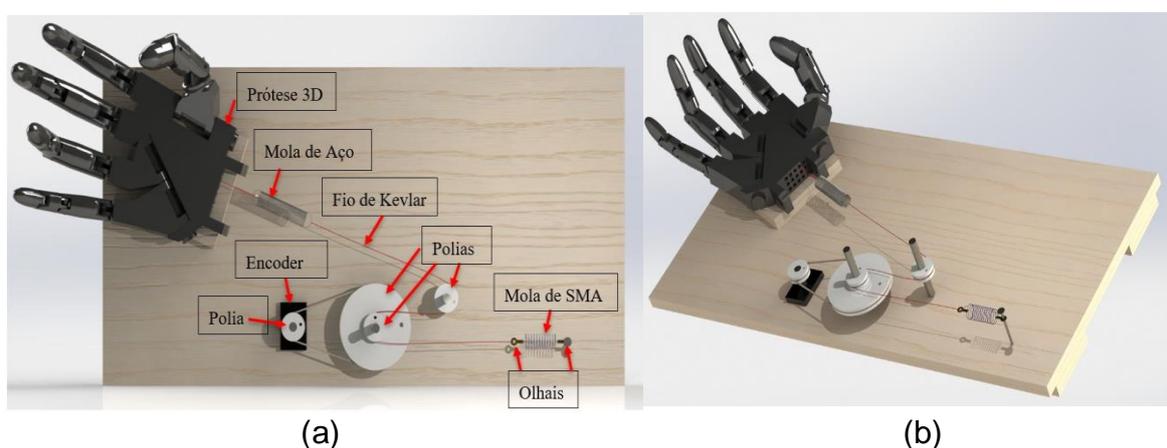


Figura 37 - Montagem final da bancada feita em Solidworks com vista superior (a) e perspectiva isométrica (b).

Fonte: Elaborado pelos autores, 2021.

O nylon foi escolhido para a montagem como material das polias, uma vez que facilita a usinagem, possui baixa condutividade térmica, não acumula energia estática e apresenta baixo ruído (amortece vibrações e pesos).

Apesar do fio de kevlar ser bem resistente a esforços repetitivos, ele acabou deslizando rapidamente e não efetuou a movimentação das polias, sendo assim como solução desse problema foi utilizado um cabo elétrico com revestimento de plástico que gerava atrito com as polias e fez se movimentar. Foi escolhido um cabo elétrico devido a sua propriedade ser inextensível para a quantidade de tração realizada pelo nosso sistema, devido ao cabo de cobre interno.

Já a mola de aço convencionais é acoplada na mão (feita em 3D diante do processo de manufatura aditiva) para aplicar uma força na atuação das molas de SMA.

Para processar os dados advindos do sensor encoder foi utilizado um Arduino, onde através da sua IDE consegue-se visualizar os dados e armazenar. Com isso, será obtido o deslocamento realizado pela mola de SMA.

5 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os procedimentos experimentais foram realizados nas seguintes etapas: corte da mola de SMA na máquina MINITOM do Laboratório de Materiais (LAMAT) do CEFET-RJ Maracanã e testes experimentais para caracterização termomecânica do SMA, bem como rigidez elástica da mola de SMA e da mola de aço convencional.

A Figura 38 ilustra um aparelho *cut-off* minitom da Struers, isto é, uma cortadora metalográfica de precisão com disco diamantado com velocidade de até 400 rpm e resfriamento que pode ser em água ou álcool durante o corte.



Figura 38 - Imagem da ISOMET do LAMAT.

Fonte: LAMAT CEFET/RJ MARACANÃ, 2021.

Foi realizado o corte de uma amostra da mola de SMA a 250 rpm e posteriormente, sua prensagem no interior do cadinho foi feita no Laboratório de Compósitos e Adesivos (LADES), conforme a Figura 39. A massa da amostra mensurada é equivalente a 14,62 mg, a massa do cadinho da amostra corresponde a 39,52 mg e a massa do cadinho de referência apresentou 39,7 mg.



Figura 39 - Imagem da prensa de cadinho com a amostra de SMA.

Fonte: LADES - CEFET/RJ MARACANÃ, 2021.

Em seguida, para obter as temperaturas de transformação de fase da mola de SMA, a amostra prensada no cadinho foi inserida no equipamento conhecido por DSC (Differential Scanner Calorimeter - Calorímetro Diferencial de Varredura) modelo 200 F3 Maia fabricado pela NETZSCH, como demonstrado na Figura 40 abaixo. Essa máquina pertence ao MECANON - Laboratório de Dinâmica Não-Linear da COPPE-Ufrj.



Figura 40 - Imagem da DSC do MECANON.

Fonte: MECANON - Laboratório de Dinâmica Não-Linear da COPPE-Ufrj, 2021.

Durante o teste de DSC, foram utilizados os seguintes itens: um cilindro contendo nitrogênio líquido, outro contendo nitrogênio gasoso de alta pureza (99,99%) e um computador para aquisição de dados, usando o software do equipamento *Proteus® Analysis*.

Outro teste realizado para caracterização termomecânica do SMA foi o ensaio de tração. Através dele foi possível avaliar a curva de força x deslocamento da mola de SMA e da mola de aço convencional, além de suas respectivas rigidezes elásticas. A Figura 41 ilustra a máquina utilizada para esse teste modelo INSTRON do Laboratório LADES do CEFET-RJ unidade Maracanã.



Figura 41 - Máquina de ensaio de tração.

Fonte: LADES - Laboratório de Compósitos e Adesivos do CEFET/RJ, 2021.

5.1 RESULTADOS DO TESTE DE DSC

Os resultados obtidos no teste de DSC foram as temperaturas de transformação de fases conforme listadas na Tabela 1, em que A_s representa a temperatura de início (*start*) da formação da austenita, A_f refere-se a temperatura final para a formação da austenita, M_s é a temperatura onde tem início a formação da martensita e por fim, M_f é a temperatura para o fim da transformação da martensita. Além disso, vale ressaltar que o teste apresentou a existência de uma fase intermediária, fase R, contendo R_s que representa a temperatura de início dessa fase e R_f como temperatura final de transformação dessa fase, durante a transição de transformação austenita para martensita.

Tabela 1 - Temperaturas de transformação obtidas para a mola de SMA.

Amostra	
A_s (°C)	58,13
A_f (°C)	77,48
R_s (°C)	66,34
R_f (°C)	50,14
M_s (°C)	14,91
M_f (°C)	-22,02

Fonte: Elaborado pelos autores, 2021.

Dessa forma, constata-se que o material da mola para temperaturas superiores a 77,48 °C (A_f), sem a presença de carga é totalmente austenítico. Por outro lado, para as temperaturas inferiores a -22,02 °C, é totalmente martensítico.

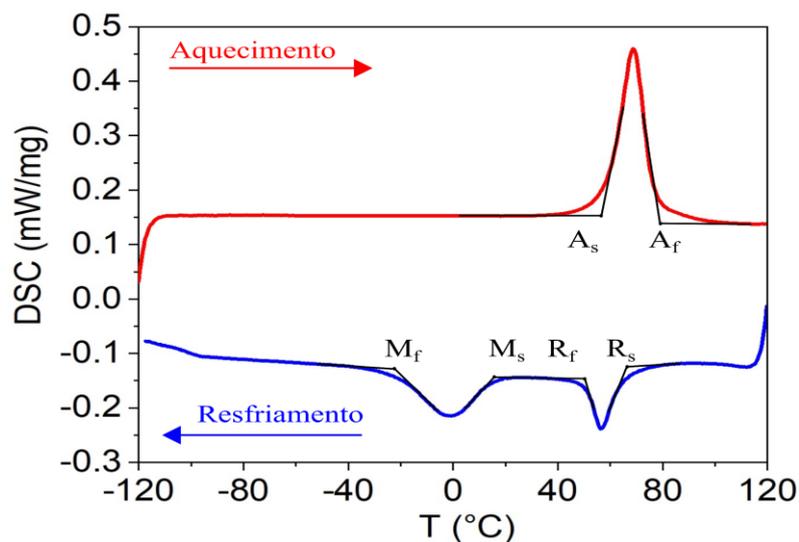


Figura 42 - Resultado do teste experimental de DSC para a amostra de SMA.

Fonte: MECANON - Laboratório de Dinâmica Não-Linear da COPPE-Ufrj, 2021.

A Figura 42 demonstra o ciclo de aquecimento e resfriamento da amostra e teve seus parâmetros iniciando a uma temperatura de $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ e indo até $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ a uma taxa de $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, em seguida, mantendo-se em $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 4 minutos e resfriando até $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ novamente na mesma taxa.

5.2 RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO

No ensaio de tração na mola de SMA foram considerados parâmetros pré-definidos de deslocamento variando de 0 a 25 mm, com o uso de uma célula de carga de 1kN e a velocidade de 2,5 mm/min. Pode ser observado na Figura 43 o posicionamento da mola de SMA entre as garras da máquina.



Figura 43 - Ensaio de tração para a mola de SMA.

Fonte: LADES - Laboratório de Compósitos e Adesivos do CEFET/RJ, 2021.

Além disso, o mesmo ensaio foi feito para a mola de aço convencional do projeto com o objetivo de obter a rigidez elástica para *input* no controle posterior. O parâmetro para este teste considerou também a mesma velocidade anterior. Na Figura 44, é posicionada a mola de aço na máquina.

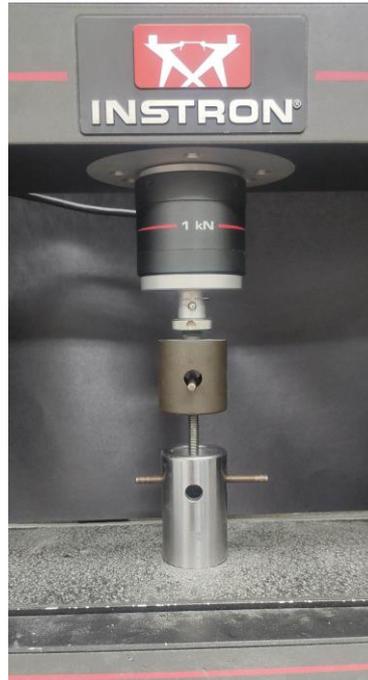


Figura 44 - Ensaio de tração para a mola de aço convencional.

Fonte: LADES - Laboratório de Compósitos e Adesivos do CEFET/RJ, 2021.

Na Figura 45 está o resultado gráfico do teste de tração em relação a mola de SMA realizado em baixa temperatura.

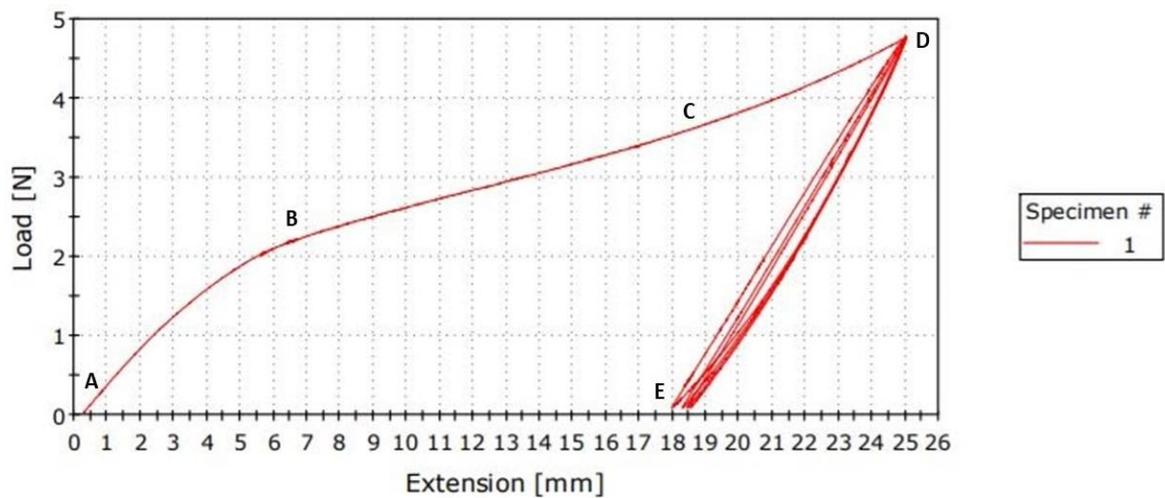


Figura 45 - Curva de força (N) em relação ao deslocamento (mm) da mola de SMA.

Fonte: LADES - Laboratório de Compósitos e Adesivos do CEFET/RJ, 2021.

O ponto **A** representa o início da aplicação de um carregamento mecânico a uma temperatura em que apenas a fase martensítica está presente. Esse carregamento se estende até o ponto **D**. A partir do ponto **B** até o ponto **D** ocorre a reorientação da martensita maclada para a martensita demaclada. Entre o ponto **D** e o ponto **E** ocorre o descarregamento mecânico tendo uma deformação residual retida.

Como a mola está na temperatura ambiente no teste de tração e já que não ocorre a aplicação de um carregamento térmico, a fase austenítica não estará presente no teste, portanto os ciclos entre os pontos **D** e **E** se repetem ao final. Logo, conclui-se que a mola é do tipo martensítica à temperatura ambiente.

As molas helicoidais, quando carregadas axialmente, apresentam na sua seção transversal uma combinação de esforços de Torção (T) e Cortante (V), resultando em um estado de tensão caracterizado por tensões de cisalhamento no fio da mola, conforme ilustrado na Figura 46. (SHIGLEY e MISCHKE, 2001, AGUIAR, 2011).

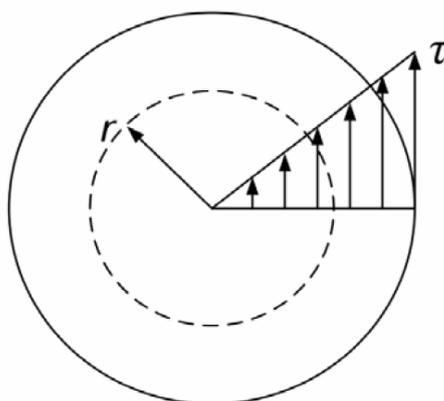


Figura 46 - Distribuição da tensão de cisalhamento em toda seção transversal do fio de uma mola linear.

Fonte: (SHIGLEY & MISCHKE, 2001) & AGUIAR (2011).

A Figura 47 ilustra o resultado do teste de tração em relação a mola de aço convencional. Este teste apenas reafirma o comportamento esperado de uma mola de aço que opera em regime linear elástico diante de uma distribuição linear das tensões de cisalhamento ao decorrer de toda a sua seção transversal.

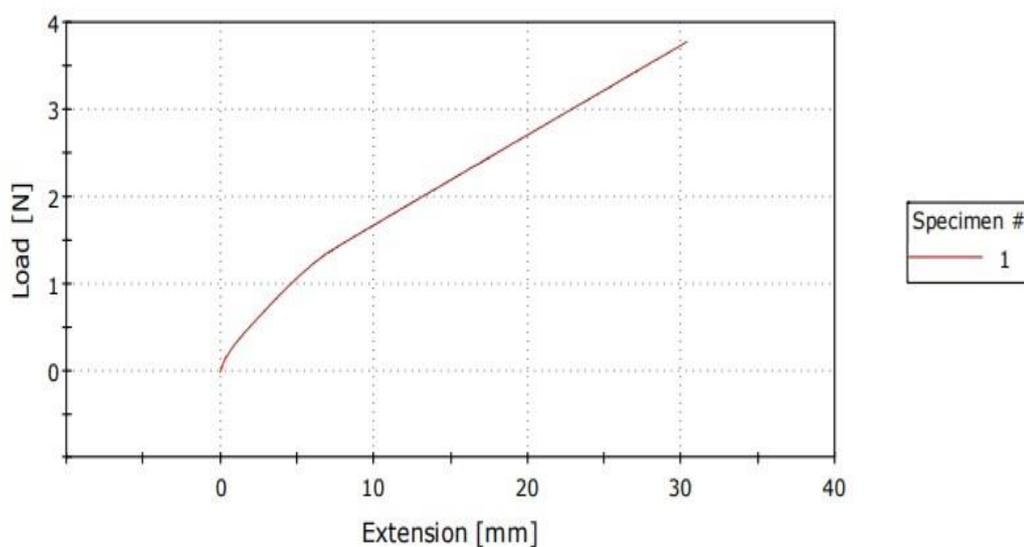


Figura 47 - Curva de força (N) em relação ao deslocamento (mm) da mola de aço convencional.

Fonte: LADES - Laboratório de Compósitos e Adesivos do CEFET/RJ, 2021.

De acordo com os resultados das curvas de ambos os testes, foi possível encontrar rigidez elástica de ambas, isto é, o K da mola de SMA equivalente a 16 N/m e o K da mola de aço convencional de 9 N/m.

6 CONTROLE E MODELAGEM

Para desenvolver o controle para a mola de SMA primeiro foi feito um ensaio para ver a sua resposta ao degrau. Nesse ensaio foi aplicada uma corrente de 2,5 Amperes e 10 Volts. Foram repetidos 3 ciclos de 20 segundos com a mola desativada e 20 segundos com a mola ativada. O resultado obtido pode ser verificado na Figura 48.

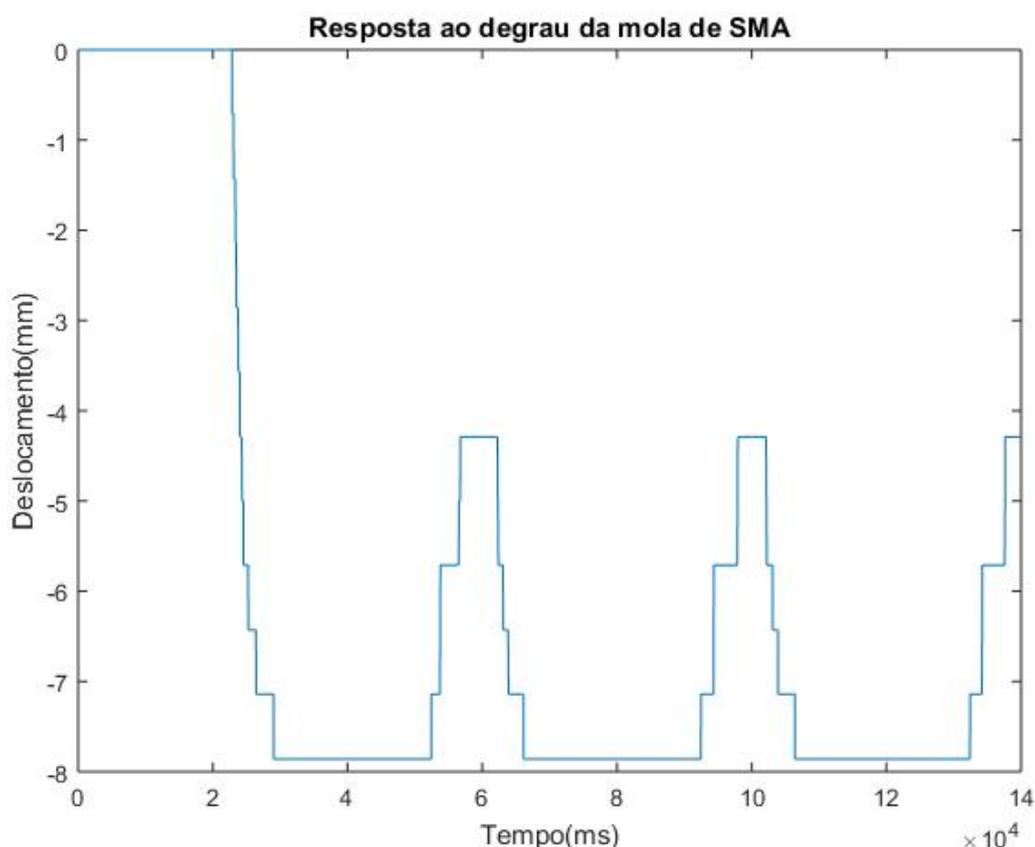


Figura 48 - Curva de deslocamento (mm) em relação ao tempo (ms) da mola de sma.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Pode-se observar um deslocamento rápido durante a ativação da mola e uma maior demora durante a sua recuperação. Esse fato se dá pela sua restauração ser feita em temperatura ambiente. Percebe-se máximo de 7,86 mm e o menor deslocamento atingido entre a recuperação da mola e a sua próxima ativação de 4,29 mm.

Para esta resposta ao degrau foi utilizado uma resolução de 0.71428 milímetros para cada passo do encoder. Esta resolução foi obtida de forma experimental. Além

deste valor ser extremamente próximo ao valor teórico do passo do encoder já calculado também quando simulado não apresenta divergência no comportamento da planta, por ser um fator multiplicado por cada passo que o encoder detecta. A planta é um termo utilizado na literatura de Sistemas de Controle para definir um sistema dinâmico qualquer.

6.1 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

Utilizando a análise de resposta transitória da resposta ao degrau (Ogata, 2010), pode-se notar o tempo de acomodação (t_s), mostrado na Figura 49. Este, que é a maior constante de tempo do sistema de controle, é o tempo necessário para que a curva de resposta alcance a faixa, entre aproximadamente 2% a 5%, do valor final.

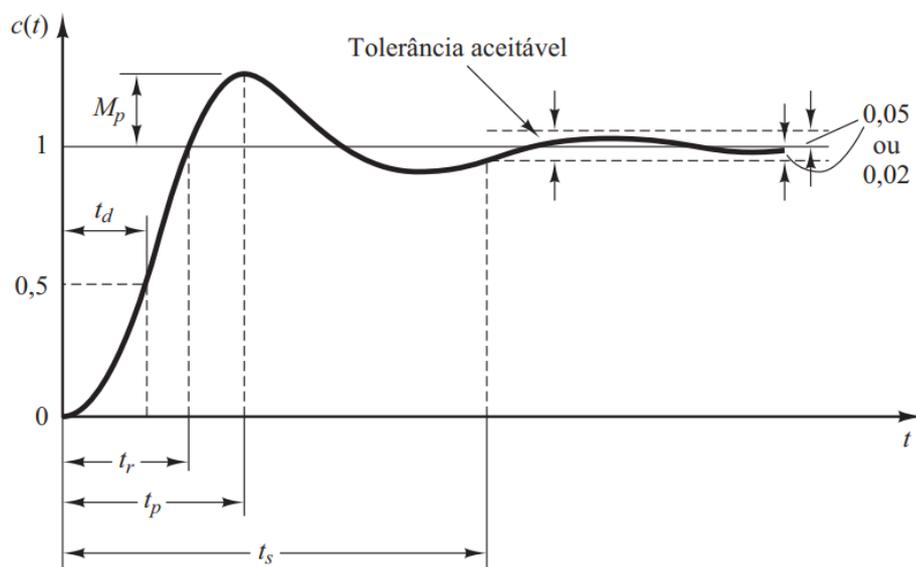


Figura 49 - Análise de resposta transitória da resposta ao degrau.

Fonte: Ogata, 2010.

Analisando o gráfico da resposta ao degrau da mola SMA, nota-se que o momento de subida ocorre em 22,86 segundos e atinge a região de tolerância aceitável, de 2%

a 5% do valor máximo, em 29,04 segundos. Sendo a diferença desses valores o tempo de acomodação temos este representado na Equação 6.1.

$$ts = 29,04 - 22,86$$

$$ts = 6,18 \approx 6,2 \text{ segundos} \quad (6.1)$$

Com o tempo de acomodação descoberto utiliza-se a correlação numérica existente entre este e o polo, para descobri-lo, como mostra a Equação 6.2.

$$ts = \frac{6}{\sigma} = \frac{6}{\zeta\omega_n}$$

$$ts = \frac{6}{\text{polo}}$$

$$6,2 = \frac{6}{\text{polo}}$$

$$\text{polo} = \frac{6}{6,2}$$

$$\text{polo} = 0,967 \quad (6.2)$$

Sendo $G(s)$ a relação entre saída e entrada do sistema de malha fechada. Para chegar à função de transferência do sistema foi considerada a Equação 6.3.

$$G(s) = \frac{K}{(s+\text{polo})(s+\text{polo})} = \frac{K}{s^2 + 2*\text{polo}*s + \text{polo}^2} \quad (6.3)$$

Pode-se descobrir o valor de K através da correlação matemática existente entre este, o polo e a relação de ganho apresentada na Equação 6.4. A relação de ganho é dada pela relação entre a entrada e a saída do sistema. Sendo assim, entram 2,5 Amperes e saem 7,86 milímetros de deslocamento.

$$\frac{K}{\text{polo}^2} = \text{Ganho DC} = \frac{7,86}{2,5} \quad (6.4)$$

$$K = 2,944$$

Temos assim a função de transferência representada na Equação 6.5.

$$G(s) = \frac{2,944}{s^2 + 1,935*s + 0.9365} \quad (6.5)$$

Foi feito um estudo para verificar se a função de transferência teórica encontrada da planta estava tendo um comportamento semelhante ao comportamento da planta real. A Figura 50 confirma que existe uma proximidade no comportamento das duas plantas.

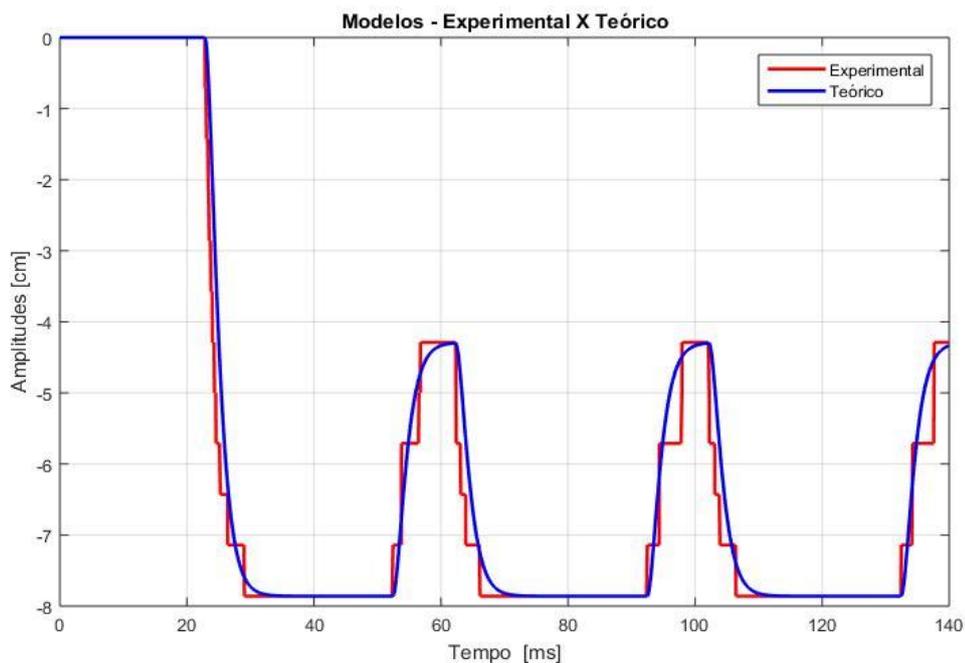


Figura 50 - Análise do comportamento da planta real e da planta teórica.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

6.2 CONTROLADOR

O controlador escolhido para realizar o controle da posição de deslocamento da mola SMA foi o PDI. Suas propriedades foram explicadas na Seção 3.3. Para chegar ao controlador, primeiro foi qual o comportamento que era desejado como resposta para correção do erro de deslocamento da mola. O comportamento escolhido foi o do polinômio da Equação 6.6. Denomina-se esse polinômio como polinômio desejado. Este é um polinômio de quarta ordem com raízes com parte real negativa. Esta escolha é feita pelos projetistas para que o sistema seja estável em malha fechada.

$$(s + polo)^4 = s^4 + a_3 * s^3 + a_2 * s^2 + a_1 * s + a_0 \quad (6.6)$$

A Figura 51 mostra o diagrama de malha fechada com o nosso controlador embutido.

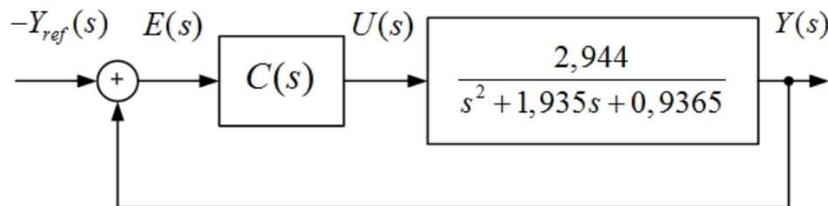


Figura 51 - Diagrama de malha fechada com o controlador.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Sendo $C(s)$ a função de um controlador PID clássico (Ogata, 2010). Temos a Equação 6.7 e a Equação 6.8, mostrando a sua função e transferência.

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d \left(\frac{Ns}{s+N} \right) \quad (6.7)$$

$$C(s) = \frac{(k_p + k_d N)s^2 + (k_p N + k_i)s + k_i N}{s(s+N)} \quad (6.8)$$

Sendo a_0, a_1 e a_2 e representados pela Equação 6.9, 6.10 e 6.11, respectivamente.

$$a_0 = k_i N \quad (6.9)$$

$$a_1 = k_p N + k_i \quad (6.10)$$

$$a_2 = k_p + k_d N \quad (6.11)$$

Simplificando $C(s)$, chegamos à Equação 6.12.

$$C(s) = \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{s(s+N)} \quad (6.12)$$

Sendo assim chegamos à função de transferência de malha fechada do sistema com o controlador representada, na Equação 6.13 e 6.14.

$$\frac{Y(s)}{Y_{ref}(s)} = \frac{\frac{2,944(a_2 s^2 + a_1 s + a_0)}{s(s+N)(s^2 + 1,935s + 0,9365)}}{1 + \frac{2,944(a_2 s^2 + a_1 s + a_0)}{s(s+N)(s^2 + 1,935s + 0,9365)}} \quad (6.13)$$

$$\frac{Y(s)}{Y_{ref}(s)} = \frac{2,944(a_2 s^2 + a_1 s + a_0)}{s(s+N)(s^2 + 1,935s + 0,9365) + 2,944(a_2 s^2 + a_1 s + a_0)} \quad (6.14)$$

Ficando o denominador da função de transferência apresentada na Equação 6.15. Agrupamos os termos no denominador encontrando a Equação 6.16 e o seu polinômio análogo será a Equação 6.17.

$$s^4 + (1,935 + N)s^3 + (0,9365 + 1,935N + 2,944a_2)s^2 + (0,9365N + 2,944a_1)s + 2,944a_0 \quad (6.15)$$

$$s^4 + \alpha_3 s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0 \quad (6.16)$$

$$(s + p^*)^4 = s^4 + (4p^*)s^3 + (6p^{*2})s^2 + (4p^{*3})s + p^{*4} \quad (6.17)$$

Sendo p^* o valor do polo desejado para a malha fechada. Realizando uma comparação entre os polinômios da Equação 6.16 e 6.17, temos:

$$\alpha_3 = 4p^*, \quad \alpha_2 = 6p^{*2}, \quad \alpha_1 = 4p^{*3}, \quad \alpha_0 = p^{*4}$$

Onde obtemos as Equações 6.18, 6.19, 6.20 e 6.21:

$$1,935 + N = 4p^* \quad (6.18)$$

$$0,9365 + 1,935N + 2,944a_2 = 6p^{*2} \quad (6.19)$$

$$0,9365N + 2,944a_1 = 4p^{*3} \quad (6.20)$$

$$2,944a_0 = p^{*4} \quad (6.21)$$

Realizando a substituição dos valores de a_2 , a_1 e a_0 nas Equações acima teremos as Equações 6.22, 6.23, 6.24 e 6.25.

$$1,935 + N = 4p^* \quad (6.22)$$

$$0,9365 + 1,935N + 2,944k_p + 2,944k_dN = 6p^{*2} \quad (6.23)$$

$$0,9365N + 2,944k_p + 2,944k_i = 4p^{*3} \quad (6.24)$$

$$2,944k_iN = p^{*4} \quad (6.25)$$

Observa-se que existe uma correlação de proporcionalidade direta entre N e p^* na Equação 6.22. Desta forma para encontrar os valores de k_p , k_i e k_d prioriza-se primeiro encontrar o valor de N , calculando de forma direta o valor de p^* , como mostra a Equação 6.26.

$$1,935 + N = 4p^* \rightarrow p^* = \frac{1,935+N}{4} \quad (6.26)$$

Desta forma k_p , k_i e k_d ficam de acordo com as Equações 6.27, 6.28, e 6.29.

$$k_i = \frac{p^{*4}}{2,944N} \quad (6.27)$$

$$k_p = \frac{4p^{*3} - 2,944k_i - 0,9365N}{2,944N} \quad (6.28)$$

$$k_d = \frac{6p^{*2} - 0,9365 - 1,935N - 2,944k_p}{2,944N} \quad (6.29)$$

Para a parte derivativa do controlador assumir um comportamento desejado encontramos o módulo dos pólos da planta na Equação 6.33 e definimos N na Equação 6.34. Considerando que os pólos da planta, na Equação 6.30 e 6.31, são 2 pólos complexos conjugados, calculamos o módulo através da Equação 6.32. Sendo Re a parte real do polo e Im a sua parte imaginária.

$$polo 1 = -0,9675 + 0,0211j \quad (6.30)$$

$$polo 2 = -0,9675 - 0,0211j \quad (6.31)$$

$$|polos da planta| = \sqrt{Re^2 + Im^2} \quad (6.32)$$

$$|polos da planta| = 1,3686 \quad (6.33)$$

$$N = 5 * polo da planta \rightarrow N = 5 * 1,3686 \rightarrow N = 6,8429 \quad (6.34)$$

Com N chegamos ao valor de α_3 na Equação 6.35 realizando a correlação entre a Equação 6.22 e 6.34.

$$\alpha_3 = 1,935 + N \rightarrow \alpha_3 = 8,7779 \quad (6.35)$$

A informação de N também nos possibilita voltar a Equação 6.26 descobrir o valor de p^* com mostra a Equação 6.36.

$$p^* = \frac{1,935+N}{4} \rightarrow p^* = 2,1945 \quad (6.36)$$

Através da descoberta de p^* podemos voltar à Equação 6.17 e descobrir os outros termos do polinômio desejado, demonstrado na Equação 6.37.

$$(s + p^*)^4 = s^4 + (4p^*)s^3 + (6p^{*2})s^2 + (4p^{*3})s + p^{*4}$$

$$(s + 2,1945)^4 = (s + 2,1945) * (s + 2,1945) * (s + 2,1945) * (s + 2,1945)$$

$$(s + 2,1945)^4 = s^4 + 8,7779s^3 + 28,8942s^2 + 42,2716s + 23,1909 \quad (6.37)$$

Com isso conseguimos descobrir os valores de α_2 , α_1 e α_3 .

$$\alpha_2 = 28,8942$$

$$\alpha_1 = 42,2716$$

$$\alpha_0 = 23,1909$$

A partir disso conseguimos achar os valores teóricos de k_p , k_i e k_d , mostrados nas Equações 6.38, 6.39 e 6.40.

$$k_i = \frac{p^{*4}}{2,944N} \rightarrow k_i = \frac{\alpha_0}{2,944N} \rightarrow k_i = 1.1512 \quad (6.38)$$

$$k_p = \frac{4p^{*3} - 2,944k_i - 0,9365N}{2,944N} \rightarrow k_p = \frac{\alpha_1 - 2,944k_i - 0,9365N}{2,944N} \rightarrow k_p = 1.6120 \quad (6.39)$$

$$k_d = \frac{6p^{*2} - 0,9365 - 1,935N - 2,944k_p}{2,944N} \rightarrow k_d = \frac{\alpha_2 - 0,9365 - 1,935N - 2,944k_p}{2,944N} \rightarrow k_d = 1.4571 \quad (6.40)$$

6.3 DISCRETIZAÇÃO DO CONTROLADOR

Para executarmos o controlador no nosso sistema temos que transcrevê-lo para a linguagem ao qual as máquinas trabalham. O microcontrolador Arduino assim como diversos outros dispositivos eletrônicos trabalham em tempo discreto. Os sinais definidos somente em um período de tempo discreto são chamados de sinais de tempo discreto (Lathi, 1998). Um típico sinal de tempo discreto pode ser observado na Figura 52.

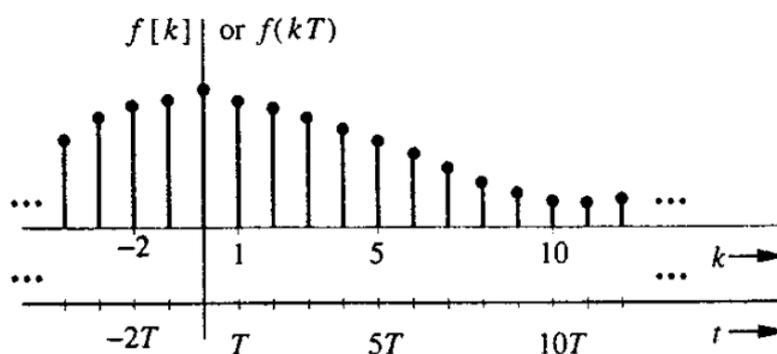


Figura 52 - Sinal de tempo discreto.

Fonte: Lathi, 2022.

Como Arduino é uma máquina que trabalha em tempo discreto, temos que passar nossa equação PID para o tempo discreto. Sendo assim, substituindo os valores encontrados do controlador, na Equação 6.41, temos a Equação 6.42. Iremos considerar para exemplificação do controlador $N = 5 * polo = 6,8429$, porém após testar diferentes N o que melhor respondeu ao projeto foi $N = 10 * polo$.

$$C(s) = \frac{(k_p + k_d N)s^2 + (k_p N + k_i)s + k_i N}{s(s + N)} \quad (6.41)$$

$$C(s) = \frac{(1.6120 + 1.4571 * 6,8429)s^2 + (1.6120 * 6,8429 + 1.1512)s + (1.1512 * 6,8429)}{s(s + 6,8429)}$$

$$C(s) = \frac{11,58s^2 + 12,18s + 7,877}{s^2 + 6,8429s} \quad (6.42)$$

É bastante difícil falar sobre a discretização de um sinal sem falar da Transformada Z. A Transformada Z possui uma importância vital para o estudo de sinais discretos, pois ela é para os sistemas de tempo discreto o mesmo que a Transformada de Laplace é para os sistemas do domínio da frequência com sinais contínuos. A Transformada de Laplace converte equações diferenciais integrais em equações algébricas, da mesma forma a Transformada Z converte equações diferenciais em equações algébricas (Lathi, 1998). Para o microcontrolador realizar os cálculos do nosso controlador precisamos realizar esta conversão.

A Transformada Z está descrita na Equação 6.43. Onde $f(k)$ é a versão amostrada de $f(t)$ como mostra a Figura 53 e k refere-se ao tempo de amostragem discreta para $t_0, t_1, t_2...$ e Z é complexo em geral (Franklin, 2013).

$$Z\{f(k)\} = F(z) = \sum_{k=0}^{\infty} f(k)z^{-k} \quad (6.43)$$

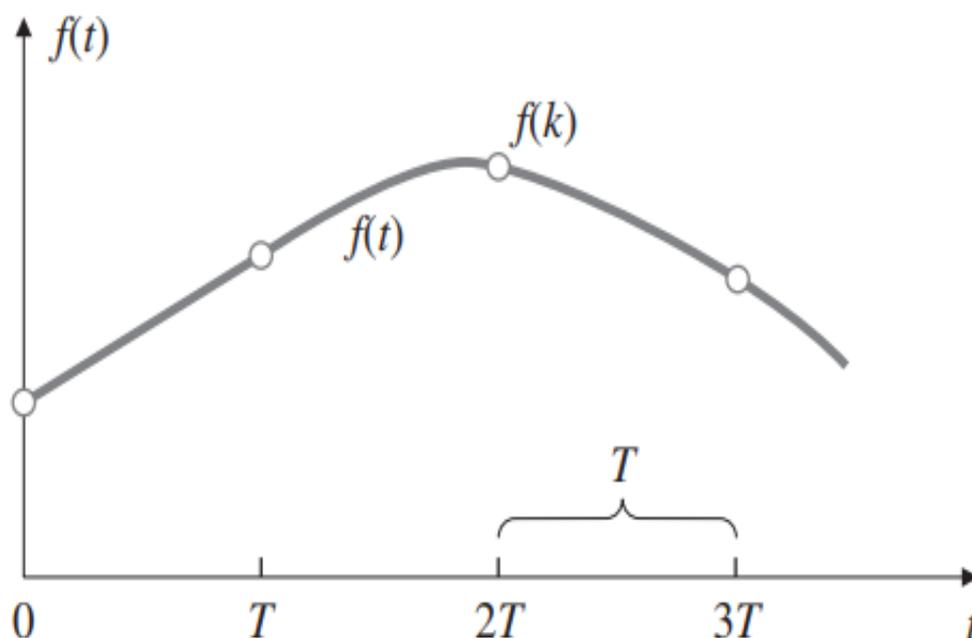


Figura 53 - Uma versão contínua amostrada do sinal f .

Fonte: Franklin, 2013.

Para realizar a discretização do controlador utilizamos o método de diferenciação Backward Euler, que por sua vez utiliza a Transformada Z. Existem dois métodos de discretização de Euler, o Forward e o Backward, ambos possuem características e aplicações diferentes um do outro. O Forward Euler é comumente utilizado no desenvolvimento de simulações simples além ser recomendado para trabalhar com sistemas não-lineares. Já o Backward Euler é usualmente utilizado na discretização de filtros de sinais simples e controladores industriais, este possui uma precisão muito maior do que o Forward Euler (Haugen, 2010). O Backward foi utilizado por se encaixar nas especificidades do nosso projeto, a sua equação está apresentada através da Equação 6.44 e a Figura 54 mostra as diferenças gráficas entre este método e o Forward, onde T_s é o tempo entre 2 amostragens.

$$\dot{x}(t_k) = \frac{x(t_k) - x(t_{k-1})}{T_s} \quad (6.44)$$

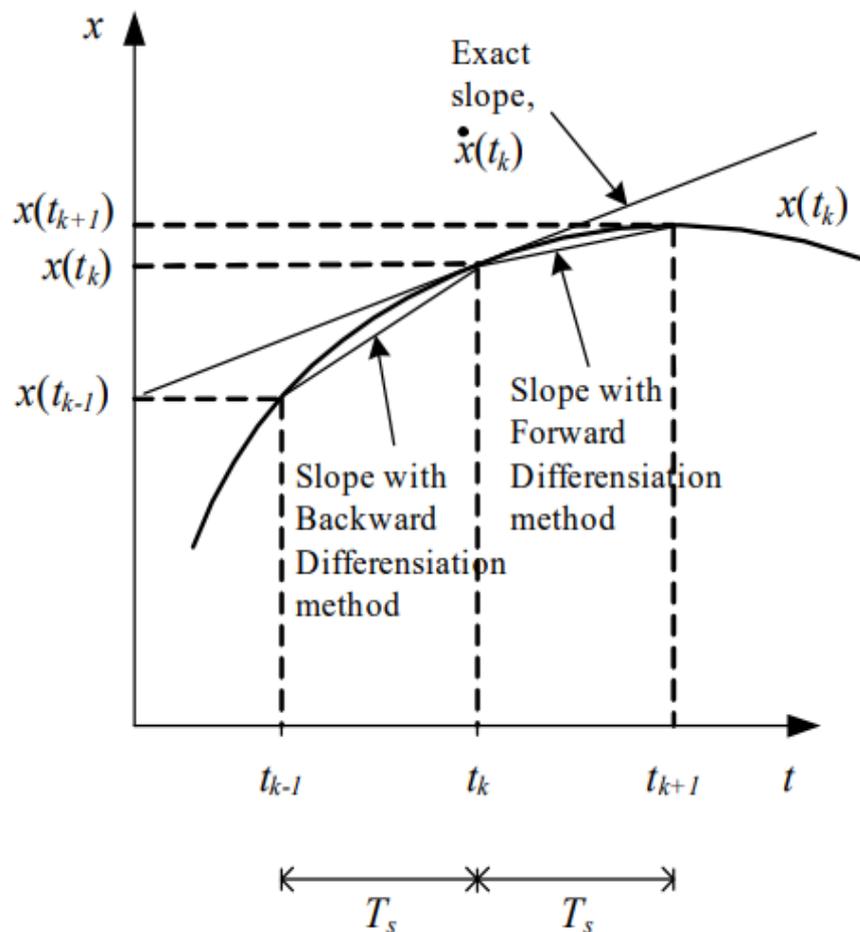


Figura 54 - Método de diferenciação Backward Euler e Forward Euler.

Fonte: Haugen, 2013.

A Figura 55 traz um caso muito semelhante ao sistema do nosso projeto e exemplifica de forma detalhada a implementação de um controlador PID discretizado no tempo e as respostas do próprio sistema. O computador registra a mensuração do sinal via conversor AD (conversor analógico-digital). Este valor é escalado, por exemplo, no nosso projeto é de ampéres para porcentagem. O resultado do sinal digital, $y(t_k)$, é usado na função do controlador, que por sua vez calcula o valor de sinal do controlador, $u(t_k)$. O sinal do controlador é escalado e enviado para o conversor DA (conversor digital-analógico), o qual causará uma resposta na planta (Haugen, 2010).

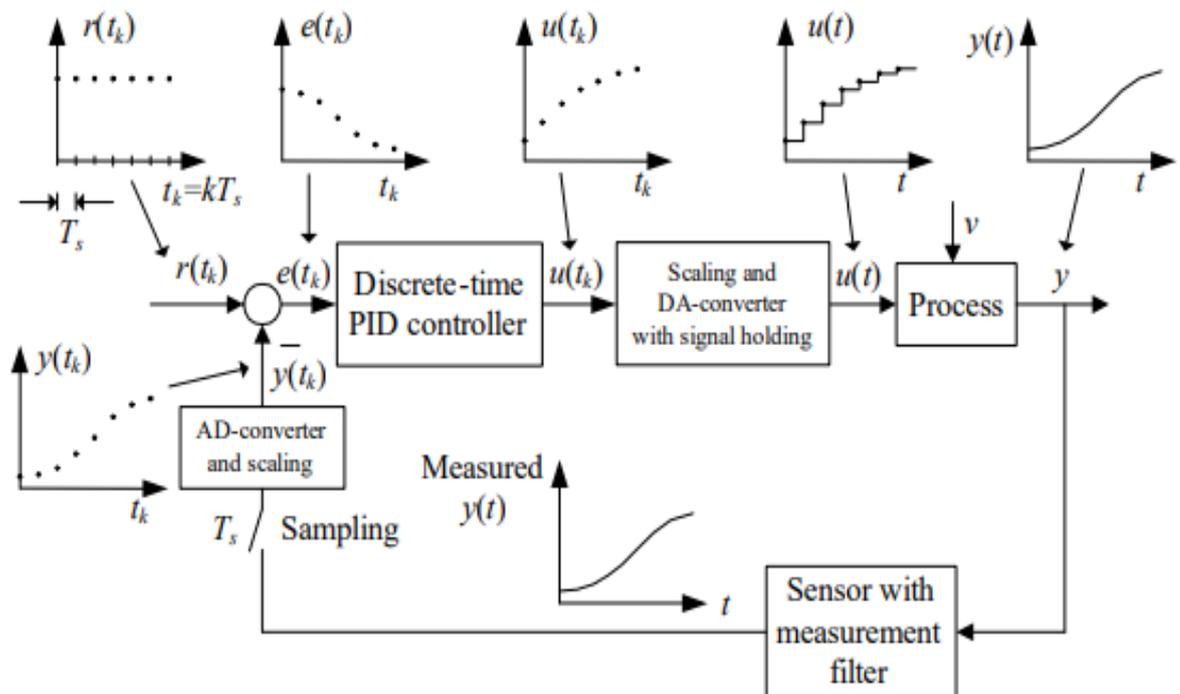


Figura 55 - Diagrama de um controlador sendo implementado em um computador.

Fonte: Haugen, 2013.

Sendo a equação no domínio do tempo definida pela Equação 6.45 (Tooçhinda, 2011). Onde os parâmetros u é a saída do controlador T_i é o tempo integral e T_d é o tempo derivativo.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e d\tau + K_p T_d \dot{e}(t) \quad (6.45)$$

O erro do controlador, e , é mostrado na Equação 6.46. Onde r é a referência e y é a saída do sistema, definido pelo processo de mensuração.

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (6.46)$$

O próximo passo para a discretização é derivar $u(t)$, no qual obtemos a Equação 6.47.

$$\frac{\partial u(t)}{\partial t} = K_p \dot{e}(t) + \frac{K_p}{T_i} e(t) + K_p T_d \ddot{e}(t) \quad (6.47)$$

Aplicando o Euler Backward na Equação 6.45, teremos a Equação 6.48.

$$\frac{u(t_k) - u(t_{k-1})}{T_s} = K_p \frac{e(t_k) - e(t_{k-1})}{T_s} + \frac{K_p}{T_i} e(t_k) + K_p T_d \frac{\dot{e}(t_k) - \dot{e}(t_{k-1})}{T_s} \quad (6.48)$$

Aplicando o método de Euler Backward em $\dot{e}(t_k)$ e $\dot{e}(t_{k-1})$ temos a Equação 6.49.

$$\frac{u(t_k) - u(t_{k-1})}{T_s} = K_p \frac{e(t_k) - e(t_{k-1})}{T_s} + \frac{K_p}{T_i} e(t_k) + K_p T_d \frac{\frac{e(t_k) - e(t_{k-1})}{T_s} - \frac{e(t_{k-1}) - e(t_{k-2})}{T_s}}{T_s} \quad (6.49)$$

Finalmente resolvendo chegamos à Equação discretizada do controlador PID, como mostra Equação 6.50.

$$u(t_k) = u(t_{k-1}) + K_p [e(t_k) - e(t_{k-1})] + \frac{K_p T_s}{T_i} e(t_k) + \frac{K_p T_d}{T_s} [e(t_k) - 2e(t_{k-1}) + e(t_{k-2})] \quad (6.50)$$

7 RESULTADOS DO CONTROLE

Após a descoberta dos valores de k_p , k_i e k_d do controlador PID foram realizados estudos inicialmente em uma planta simulada, com os valores da própria planta do projeto, para verificar o desempenho em malha fechada. Após isto, com a confirmação de que possuíamos um controle estável, aplicamos o mesmo na planta real do projeto.

7.1 RESPOSTA DO CONTROLADOR EM UMA PLANTA SIMULADA

Para verificar a resposta do controlador em uma planta simulada no Arduino, previamente é necessária a discretização da função de transferência da planta. Sendo assim, foi necessária a descoberta da frequência em que o Arduino funcionava, ou seja, o seu tempo de amostragem (h). Através de um simples cálculo de média entre o tempo de um período de amostragem para o outro descobrimos que este teria aproximadamente 1.3 ms. Sendo assim:

$$h = 1.3 \text{ ms}$$

Descobrimos que a função de transferência discretizada da planta fica como demonstrado na Equação 7.1 e 7.2.

$$x_1 = \dot{x}_1 + h * \dot{x}_2 \quad (7.1)$$

$$x_2 = \dot{x}_2 + h(-1.935\dot{x}_2 - 0.9365\dot{x}_1 + 2.944Un) \quad (7.2)$$

Transcrevendo as Equações 7.1 e 7.2 para o Arduino, obtemos a resposta ao degrau e percebemos o seguinte comportamento demonstrada no Figura 56. Com uma entrada de 2.5 Amperes na planta simulada percebemos um comportamento muito semelhante a planta experimental e teórica, como já era esperado.

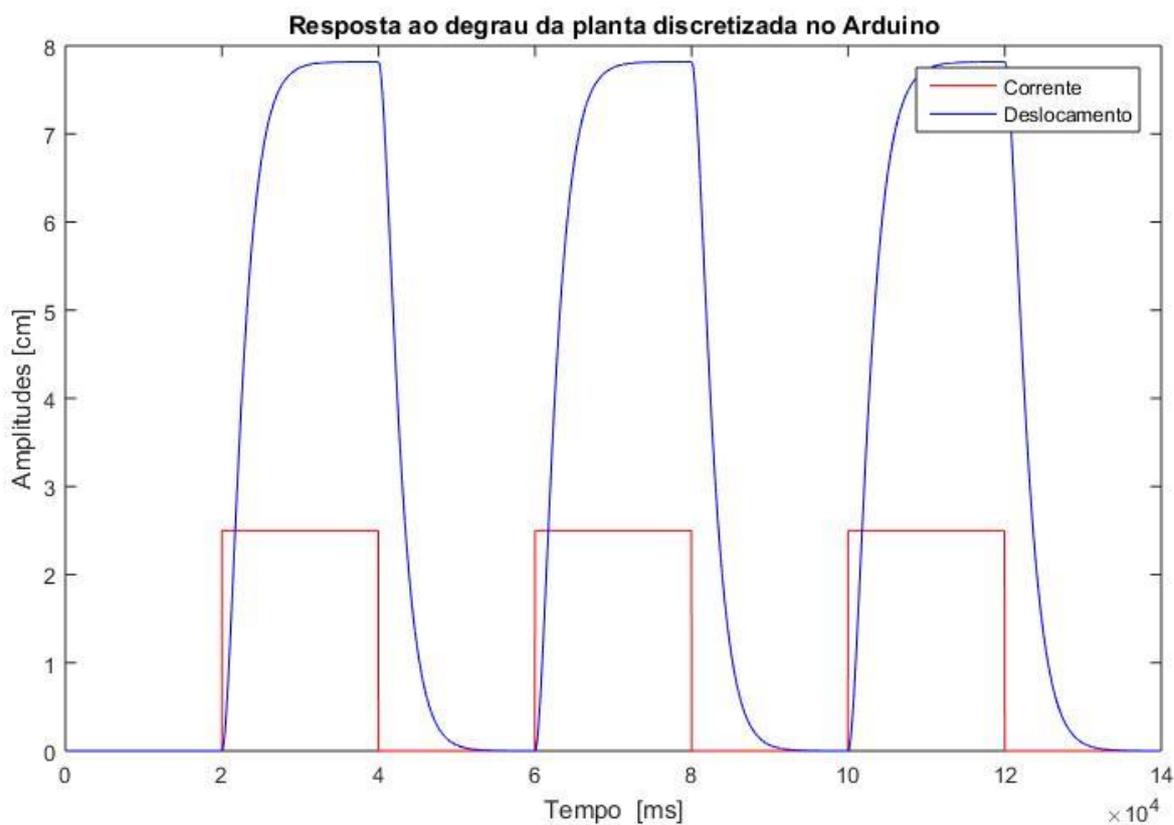


Figura 56 - Resposta ao degrau da planta discretizada no Arduino.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Verificando que a resposta ao degrau da planta simulada era semelhante ao comportamento da planta real e teórica, implementamos o controle PID para verificar o como seria o seu comportamento. Após verificar que a resposta do controlador PID não estava tendo um comportamento muito suave, foram feitas as seguintes mudanças para chegar no comportamento desejado.

$$k_p = 5$$

$$k_i = 1.9$$

$$k_d = 1.7$$

Através disso chegamos à Figura 57 que mostra a resposta da planta com o controlador PID, a curva em vermelho demonstra a referência e a curva em azul demonstra o deslocamento como resultado. Podemos observar que o sistema converge para a referência desejada, sendo assim nosso controlador PID está funcionando.

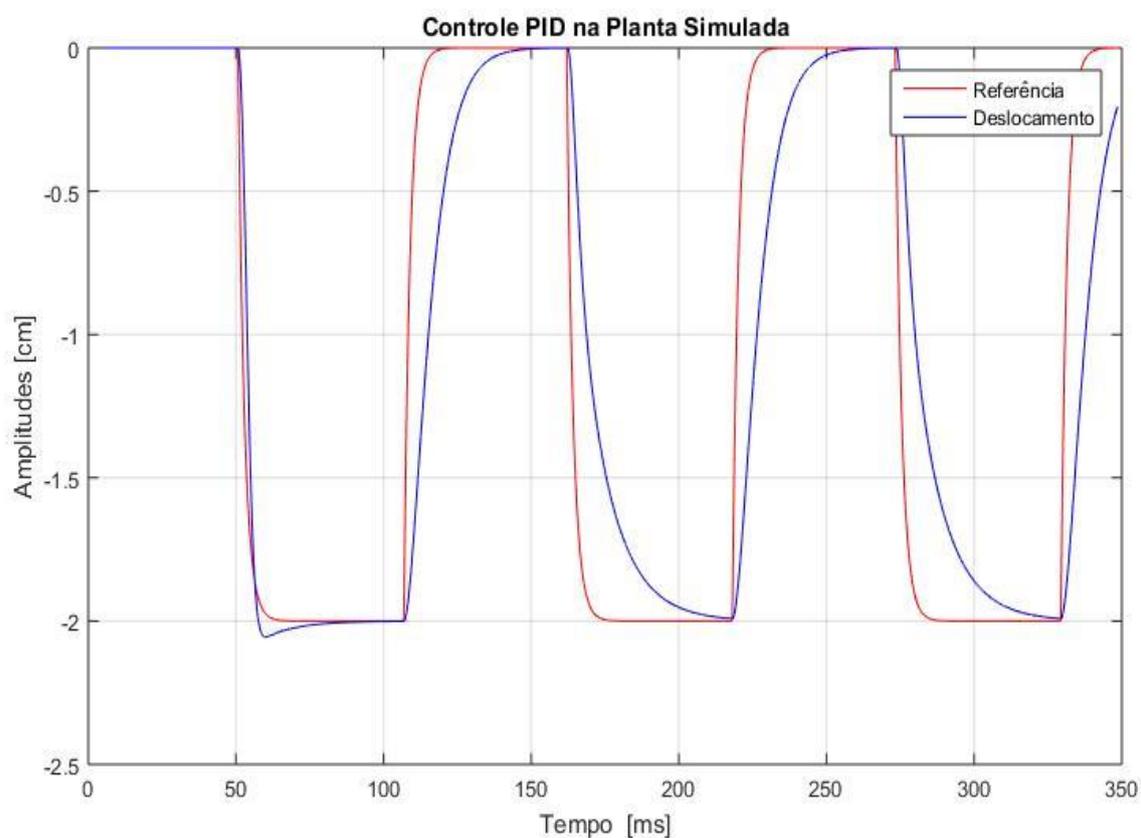


Figura 57 - Resposta do sistema com a implementação do Controlador PID.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

7.2 RESPOSTA DO CONTROLADOR NA PLANTA REAL DO PROJETO

Após percebermos que o controlador PID estava funcionando adequadamente na planta simulada foi implementado o mesmo na planta real. Para sua implementação tanto na planta real quanto na simulada é importante destacar alguns pontos.

O primeiro ponto foi a criação de um limitador de corrente para prevenir qualquer possível instabilidade da planta, para própria segurança do projeto e também para prevenir a plastificação da mola de SMA por excesso de calor, fazendo com que essa não consiga voltar para a forma previamente memorizada.

Quando a saída do controlador (U_n) é maior que a corrente máxima, a princípio 2.5 Amperes, está se manterá em 2.5 Amperes. Caso a saída seja menor do que zero, esta se manterá em 0 Amperes.

Outro ponto foi a implementação de uma equação diferencial ordinária (EDO) para verificar quando o erro e a derivada do erro tendem a zero, representada pela Equação 7.3. Quando ambas tendem a zero a EDO será igual a zero. A EDO é utilizada para zerar o termo integral, pois este é um somador constante.

Uma recomendação da literatura é zerar este termo quando ele está longe do regime permanente, esta técnica se chama *ant wind-up*. Sendo assim, caso a EDO seja menor ou igual a 0.01 $k_i = 0$, caso contrário $k_i = 1.9$.

$$EDO = \dot{e} + e \quad (7.3)$$

Ainda salientando os pontos, foi de extrema importância a implementação de um filtro para o sinal de referência, pois este quando sofria alguma mudança muito brusca, aumentava muito o termo derivativo, gerando um comportamento indesejado para o nosso controle. Este filtro suaviza o sinal da referência. Este filtro é basicamente um filtro passa-baixa, mostrado na Equação 7.4, no domínio da frequência, onde α é o polo do filtro. Tal filtro foi discretizada utilizando o método de Euler (*Backward Euler*), para ser utilizado no Arduino. Podemos observar na Equação 7.5, a equação discretizada do sinal referência filtrada (ref_f), onde o α escolhido foi 2, $ref_{f,old}$ é a derivada da referência e ref é o sinal da referência.

$$\text{filtro passa baixa} = \frac{\alpha}{s+\alpha} \quad (7.4)$$

$$ref_f = (1 - h * \alpha)ref_{f_{old}} + h * \alpha * ref \quad (7.5)$$

Outro ponto importante também é que para obter uma melhor resposta escolhemos a referência como sendo um múltiplo da resolução de deslocamento. Sendo a resolução 0.628318 milímetros uma das referências escolhidas foi 3.769908 milímetros.

Assim sendo, obtivemos a seguinte resposta do controlador com uma referência fixa de 3.769908 milímetros e uma entrada de corrente de 2.5 Amperes, como mostra a Figura 58.

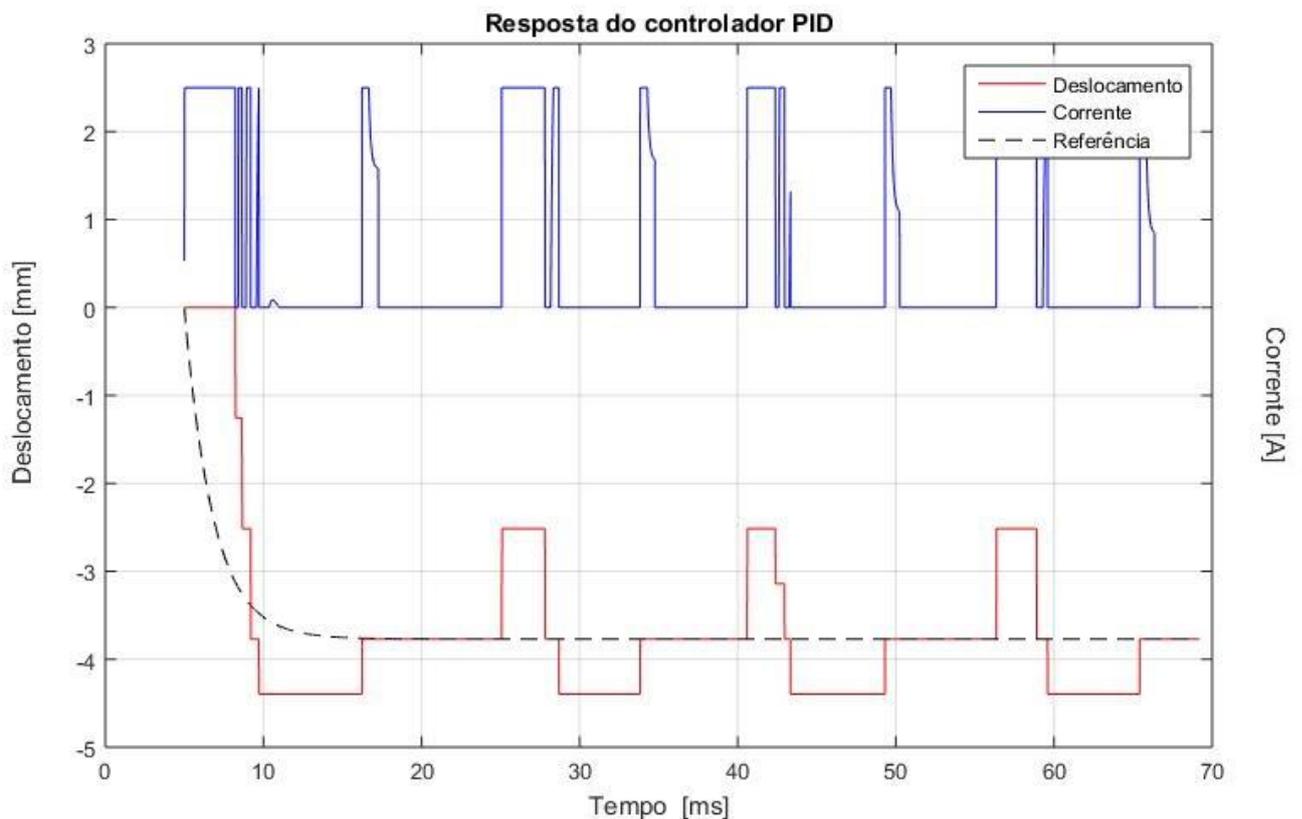


Figura 58 - Resposta do Controlador PID.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

A primeira situação que podemos observar é que o controle só é ativado quando a saída do sistema está fora da referência, ou seja, quando existe um erro. Esse fato alinhado à construção do hardware do encoder, faz com que o sistema sempre

comece a aquecer a mola, esta traciona o encoder, o qual o faz girar medindo assim o deslocamento.

Isto faz com que sempre o sistema volte para a referência, porém sempre atuando em uma faixa de deslocamento e as vezes quando a mola é aquecida e chega ao valor da referência faz com que o controle seja desativado porém, por ainda estar em sua curva de aquecimento se desloca em dois passos até alcançar sua estabilidade. Esses dois passos correspondem a 1,256636 milímetros.

A segunda situação foram as ativações do controlador em picos, sempre que ocorria um deslocamento além de uma inconstância no comportamento do controlador, como podemos verificar na curva azul da Figura 58.

Visando reduzir estes 2 impactos no sistema, percebeu-se que o fator derivativo detinha um grande impacto no sistema. Após diversas tentativas experimentais descobrimos uma melhor resposta do sistema para $k_p = 0,0001$, como podemos observar na Figura 59. Pode-se observar uma resposta mais uniforme do controlador, pela curva azul.

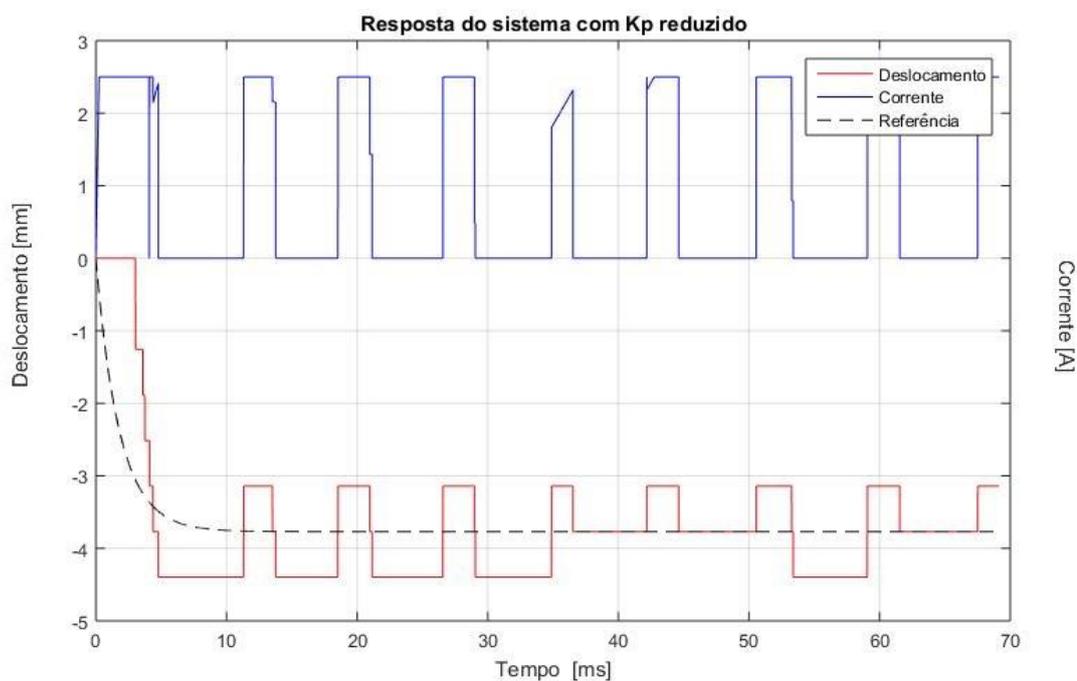


Figura 59 - Resposta do sistema com Kp reduzido.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Foi realizado também testes com diferentes Amperagens para fim de estudo de resposta do sistema. Para 2 Amperes, é notório o maior tempo necessário para o sistema alcançar a referência do que com 2.5 Amperes, como mostra a Figura 60. O sistema só alcança a referência em pouco menos de 10 segundos. Em comparação com a Figura 59, com a entrada de 2.5 Amperes, temos quase que o dobro de demora para o sistema chegar ao valor de referência. Porém este não obteve *overshoot*, que em detrimento com a Figura 59, obteve. Isso se da devido ao fato que ao sistema irá aquecer a mola com muito mais velocidade com 2.5 Amperes do que com 2.0 Amperes. Quando o controlador percebe que chegou à referência e desliga o aquecimento a mola de SMA ainda está em processo de aquecimento devido ao Efeito Joule, o que o faz passar do ponto de referência acarretando assim no *overshoot*.

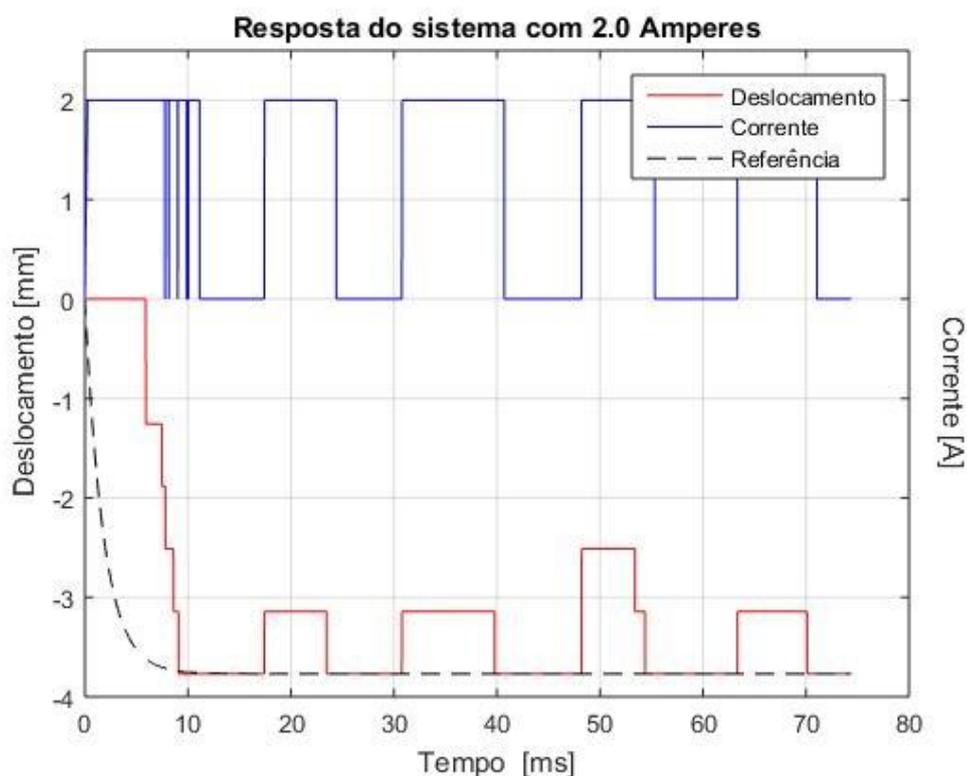


Figura 60 - Resposta do sistema com 2.0 Amperes.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

A Figura 61, mostra a resposta do sistema para 1.75 Amperes. Com ele foi necessário um tempo muito maior até o sistema alcançar a referência, mais do que o dobro do que quando o sistema aquece a mola com 2 Amperes. Só após

aproximadamente 25 segundos que o sistema alcança à referência. Pode-se observar também que o tempo para o sistema retornar à referência, após a corrente ter sido desligada pelo controlador, se tornou muito maior. Tal fenômeno também pode ser observado nas Figuras 59 e 60, o qual quanto maior a corrente, menor será o tempo de resposta do sistema para retornar à referência. Este comportamento é devido às propriedades da Liga de Memória de Forma, já explicadas anteriormente.

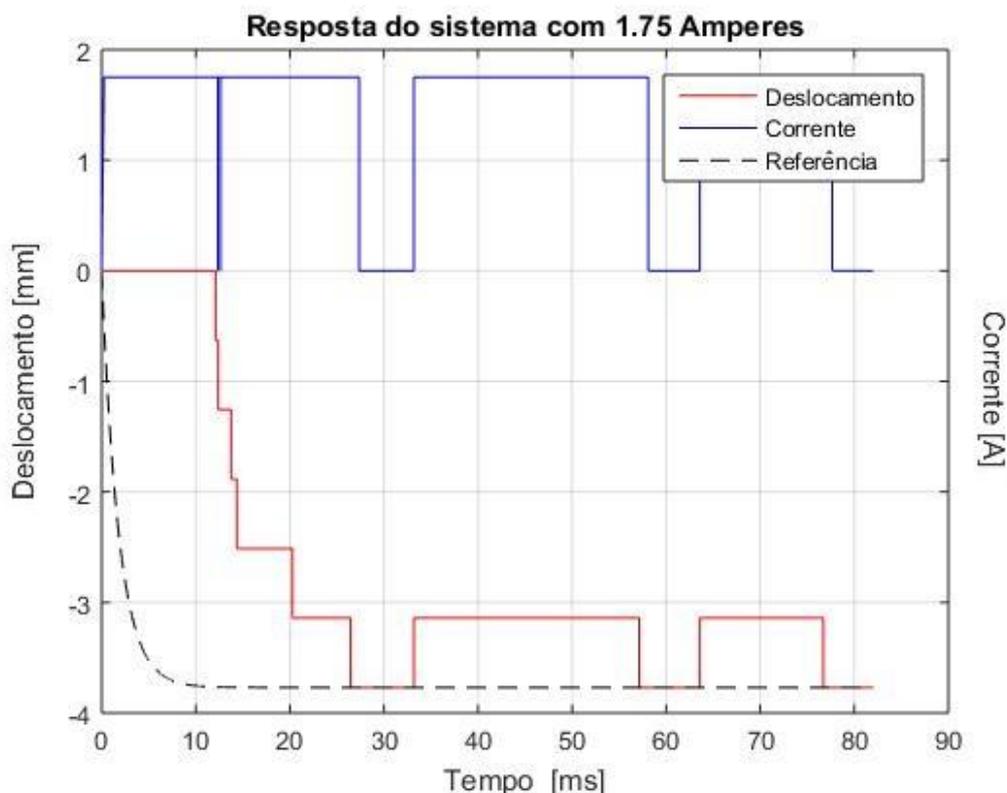


Figura 61 - Resposta do sistema com 1.75 Amperes.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Foi realizado um teste com a corrente de 1.5 Amperes também, porém tal corrente não foi suficiente para o sistema alcançar a referência.

Visando refletir um comportamento semelhante ao que o sistema será submetido na prótese robótica, uma constante mudança de referência é esperada. Tendo isso em vista, foram realizados testes com uma mudança de referência. A primeira realizada foi mantendo até 5 segundos a referência de 0 milímetros, após 5 segundos a referência é alterada para -3.769908 milímetros, após 20 segundos a referência muda para -5.026544 milímetros e após 40 segundos a referência passa a ser de -

6.28318 milímetros. Na Figura 62 podemos observar o comportamento para 2.5 Amperes e na Figura 63, observamos o mesmo para 2 Amperes, respectivamente.

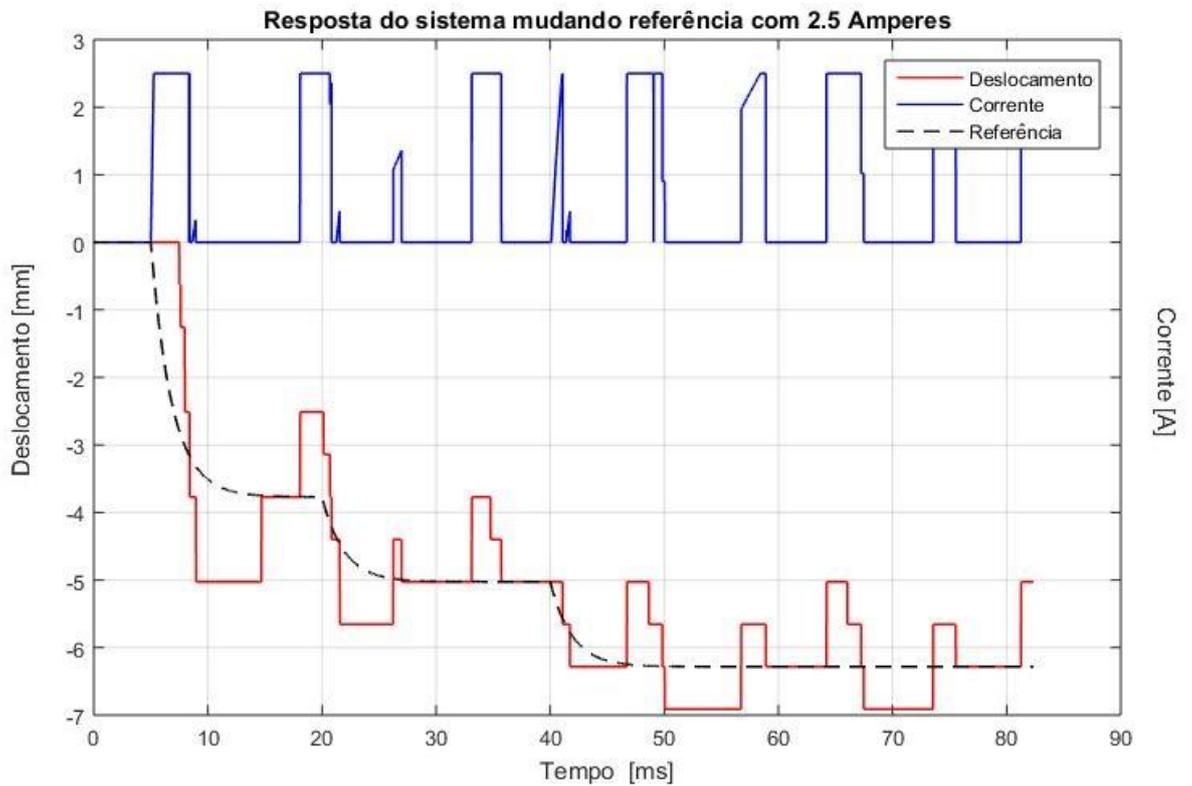


Figura 62 - Resposta do sistema com mudança de referência com 2.5 Amperes.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

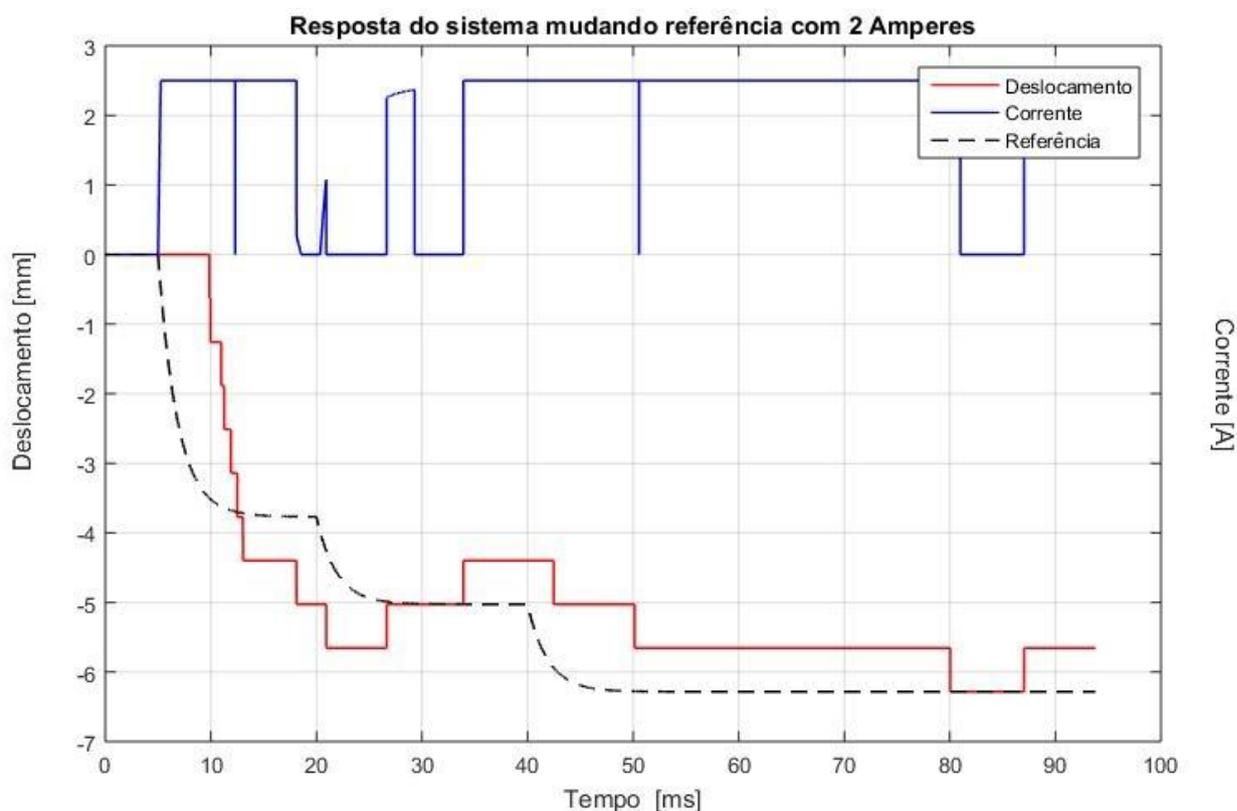


Figura 63 - Resposta do sistema com mudança de referência com 2 Amperes.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Para 2 Amperes, podemos observar além de uma maior demora para o sistema chegar ao ponto de referência no geral, o sistema demonstra uma grande dificuldade em alcançar a maior referência, de -6.28318 milímetros. Este comportamento é devido à dificuldade em aquecer a mola de SMA, para atingir um maior deslocamento, enquanto é tracionada pela mola de aço fazendo com que a mudança da fase martensítica para a austenítica seja retardada.

Foi realizado outro estudo também, desta vez com um ciclo completo de referências. A primeira realizada foi mantendo até 5 segundos a referência de 0 milímetros, após 5 segundos a referência é alterada para -3.769908 milímetros, após 25 segundos a referência muda para -5.026544 milímetros, após 45 segundos a referência passa a ser de -6.28318 milímetros, após 65 segundos a referência cai para -5.026544 milímetros, após 85 segundos cai para -3.769908 milímetros e após 105

segundos, esta cai para 0 milímetros. Todo esse ciclo foi realizado utilizando 2.5 Amperes e podemos vê-lo na Figura 64.

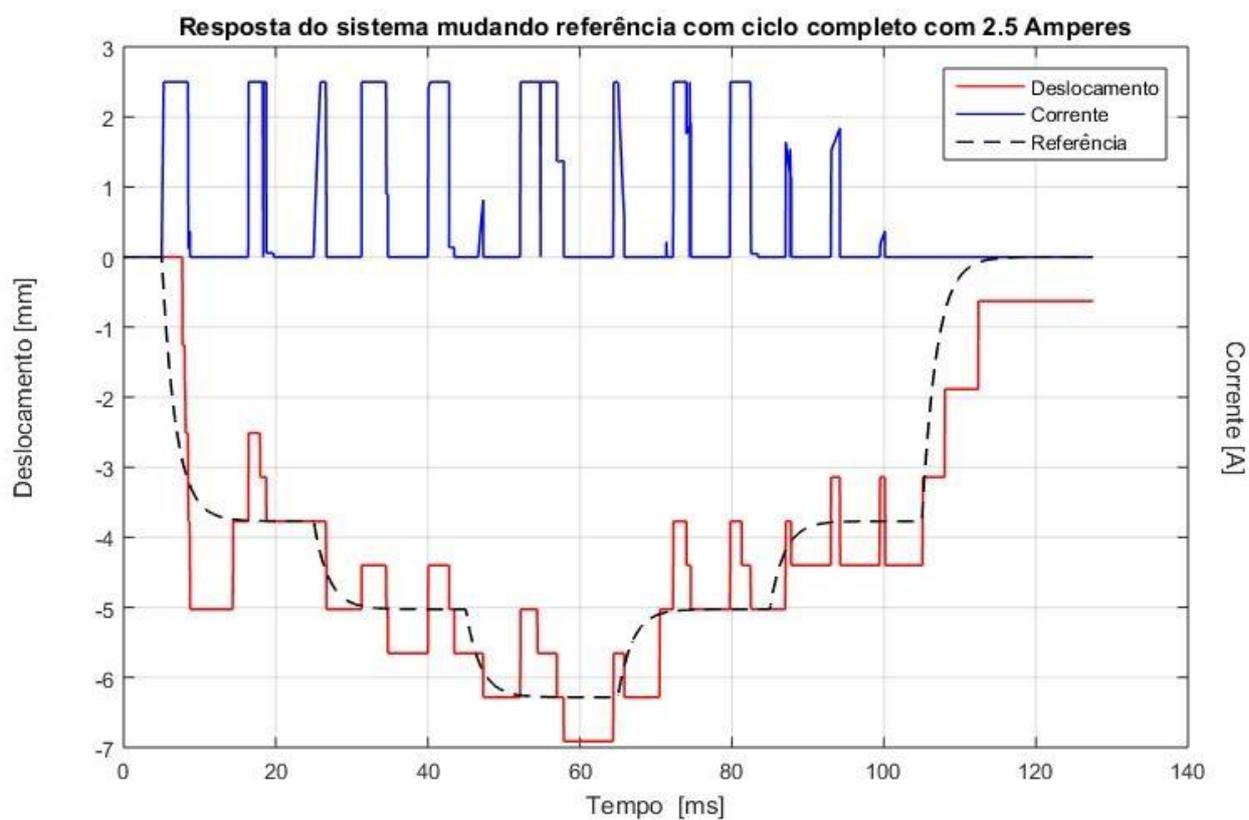


Figura 64 - Resposta do sistema com mudança de referência com ciclo completo com 2.5 Amperes.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

7.3 RESPOSTA DO CONTROLADOR NA PRÓTESE ROBÓTICA

Foi implementado o sistema na prótese robótica para verificar a eficácia do controlador desenvolvido. Podemos ver na Figura 65 todo o sistema montado.

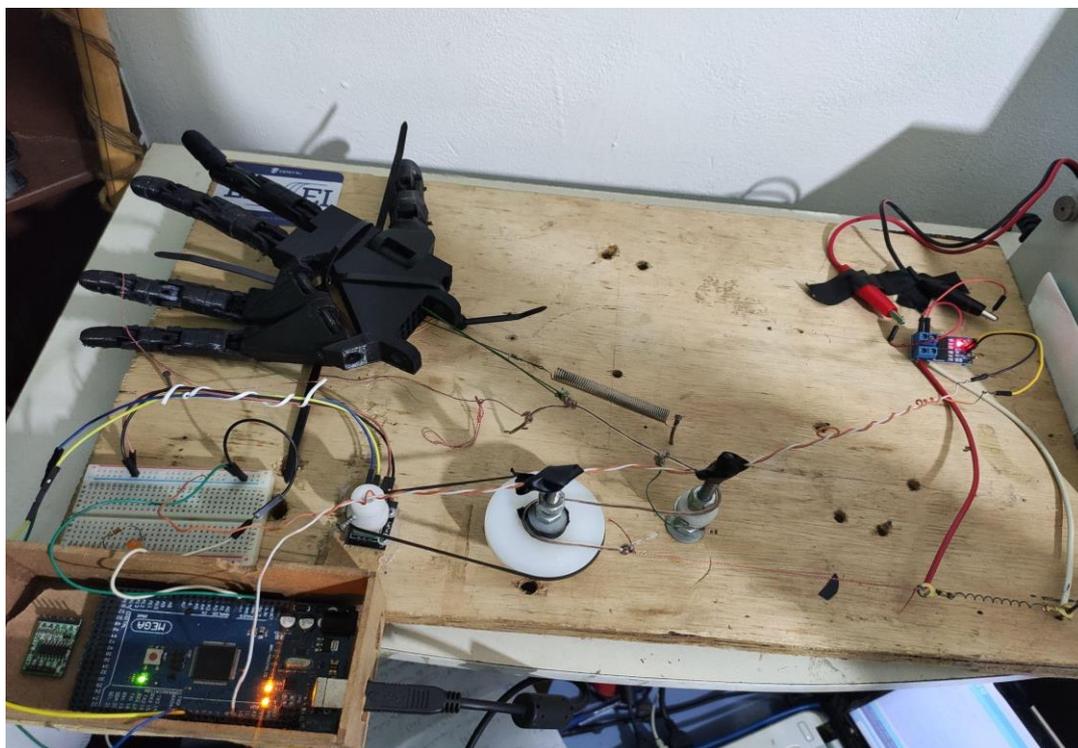


Figura 65 - Resposta do sistema com mudança de referência com ciclo completo com 2.5 Amperes.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Foram realizados experimentos com referências fixas para verificar a resposta do sistema a elas. As Figuras 66, 67 e 68 mostram respectivamente a resposta do sistema para referência de 3,76 milímetros, 5,02 milímetros e 6,28 milímetros.

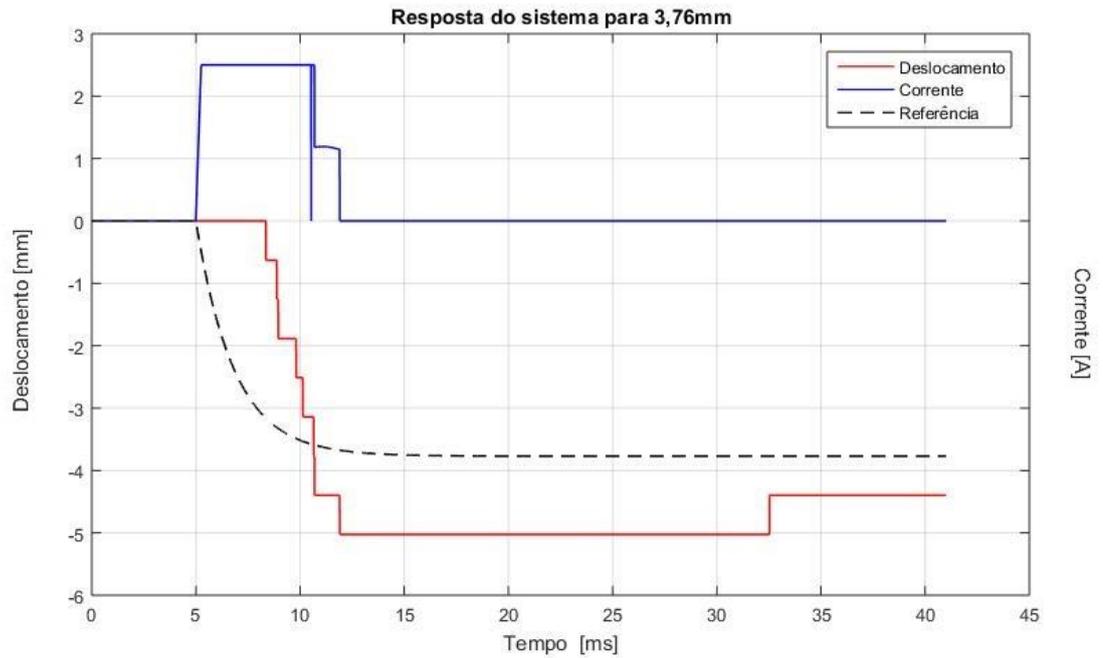


Figura 66 - Resposta com a prótese para deslocamento de 3,76 milímetros.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

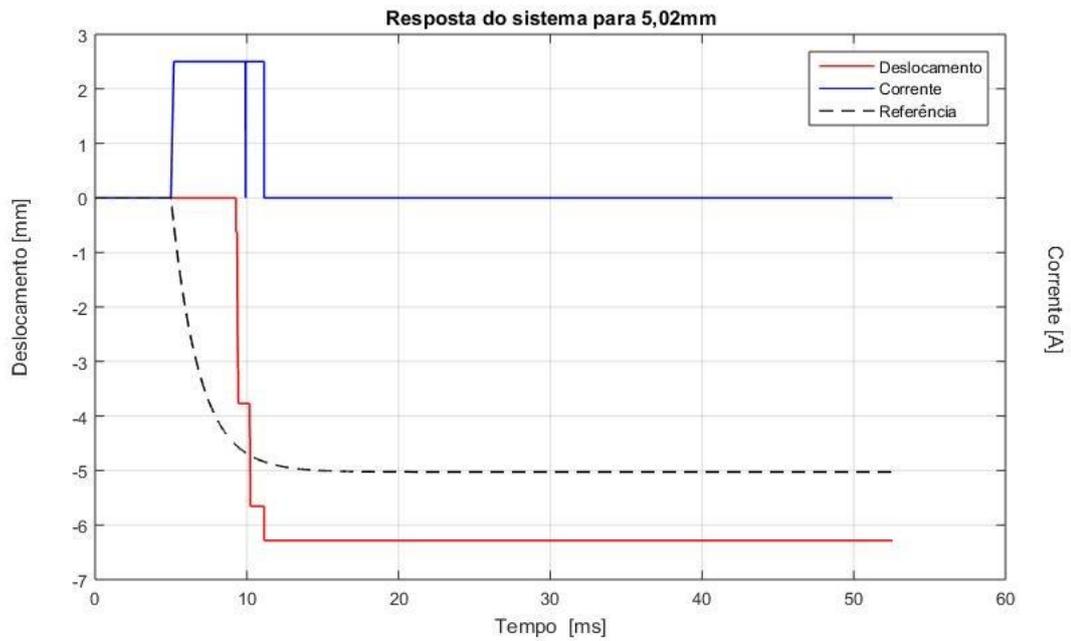


Figura 67 - Resposta com a prótese para deslocamento de 5,02 milímetros.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

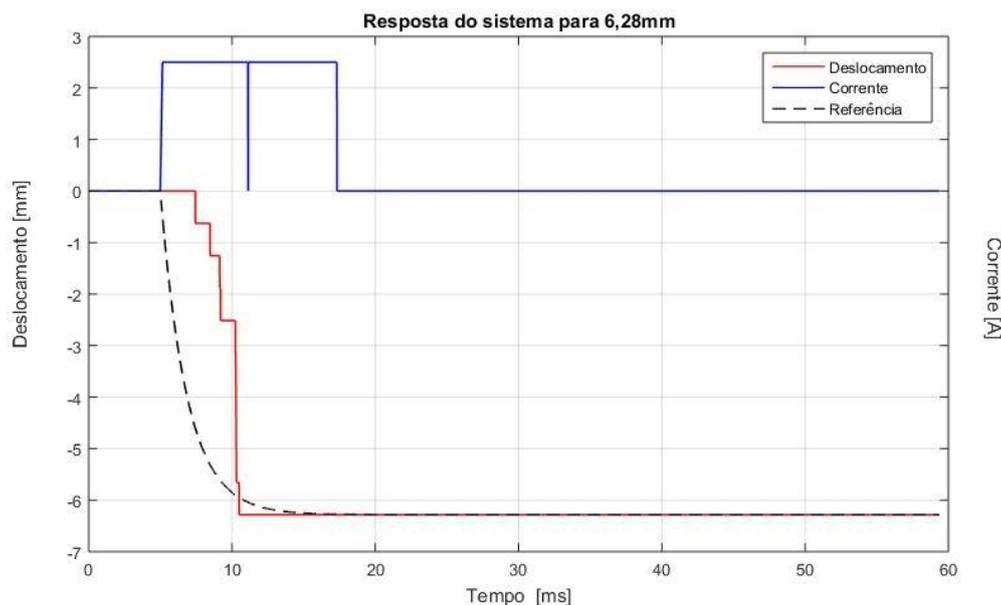


Figura 68 - Resposta com a prótese para deslocamento de 6,28 milímetros.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Pode-se notar que o sistema possui uma tendência muito grande a permanecer no seu máximo deslocamento, sendo ou não a referência. Esse efeito é motivado por dois principais motivos.

O primeiro é com relação aos graus de liberdade da prótese. Esta necessita em alguns momentos de mais força para alcançar alguns graus do que em outros. O sistema de forças internas e atrito da própria prótese gera uma grande dificuldade para que o dedo em questão tracionado tenha dificuldade, em caso tenha passado do ponto de referência, mesmo com o controle desativado o que conseqüentemente não passa corrente pela mola, então esta não será aquecida, tenha resistência a voltar para o ponto de referência. Este comportamento podemos observar nitidamente nas Figuras 66 e 67.

O segundo motivo é com relação a mola de aço. Como a própria prótese necessita de forças diferentes em angulações diferentes e a mola de aço só realiza uma força constante mediante a sua distensão, o próprio sistema não responderá de forma concisa ao retorno da referência.

A resolução para esses problemas será abordada na próxima seção, Propostas de Trabalhos Futuros.

Podemos observar a dificuldade do sistema em retornar para um valor menor do que o assumido na Figura 69. Nesta foi realizado um experimento de ciclo de referências completo onde primeiro é mantido até 5 segundos a referência de 0 milímetros, após 5 segundos a referência é alterada para -3.769908 milímetros, após 25 segundos a referência muda para -5.026544 milímetros, após 45 segundos a referência passa a ser de -6.28318 milímetros, após 65 segundos a referência cai para -5.026544 milímetros, após 85 segundos cai para -3.769908 milímetros e após 105 segundos, esta cai para 0 milímetros. Todo esse ciclo foi realizado utilizando 2.5 Amperes.



Figura 69 - Resposta do sistema a um ciclo completo de referências.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Um ponto importante a salientar é que o melhor resultado obtido para o sistema foi sem a prótese e com 2.5 Amperes de corrente, mostrado na Figura 64. Pode-se observar uma semelhança muito grande com o trabalho de Silva(2007). No qual o sistema acompanha bem a referência durante a fase de acionamento do material SMA, porém quanto maior a frequência, maior será o erro obtido devido ao tempo de resfriamento do material em temperatura ambiente.

8 CONCLUSÃO

Com base no trabalho proposto, pode-se concluir que o SMA cada vez mais tem sido utilizado em atuadores devido ao aumento na demanda de aplicações em diversos ramos, especialmente na robótica e biomecânica diante de movimentos suaves e que não exigem tanta força para execução.

Os procedimentos experimentais serviram de base para caracterização mecânica do SMA, bem como rigidez elástica da mola de aço e de SMA. Uma vez que essas molas não possuíam informações de dados (datasheet do fornecedor).

Foi possível correlacionar o modelo experimental com o modelo teórico da função de transferência do sistema e assim chegar aos parâmetros do controlador.

O método de controle PID possibilitou uma resposta suavizada e rápida para o nosso sistema, atendendo as demandas necessárias para este projeto. A utilização deste controlador em próteses robóticas tende a proporcionar uma experiência agradável ao usuário para que atenda às suas expectativas.

Foi de suma importância a interdisciplinaridade entre automação e mecânica para concepção, realização e controle do protótipo desse projeto. Houve ganhos em relação a troca de conhecimentos de ambas as áreas.

9 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de trabalhos futuros, é proposto a utilização de um controlador ADRC (*Active Disturbance Rejection Control* - Controle com rejeição ativa de distúrbios), uma vez que ele é um método de controle robusto e mais preciso de realimentação de saída aplicado a sistemas com parâmetros incertos, além de ser possível reduzir as incertezas no projeto.

Diante desse controlador, seria possível fazer a correlação com os valores de rigidez elástica da mola de aço convencional e da rigidez elástica da mola de SMA obtidas nesse trabalho, que serviriam de input para esse sistema.

Outra sugestão é com relação a dificuldade abordada na Seção anterior, o qual o sistema apresenta resistência para voltar para um valor de referência menor do que o que o sistema atingiu. A prótese utilizada neste trabalho foi uma prótese impressa em PLA por uma impressora 3D, as juntas foram conectadas utilizando varetas de fibra de carbono. Apesar das varetas serem lisas e apresentarem pouco atrito, seria fundamental a utilização de rolamentos para a ligação e movimentação das juntas. Além disso a prótese impressa em 3D, dependendo da resolução ao qual foi impressa, apresenta uma superfície rugosa, o qual causa atritos internos consideráveis para o funcionamento do sistema. Seria importante para a resolução deste problema a utilização de outros materiais para a construção da prótese, ou uma prótese impressa em 3D, em que as juntas que apresentam atrito possuem um outro material para revestimento, para gerar menos atrito ou uma impressão com uma resolução altíssima o qual reduziria esses atritos internos do sistema.

Um ponto importante a salientar é com relação a mola de aço implementada no sistema, esta que possui a função restauradora do sistema. Como para angulações diferentes temos necessidades diferentes de forças a serem implementadas. Talvez a mola de aço como força restauradora para uma prótese impressa em 3D, que possui atritos internos devido a suas paredes rugosas, não seja a melhor escolha. Para casos como este talvez seja interessante a utilização de outra mola de SMA para realizar a força restauradora do sistema. Esta agiria de forma oposta a outra mola de SMA, que

possui a função de acionar o dedo. Enquanto a mola de SMA acionadora aqueceria, acionando assim o dedo, a mola restauradora resfriaria e vice-versa.

Outro ponto importante é que quando trabalhamos com Ligas de Memória de Forma, temos que levar não somente em consideração o aquecimento deste material, mas também o resfriamento deste. Isso possui um papel crucial em sistemas como próteses, o qual apresenta mudanças de referência com uma frequência razoavelmente alta. Uma sugestão seria desenvolver um controle para o resfriamento da mola de SMA utilizando fluidos resfriados, cooler ou células de peltier.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, R.A.A.; SAVI, M.A.; PACHECO, P.M.C.L. **Experimental Investigation of Vibration Reduction Using Shape Memory Alloys**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v. 24, pp. 247-261, 2013.

AGUIAR, Ricardo Alexandre Amar De. **Análise da redução de vibrações em sistemas mecânicos utilizando ligas com memória de forma**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

ALPERIN, R.C. **A Mathematical Theory of Origami Constructions and Numbers**, New York Journal of Mathematics, Vol. 6, pp. 119-133, 2000.

ANDREASS, B. **Origami art as a means of facilitating learning**, Procedia - Social and Behavioral Sciences, Vol. 11, pp. 32-36, ISSN 1877 0428, <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.01.028>, 2011.

ANTÔNIO, A. M. **A bioengenharia no Brasil, século XX**: Estado da Arte. 2004. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Interunidade em Bioengenharia - Escola de Engenharia de São Carlos / Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto / Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002. (modelo de referência com autoria coletiva).

CHOI, S. Position control of a single-link mechanism activated by shape memory alloy springs: experimental results. **Smart Materials and Structures**, v.15, p.51-58, 2006.

CZECHOWICZ, Alexander; LANGBEIN, Sven. **Shape Memory Alloy Valves**: Basics, Potentials, Design. Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London, 2015.

DA SILVA, E.P., 2007. "**Beam shape feedback control by means of a shape memory actuator**". Materials & design, Vol. 28, No. 5, pp. 1592–1596.

DONG, Y.; BOMING, Z.; JUN, L. **A changeable aerofoil actuated by shape memory alloy springs**. Materials Science and Engineering, p. 243 - 250, 2008.

FRANKLIN, GENE F.; POWELL, D; EMANI-NAEINI, ABBAS .**Sistemas de controle para engenharia** - 6. ed - 2013.

GARRIDO, B. M. **Controle de um Motor de Corrente Contínua para uso em Órteses e Próteses**. 2008. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

GHASEMI, M. R; SHABAKHTY, N.; ENFERADI, M. H. **Vibration control of offshore jacket platforms through shape memory alloy pounding tuned mass damper (SMA-PTMD)**.0029-8018/ 2019 Elsevier Ltd. (2019)

GLASSNER, A. **More Origami Solids**, vol. 16, no. 5, September 1996, pp. 85-91.

HAUGEN, F. **Discretization of simulator, filter, and PID controller**. TechTeach. 2010.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistências dos materiais**. 7 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

KAPLANOGLU, Erkan. **Design of Shape Memory Alloy-Based and Tendon-Driven Actuated Fingers Towards a Hybrid Anthropomorphic Prosthetic Hand**. Marmara University Technical Edu. Faculty Mechatronics Department, 2012.

KIM, B.; LEE, M.; LEE, Y.; KIM, Y.; LEE, G. **An earthworm-like micro robot using shape memory alloy actuator**. Sensors and Actuators A, v. 125, pp. 429–437, 2006.

KO, J.; JUN, M. B.; GILARDI, G.; HASLAM, E.; PARK, E. J. **Fuzzy PWM-PID control of cocontracting antagonistic shape memory alloy muscle pairs in an artificial finger**. Mechatronics, 21(7), 1190–1202. doi:10.1016/j.mechatronics.2011.07.003. (2011)

LAGOUDAS, D.C. **Shape Memory Alloys, Modeling and Engineering Applications**. Department of Aerospace Engineering Texas A&M University, Springer Science Business Media, LLC, 2008.

LANGE, G.; LACHMANN, A.; RAHIM, A. H. A.; ISMAIL, M. H.; LOW, C. Y. **Shape Memory Alloys as Linear Drives in Robot Hand Actuation**. *Procedia Computer Science*, 76, 168–173. doi:10.1016/j.procs.2015.12.335. (2015).

LATHI, B, P. **Signal Processing and Linear Systems**. Berkeley-Cambridge Press.P.O. Box 947, Carmichael, CA. 95609-0947, 1998.

LEE D. Y. et al. **The Deformable Wheel Robot Using Magic-Ball Origami Structure**, International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, Portland, Oregon, 2013.

LEE D.Y. et al. **A Passive, Origami-Inspired, Continuously Variable Transmission**. IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA). Hong Kong Convention and Exhibition Center May 31 - June 7, 2014. Hong Kong, China.

MACHADO, L.G et al., 2003. **Medical applications of shape memory alloys**. Brazilian J. Medical Biological.

MANSOUR, N. A.; JANG, T.; BAEK, H.; SHIN, B.; RYU, B.; KIM, Y. **Compliant closed-chain rolling robot using modular unidirectional SMA actuators**. Sensors and Actuators A: Physical, 310, 112024. doi:10.1016/j.sna.2020.112024.(2020)

MENDELSON, S. **Mechanisms for martensitic formation and the shape memory effect**. In: PERKINS, Jeff. Shape memory effects in alloys. 1. ed. Plenum Press. 487-502, 1975.

MONTEIRO P.C.C., SILVA L.L., NETTO T.A. and SAVI M.A. **Experimental investigation of the influence of the heating rate in an SMA actuator performance**. Sensors and Actuators A: Physical, v. 199(1), pp. 254–259, 2013.

NAMAZU, T.; HASHIZUME, A.; INOUE, S. **Thermomechanical tensile characterization of Ti–Ni shape memory alloy films for design of MEMS actuator**. Sensors and Actuators A, v. 139, pp. 178–186, 2007.

NESPOLI A., BESSEGHINI S., PITTACCIO S., VILLA E., VISCUSO S. **The high potential of shape memory alloys in developing miniature mechanical Devices: A review on shape memory alloy mini-actuators**. Sensors and Actuators A, v. 158, pp. 149–160, 2010.

NIKDEL, N., NIKDEL, P., BADAMCHIZADEH, M. A., & HASSANZADEH, I. (2014). **Using Neural Network Model Predictive Control for Controlling Shape Memory Alloy-Based Manipulator**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61(3), 1394–1401. doi:10.1109/tie.2013.2258292.

OGATA, KATSUHIKO. **Engenharia de controle moderno**. Tradutora Heloísa Coimbra de Souza; revisor técnico Eduardo Aoun Tannuri. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

OLIVEIRA, Sérgio. **Um modelo constitutivo tridimensional para descrever os efeitos de memória de forma e pseudoelástico em ligas com memória de forma**. Dissertação de D.Sc., COPPE UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

PAI, A., Riepold, M., & Trächtler, A. (2016). **Precision Control of SMA Actuators with a Real Time Model-Based Controller and Extended VSC**. IFAC-PapersOnLine, 49(21), 66–73. doi:10.1016/j.ifacol.2016.10.512

PAIVA, A.; SAVI, M.A.; PACHECO, P.M.C.L. **Modelos Constitutivos para Ligas com Memória de Forma**. São Paulo: Série Arquimedes, v.2, pp. 1-30, 2003.

PICCINI, M.; TOWE, B. **A shape memory alloy microvalve with flow sensing**. Sensors and Actuators A, v. 128, pp. 344–349, 2006.

PONS, J.L.; E. ROCON AND R. CERES, D. REYNAERTS, B. SARO, S. LEVIN, W. VAN OKUNO, RYUHEI; MASAKI YOSHIDA, AND KENZO AKAZAWA. **Compliant Grasp in a Myoelectric Hand Prosthesis**. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine July/August, 2005.

REDINIOTIS, O.K.; WILSON, L.N.; LAGOUDAS, D.C.; KHAN, M. M. **Development Of A Shape-Memory-Alloy Actuated Biomimetic Hydrofoil**. Journal of Intelligent Material Systems And Structures. 13,n.1, pp.35-49, 2002.

REIS, Widson Porto. **Caracterização DE Ligas De Níquel – Titânio Para Ortodontia**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2001.

ROGERS, C.A. **Intelligent Materials**. Scientific American (September), 122 – 127, 1995.

ROSHAN, T. A. U., BASNAYAKE, B. A. D. J. C. K., AMARASINGHE, Y. W. R., WIJETHUNGE, D., & NANAYAKKARA, N. D. (2018). **Development of a PID Based Closed Loop Controller for Shape Memory Alloy Actuators**. 2018 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon). doi:10.1109/mercon.2018.8421929.

SAVI, M. A.; et al **Modelagem do Comportamento Termomecânico das Ligas com Memória de Forma**. In: 3.º Congresso Temático de Dinâmica, Controle e Aplicações - 3.º DINCON, Ilha Solteira, Junho, 2004.

SHI, Z., WANG, T., LIU, D., MA, C., & YUAN, X. (2014). **A fuzzy PID-controlled SMA actuator for a two-DOF joint**. Chinese Journal of Aeronautics, 27(2), 453–460. doi:10.1016/j.cja.2014.02.015

SHIGLEY, J. E., MISCHKE, C. R. **Mechanical Engineering Design**. McGraw-Hill, USA, 2001.

SILVA, E. P. D. (2007). **Beam shape feedback control by means of a shape memory actuator**. *Materials & Design*, 28(5), 1592–1596. doi:10.1016/j.matdes.2006.02.021

SILVA, L.L., OLIVEIRA, S.A., PACHECO, P.M.C.L. and SAVI, M.A. **Synergistic Use of Smart Materials for Vibration-Based Energy Harvesting**, European Physical Journal – Special Topics, v. 224(14-15), pp.3005-3012, 2015(b).

SONG, G.; PATIL, D.; KOCUREK, C.; BARTOS, J. **Applications of shape memory alloys in offshore oil and gas industry: a review**. In: Proceedings of earth and space 2010: engineering, science, construction, and operations in challenging environments, vol 366, Honolulu, HI, USA, pp 14-17 March 2010.

TAI, N. T.; AHNZ, K. K. **Apply adaptative fuzzy sliding mode control to SMA actuator**. International Conference on Control, Automation and Systems, 27-30 Oct. 2010, Kintex, Korea.

TOOCHINDA, V. **Digital PID Controllers**. Disponível em:<<http://www.controlsystemslab.com>>. Acesso em 11 jan. 2011.

VILLARINHO, D. J. **Caracterização de uma liga NITI visando confecção e aplicação como material biomédico em órtese Grampo de Judet**. 2010. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

WADDELL. A.; PUNCH, J.; STAFFORD, J.; JEFFERS, N. **On the Hydrodynamic Characterization of a Passive Shape Memory Alloy Valve**. CTVR, Stokes Institute,

University of Limerick, Limerick, Ireland Thermal Management Research Group, Bell Labs, Alcatel-Lucent. Dublin, Ireland, 2015.

WEBB, G.; WILSON, L.; LAGOUDAS, D. C.; REDINIOTIS, O. **Adaptive control of shape memory alloy actuators for underwater biomimetic applications.** AIAA Journal 38 (2), 325-334, 2000.

ZHANG, S.; LIU, B.; WANG, L.; YAN, Q.; HUAT, K. L.; YANG, J. **Design and Implementation of a Lightweight Bioinspired Pectoral Fin Driven by SMA.** Mechatronics, V. PP, p.1-13, 2014.