



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
DEPARTAMENTO DAS ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LUIZ GOMES TAVARES JÚNIOR

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA DEFORMAÇÃO DE UMA VIGA
SIMPLESMENTE ENGASTADA ATUADA POR FIO DE LIGA DE MEMÓRIA DE
FORMA COM O USO DO *SOFTWARE* LABVIEW**

CARAÚBAS/RN

2023

LUIZ GOMES TAVARES JÚNIOR

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA DEFORMAÇÃO DE UMA VIGA
SIMPLESMENTE ENGASTADA ATUADA POR FIO DE LIGA DE MEMÓRIA DE
FORMA COM O USO DO *SOFTWARE* LABVIEW**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido –
UFERSA, Campus Caraúbas, como requisito para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Walber Medeiros Lima.

CARAÚBAS/RN

2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

T231m Tavares, Luiz Gomes Tavares Júnior.
MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA DEFORMAÇÃO DE UMA
VIGA SIMPLEMENTE ENGASTADA ATUADA POR UM FIO DE
LIGA DE MEMÓRIA DE FORMA COM O USO DO SOFTWARE
LABVIEW / Luiz Gomes Tavares Júnior Tavares. -
2023.
58 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Walber Medeiros Lima
Lima.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Elétrica, 2023.

1. Deformação. 2. Liga de Memória de Forma. 3.
Método de Ziegler Nichols. 4. LABVIEW. I. Lima,
Prof. Dr. Walber Medeiros Lima, orient. II.
Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em
conformidade com AACR2 e os dados fornecidos pelo
autor(a).

Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito
RodriguesCRB: 15/700

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

LUIZ GOMES TAVARES JÚNIOR

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA DEFORMAÇÃO DE UMA VIGA
SIMPLESMENTE ENGASTADA ATUADA POR FIO DE LIGA DE MEMÓRIA DE
FORMA COM O USO DO *SOFTWARE* LABVIEW**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido –
UFERSA, Campus Caraúbas, como requisito para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Elétrica.

Defendida em: 19 / 05 / 2023.

BANCA EXAMINADORA

WALBER
MEDEIROS
LIMA: [REDACTED]

Assinado de forma digital por
WALBER MEDEIROS
LIMA: [REDACTED]
Dados: 2023.05.26 09:51:47 -03'00'

Walber Medeiros Lima, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Documento assinado digitalmente



JOSE ELISEU DOS SANTOS FILHO
Data: 26/05/2023 13:50:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

José Eliseu dos Santos Filho, Bel.
Membro Examinador

Assinado de forma digital
por JACKSON DE BRITO
SIMÕES: [REDACTED]
Dados: 2023.05.26
09:48:51 -03'00'

Jackson de Brito Simões, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

*Dedico este trabalho a Deus, por sempre está
comigo nos momentos mais difíceis, e a minha
família, em especial aos meus pais: Luiz Gomes
Tavares e Francisca Rozalba Almeida Silva
Tavares.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me permitido chegar até aqui, por ter me acompanhado durante toda essa minha trajetória, mostrando que me ouve e está presente em tudo o que faço.

Agradeço aos meus pais Luiz Gomes Tavares e Francisca Rozalba Almeida Silva Tavares por todo o apoio e suporte, por terem sido os pilares essenciais na minha vida, por sempre torcerem pelo meu sucesso e por terem me tornado a pessoa que sou hoje. Obrigado, amo vocês.

Agradeço à toda minha família por toda a paciência, por sempre estarem me aconselhando, ouvindo e apoiando até hoje. Obrigado, amo vocês.

Agradeço a todos os meus amigos que fiz no decorrer da minha jornada acadêmica até aqui, por todas as ajudas e por todo o incentivo. Sem dúvidas, um dos maiores presentes da minha vida foi ter a amizade de vocês, Obrigado.

Agradeço a todos que ainda assim, de alguma forma puderam contribuir como o meu desenvolvimento acadêmico e com a minha jornada até aqui, Obrigado.

Agradeço a Universidade Federal Rural do Semi-Árido, por todas as oportunidades me dadas e por ter contribuído para o meu crescimento acadêmico. Por fim, agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Walber Medeiros Lima por ter aceitado me orientar, e pelo compromisso para que fosse possível a realização deste trabalho, por todo ensino e paciência. Obrigado.

*“Algumas batalhas são vencidas com espadas
e lanças, outras com papel e caneta.”*

Tywin Lannister.

RESUMO

Por muito tempo, os problemas mecânicos relacionados a deformação e/ou vibração em sistemas estruturais têm sido abordados por meio de técnicas de controle convencionais, modernas e robustas. No entanto, é necessário investigar esses problemas em um contexto específico, como em uma viga simplesmente engastada, a fim de desenvolver métodos eficazes de controle de deformação usando atuadores de Liga de Memória de Forma (LMF). Com base nessa necessidade, este trabalho tem como objetivo abordar a modelagem e simulação da deformação em uma viga simplesmente engastada, atuada por meio de um fio de LMF, utilizando o software LABVIEW. A modelagem implementada foi baseada no comportamento do fio de LMF, considerando o modelo térmico, o modelo de mudança de fase e o modelo do sistema mecânico, em conjunto com o modelo da viga engastada. Foi realizada uma análise detalhada do gráfico da deformação da viga engastada em função do tempo através do primeiro método de sintonia de Ziegler Nichols, utilizando controladores PI e PID. Os resultados obtidos foram satisfatórios e apresentaram concordância com o embasamento teórico apresentado no trabalho. Esses resultados demonstram a viabilidade do uso de atuadores de LMF no controle da deformação em sistemas estruturais, além de ressaltar a importância de técnicas de controle modernas e robustas para lidar com problemas mecânicos relacionados a deformação e/ou vibração em sistemas estruturais.

Palavras-chaves: Deformação. Liga de Memória de Forma. Método de Ziegler Nichols. LABVIEW.

ABSTRACT

For a long time, mechanical problems related to deformation and/or vibration in structural systems have been addressed through conventional, modern and robust control techniques. However, it is necessary to investigate these problems in a specific context, such as in a simply cantilevered beam, in order to develop effective methods of strain control using Shape Memory Alloy (SMA) actuators. Based on this need, this work aims to address the modeling and simulation of the deformation in a simply cantilevered beam, actuated by means of an LMF wire, using the LABVIEW software. The implemented modeling was based on the behavior of the LMF wire, considering the thermal model, the phase change model and the mechanical system model, together with the cantilevered beam model. A detailed analysis of the graph of the deformation of the cantilevered beam as a function of time was carried out through the first tuning method by Ziegler Nichols, using PI and PID controllers. The results obtained were satisfactory and showed agreement with the theoretical basis presented in the work. These results demonstrate the feasibility of using LMF actuators to control strain in structural systems, in addition to highlighting the importance of modern and robust control techniques to deal with mechanical problems related to strain and/or vibration in structural systems.

Keywords: Deformation. Shape Memory Alloy. Ziegler Nichols method. LABVIEW.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perspectiva isométrica da plataforma experimental.	17
Figura 2 - Estrutura atômica das diferentes fases da LMF.....	18
Figura 3 - Efeito de memória de forma simples.	19
Figura 4 - Efeito de memória de forma duplo.	20
Figura 5 - Diagrama de blocos dos modelos do sistema proposto.	21
Figura 6 - Diagrama de corpo livre das forças presentes na extremidade da viga engastada.	24
Figura 7 - Curva de formato S a resposta ao degrau unitário de uma planta.....	26
Figura 8 - Diagrama de blocos do controlador PID na forma paralelo ideal.....	31
Figura 9 - Diagrama de blocos do controlador PID na forma série.....	31
Figura 10 - Controle PID de uma planta genérica.	31
Figura 11 - Modelo térmico implementado através do software LabVIEW.....	36
Figura 12 - Modelo de mudança de fase implementado através do software LabVIEW.....	38
Figura 13 - Deformação presente no fio implementado através do software LabVIEW.	39
Figura 14 - Módulo de elasticidade do fio implementado através do software LabVIEW.	39
Figura 15 - Força presente no fio implementado através do software LabVIEW.....	40
Figura 16 - Força presente no fio implementado através do software LabVIEW.....	40
Figura 17 - Representação das dimensões da viga engastada.	41
Figura 18 - Modelo da viga engastada implementado através do software LabVIEW.....	42
Figura 19 - Gráfico da temperatura X tempo implementado através do software LabVIEW.....	44
Figura 20 - Gráfico da fração martensita X tempo implementado através do software LabVIEW.....	45
Figura 21 - Gráfico da deformação do fio X tempo implementado através do software LabVIEW.....	46
Figura 22 - Gráfico da força do fio X tempo implementado através do software LabVIEW.	46
Figura 23 - Gráfico da fração martensita X temperatura implementado através do software LabVIEW.....	47
Figura 24 - Gráfico da deformação do fio X temperatura implementado através do software LabVIEW.....	48
Figura 25 - Gráfico da força do fio X temperatura implementado através do software LabVIEW.....	48
Figura 26 - Gráfico da deformação da viga X tempo implementado através do software LabVIEW.....	49
Figura 27 - Gráfico da deformação X número de amostra na fase austenita.....	50

Figura 28 - Gráfico da deformação X tempo na fase martensítica.	51
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Regra de sintonia de Ziegler- Nichols para o método da curva de reação.	27
Tabela 2 - Regra de sintonia de Ziegler- Nichols para o método do ponto crítico.....	28
Tabela 3 - Parâmetros do modelo térmico	35
Tabela 4 - Temperaturas de transição do fio.....	37
Tabela 5 - Parâmetros mecânicos do material.	38
Tabela 6 - Parâmetros da viga engastada.....	41
Tabela 7 - Análise comparativa entre os parâmetros dos controladores PI e PID para a fase austenita.	52
Tabela 8 - Análise comparativa entre os parâmetros dos controladores PI e PID para a fase martensítica.	52

LISTA DE ABREVIATURAS

CCC	Cúbica de Corpo Centrado
EMF	Efeito de Memória de Forma
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
LMF	Liga de Memória de Forma
NiTi	Níquel-Titânio
P	Proporcional
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1. OBJETIVOS.....	16
1.1.1. OBJETIVO GERAL.....	16
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1. PLATAFORMA EXPERIMENTAL.....	17
2.2. LIGAS DE MEMÓRIA DE FORMA.....	17
2.3. MODELAGEM MATEMÁTICA	20
2.3.1 MODELO TÉRMICO	21
2.3.2. MODELO DE MUDANÇA DE FASE	22
2.3.3. MODELO DO SISTEMA MECÂNICO	23
2.3.4. MODELO DA VIGA ENGASTADA	24
2.4. MÉTODO DE SINTONIA DE ZIEGLER NICHOLS.....	25
2.4.1 MÉTODO DA CURVA DE REAÇÃO	25
2.4.2. MÉTODO DO PONTO CRÍTICO	27
2.4.3. FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO CONTROLADOR P	28
2.4.4. FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO CONTROLADOR PI	29
2.4.5. FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO CONTROLADOR PID.....	30
2.5. TRABALHOS REALIZADOS	31
2.6. SOFTWARE LABVIEW	33
3. METODOLOGIA PARA MODELAGEM E CONTROLE.....	35
3.1. MODELO TÉRMICO DO FIO ATUADOR.....	35
3.2. MODELO DE MUDANÇA DE FASE DO FIO ATUADOR.....	37
3.3. MODELO DO SISTEMA MECÂNICO DO FIO ATUADOR.....	38
3.4. MODELO DA VIGA SIMPLEMENTE ENGASTADA.....	40
3.5. SINTONIA E CONTROLE DE PROCESSO.....	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
4.1. RESULTADO DO MODELO	44
4.2. RESULTADO PARA O MÉTODO DE SINTONIA DE ZIEGLER NICHOLS.....	49
5. CONCLUSÕES.....	54
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55

1. INTRODUÇÃO

Atualmente estudos na área de controle de vibração/deformação em sistemas estruturais têm crescido de forma considerável. Derivado a isso, a utilização conjunta de sensores, atuadores e controladores faz com que o sistema estrutural responda de maneira controlada às excitações externas, compensando os efeitos que levariam a amplitudes de resposta a se afastarem de patamares atualmente aceitáveis (PEQUENO, 2012).

Os atuadores de Liga de Memória de Forma (LMF) são considerados notáveis entre os diferentes tipos de atuadores mecânicos empregados em sistemas de controle de deformação e/ou vibração. (PEQUENO, 2012).

As LMF são materiais metálicos especiais que exibem um comportamento único conhecido como Efeito de Memória de Forma (EMF). Essas ligas têm uma notável capacidade de "lembrar" sua forma original quando expostas a variações de temperatura. Isso significa que elas podem ser deformadas significativamente sob certas condições térmicas e, em seguida, retornar à sua forma memorizada quando a temperatura é alterada novamente. Essa capacidade de "memória de forma" torna as LMFs extremamente valiosas para o desenvolvimento de atuadores, que são dispositivos que convertem energia térmica em energia mecânica (SIMÕES, 2017).

Embora os atuadores de LMF sejam considerados promissores como atuadores termomecânicos, a sua aplicação efetiva requer o uso de técnicas de controle devido a algumas dificuldades associadas ao seu comportamento. Essas dificuldades incluem a imprecisão no controle de deslocamento devido ao comportamento histerético com a variação da temperatura, a não linearidade na resposta dos materiais e as perdas energéticas decorrentes da conversão entre energia térmica e mecânica. Portanto, é necessário empregar estratégias de controle adaptadas para mitigar esses desafios e garantir o desempenho preciso e confiável dos atuadores de LMFs em aplicações práticas (CAMPOS, 2018).

Considerando o que foi mencionado, é essencial realizar uma análise da deformação e/ou vibração em uma viga engastada em apenas uma extremidade, assim como identificar métodos para controlar essas deformações por meio da aplicação de atuadores com materiais de liga com memória de forma.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho consiste na modelagem e simulação da deformação de uma viga simplesmente engastada utilizando o *software* Labview.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

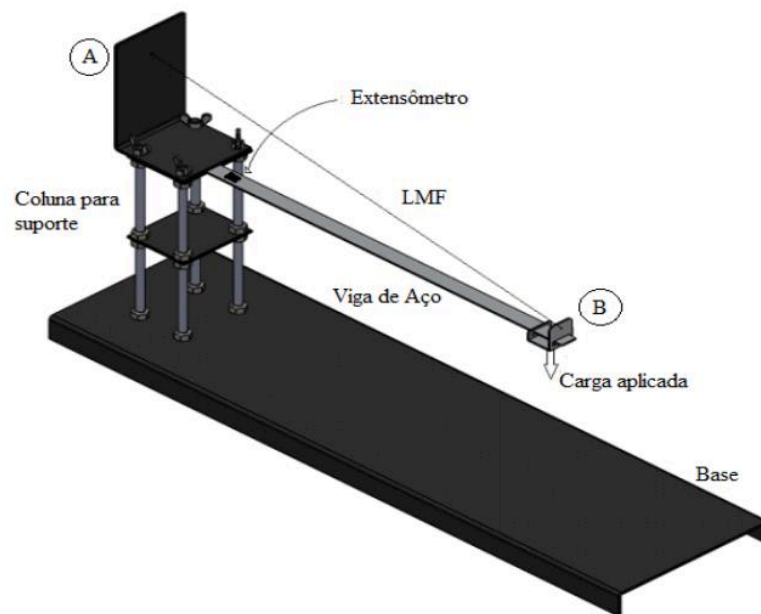
- Realizar a modelagem do sistema (liga + viga simplesmente engastada) proposto;
- Simular no Labview a modelagem do sistema proposto;
- Simular no Labview o método de sintonia de Ziegler Nichols no sistema proposto para obter os parâmetros do controlador;

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. PLATAFORMA EXPERIMENTAL

Na Figura 1, ilustra-se a estrutura física de uma plataforma experimental, originalmente desenvolvida por LIMA (2008) e modificada por CAMPOS (2018), em uma perspectiva isométrica. Nessa plataforma, um fio de LMF é utilizado como um atuador para controlar a posição e/ou deformação de uma viga simplesmente engastada. A viga é deformada pelo seu próprio peso em balanço e também pode ser submetida a uma carga externa opcional, causando uma deformação na viga e no fio de LMF. Portanto, é necessário aplicar uma potência elétrica ao fio por meio de uma fonte externa, de forma a fazê-lo recuperar sua forma inicial, gerando uma força que retorna a viga à posição desejada.

Figura 1- Perspectiva isométrica da plataforma experimental.



Fonte: CAMPOS (2018).

2.2. LIGAS DE MEMÓRIA DE FORMA

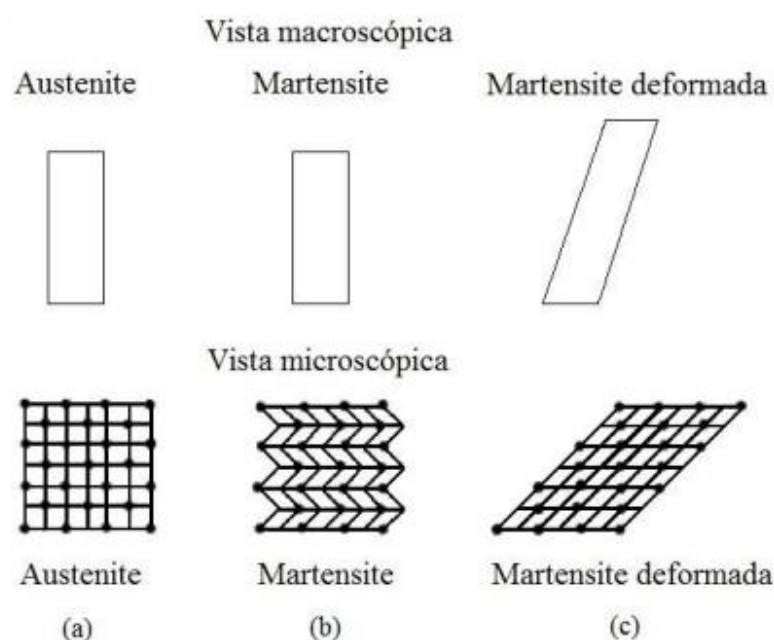
As ligas de Níquel-Titânio (NiTi), conhecidas como NITINOL, foram descobertas em 1963, mas inicialmente apresentaram muitas dificuldades e fenômenos confusos durante cerca de duas décadas. Foi somente em 1982 que um conhecimento básico sólido foi estabelecido, relacionando a microestrutura dessas ligas com o EMF. Desde então, o uso dessas ligas em

aplicações de EMF tem crescido significativamente, graças à sua capacidade de apresentar deformações consideráveis em função da temperatura (CAMPOS, 2018).

As ligas de NiTi têm propriedades únicas, como: a capacidade de se recuperar de grandes deformações, mesmo após ciclos repetidos, e de se adaptar a diferentes temperaturas. Isso é possível devido à sua estrutura cristalina, que passa por uma mudança reversível durante o processo de deformação (DIAS, 2005).

As LMF possuem características relacionadas à sua estrutura cristalina, que consiste em 2 (duas) fases principais com estruturas e propriedades distintas. A fase austenita é conhecida como a fase de alta temperatura e possui uma estrutura cristalina chamada de Cúbica de Corpo Centrado (CCC), ilustrada na Figura 2 (a). Já a fase martensítica é a fase de baixa temperatura e pode apresentar várias orientações cristalinas, como tetragonal, ortorrômbica ou monoclínica, como ilustrada na Figura 2 (b) e (c). A temperatura é o fator determinante para o início e o término de cada fase. A temperatura em que a austenita começa a se transformar em martensítica é chamada de Martensita Inicial (MS), enquanto a temperatura em que essa transformação se completa é conhecida como Martensita Final (MF). Da mesma forma, as temperaturas em que a martensita começa a se transformar em austenita são denominadas Austenita Inicial (AS) e Austenita Final (AF), respectivamente (SIMÕES, 2016). Na Figura 2, ilustra-se a estrutura atômica das diferentes fases da LMF.

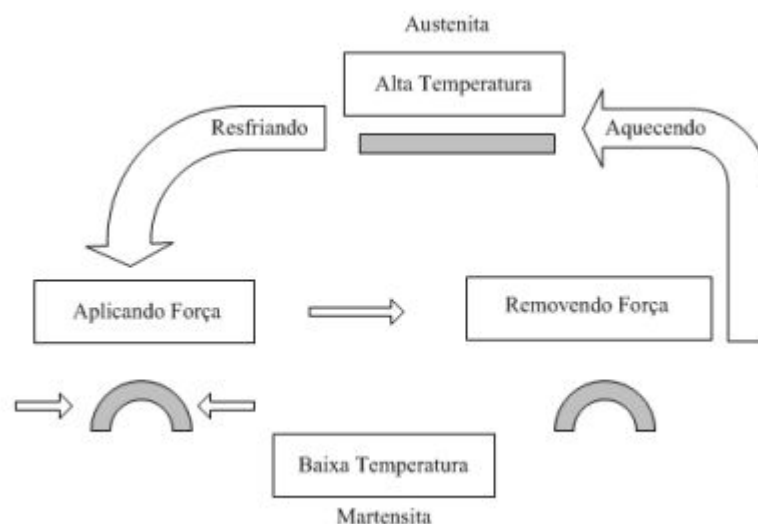
Figura 2 - Estrutura atômica das diferentes fases da LMF.



O EMF é um fenômeno observado em certos materiais que lhes permite recuperar sua forma original após terem sido deformados mecanicamente. Esse comportamento é possível graças a mudanças na estrutura cristalina do material durante o processo de deformação, que permitem que ele "lembra" de sua forma original.

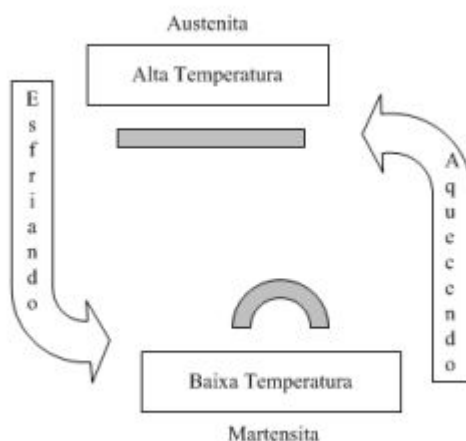
Existem duas formas distintas de observar o efeito memória de forma: o caminho simples, ilustrado na Figura 3 e o caminho duplo, ilustrado na Figura 4. No caminho simples, o material é deformado mecanicamente e, ao ser aquecido até uma determinada temperatura, ele recupera sua forma original. No entanto, se o material for resfriado novamente, ele não consegue retornar à sua forma deformada. Já no caminho duplo, o material é capaz de memorizar duas formas diferentes: uma para temperaturas mais baixas e outra para temperaturas mais altas. Dessa forma, o material pode ser deformado em uma dessas temperaturas e, ao ser aquecido ou resfriado para a outra temperatura, ele é capaz de recuperar sua forma original ou retornar à forma deformada, respectivamente. O caminho duplo do efeito memória de forma é possível graças à existência de duas fases distintas no material, uma chamada de fase martensítica e outra de fase austenita. Cada fase corresponde a uma determinada temperatura, e a mudança entre elas ocorre por meio de um processo chamado de transformação martensítica (CASTILHO, 2011), (OTUBO, 1994).

Figura 3 - Efeito de memória de forma simples.



Fonte: Adaptado de LIMA (2008).

Figura 4 - Efeito de memória de forma duplo.



Fonte: Adaptado de LIMA (2008).

Graças à sua capacidade de recuperar a forma original, as ligas de NiTi têm diversas aplicações em áreas como medicina, engenharia aeroespacial, automotiva e até mesmo em jóias. Na medicina, por exemplo, essas ligas são usadas em stents vasculares, próteses ortopédicas, cateteres, fios de sutura, entre outros dispositivos. Na engenharia aeroespacial e automotiva, elas são usadas em molas, amortecedores e componentes estruturais. Já na joalheria, as ligas de NiTi são usadas em peças que podem ser deformadas para se ajustarem ao formato do corpo e recuperar sua forma original posteriormente (RODRIGUES, 2016), (SPINI, 2012).

2.3. MODELAGEM MATEMÁTICA

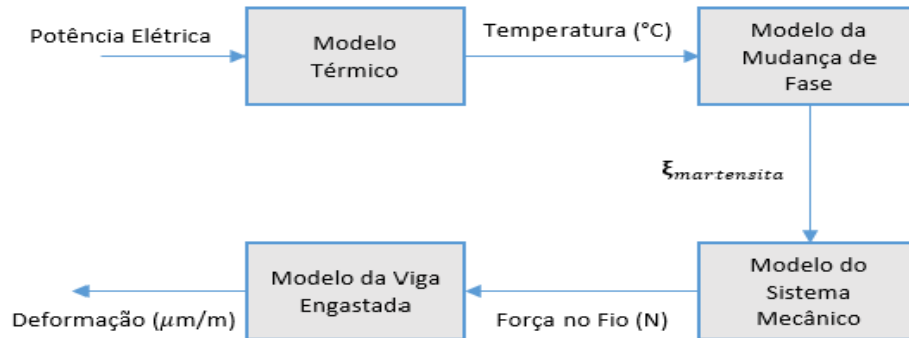
A modelagem matemática do sistema proposto é composta por 4 (quatro) modelos distintos: o modelo térmico, o modelo de mudança de fase, o modelo do sistema mecânico e o modelo da viga engastada. Cada um desses modelos descreve aspectos diferentes do sistema e juntos, formam a estrutura do sistema padrão.

O primeiro modelo, o térmico, é responsável por descrever as variações de temperatura do sistema e como elas afetam as propriedades das LMF. O segundo modelo, o de mudança de fase, descreve a transição da estrutura cristalina das LMF durante o processo de deformação e recuperação. Já o modelo do sistema mecânico descreve as características mecânicas das LMF e como elas se comportam sob diferentes forças.

Por fim, o modelo da viga engastada descreve a estrutura mecânica que será submetida às LMF. Na Figura 5, ilustra-se o diagrama de blocos esquemáticos desses modelos, que juntos

compõem a estrutura completa do sistema. Esses modelos são essenciais para entender e simular o comportamento das LMF em diferentes aplicações, permitindo otimizar o uso dessas ligas em diversas áreas da engenharia, como na fabricação de próteses médicas, molas de amortecimento e outros dispositivos.

Figura 5 - Diagrama de blocos dos modelos do sistema proposto.



Fonte: BARROSO (2019).

Na Figura 5, ilustra-se que uma potência elétrica é aplicada no atuador da Liga de Memória de Forma (LMF), para aquecê-lo através do efeito Joule. Isso resulta em uma mudança na estrutura cristalina do material, conhecida como mudança de fase, que pode ser caracterizada pela fração martensita ξ . A fração de martensita ξ , que varia de 0 a 1, é um indicador do estado de fase do material, sendo $\xi = 1$ (100%) quando está na fase martensítica e $\xi = 0$ (0%) quando está na fase austenita. Essa emissão afeta diretamente a força exercida pelo fio do atuador da Liga de Memória de Forma (LMF) e, por consequência, influencia a deformação resultante na viga engastada (BARROSO, 2019).

2.3.1 MODELO TÉRMICO

O modelo térmico do atuador da liga de memória de forma é baseado nas propriedades termoelásticas da liga de memória de forma utilizadas como atuador. Essas ligas são materiais inteligentes que podem recuperar sua forma original após serem deformadas quando são aquecidas acima de sua temperatura de transformação de fase. Com base nisso o modelo utilizado é obtido através do balanço térmico no fio, de modo que o calor Q_{LMF} é representado pela diferença do calor fornecido pela fonte externa Q_{fonte} e as perdas por convecção Q_{conv} , condução Q_{cond} e radiação Q_{rad} , como está representado na Equação 1. Além disso, pode-se

dizer que a parcela de calor referente a radiação pode ser considerada desprezível, pois a mesma se trata de aplicações presentes na atmosfera, igualmente o que se pode dizer com a troca de calor, ao considerar que a temperatura atual é constante ao longo da LMF (BARROSO, 2019). Assim, a Equação 1 se torna a Equação 2.

$$Q_{LMF} = Q_{fonte} - Q_{conv} - Q_{cond} - Q_{rad} \quad (1)$$

$$Q_{LMF} = Q_{fonte} - Q_{conv} \quad (2)$$

Através da Equação 3, é possível obter a temperatura T no fio, por meio de uma equação diferencial de primeira ordem, que é derivada da Equação 2.

$$m_{LMF} \cdot c_p \frac{dT}{dt} = P_{LMF} - h \cdot S(T - T_{amb}) \quad (3)$$

Em que, m_{LMF} representa a massa do fio de LMF, c_p o calor específico do fio, P_{LMF} a potência elétrica fornecida através da fonte externa, h o coeficiente de convecção, S a área superficial da LMF e T_{amb} é a temperatura ambiente.

2.3.2. MODELO DE MUDANÇA DE FASE

As LMF exibem uma histerese na relação entre a fração de martensita e a temperatura. Do ponto de vista físico, essa histerese está associada à dissipação e assimilação de calor latente durante a mudança de fase. Como resultado, tanto o aquecimento quanto o resfriamento do material são atrasados (BARROSO, 2019).

As Equações 4 e 5 apresentam o modelo matemático da fração de martensita em função da temperatura para o aquecimento e resfriamento, respectivamente. Essas relações foram derivadas de forma empírica utilizando a teoria estatística de Fermi-Dirac, desenvolvida por Liang e Rogers, e têm sido amplamente utilizadas em diversos estudos, como por exemplo em Velázquez e Pissaloux (2012), Abdelaal e Nagib (2014) e CAMPOS (2018) (BARROSO, 2019).

$$\xi_a(T) = \begin{cases} 0, & T > A_f \\ 0,5 \left[\cos \left(\pi \frac{T - A_s}{A_f - A_s} \right) + 1 \right], & A_s < T < A_f \\ 1, & T < A_s \end{cases} \quad (4)$$

$$\xi_r(T) = \begin{cases} 0, & T > M_s \\ 0,5 \left[\cos \left(\pi \frac{T - M_f}{M_s - M_f} \right) + 1 \right], & M_f < T < M_s \\ 1, & T < M_f \end{cases} \quad (5)$$

Em que, $\xi_a(T)$ representa a fração martensita para o aquecimento e $\xi_r(T)$ a fração martensita para o resfriamento.

2.3.3. MODELO DO SISTEMA MECÂNICO

No modelo mecânico do sistema do atuador de LMF, é possível estabelecer uma relação entre a deformação ε e a fração de martensita ξ da LMF. Essa relação permite que o atuador realize um trabalho mecânico após sofrer a deformação (CAMPOS, 2018). Assim, pode-se dizer que de acordo com a equação diferencial de primeira ordem, descrita na Equação 6, é possível determinar a deformação presente na LMF.

$$\varepsilon + \tau_{mec} \frac{d\varepsilon}{dt} = \varepsilon_m [1 - \xi(T)] \quad (6)$$

Em que, ε é a deformação percentual do fio de LMF em relação ao seu comprimento, τ_{mec} representa a constante de tempo mecânica do sistema e ε_m é a máxima deformação recuperável do fio.

De acordo com Xiaoguang et al. (2017), o módulo de elasticidade pode ser formulado em função da fração martensita ξ , como também dos módulos de elasticidade das fases martensítica E_m e austenita E_a (BARROSO, 2019). Nesse sentido, a Equação 7 apresenta o módulo de elasticidade do fio.

$$E_{LMF} = \xi \cdot E_m + (1 - \xi) \cdot E_a \quad (7)$$

Ademais, a força exercida no fio durante a deformação está relacionada ao módulo de elasticidade E_{LMF} , da deformação ε e da área transversal A_t dá LMF (CAMPOS, 2018). Assim, essa força está apresentada na Equação 8.

$$F_{fio} = E_{LMF} \cdot \varepsilon \cdot A_t \quad (8)$$

2.3.4. MODELO DA VIGA ENGASTADA

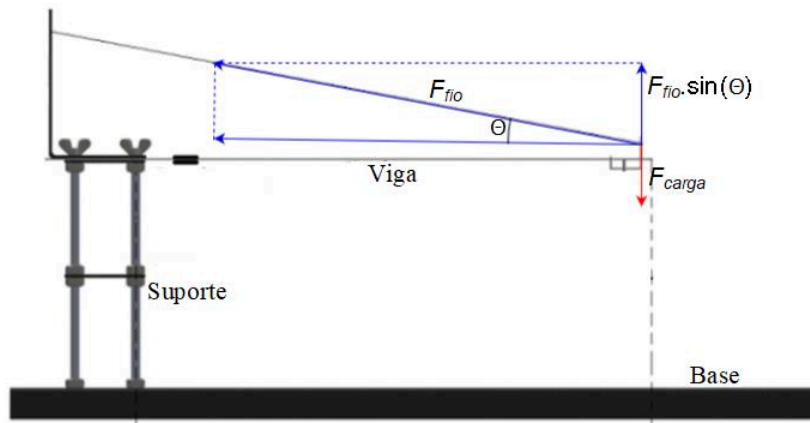
Em relação ao modelo da viga engastada, pode-se dizer que: A deformação ε_{viga} na extremidade livre de uma viga engastada, causada pela força resultante F_R aplicada nessa extremidade, pode ser descrita em termos de comprimento L , largura a , espessura b e o módulo de elasticidade da viga E_{viga} , conforme indicado na Equação 9.

$$\varepsilon_{viga} = \frac{6 \cdot F_R \cdot L}{a \cdot b^2 \cdot E_{viga}} \quad (9)$$

Na Figura 6, ilustra-se o diagrama de corpo livre das forças atuantes na extremidade da viga engastada. Observa-se que a força resultante é calculada pela diferença $F_{fio} \cdot \sin(\theta) - F_{carga}$. Com base nisso, obtém-se a Equação 10.

$$\varepsilon_{viga} = \frac{6 \cdot L}{a \cdot b^2 \cdot E_{viga}} [F_{fio} \cdot \sin(\theta) - F_{carga}] \quad (10)$$

Figura 6 - Diagrama de corpo livre das forças presentes na extremidade da viga engastada.



Fonte: CAMPOS (2018).

2.4. MÉTODO DE SINTONIA DE ZIEGLER NICHOLS

O método de Ziegler-Nichols é uma técnica clássica de sintonia de controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) amplamente utilizada em sistemas de controle industrial. Este método foi proposto por JG Ziegler e NB Nichols em 1942, como uma maneira de ajustar rapidamente os parâmetros de um controlador PID para alcançar um desempenho em um sistema de controle.

O método de Ziegler-Nichols envolve a realização de experimentos no sistema de controle para obter informações sobre a resposta dinâmica do sistema. A partir dos dados coletados, é possível determinar os parâmetros do controlador PID, incluindo o ganho proporcional, o tempo integral e o tempo derivativo, que permitirão um controle adequado do sistema.

O controlador PID, que utiliza uma combinação de três ações de controle – proporcional, integral e derivativo; é amplamente utilizado em sistemas de controle industrial e é considerado o mais comum nessa área. Há uma grande variedade de métodos de sintonização e regras disponíveis na literatura para ajustar os parâmetros desse controlador, incluindo técnicas de sintonização automática (OGATA, 2010).

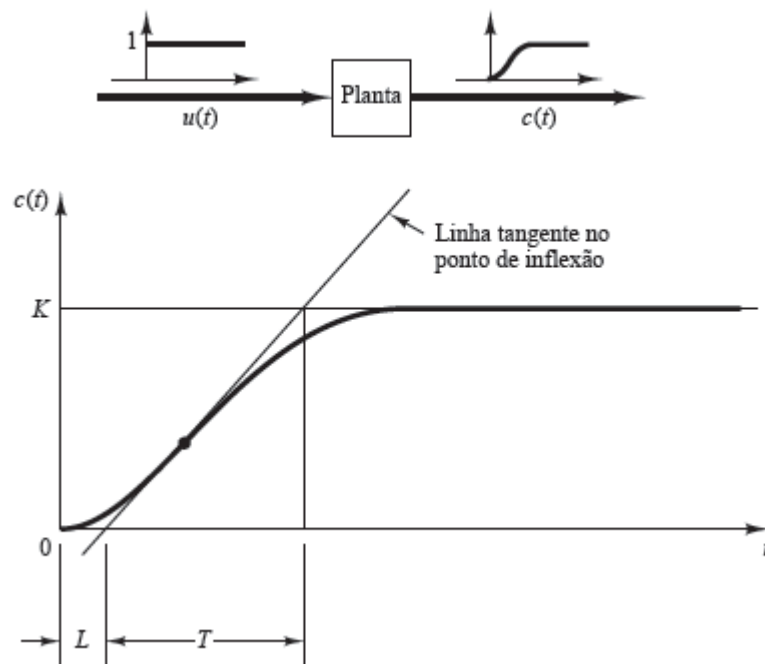
Para obter um bom desempenho do controlador PID, é necessário ajustar seus parâmetros por meio de um processo de sintonia. O trabalho pioneiro de Ziegler e Nichols (1942) propõe dois métodos para essa sintonia. O primeiro método, denominado curva de reação, consiste em avaliar a resposta do processo em malha aberta a um sinal degrau e utilizar essa informação para ajustar os parâmetros do controlador. O segundo método, conhecido como método do ponto crítico, consiste em aumentar gradativamente a ação proporcional da controladora em malha fechada até que a saída do sistema apresente oscilações sustentadas, e então usar essa informação para determinar os parâmetros da controladora. Ambos os métodos são amplamente utilizados para sintonização de controladores PID e têm sido objeto de estudos e aprimoramentos ao longo dos anos (OGATA, 2010), (GONÇALVES, 1997), (DE MOURA, 2021), (QUEIROZ, 2023).

2.4.1 MÉTODO DA CURVA DE REAÇÃO

O método da curva de reação envolve a obtenção da resposta temporal de um sistema em modo aberto, quando submetido a uma entrada degrau $u(t)$. Se a planta não apresentar polos complexos dominantes ou integradores, a resposta em curva da saída $c(t)$ assume uma forma S característica. O mesmo, busca analisar a dinâmica do sistema a partir da resposta ao degrau, buscando identificar características importantes do comportamento da planta, como a presença de atrasos, oscilações, tempo de subida e tempo de acomodação (OGATA, 2010), (RIBEIRO, 2012).

Para caracterizar a curva de formato S são necessárias 2 (duas) constantes de tempo: o tempo de atraso L e a constante de tempo T , no qual as mesmas são obtidas ao traçar uma reta tangente que passa pelo ponto de inflexão até tocar o eixo do tempo e a linha paralela ao eixo do tempo que simboliza o ponto de ganho K de regime permanente no eixo do sinal de saída da planta (BARROSO, 2019), (RIBEIRO, 2012), (ARAÚJO, 2007), como ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Curva de formato S a resposta ao degrau unitário de uma planta.



Fonte: OGATA (2010).

Derivado a isso, podemos dizer que a função de transferência da resposta do sistema $\frac{C(s)}{U(s)}$, pode ser representada através de um sistema de primeira ordem com atraso (OGATA, 2010), através da Equação 10:

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{K}{Ts + 1} e^{-Ls} \quad (11)$$

Desse modo, para o método da curva de reação, temos os seguintes parâmetros do controlador, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 - Regra de sintonia de Ziegler- Nichols para o método da curva de reação.

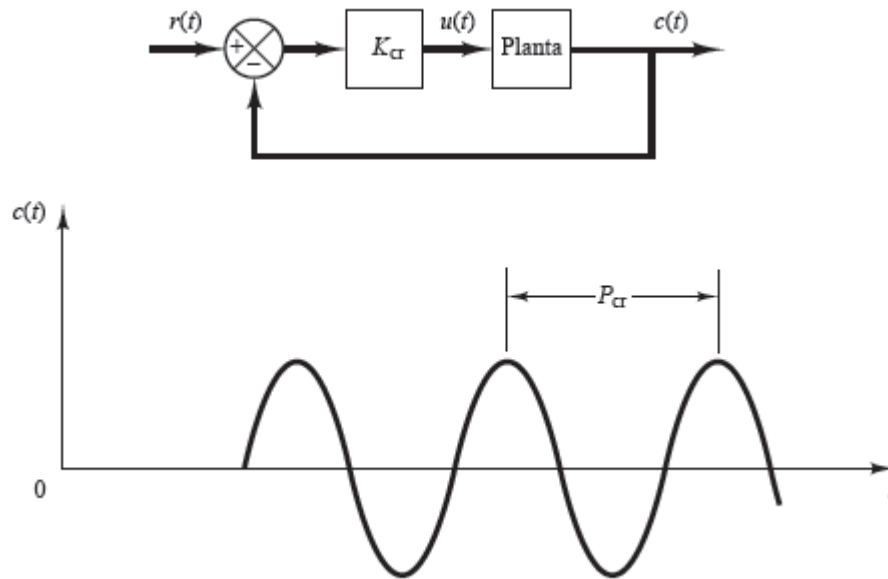
<i>Tipo de Controlador</i>	<i>Kp</i>	<i>Ti</i>	<i>Td</i>
<i>P</i>	$\frac{T}{L}$	∞	0
<i>PI</i>	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
<i>PID</i>	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

Fonte: Adaptado de OGATA (2010).

2.4.2. MÉTODO DO PONTO CRÍTICO

O método do ponto crítico, ilustrado na Figura 8 é uma técnica de ajuste de controladores que utiliza apenas a ação proporcional em sistemas de controle em malha fechada. Nesse método, a constante de tempo integral (T_i) é considerada infinita e a constante de tempo derivativa (T_d) é igual a zero. O controlador proporcional é ajustado aumentando-se o valor de K_p , no qual a saída do sistema apresenta oscilações sustentadas pela primeira vez, em um ponto crítico conhecido como K_{cr} , (OGATA, 2010), (RIBEIRO, 2012), com isso, pode-se determinar o ganho crítico K_{cr} e o seu período crítico P_{cr} correspondente.

Figura 8 - Oscilação sustentada com período P_{cr} para o método do ponto crítico.



Fonte: OGATA (2010).

Desse modo, para o método do ponto crítico, temos os seguintes parâmetros do controlador, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Regra de sintonia de Ziegler- Nichols para o método do ponto crítico.

<i>Tipo de Controlador</i>	<i>K_p</i>	<i>T_i</i>	<i>T_d</i>
<i>P</i>	$0,5K_{cr}$	∞	0
<i>PI</i>	$0,45K_{cr}$	$\frac{1}{1,2}P_{cr}$	0
<i>PID</i>	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

Fonte: Adaptado de OGATA (2010).

2.4.3. FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO CONTROLADOR P

Um controlador que utiliza somente a ação proporcional estabelece uma relação entre o sinal de controle $u(t)$ e o sinal de erro $e(t)$. Entretanto, devido à ausência de outras ações de controle, esse tipo de controlador geralmente apresenta um erro de regime permanente quando permanece a um sinal de referência fixo. Assim, quanto maior for o ganho K_p do controlador proporcional, menor será o erro de regime permanente apresentado pelo sistema. Em outras

palavras, o aumento do ganho proporcional leva a uma redução do erro de regime permanente, tornando o sistema mais preciso em relação à referência desejada. No entanto, é importante ressaltar que o aumento excessivo do ganho pode gerar instabilidade no sistema e prejudicar o desempenho do controle (FRANKLIN *et al.*, 2013), (CAMPOS, 2018), visto na Equação 12.

$$u(t) = K_p e(t) \quad (12)$$

Dessa forma, a função de transferência do Controlador P no domínio de Laplace ilustra-se na Equação 13.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (13)$$

2.4.4. FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO CONTROLADOR PI

Um controlador que utiliza a ação proporcional em conjunto com a ação integral estabelece uma relação entre o sinal de controle $u(t)$ e o sinal de erro $e(t)$. A adição do termo integral auxilia no problema do controlador P, que tendem a apresentar um erro de regime permanente. Esse termo consiste em um somatório dos valores acima do sinal de erro $e(t)$, que é adicionado ao sinal de controle $u(t)$ e, assim, ajuda a evitar o erro de regime permanente do sistema. Em outras palavras, o controlador proporcional-integral (PI) utiliza o termo integral para eliminar o erro de regime permanente, que pode surgir em sistemas controlados apenas com o controlador proporcional. O termo integral atua como um "corretor" de longo prazo que acumula os erros passados e os corrige ao longo do tempo (FRANKLIN *et al.*, 2013), (BARROSO, 2019), (ROVEA, 2017), visto na Equação 14.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (14)$$

Dessa forma, a função de transferência do Controlador PI no domínio de Laplace ilustra-se na Equação 15.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (15)$$

2.4.5. FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO CONTROLADOR PID

Um controlador que combina as ações proporcional, integral e derivativa é a junção de um controlador PI com o termo derivativo. A relação entre o sinal de controle $u(t)$ e o sinal de erro $e(t)$ pode ser vista na Equação 16. O termo derivativo do controlador depende da taxa de variação do erro e , assim, tende a antecipar a correção do sinal do erro para reduzir o tempo de resposta e melhorar a estabilidade do sistema (OGATA, 2010), (CAMPOS, 2018), (FACCIN, 2004).

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (16)$$

Dessa forma, a função de transferência do Controlador PID no domínio de Laplace ilustra-se na Equação 17.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (17)$$

Nas Figuras 8 e 9, ilustram-se as representações do controlador PID nas formas paralela ideal e série, respectivamente. A forma paralela ideal é a implementação mais comum do controlador PID, na qual é representada pelos ganhos integral (K_i) e derivativo (K_d), os quais se relacionam com o ganho proporcional (K_p) por meio das Equações 18 e 19, respectivamente.

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (18)$$

$$K_d = K_p T_d \quad (19)$$

Na figura 10, ilustra-se um sistema de malha fechada com um controlador PID.

controle de deformação. Foi utilizado um controlador PI para controlar a deformação da barra e observar a largura de banda que o sistema responde para diferentes tipos de sinais de referência. Foi constatado que a deformação na barra pode ser controlada com sucesso por meio de uma fonte de tensão elétrica que aquece os fios de LMF por efeito Joule. A plataforma permitiu determinar a relação não-linear e linear e o surgimento de histerese no comportamento dos fios de LMF.

No trabalho de PEQUENO (2012), foi realizado um experimento que foi conduzido para controlar a posição de equilíbrio de uma viga em balanço, utilizando um atuador de Liga com Memória de Forma e extensômetros como sensores. Diferentes técnicas de controle foram aplicadas, utilizando o software LabVIEW em um microcomputador pessoal, conectado à plataforma por meio de uma placa PCI-Express. Controladores PID foram implementados com sintonia automática dos parâmetros utilizando a ferramenta de Auto-tuning do LabVIEW e também foram ajustados manualmente utilizando o método geométrico das raízes. Os ensaios foram realizados com diferentes frequências e cargas na extremidade livre da viga, além de diferentes tipos de sinais de entrada, como onda senoidal, quadrada e triangular. A potência elétrica utilizada durante os ensaios foi monitorada e foi observado que o controle realizado com fonte de corrente apresentou melhores resultados do que o controle com fonte de tensão. Além disso, a sintonia manual do controlador obteve melhores resultados do que a sintonia automática.

No trabalho de CAMPOS (2018), o texto aborda a proposta de técnicas de controle para contornar a necessidade de obtenção de um modelo analítico de uma planta com atuador de Níquel-Titânio. Foram aplicados sinais do tipo degrau para verificar o funcionamento do modelo analítico em malha aberta e implementado um modelo identificado de primeira ordem com atraso de transporte através do método da curva de reação. Foram projetados controladores PI e PID, além de um controlador Fuzzy-PID híbrido para seleção dos ganhos do controlador PID. Foram realizados quatro cenários distintos para análise de resultados, com referência quadrada e senoidal com e sem carga. Os resultados obtidos que, para controladores mais agressivos, o controlador PID apresentou melhor resposta em todos os cenários, enquanto para controladores com agressividade normal, tanto o PI quanto o PID apresentaram respostas razoáveis sem carga, mas o PI não foi robusto em relação à regulação da deformação da viga com carga. Para controladores menos agressivos, o PID foi forçado para o rastreamento da referência, mas o PI não conseguiu rastrear a referência com carga. O controlador híbrido apresentou mais robustez para situações com carga mecânica. Em geral, os controladores

projetam pela curva de reação e o controlador híbrido apresenta o melhor compromisso entre índice de desempenho e carga mecânica.

No trabalho de BARROSO (2019), foi realizado um estudo para controlar a posição de uma viga de aço engastada usando um atuador com Liga de Memória de Forma. Os objetivos do estudo incluíram a caracterização do material, modelagem matemática do sistema, simulação dos modelos no software e comparação com resultados experimentais, bem como a aplicação de um sistema de controle em malha fechada para a deformação da viga. Os controladores PI e PID foram utilizados e seus desempenhos foram avaliados usando o índice de desempenho ISE, tempo de subida, tempo de acomodação e sobressinal. Para validar o modelo analítico, o software MATLAB R2018a e sua ferramenta de simulação Simulink foram usados para construir o modelo da plataforma em malha aberta. O sistema de controle requer uma potência mínima de 2,4 W e é capaz de produzir uma transformação martensita-austenita completa e deformar a viga em até 350 $\mu\text{m/m}$. O controlador PID mostrou-se mais eficaz que o controlador PI, devido à sua maior complexidade e robustez. O método de projeto do controlador PID do Ponto Crítico mostrou-se mais eficaz do que o método da Curva de Reação.

2.6. SOFTWARE LABVIEW

O LabVIEW, que significa "Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench", é um software desenvolvido pela National Instruments, uma empresa líder em instrumentação virtual e automação. O mesmo fornece um ambiente de programação gráfica que permite aos usuários criar programas interativos usando uma abordagem baseada em diagramas de blocos, conhecidos como "diagramas de fluxo de dados", nos quais elementos do programa são representados por blocos gráficos (conhecidos como "VIs", sigla para Virtual Instruments) e conectados por fios para definir a lógica de funcionamento (National, 2021).

Uma das principais características do LabVIEW é sua capacidade de integração com hardware de medição e controle. Ele suporta uma ampla gama de dispositivos de aquisição de dados, como placas de aquisição de dados, sensores, atuadores e instrumentos de medição, o que o torna uma ferramenta poderosa para o desenvolvimento de sistemas de controle e automação em tempo real. Com o LabVIEW, os usuários podem criar interfaces de usuário customizadas, adquirir dados de sensores, controlar atuadores, processar dados em tempo real

e interagir com dispositivos de hardware em aplicações de controle e automação (National, 2021).

O LabVIEW é amplamente utilizado em uma variedade de setores e indústrias. Na área de engenharia, ele é frequentemente utilizado para o desenvolvimento de sistemas de controle de processos, automação industrial, testes automatizados e simulação. Nas ciências da computação, o LabVIEW é utilizado em aplicações como processamento de sinais, visão computacional e robótica. Na física, o mesmo é utilizado em experimentos e simulações para aquisição de dados e análise. Na biotecnologia, o LabVIEW é utilizado em aplicações de monitoramento e controle de processos biológicos. Além disso, o LabVIEW é amplamente utilizado em ambientes de pesquisa acadêmica e educação para o ensino de conceitos de controle, automação e aquisição de dados (National, 2021).

O LabVIEW é conhecido por sua flexibilidade e facilidade de uso. Sua interface gráfica intuitiva permite que os usuários criem programas de forma visual, arrastando e conectando blocos gráficos para definir a lógica de funcionamento. Ele também possui uma ampla biblioteca de funções e ferramentas pré-construídas que podem ser facilmente incorporadas aos programas, o que agiliza o processo de desenvolvimento. Além disso, o LabVIEW oferece recursos avançados, como depuração em tempo real, visualização de dados em tempo real e suporte a múltiplas linguagens de programação, o que o torna uma ferramenta poderosa para o desenvolvimento de aplicações complexas (National, 2021).

3. METODOLOGIA PARA MODELAGEM E CONTROLE

Nesse trabalho, realizou-se a análise da deformação de uma viga simplesmente engastada, usando o programa LabVIEW. Para isso, utilizou-se o método de resolução de Euler de primeira ordem, através desse método, foi possível modelar e controlar a deformação da viga e simular seu comportamento ao longo do tempo.

Para a simulação da modelagem, utilizou-se o modelo do fio atuador de Liga de Memória de Forma de Ni-Ti (modelo térmico, modelo de mudança de fase e modelo do sistema mecânico), juntamente com o modelo da viga simplesmente engastada, conforme as Equações apresentadas na seção 2.3. E para a obtenção dos parâmetros do controlador, utilizou-se o primeiro método de sintonia de Ziegler Nichols, o método da curva de reação para os controladores PI e PID.

3.1. MODELO TÉRMICO DO FIO ATUADOR

Foi utilizado o modelo térmico de um fio feito de Liga de Memória de Forma de Ni-Ti, descrito pela Equação 3. Os parâmetros necessários para essa equação foram obtidos a partir de informações contidas no trabalho de BARROSO (2019) e na folha de dados de DYNALLOY (2021). Esses parâmetros estão listados na Tabela 3.

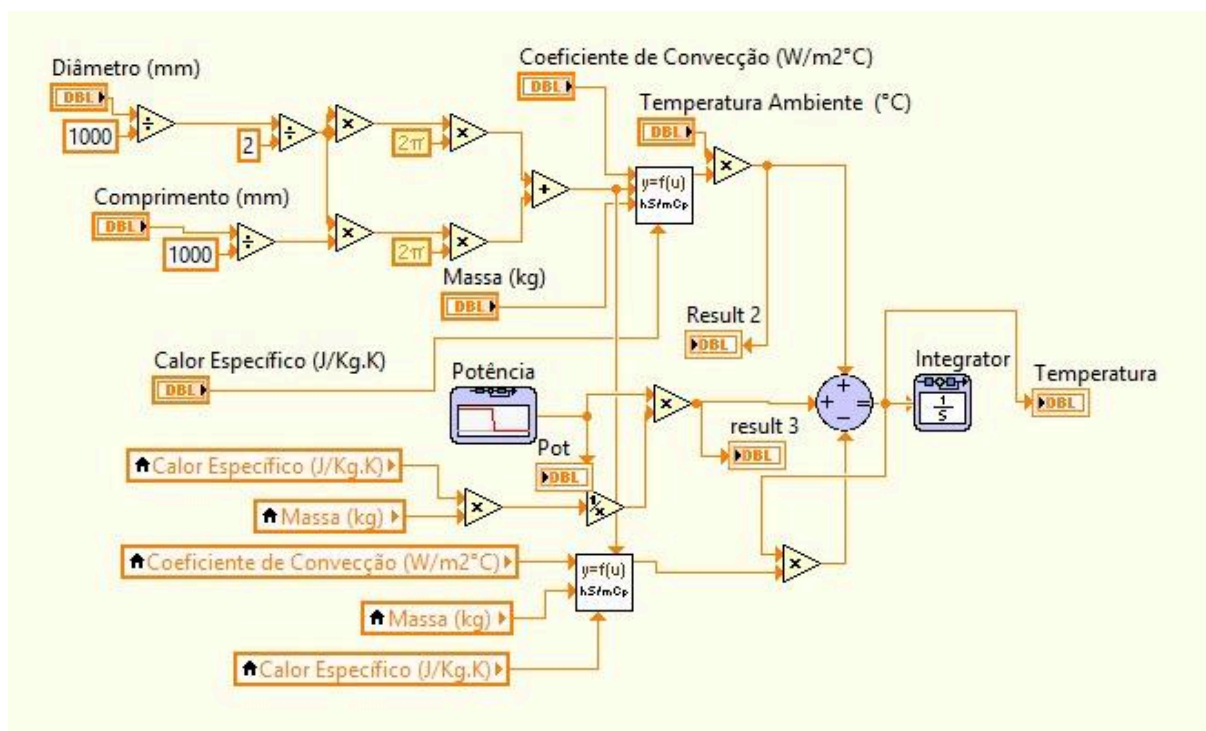
Tabela 3 - Parâmetros do modelo térmico

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Fonte</i>
<i>d</i>	0,2mm	<i>Experimental</i>
<i>l</i>	789mm	<i>Experimental</i>
<i>S</i>	$4,96 \cdot 10^{-4} m^2$	<i>Experimental</i>
<i>V</i>	$2,48 \cdot 10^{-8} m^3$	<i>Experimental</i>
<i>T_{amb}</i>	22°C	<i>Experimental</i>
<i>m_{LMF}</i>	$1,58 \cdot 10^{-4} Kg$	<i>Experimental</i>
<i>ρ_{LMF}</i>	6,450Kg/m ³	<i>Fabricante</i>
<i>C_p</i>	837j/Kg.K	<i>Fabricante</i>
<i>K</i>	1800W/ (m.K)	<i>Fabricante</i>
<i>R_{LMF}</i>	29Ω/m	<i>Fabricante</i>
<i>h</i>	150W/m ² . °C	<i>Fabricante</i>

Fonte: Adaptado de BARROSO (2019).

Com isso, na Figura 11, é apresentado o modelo térmico do fio de Liga de Memória de Forma de Ni-Ti, que foi implementado utilizando o software LabVIEW. Esse modelo recebe como entrada uma potência elétrica aplicada ao fio e tem como saída a temperatura do fio.

Figura 11 - Modelo térmico implementado através do software LabVIEW.



Fonte: Autoria própria (2023).

No início do experimento, a entrada do sistema foi configurada para uma potência elétrica de 3,5 W por 10 segundos, e em seguida por uma potência elétrica de 0 W por mais 10 segundos. Isso foi feito para investigar o comportamento das variáveis relacionadas ao fio atuador de Liga de Memória de Forma de Ni-Ti e à viga simplesmente engastada, durante o aquecimento e resfriamento. As variáveis estudadas nesta etapa inicial incluíram a temperatura, a fração martensita, a deformação do fio, a força no fio e a deformação na viga. Durante os primeiros 10 segundos, foram seguidas as respostas no tempo dessas variáveis. Já na etapa de resfriamento, foi possível analisar o comportamento histerético do material em relação à temperatura, ou seja, como a mudança de temperatura afetou as propriedades do material e suas respostas.

3.2. MODELO DE MUDANÇA DE FASE DO FIO ATUADOR

O modelo de mudança de fase do fio de LMF foi implementado por meio das Equações 4 e 5, que envolve parâmetros como as temperaturas de transformação. Essas temperaturas foram retiradas do trabalho de BARROSO (2019) e estão listadas na Tabela 4. Essas temperaturas são importantes para o comportamento histerético do fio e foram utilizadas durante a fase inicial de aquecimento e resfriamento do sistema, quando um degrau de potência elétrica foi aplicado e removido. Essas temperaturas permitem uma modelagem mais precisa do comportamento do fio de LMF durante o aquecimento e resfriamento, ajudando a compreender melhor as variáveis em estudo, como temperatura, fração martensita, deformação do fio, força no fio e deformação na viga.

Tabela 4 - Temperaturas de transição do fio.

<i>Temperatura</i>	<i>Valor</i>
M_f	41,8°C
M_s	64,1°C
A_s	55,9°C
A_f	66,8°C

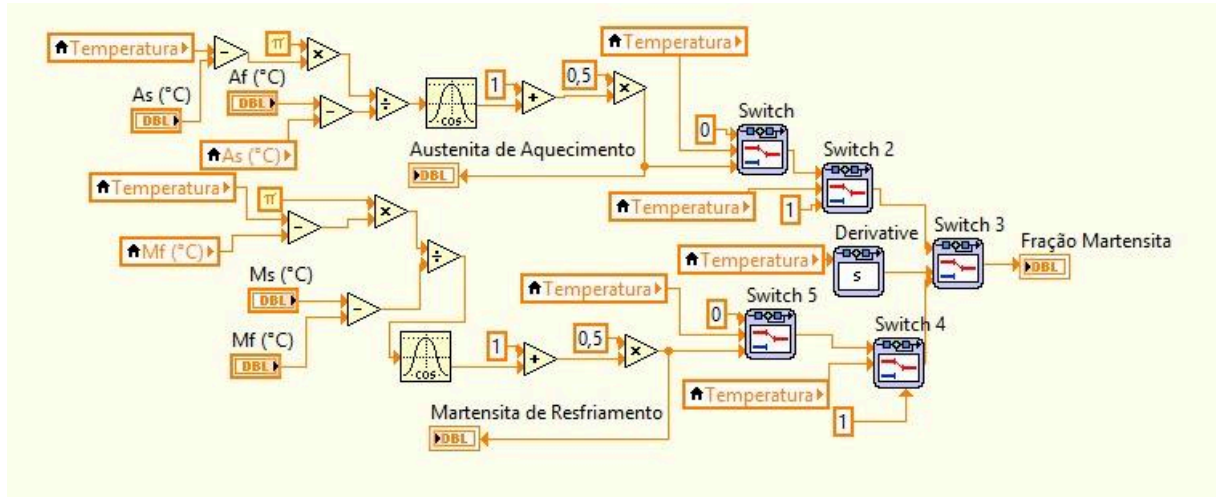
Fonte: Adaptado de BARROSO (2019).

Embora os atuadores de LMF apresentem diversas vantagens, sua utilização para controle de posição enfrenta dificuldades na caracterização de parâmetros, devido à variação temporal desses parâmetros e, consequentemente, na modelagem matemática do sistema analítico, conforme descrito por BARROSO (2019). O principal desafio na utilização dessas ligas para controle de posição é a dificuldade em modelar precisamente o comportamento desse material, uma vez que sua característica de mudança de fase, responsável pelo EMF, apresenta um comportamento histerético, conforme mencionado por CAMPOS (2018). Isso significa que a modelagem precisa dos atuadores de LMF é um desafio, o que pode dificultar a implementação de sistemas mecânicos baseados nesses atuadores para controle de posição (PAIVA, 2004).

Devido às dificuldades em descrever com precisão o comportamento do material de LMF, que apresenta um comportamento histerético, torna-se complicado realizar o controle de posição em sistemas mecânicos que possuem atuadores de LMF.

Com isso, na Figura 12 ilustra-se o modelo de mudança de fase do fio de LMF implementado através do software LabVIEW, onde esse modelo tem como entrada a temperatura do fio e como saída a fração martensita.

Figura 12 - Modelo de mudança de fase implementado através do software LabVIEW.



Fonte: Autoria própria (2023).

3.3. MODELO DO SISTEMA MECÂNICO DO FIO ATUADOR

O modelo do sistema mecânico do fio de LMF é dividido em três partes, conforme as Equações 6, 7 e 8. Os parâmetros necessários para essas equações foram obtidos a partir do trabalho de BARROSO (2019) e estão listados na Tabela 5.

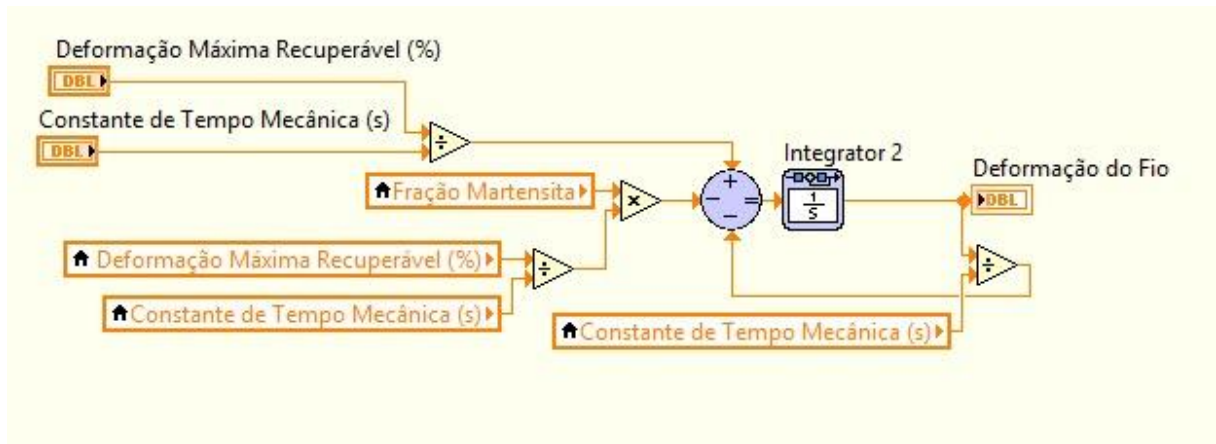
Tabela 5 - Parâmetros mecânicos do material.

<i>Parâmetros</i>	<i>Valor</i>
τ_{mec}	1,5 s
ϵ_m	5 %
E_a	32,5 GPa
E_m	22,5 GPa
A_t	$3,1416 \cdot 10^{-8} m^2$

Fonte: Adaptado de BARROSO (2023).

Na Figura 13, é possível observar a deformação presente no fio implementado no software LabVIEW, através da Equação 6

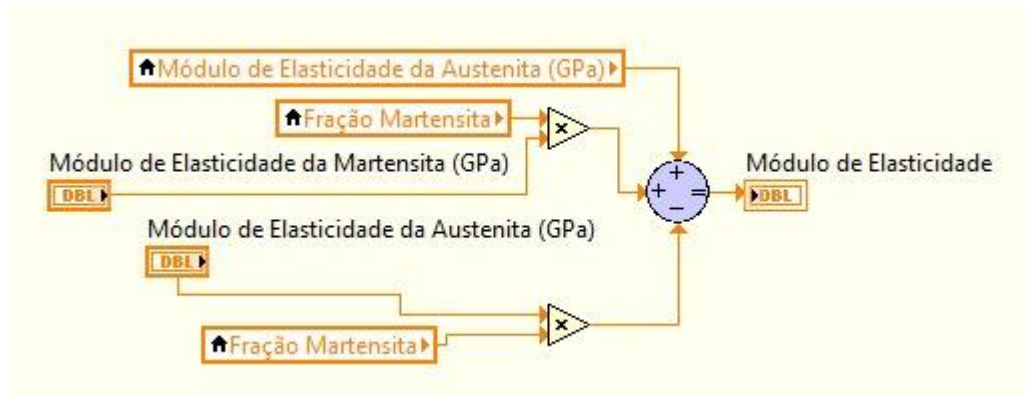
Figura 13 - Deformação presente no fio implementado através do software LabVIEW.



Fonte: Autoria própria (2023).

Na Figura 14, é possível observar o módulo de elasticidade do fio implementado no software LabVIEW, através da Equação 7.

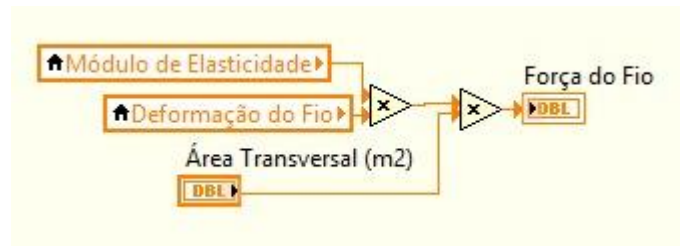
Figura 14 - Módulo de elasticidade do fio implementado através do software LabVIEW.



Fonte: Autoria própria (2023).

Na Figura 15, é possível observar a força presente no fio implementado no software LabVIEW, através da Equação 8.

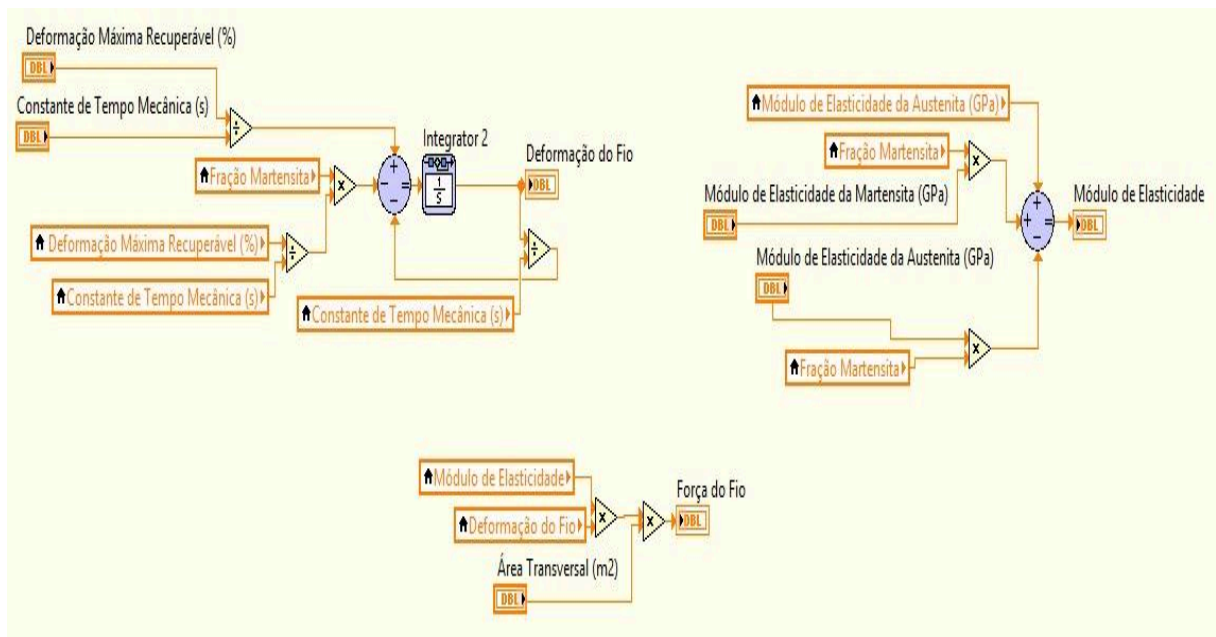
Figura 15 - Força presente no fio implementado através do software LabVIEW



Fonte: Autoria própria (2023).

Na Figura 16, vemos o modelo do sistema mecânico completo, no qual o mesmo depende das Equações 6, 7, 8. Esse modelo tem como entrada a fração martensita do fio e como saída a força gerada no fio.

Figura 16 - Força presente no fio implementado através do software LabVIEW.



Fonte: Autoria própria (2023).

3.4. MODELO DA VIGA SIMPLEMENTE ENGASTADA

O modelo matemático utilizado para representar o comportamento da viga engastada no sistema consiste na Equação 10. Essa manifestação é responsável por descrever uma variável de processo, que é a deformação na viga. Para implementar esse modelo no sistema, foram necessários alguns parâmetros, que foram obtidos através do trabalho de BARROSO (2019) e estão detalhados na Tabela 6. Esses parâmetros são fundamentais para garantir a

precisão do modelo e, consequentemente, a eficácia do sistema de controle. Com base nesses parâmetros, é possível simular e prever o comportamento da viga engastada durante o processo de controle de posição.

Tabela 6 - Parâmetros da viga engastada.

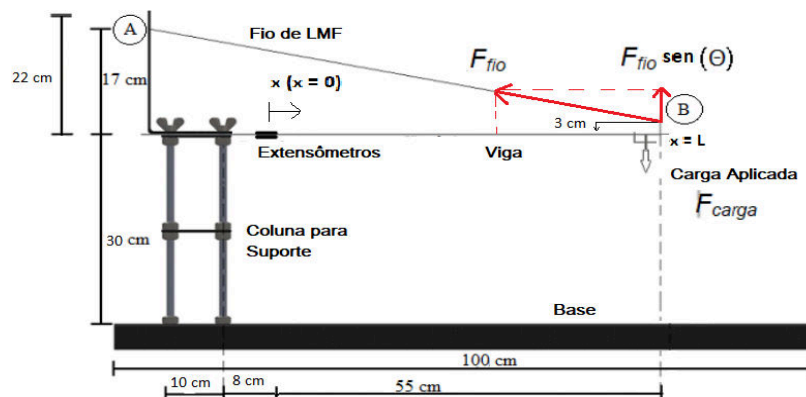
<i>Parâmetros</i>	<i>Valor</i>
<i>L</i>	55 cm
<i>a</i>	26 mm
<i>b</i>	2 mm
<i>E_{viga}</i>	20,6. 10 ¹⁰ N/m ²
<i>ρ_{viga}</i>	7.860 kg/m ³
<i>I</i>	1,73. 10 ⁻¹¹ m ⁴

Fonte: Adaptado de BARROSO (2019).

Para calcular o ângulo θ relacionado à componente vertical da força do fio, que aparece na Equação 10, foi utilizado o conceito trigonométrico do arco tangente para os valores representados na Figura 17. Nesse processo, foi possível determinar o valor de θ como sendo a tangente inversa do quociente entre a altura H e o comprimento L, que corresponde ao ângulo formado entre a horizontal e a reta que liga o ponto de aplicação da força na viga ao ponto de engaste. Na Equação 20, ilustra-se o valor de θ :

$$\theta = tg^{-1} \left(\frac{14 \text{ cm}}{73 \text{ cm}} \right) = 10,8564^\circ \quad (20)$$

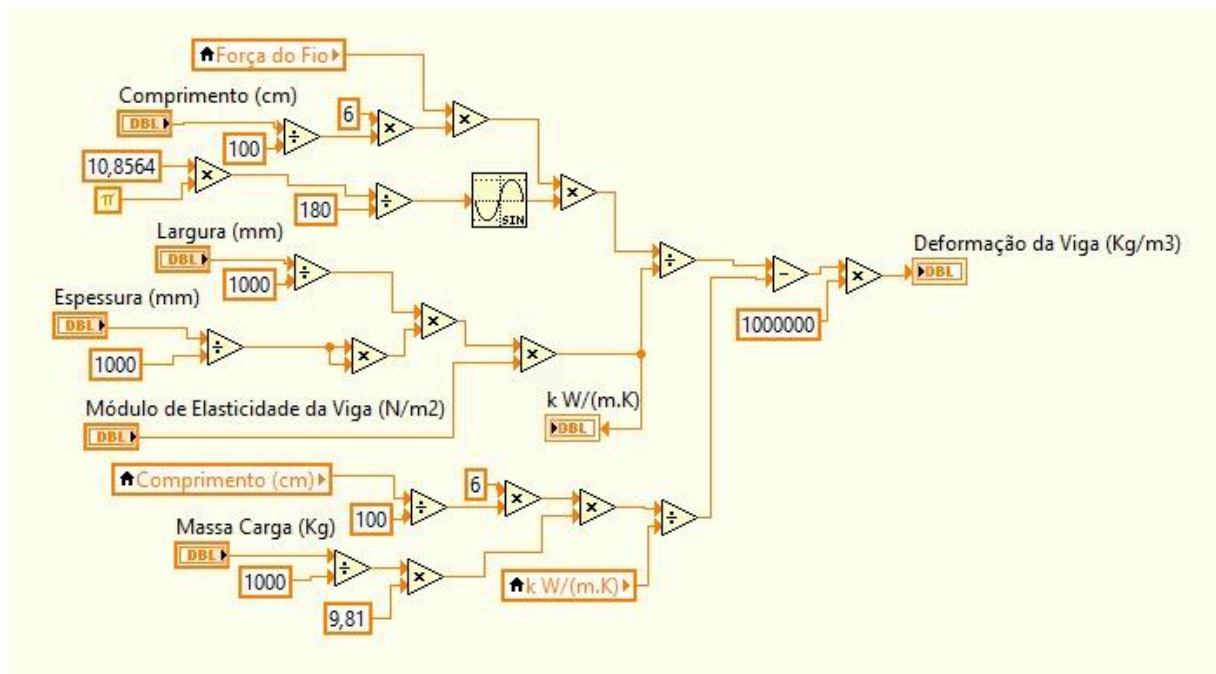
Figura 17 - Representação das dimensões da viga engastada.



Fonte: BARROSO (2019).

Na figura 18, ilustra-se o modelo da viga engastada implementado através do software LabVIEW, no qual, esse modelo é alimentado com a força aplicada no fio, que é sua entrada principal, além de uma carga mecânica opcional. A deformação da viga é a variável de controle monitorada e representa a saída do modelo. O objetivo é controlar a deformação da viga por meio da variação da força aplicada no fio, utilizando o atuador de LMF como elemento de controle.

Figura 18 - Modelo da viga engastada implementado através do software LabVIEW.



Fonte: Autoria própria (2023).

3.5. SINTONIA E CONTROLE DE PROCESSO

Após ser realizada a modelagem completa utilizando o software LabVIEW, foi realizado a obtenção dos parâmetros do controlador utilizando o método de sintonia de Ziegler Nichols, no qual foi escolhido o primeiro método, o método da curva de reação.

O Método da Curva de Reação é uma técnica utilizada em controle de processos para sintonia de controladores PI e PID. Ele consiste em aplicar um degrau no setpoint do processo e monitorar a resposta do sistema em relação a essa mudança. A curva de reação é então conduzida para determinar os parâmetros do controlador.

A curva de reação é uma representação gráfica da resposta do processo à mudança de setpoint. Ela é gerada ao monitorar a variável de processo ao longo do tempo após a mudança de ponto de ajuste. A curva geralmente apresenta um comportamento característico que pode ser utilizado para determinar os parâmetros do controlador.

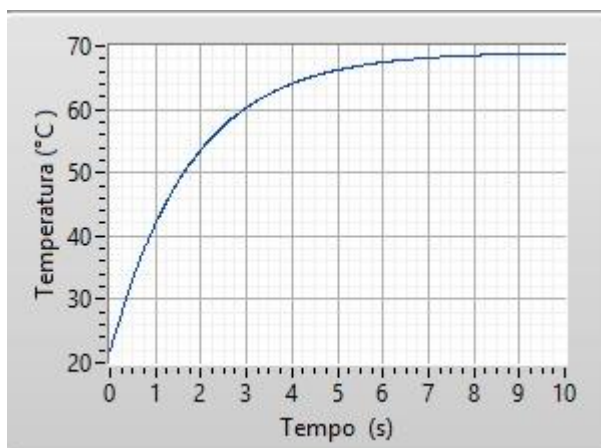
Com isso, no trabalho será realizada a análise detalhada do gráfico da deformação da viga em função do tempo, de acordo com o método da curva de reação. A análise da curva de reação permite determinar os valores ótimos de ganho proporcional, tempo integral e tempo derivativo do controlador.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. RESULTADO DO MODELO

Nas Figuras 19, 20, 21 e 22, demonstram o comportamento de um atuador composto por um fio de Liga com Memória de Forma (LMF), quando submetido a um aumento súbito na potência elétrica que o atravessa ao longo do tempo. Esse aumento de potência elétrica faz com que o fio de LMF aqueça e, como resultado, ocorram mudanças em algumas variáveis que estão sendo acompanhadas e ilustradas graficamente, tais como a temperatura do fio, a fração de martensita presente nele, a deformação do fio e a força que é exercida sobre ele. Essas mudanças ao longo do tempo são representadas nos gráficos que acompanham as imagens, permitindo a análise do comportamento do atuador de LMF em resposta a essa variação de potência elétrica. Na Figura 19, ilustra-se o gráfico da temperatura em função do tempo implementado através do software LabVIEW.

Figura 19 - Gráfico da temperatura X tempo implementado através do software LabVIEW.



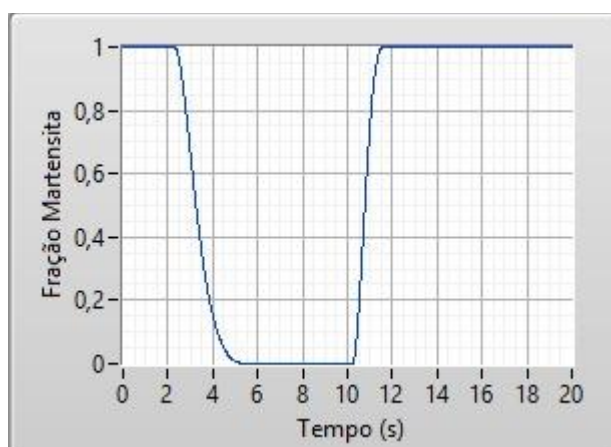
Fonte: Autoria própria (2023).

Durante o processo de aquecimento do fio de LMF, a temperatura do fio aumentou até atingir um valor constante de 68 °C, que é chamado de regime permanente ou estado estacionário. Essa temperatura demorou 10 segundos para se tornar constante, o que significa que não houve mais variações na sua magnitude nesse intervalo de tempo. Isso indica que o fio de LMF atingiu um equilíbrio térmico com o ambiente ao seu redor e não estava mais absorvendo energia térmica. A estabilidade do valor de temperatura no regime permanente é

importante para garantir o funcionamento correto do sistema em que o fio de LMF está sendo usado, pois as propriedades mecânicas e térmicas do material podem ser suportadas por variações na temperatura.

Na Figura 20, ilustra-se o gráfico da fração martensita em função do tempo implementado através do software LabVIEW.

Figura 20 - Gráfico da fração martensita X tempo implementado através do software LabVIEW.

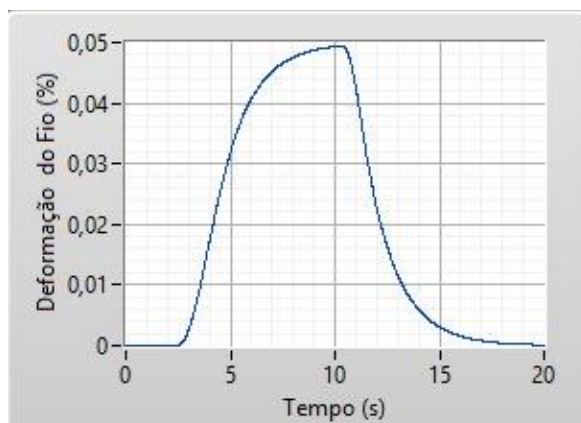


Fonte: Autoria própria (2023).

Pelo gráfico, é possível observar que a fração martensita iniciou com o valor de 1, após 2,5 s ela dá início ao seu processo de transformação, esse processo é a transformação da fase martensítica para a fase austenita, a mesma começa em 2,5 s e finaliza em 5 s, no qual pode-se observar que o material teve a sua transformação completa, pois a mesma finaliza em 0. Após 10,2 s ela dá início novamente a um processo de transformação, esse processo é a transformação da fase austenita para a fase martensítica, a mesma inicia em 10,2 s e finaliza em 11,5 s, no qual pode-se observar que a transformação do material novamente foi completada, pois a mesma finaliza em 1. Este resultado já era esperado, visto que a temperatura atingida foi superior a temperatura final da fase Austenita, que consiste em 66,8 °C.

Na Figura 21, ilustra-se o gráfico da deformação do fio em função do tempo implementado através do software LabVIEW.

Figura 21 - Gráfico da deformação do fio X tempo implementado através do software LabVIEW.

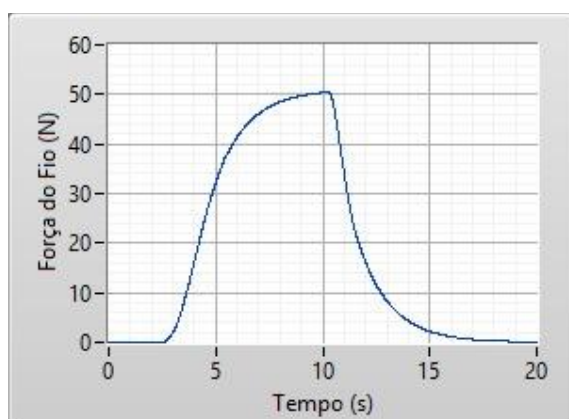


Fonte: Autoria própria (2023).

Pelo gráfico, é possível observar que a deformação do fio de LMF aumentou progressivamente ao longo do tempo devido ao aquecimento, e se aproximou do seu valor máximo, que é de 5%. Esse valor máximo representa a deformação máxima que o fio de LMF pode suportar antes de sofrer uma falha mecânica. É importante destacar que a deformação do fio não ultrapassou esse limite máximo, o que indica que o processo de aquecimento ocorreu dentro dos parâmetros esperados para o material e que o fio de LMF manteve sua integridade estrutural durante o experimento.

Na Figura 22, ilustra-se o gráfico da força do fio em função do tempo implementado através do software LabVIEW.

Figura 22 - Gráfico da força do fio X tempo implementado através do software LabVIEW.



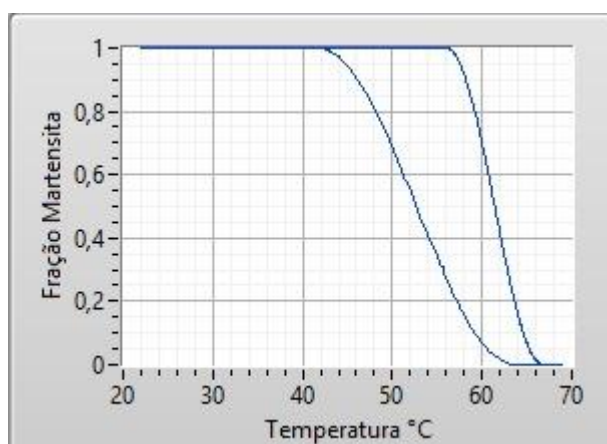
Fonte: Autoria própria (2023).

Conforme pode ser observado no gráfico, a força exercida pelo fio de LMF aumentou gradualmente durante o processo de aquecimento, até atingir o seu valor máximo de 51 N, após cerca de 10 s. Esse valor máximo representa a força máxima que o fio de LMF pode suportar antes de sofrer uma falha mecânica. É importante destacar que a força se manteve nesse valor máximo por um curto período de tempo antes de retornar ao seu estado inicial, isso pode estar relacionado às propriedades mecânicas do material.

Nas Figuras 23, 24 e 25, ilustram-se os gráficos da fração martensita, deformação do fio e da força do fio versus a temperatura. Na Figura 26, ilustra-se a deformação da viga versus o tempo. Esses gráficos demonstram o comportamento de como o sistema se comporta durante o processo de aquecimento e resfriamento em relação à temperatura. É possível notar que o atuador de LMF apresenta um comportamento histerético, ou seja, a curva do processo de aquecimento não se sobrepõe completamente à curva do processo de resfriamento. Essa característica histerética é uma propriedade intrínseca dos materiais de LMF, que faz com que o comportamento mecânico do material dependa do histórico térmico ao qual foi influenciado.

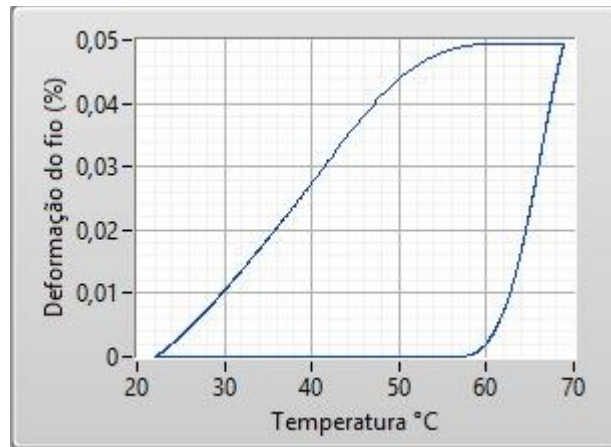
Além disso, é possível notar que a transformação da fase martensítica em austenita ocorre em um intervalo de temperatura que vai de 55,9°C a 66,8°C, enquanto a transformação da fase austenita em martensítica ocorre em um intervalo de temperatura que vai de 64,1°C a 41,8°C. Esses caminhos diferentes de transformação de fase são uma característica típica dos materiais de LMF e estão relacionados à história do material. Essa histerese é causada por mudanças na estrutura cristalina do material durante uma transformação de fase, que causou as propriedades mecânicas do material.

Figura 23 - Gráfico da fração martensita X temperatura implementado através do software LabVIEW.



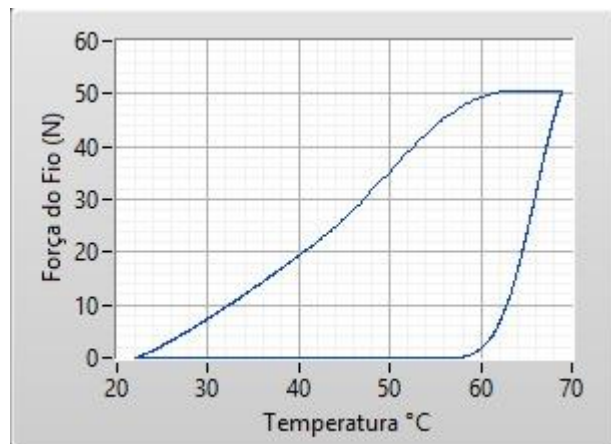
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 24 - Gráfico da deformação do fio X temperatura implementado através do software LabVIEW.



Fonte: Autoria própria (2023).

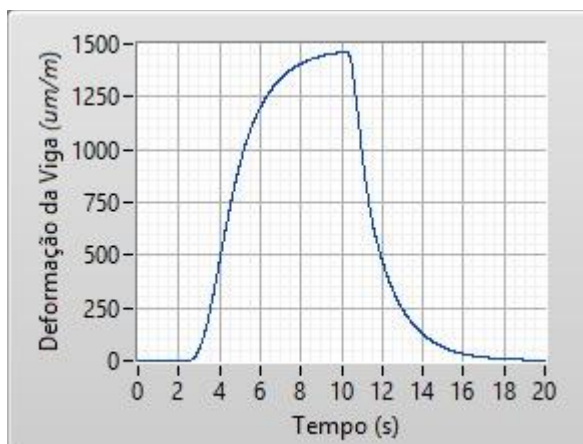
Figura 25 - Gráfico da força do fio X temperatura implementado através do software LabVIEW.



Fonte: Autoria própria (2023).

Na Figura 26, apresenta-se o gráfico da deformação versus o tempo sem a presença de carga externa. É importante destacar que, nessa condição de análise, a viga não estava sujeita a forças externas que poderiam causar a sua deformação. Portanto, a deformação apresentada no gráfico é devida as propriedades do material de LMF apresentados.

Figura 26 - Gráfico da deformação da viga X tempo implementado através do software LabVIEW.



Fonte: Autoria própria (2023).

Na Figura 26, o gráfico apresentado indica que a fase de aquecimento do material (fase austenita) leva um pouco mais de 10 s para atingir sua deformação máxima, que é de 1465 $\mu\text{m}/\text{m}$. Após isso, inicia-se uma fase de resfriamento, na qual ocorre a transformação da fase austenita em fase martensita. Essa fase de resfriamento também dura cerca de 10 s.

Essa informação é importante porque fornece uma ideia sobre a velocidade com que ocorrem as transformações de fase no material, além de ajudar a entender melhor o comportamento do material durante as diferentes fases do aquecimento e resfriamento. É importante ressaltar que o tempo exato para a transformação de fase pode variar de acordo com as condições de aquecimento e resfriamento, bem como com as propriedades do material em questão.

4.2. RESULTADO PARA O MÉTODO DE SINTONIA DE ZIEGLER NICHOLS

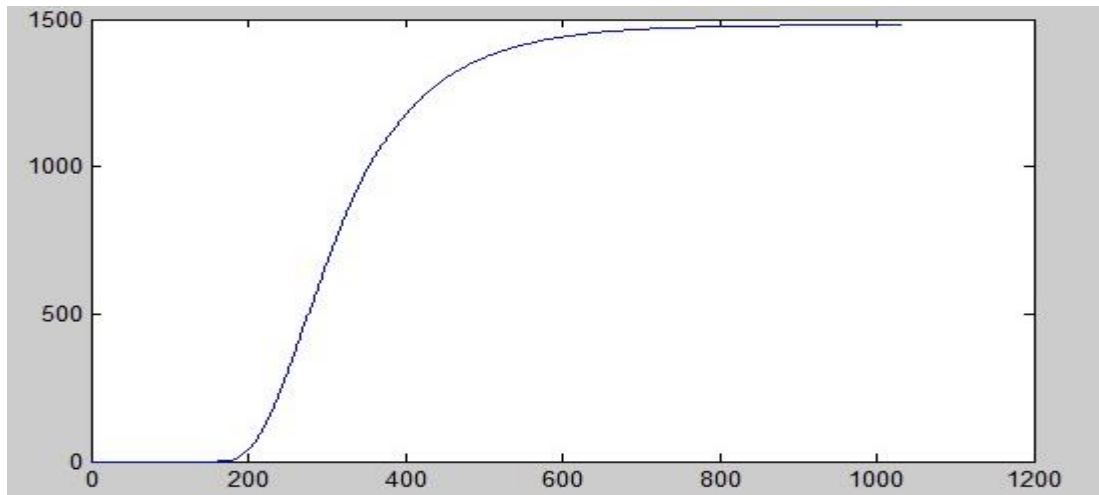
Nesta etapa do trabalho, foi realizada uma análise minuciosa do gráfico que representa a deformação da viga em função do tempo, utilizando o método de Ziegler-Nichols. Especificamente, foi aplicado o método da curva de reação para obter os parâmetros dos controladores PI e PID. Durante essa etapa, uma potência de 3,5 w e um tempo de 15 s foram usados como parâmetros iniciais. Foi utilizado esse tempo para obter resultados mais eficazes.

Assim, após a análise dos gráficos, foram identificadas duas fases distintas: a fase austenita e a fase martensítica. Cada uma dessas fases foi acompanhada com mais detalhes a

fim de compreender melhor o comportamento da deformação da viga em relação ao tempo. Todo esse processo foi importante para a obtenção de informações relevantes que ajudarão a otimizar o controle do sistema em questão.

Na Figura 27, ilustra-se o caminho que um material percorre durante a fase de aquecimento para alcançar a fase austenita, antes de iniciar o processo de transformação para a fase martensítica. Durante essa fase, o material é submetido a um aquecimento controlado até atingir uma temperatura específica em que a austenita é formada.

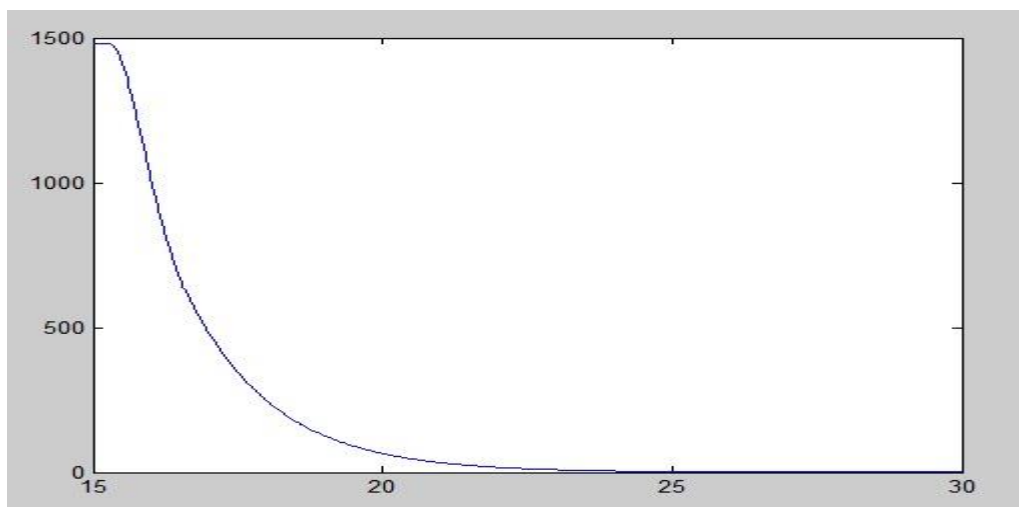
Figura 27 - Gráfico da deformação X número de amostra na fase austenita.



Fonte: Autoria própria (2023).

Após o material atingir a fase austenita completa, o material é resfriado rapidamente para iniciar o processo de transformação para a fase martensítica. Esse processo é realizado por meio de um resfriamento rápido o suficiente para evitar a formação de outras fases intermediárias e permitir que a austenita se transforme diretamente em martensita. Essa transformação é caracterizada por uma mudança na estrutura cristalina e resulta em um aumento significativo na dureza e na resistência mecânica do material. Na Figura 28, ilustra-se o processo da fase martensítica completo.

Figura 28 - Gráfico da deformação X tempo na fase martensítica.



Fonte: Autoria própria (2023).

Na Figura 27, ilustra a resposta de um sistema durante a fase de aquecimento, onde a fase austenita é alcançada. A partir da Figura 27, foram obtidos três parâmetros: K , L e T . O parâmetro K é o ponto de ganho de regime permanente no eixo do sinal de saída da planta, ou seja, é o valor da saída do sistema quando ele se estabiliza, onde $K = 1480$. O parâmetro L é o tempo de atraso, que representa o tempo que o sistema leva para responder às mudanças no sinal de entrada, onde $L = 2,874$. Já o parâmetro T é a constante de tempo, que representa a rapidez com que o sistema responde às mudanças no sinal de entrada após o tempo de atraso, onde $T = 3,35$.

Esses parâmetros são usados para calcular o controle do sistema, que consiste em ajustar a saída do sistema para atingir um valor desejado. O controle é feito por meio de três parâmetros: K_p , T_i e T_d . O parâmetro K_p é o ganho proporcional, que determina a magnitude da correção aplicada ao sinal de saída em resposta a um erro entre a saída do sistema e o valor desejado. O parâmetro T_i é o tempo integral, que representa o tempo necessário para eliminar um erro constante na saída do sistema. Já o parâmetro T_d é o tempo derivativo, que representa a rapidez com que o sistema responde às mudanças no erro de saída.

Esses parâmetros são muito importantes para o projeto de sistemas de controle, pois permitem ajustar o comportamento do sistema para atingir as metas desejadas, como por exemplo, alcançar a fase austenita de forma precisa e eficiente. O conhecimento e a utilização adequada desses parâmetros podem levar a uma melhora significativa no desempenho do sistema de controle.

Na Tabela 7 são apresentados o Ganho Proporcional (K_p), Tempo Integral (T_i), Tempo Derivativo (T_d), para os controladores PI e PID, na fase austenita, respectivamente.

Tabela 7 - Análise comparativa entre os parâmetros dos controladores PI e PID para a fase austenita.

<i>Tipo de Controlador</i>	<i>K_p</i>	<i>T_i</i>	<i>T_d</i>
<i>PI</i>	1,049	9,58	0
<i>PID</i>	1,398	5,748	1,437

Fonte: Autoria própria (2023).

Na Figura 28, ilustra a resposta de um sistema durante a fase de resfriamento, onde a fase martensítica é alcançada. A partir da Figura 28, foram obtidos três parâmetros: K, L e T. Onde K = 1480, L = 0,3 e T = 1,99.

Na Tabela 8 são apresentados o Ganho Proporcional (K_p), Tempo Integral (T_i), Tempo Derivativo (T_d), para os controladores PI e PID, na fase martensítica, respectivamente.

Tabela 8 - Análise comparativa entre os parâmetros dos controladores PI e PID para a fase martensítica.

<i>Tipo de Controlador</i>	<i>K_p</i>	<i>T_i</i>	<i>T_d</i>
<i>PI</i>	5,97	0,3	0
<i>PID</i>	7,96	0,6	0,15

Fonte: Autoria própria (2023).

As Tabelas 7 e 8, ilustram uma análise comparativa dos resultados obtidos durante as fases austenita e martensítica do processo de transformação de materiais metálicos. Ao analisar os dados, foi possível concluir que houve um atraso menor durante a fase martensítica em comparação com a fase austenita.

Isso significa que durante a transformação para a fase martensítica, o material apresentou uma resposta mais rápida às mudanças no sinal de entrada em comparação com a fase austenita. O tempo de atraso é um parâmetro importante na análise da dinâmica de sistemas, pois representa o tempo que um sistema leva para responder às mudanças no sinal de entrada. Uma resposta mais rápida às mudanças no sinal de entrada é desejável em muitas

aplicações, pois permite uma maior eficiência e controle no processo de transformação. Portanto, a conclusão de que ocorreu um atraso menor na fase martensítica do que na fase austenita é uma informação valiosa para o desenvolvimento e otimização de processos que envolvam a transformação de materiais metálicos.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho, teve como objetivo principal realizar a modelagem, controle e simulação da deformação de uma viga simplesmente engastada, utilizando um fio atuador feito de Liga de Memória de Forma com o uso do software LabVIEW.

Os resultados obtidos no estudo foram bastante satisfatórios, mostrando a eficácia das técnicas utilizadas e a validade dos modelos propostos. Foi possível avaliar o desempenho dos controladores PI e PID, bem como do primeiro método de sintonia de Ziegler-Nichols, o método da curva de reação, no controle da deformação da viga.

Além disso, foi possível demonstrar a utilidade e a eficácia do software LabVIEW na simulação e otimização de processos de controle em sistemas mecânicos, pois os resultados das simulações foram coerentes com o embasamento teórico apresentado no decorrer do trabalho.

Com base nas conclusões obtidas, é possível afirmar que este estudo pode contribuir significativamente para o avanço da pesquisa em controle de posição de sistemas mecânicos, especialmente em relação ao controle de deformação de vigas simplesmente engastadas. Espera-se, portanto, que este trabalho possa ser útil para pesquisadores interessados em estudar o controle de posição de sistemas mecânicos, e fornecer informações valiosas para futuros estudos sobre o tema.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdelaal, W.G.A. and Nagib, G. (2014). **Modeling and simulation of sma actuator wire**. 9th International Conference on Computer Engineering & Systems (ICCES).

ALIBABA.COM – Disponível em WWW: <http://news.alibaba.com>. Acesso em: 05 maio 2023.

ARAÚJO, F. M. U de. **Sistemas de controle**. Natal: UFRN, 2007. Disponível em: <http://www.dca.ufrn.br/~meneghet/FTP/Controle/scv20071.pdf>>. Acesso em: 07 maio 2023.

BARROSO, Antônio Júlio Santana. **Caracterização, modelagem e controle de um atuador de liga de memória de forma**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

CAMPOS, Andrei Henrique Patriota. **Estratégias de controle aplicadas a um atuador de liga de memória de forma para o controle de deformação de uma viga engastada**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

CASTILHO, Weimar Silva; SILVA, E. P. **Algumas aplicações das ligas com memória de forma Shape Memory Alloys–SMA**. In: Congresso Sinergia. 2011. p. 99-108.

DE MOURA, José Pinheiro; DA FONSECA NETO, João Viana. Sistema Híbrido de Sintonia de Controladores com Ações PID Baseado em Métodos Adaptativos para Processo de Solda por Fricção. In: **Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente-SBAI**. 2021.

DIAS, Rogerio Fonseca et al. **Efeito da deformação cíclica nas propriedades mecânicas de uma liga níquel-titânio superelástica**. 2005.

DYNALLOY, Inc. **Technical characteristicsofflexinolactuatorwires**. Disponível em: <https://www.dynalloy.com/pdfs/TCF1140.pdf>. Acesso em: 01 maio 2023.

FACCIN, Flávio. **Abordagem inovadora no projeto de controladores PID**. 2004.

FRANKLIN, Gene F. *et al.* **Sistemas de controle para engenharia**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

GONÇALVES, Manuel Narciso Ferreira; KOELLE, Edmundo. **Análise e otimização dos parâmetros do regulador de velocidade e utilização de controle adaptativo em máquinas hidráulicas através do método das características e do segundo método de Ziegler-Nichols**. 1997.

LIMA, W.M. (2008). **Plataforma para Análise Comportamental de Atuadores de Ligas com Memória de Forma e para o Controle de Deformação de uma Barra Flexível**. Master's thesis, Universidade Federal de Campina Grande.

National Instruments. (2021). LabVIEW - Graphical Programming. <https://www.ni.com/en-us/shop/labview.html>. Acesso em: 03 maio 2023.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

OTUBO, J. *et al.* **Desenvolvimento de novos aços inoxidáveis com efeito de memória de forma**. 1994.

PAIVA, Alberto. **Modelagem do comportamento termomecânico das ligas com memória de forma. Dr. Tese, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2004.**

PEQUENO, Arthur Abrantes Paiva. **Aplicação de Métodos de Controle em uma Estrutura Ativa de Viga Engastada com Atuador de Liga com Memória de Forma.** Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

PINTO, Jan Erik Mont Gomery. **Aplicação prática do método de sintonia de controladores PID utilizando o método do relé com histerese.** Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

QUEIROZ, Luiz Fernando Barbosa. **Modelagem e controle PID de sistema automotivo de suspensão ativa. 2023.**

RIBEIRO, JLD; LACERDA, WAM; PEREIRA, FA Sistemas de Controle. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012. Disponível em: <https://materialpublic.imd.ufrn.br/curso/disciplina/1/63/4/4/>. Acesso em: 09 maio 2023.

RODRIGUES, Mariana Carla Mendes. **Efeito do treinamento por ciclagem pseudoelástica nas propriedades mecânicas e funcionais de uma liga de níquel-titânio.** 2016.

ROVEA, Samuel Bahu; JANUÁRIO, Marconi. **ANÁLISE, MODELAGEM, PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM CONTROLADOR PI DIGITAL ATRAVÉS DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA. Seminário de Iniciação Científica e Seminário Integrado de Ensino, Pesquisa e Extensão, 2017.**

SIMÕES, Jackson de Brito. **Fabricação de Componentes Miniaturizados de Ligas com Memória de Forma NI-Ti Usando Fundição de Precisão**. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande, João Pessoa, 2016.

SPINI, Tatiana Sobottka et al. **Avaliação do intervalo de transição térmica das ligas de níquel-titânio termoativadas**. *Ortodontia*, v. 45, n. 5, p. 575-580, 2012.

Velázquez, R. and Pissaloux, E. (2012). **Modelling and temperature control of shape memory alloys with fast electrical heating**. *International Journal of Mechanics and Control*, 13(2), Pag 3 - 10.

Xiaoguang, L., Daohui, Z., Xingang, Z., and Han, J. (2017). **Modeling and control of shape memory alloy actuator using feedback linearization**. 2017 36th Chinese Control Conference (CCC).