



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

JAKSON DOS SANTOS SILVA

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

CARAÚBAS/RN

2021

JAKSON DOS SANTOS SILVA

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

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

Coorientador: Prof. Dr. Marcus Vinícius S. Costa

CARAÚBAS/RN

2021

© 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.

S586m Silva, Jakson dos Santos.

Modelagem, controle e simulação da deformação de uma viga simplesmente engastada atuada por fio de liga de memória de forma com o uso do software Matlab / Jakson dos Santos Silva. - 2021.
63 f. : il.

Orientador: Walber Medeiros Lima.

Coorientador: Marcus Vinícius Silvério Costa.

Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Elétrica, 2021.

1. Deformação. 2. Liga de Memória de Forma. 3. Controlador PID. 4. Método do Relé com histerese. 5. MATLAB/SIMULINK. I. Lima, Walber Medeiros, orient. II. Costa, Marcus Vinícius Silvério, co-orient. III. Título.

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

Biblioteca Campus Caraúbas

Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues

CRB: 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.

JAKSON DOS SANTOS SILVA

**MODELAGEM, CONTROLE E SIMULAÇÃO DA DEFORMAÇÃO DE UMA
VIGA SIMPLEMENTE ENGASTADA ATUADA POR FIO DE LIGA DE
MEMÓRIA DE FORMA COM O USO DO SOFTWARE MATLAB.**

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.

Aprovado em: 19 / 11 / 2021

Jakson dos Santos Silva

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Walber Medeiros Lima
Presidente

Prof. Dr. Hugo Michel Câmara de Azevedo Maia
Membro Interno

Eng. Francisco Luís de Carvalho Costa
Membro Externo

DEDICATÓRIA

A Deus, pelas infinitas oportunidades e bênçãos na minha vida.

A minha família, em especial aos meus pais que tanto amo: José Abdias da Silva e Maria Francinete dos Santos Silva.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me dado forças para vencer todos os momentos difíceis ao longo desta jornada.

A minha família que é a base do meu crescimento, sendo meus pais José Abdias da Silva e Maria Francinete dos Santos Silva, que por muitas vezes desistiram dos seus sonhos para viverem o meu.

A meu orientador em especial, Walber Medeiros Lima, por toda atenção, orientação, compromisso, sabedoria e apoio dado para a realização do trabalho.

A meu coorientador Marcus Vinícius Silvério Costa, por todo conhecimento repassado para a realização do trabalho.

Aos membros da banca, Hugo Michel Câmara de Azevedo Maia e Francisco Luís de Carvalho Costa, pelo interesse e disponibilidade.

A minha namorada Juliana Brito, pessoa que compartilho minhas alegrias, tristezas e conquistas.

A todos os meus amigos da minha cidade Campo Grande-RN, que sempre me apoiaram, incentivaram e torceram por mim ao longo desta jornada.

A meus colegas de curso, Naiane Silva, Regiano Lima, Gutianne Michelle, Charlele Camara, Giovanni Barbosa, Antônio Juscelino, Antônio Tadeu, Matheus Justino, Oziana Medeiros, Roserlange Freitas, João Carlos, Maria Eliza, Rafaela Rithelly, Cícero Eduardo, Wisla Milena, Karine Pérsia, Walef de Oliveira, Aquiles de Oliveira, Gleidson Leite, Mara Alice, Gesley Alves, Hortência Cibelle, Sávio Gomes, Ingrid Thais, José Ailton, Maria Teresa, Nadison Francisco, Hadassa Juliana, João Batista, Yago Souto, Jardel Figueiredo, Danilo Luan, Lucas Duarte, José Rubens, Sebastião Augusto e José Jefferson, que sempre se fazem presente diariamente e contribuem diretamente ou indiretamente.

A todos os docentes que colaboraram com conhecimentos repassados, o que resultou para o meu crescimento acadêmico.

Por fim, a todos que contribuíram de alguma forma nessa trajetória, obrigado!

“O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano.”

Isaac Newton.

RESUMO

Por mais de 20 anos, os problemas mecânicos de deformação e/ou vibração em sistemas estruturais têm sido tratados por técnicas de controle clássico (convencional), moderno e robusto, ao ponto que se faz necessário investigar esses problemas presentes em uma viga simplesmente engastada, como também métodos de controle de deformação através da adição de atuadores de Liga de Memória de Forma (LMF). Portanto, o presente trabalho aborda a modelagem, controle e simulação da deformação de uma viga simplesmente engastada, atuada através de um fio de LMF, com o uso do *software* MATLAB/SIMULINK. A modelagem implementada foi baseada no modelo que descreve o comportamento do fio de LMF (modelo térmico, modelo de mudança de fase e modelo do sistema mecânico) juntamente com o modelo da viga engastada. A técnica de controle utilizada foi o PI e PID com sintonia via relé com histerese, objetivando a redução de possíveis ruídos no sinal de saída do sistema. Os resultados obtidos foram analisados em termos das métricas de desempenho (IAE, ITAE, ISE, tempo de subida, tempo de acomodação e sobressinal), nos quais foram satisfatórios e apresentaram concordância ao embasamento teórico apresentado nesse trabalho.

Palavras-chaves: Deformação. Liga de Memória de Forma. Controlador PID. Método do Relé com histerese. MATLAB/SIMULINK.

ABSTRACT

For more than 20 years, the mechanical problems of deformation and/or vibration in structural systems have been treated by classical control techniques (conventional), modern and robust, to the point that it is necessary to investigate these problems present in a simply inserted beam, such as also methods of deformation control through the addition of Shape Memory Alloy (SMA) actuators. Therefore, the present work addresses the modeling, control and simulation of the deformation of a simply inserted beam, actuated through a SMA wire, using the MATLAB/SIMULINK software. The implemented modeling was based on the model that describes the behavior of the SMA wire (thermal model, phase change model and mechanical system model) together with the inserted beam model. The control technique used was PI and PID with relay tuning with hysteresis, aiming to reduce possible noise in the output signal of the system. The results obtained were analyzed in terms of performance metrics (IAE, ITAE, ISE, rise time, accommodation time and overshoot), in which were satisfactory and presented agreement to the basement theoretical basis presented in this work.

Keywords: *Deformation. Shape Memory Alloy. PID controller. Relay method with hysteresis. MATLAB/SIMULINK.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perspectiva isométrica da plataforma experimental.	18
Figura 2 – Diagrama de blocos dos modelos do sistema proposto.	20
Figura 3 - Diagrama de corpo livre das forças presentes na extremidade da viga engastada.	23
Figura 4 – Curva de formato S a resposta ao degrau unitário de uma planta.....	25
Figura 5 – Oscilação sustentada com período P_{cr} para o método do ponto crítico.	26
Figura 6 – Diagrama de blocos do controlador PID na forma paralelo ideal.....	29
Figura 7 - Diagrama de blocos do controlador PID na forma série.....	29
Figura 8 – Controle PID de uma planta genérica.	29
Figura 9 - Curva característica entrada-saída do relé sem histerese.....	31
Figura 10 - Curva característica entrada-saída do relé com histerese.	31
Figura 11 – Estrutura fundamental para o método do relé em malha fechada.	32
Figura 12 - Saída do processo via ensaio do relé sem histerese.	33
Figura 13 - Funcionamento do relé realimentado com histerese.....	33
Figura 14 – Sistema operado pelo relé realimentado com histerese.	34
Figura 15 – Resposta ao degrau unitário de um sistema de controle genérico.....	37
Figura 16 – Modelo térmico implementado através do software MATLAB/SIMULINK.	43
Figura 17 - Modelo de mudança de fase implementado através do software MATLAB/SIMULINK.....	45
Figura 18 - Modelo do sistema mecânico implementado através do software MATLAB/SIMULINK.....	46
Figura 19 – Representação das dimensões da viga engastada.....	47
Figura 20 - Modelo da viga engastada implementado através do software MATLAB/SIMULINK.....	48
Figura 21 – Esquemático do ensaio do relé e do Controlador PID montados no software MATLAB/SIMULINK.....	49
Figura 22 - Resposta para o aquecimento do modelo do atuador de LMF ao degrau de Potência elétrica.	50
Figura 23 - Resposta para o aquecimento e resfriamento do modelo do atuador de LMF ao degrau de Potência elétrica.	51
Figura 24 – Resultado do ensaio do relé para o processo sem carga mecânica.	52
Figura 25 – Resposta ao Degrau para o sistema sem carga controlado pelo controlador PI...53	
Figura 26 - Resposta ao Degrau para o sistema sem carga controlado pelo controlador PID.54	

Figura 27 - Resultado do ensaio do relé para o processo com carga mecânica.....	55
Figura 28 - Resposta ao Degrau para o sistema com carga controlado pelo controlador PI. ..	56
Figura 29 - Resposta ao Degrau para o sistema com carga controlado pelo controlador PID.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Regra de sintonia de Ziegler- Nichols para o método da curva de reação.....	25
Tabela 2 - Regra de sintonia de Ziegler- Nichols para o método do ponto crítico.....	26
Tabela 3 – Parâmetros do modelo térmico	42
Tabela 4 – Temperaturas de transição do fio.....	44
Tabela 5 – Parâmetros mecânicos do material.	45
Tabela 6 – Parâmetros da viga engastada.	46
Tabela 7 – Análise comparativa entre os parâmetros dos controladores PI e PID para o sistema sem carga.	54
Tabela 8 - Análise comparativa entre as variáveis associadas a resposta do sistema sem carga para os controladores PI e PID.	54
Tabela 9 – Análise comparativa entre os parâmetros dos controladores PI e PID para o sistema com carga.....	57
Tabela 10 - Análise comparativa entre as variáveis associadas a resposta do sistema com carga para os controladores PI e PID.	58

LISTA DE ABREVIATURAS

CCC	Cúbica de Corpo Centrado
Dr.	Doutor
EMF	Efeito de Memória de Forma
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
IAE	Integral do Erro Absoluto
ISE	Integral do Erro ao Quadrado
ITAE	Integral do Erro Ponderado pelo Tempo
LMF	Liga de Memória de Forma
NiTi	Níquel-Titânio
P	Proporcional
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. OBJETIVOS	17
1.1.1. Objetivo Geral	17
1.1.2. Objetivos Específicos	17
2. REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1. PLATAFORMA EXPERIMENTAL	18
2.2. LIGAS DE MEMÓRIA DE FORMA	18
2.3. MODELAGEM MATEMÁTICA	19
2.3.1. Modelo Térmico	20
2.3.2. Modelo de Mudança de Fase	21
2.3.3. Modelo do Sistema Mecânico	22
2.3.4. Modelo da Viga Engastada	22
2.4. CONTROLADORES PID	23
2.4.1. Método da Curva de Reação	24
2.4.2. Método do Ponto Crítico	26
2.4.3. Função de Transferência do Controlador P	27
2.4.4. Função de Transferência do Controlador PI	27
2.4.5. Função de Transferência do Controlador PID	28
2.5. MÉTODO DO RELÉ PARA SINTONIA PID	29
2.5.1. Sintonia do Controlador PID	32
2.5.2. Identificação do Modelo	35
2.6. MÉTRICAS DE DESEMPENHO	35
2.6.1. Índice IAE	36
2.6.2. Índice ITAE	36
2.6.3. Índice ISE	36
2.6.4. Tempo de Subida	36
2.6.5. Tempo de Acomodação	37
2.6.6. Sobressinal	37
2.7. TRABALHOS REALIZADOS	38
2.8. SOFTWARE MATLAB/SIMULINK	41
3. METODOLOGIA PARA MODELAGEM E CONTROLE	42

3.1.	MODELO TÉRMICO DO FIO ATUADOR	42
3.2.	MODELO DE MUDANÇA DE FASE DO FIO ATUADOR	43
3.3.	MODELO DO SISTEMA MECÂNICO DO FIO ATUADOR	45
3.4	MODELO DA VIGA SIMPLEMENTE ENGASTADA.....	46
3.5.	SINTONIA E CONTROLE DE PROCESSO	48
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1.	RESULTADO DO MODELO.....	50
4.2.	RESULTADO PARA SINTONIA VIA MÉTODO DO RELÉ E CONTROLE	52
4.2.1.	Resultado para o Processo Sem Carga Mecânica	52
4.2.2.	Resultado para o Processo Com Carga Mecânica	55
5.	CONCLUSÕES	59
6.	TRABALHOS FUTUROS.....	60
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

1. INTRODUÇÃO

Os projetos e análise estruturais têm como objetivo realizar uma avaliação sobre a resistência do material ao aplicar um carregamento mecânico, na qual pode acarretar falhas por sobrecarga durante a vida útil do material envolvido. Diante disso, cada vez mais o mercado exige que os projetos apresentem uma ótima relação entre qualidade e custo, surgindo a necessidade de avaliar o carregamento que as peças estão submetidas de forma mais elaborada e cautelosa (GRANTE, 2014).

Um exemplo desse tipo de estrutura é uma viga simplesmente engastada, ou viga em balanço (PEQUENO, 2012). Essas vigas de aço, alumínio e madeira, bastante utilizadas na engenharia de estruturas, estão sujeitas a perturbações internas e externas, provocando deformações e/ou vibrações indesejadas que, em alguns casos, pode ocorrer mudanças significativas na sua geometria original e colocar em risco a própria integridade estrutural do sistema (HIBBELER, 2004; BEER *et al.*, 2011; TEIXEIRA, 2001).

Por mais de 20 anos, os problemas mecânicos de deformação e/ou vibração em sistemas estruturais têm sido tratados por técnicas de controle clássico (convencional), moderno e robusto, por meio da adição de atuadores conhecidos como ligas de memória de forma, como apresentado nos trabalhos de LIMA (2008), MOUTINHO (2007), PALMA (2007), SANTOS (2008), PEREIRA (2014) e DALTIN (2017).

As Ligas de Memória de Forma (LMF) consistem em ligas metálicas especiais que possuem Efeito de Memória de Forma (EMF), no qual devido a este efeito são aplicadas no desenvolvimento de atuadores. O EMF é caracterizado por fazer a liga retornar ou memorizar sua forma anterior a um carregamento imposto, seja um carregamento térmico, ou ainda do tipo magnético. Com isso, as LMF recuperam a sua geometria original após sofrerem deformação pseudoplástica, ou ainda, desenvolvem forças de restituição, perante a aplicação de um campo de temperatura e/ou de tensão (SIMÕES, 2016).

As LMF absorvem e dissipam energia mecânica devido a uma mudança histerética reversível, que se desenvolve devido a uma carga mecânica cíclica, que faz com que absorvam impactos em aplicações de amortecimento e vibração, como também trabalhem na detecção e atuação. Entretanto, essas ligas apresentam uma boa atuação para frequências baixas, na faixa de 0,1 a 20 Hz (BARROSO, 2019). Para frequências mais elevadas são utilizadas uma classe de LMF conhecidas como Liga de Memória de Forma Magnética (CAMPOS, 2018).

Diante do exposto, se faz necessário investigar a deformação e/ou vibração presente em uma viga simplesmente engastada, como também métodos de controle de deformação através da adição de atuadores de LMF.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

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

1.1.2. Objetivos Específicos

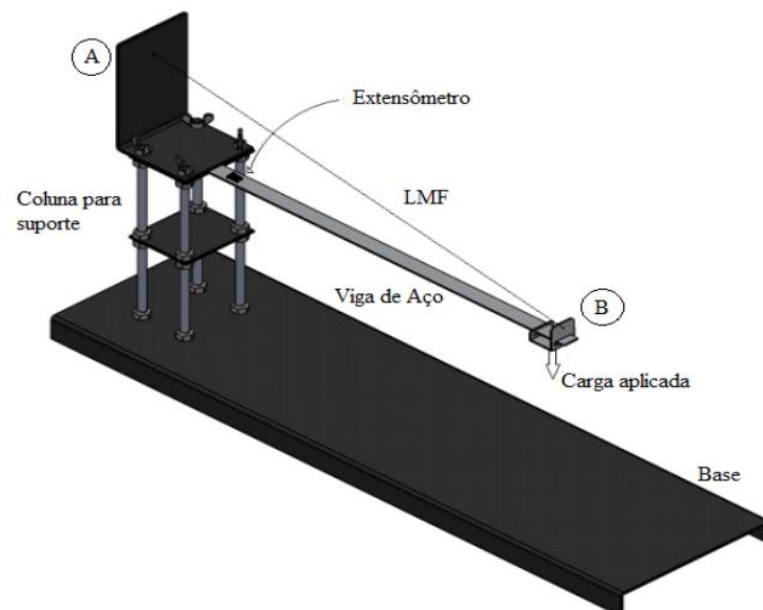
- Realizar a modelagem do sistema (liga + viga simplesmente engastada) proposto;
- Simular no Matlab a modelagem do sistema proposto;
- Simular no Matlab o método do relé para encontrar o modelo de 1ª ordem do sistema proposto;
- Simular no Matlab o método do relé para sintonia PID para controlar a deformação na viga.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. PLATAFORMA EXPERIMENTAL

Na Figura 1, ilustra-se a estrutura física da plataforma experimental, desenvolvida inicialmente por LIMA (2008) e modificada por CAMPOS (2018), em sua perspectiva isométrica. A plataforma experimental possui um fio de LMF que desempenha o papel de atuador no controle de posição e/ou deformação da viga simplesmente engastada entre valores que o usuário definir previamente. Dessa forma, a viga é deformada pelo próprio peso em balanço, como também por uma carga externa optativa, que consequentemente deforma o fio. Assim, se faz necessário aplicar uma potência elétrica no fio através de uma fonte externa, de modo que recupere sua forma inicial por meio do desenvolvimento de uma força capaz de retornar a viga para a posição desejada.

Figura 1 - Perspectiva isométrica da plataforma experimental.



Fonte: CAMPOS (2018).

2.2. LIGAS DE MEMÓRIA DE FORMA

As LMF apresentam propriedades ligadas à sua estrutura cristalina, no qual possuem 2 (duas) fases essenciais com estrutura e propriedades distintas, que são a fase austenita, conhecida como fase de alta temperatura com uma estrutura cristalina Cúbica de Corpo

Centrado (CCC), e a fase martensítica, conhecida como fase de baixa temperatura que pode apresentar diversas orientações desde uma estrutura tetragonal, ortorrômbica ou monoclínica. Dessa forma, a temperatura define o início e o término de cada fase, em que a temperatura que dá início a transformação de fase da austenita em martensítica é chamada de Martensita Inicial (M_S), e a temperatura em que essa transformação termina é denominada Martensita Final (M_F). De modo análogo, a temperatura inicial e final, para a transformação de fase da martensítica em austenita são conhecidas por Austenita Inicial (A_S) e Austenita Final (A_F), respectivamente (SIMÕES, 2016).

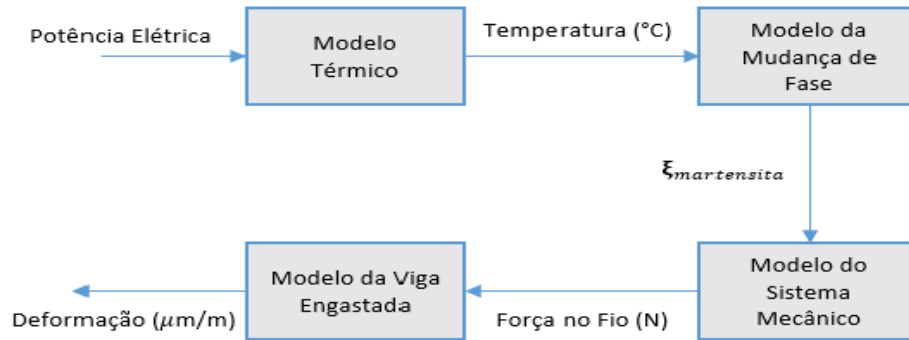
O EMF pode acontecer de 2 (duas) maneiras, seguindo o caminho simples (*one way*), no qual o material deformado mecanicamente recupera sua geometria original após ser aquecido, mas quando o material é resfriado não consegue retornar a sua forma deformada, e o caminho duplo (*two-way*), em que o material tem a capacidade de memorizar duas formas distintas, uma para temperaturas mais baixas e a outra para temperaturas mais elevadas (BARROSO, 2019).

As ligas Níquel-Titânio (NiTi) ou NITINOL foram descobertas no ano de 1963, no qual apresentavam muitas dificuldades com relação a fenômenos confusos por cerca de duas décadas, até que no ano de 1982, o conhecimento básico foi estabelecido fundamentado na relação entre sua microestrutura e o EMF. Dessa forma, o número de aplicações das LMF através das NiTi vem crescendo significativamente, de modo que apresentam deformações consideráveis em função da temperatura (CAMPOS, 2018).

2.3. MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem matemática do sistema proposto pode ser dividida em 4 (quatro) modelos: modelo térmico, modelo de mudança de fase, modelo do sistema mecânico e modelo da viga engastada. Dentre esses modelos, os 3 (três) iniciais correspondem ao atuador de LMF e último refere-se a viga simplesmente engastada. Na Figura 2, ilustra-se o esquemático de diagrama de blocos dos modelos do sistema proposto.

Figura 2 – Diagrama de blocos dos modelos do sistema proposto.



Fonte: BARROSO (2019).

De acordo com a Figura 2, aplica-se uma potência elétrica no atuador de LMF, na forma de fio, para aquecê-lo por meio do efeito Joule e, em seguida, o material sofre uma mudança em sua estrutura cristalina, conhecido como mudança de fase, em que essa mudança pode ser caracterizada através da fração martensita ξ , de modo que quando essa fração assume o valor $\xi = 1$ (100%), o material está na fase martensítica, ao passo que quando apresenta o valor $\xi = 0$ (0%), o material está na fase austenita (BARROSO, 2019). Essa fração determina a força aplicada no fio e consequentemente a deformação presente na viga engastada.

2.3.1. Modelo Térmico

O modelo térmico do atuador de LMF, na forma de fio, baseia-se na variação de temperatura para gerar uma força necessária para a deformação, no qual se faz necessário determinar as equações que descrevem este comportamento. Com isso, 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 disto, a parcela de calor referente a radiação pode ser considerada desprezível, uma vez que se trata de aplicações presentes na atmosfera, como também a troca de calor por condução pode ser desprezível, ao considerar que a temperatura atual é constante ao longo do fio de LMF (BARROSO, 2019). Assim, a Equação 1 se torna a Equação 2.

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

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

A partir da Equação 3 é possível determinar a temperatura T no fio, através de uma equação diferencial de primeira ordem, que derivou 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 do fio e T_{amb} é a temperatura ambiente.

2.3.2. Modelo de Mudança de Fase

As LMF apresentam uma histerese entre a relação da fração martensita e a temperatura, em que do ponto de vista físico, essa histerese se concentra na dissipação e assimilação de calor latente relacionada a mudança de fase e, com isso, tanto o aquecimento quanto o resfriamento são retardados (BARROSO, 2019).

Nas Equações 4 e 5, é apresentado o modelo matemático da fração martensita em função da temperatura, para o aquecimento e o resfriamento, respectivamente. Estas relações foram desenvolvidas de forma empírica, através da teoria de estatística Fermi-Dirac, no qual foi desenvolvida por *Liang e Rogers*, e foram utilizadas em diversos trabalhos, tal como Velázquez and Pissaloux (2012), Abdelaal and 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 do sistema mecânico do atuador de LMF é possível estabelecer uma relação entre a deformação ε e a fração martensita ξ do fio, no qual o atuador realiza um trabalho mecânico após sofrer a deformação (CAMPOS, 2018). Com isso, a deformação presente no fio pode ser expressa de acordo com equação diferencial de primeira ordem, vista na Equação 6.

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

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.

O módulo de elasticidade, de acordo com Xiaoguang et al. (2017), 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). Com isso, a Equação 7 ilustra o módulo de elasticidade do fio.

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

Além disso, a força presente no fio ao ser deformado está ligada ao módulo de elasticidade E_{LMF} , da deformação ε e da área transversal A_t do fio de 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

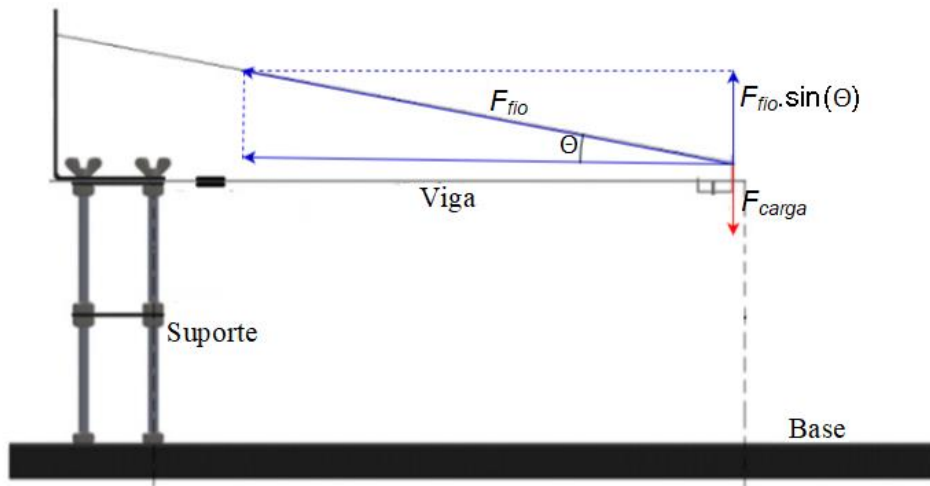
O modelo da viga engastada está ligado à deformação ε_{viga} presente na extremidade livre da viga, causada através da força resultante F_R contida nessa extremidade. Dessa forma, para uma viga com comprimento L , largura a , espessura b e módulo de elasticidade E_{viga} , a deformação na viga é dada pela Equação 9.

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

A Figura 3, ilustra-se o diagrama de corpo livre das forças presentes na extremidade da viga engastada, no qual é possível perceber que a força resultante é determinada pela diferença $F_{fio} \cdot \sin(\theta) - F_{carga}$ e, com isso, a Equação 9 se torna 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 3 - Diagrama de corpo livre das forças presentes na extremidade da viga engastada.



Fonte: CAMPOS (2018).

2.4. CONTROLADORES PID

O controle consiste no processo de estabelecer que uma variável de um sistema busque uma referência definida, sendo passível de variações. Para sistemas de controle que estabelece uma comparação entre um sinal de saída e um sinal de entrada como referência, no qual essa diferença seja utilizada como meio de controle, esse tipo de sistema é chamado de controle de malha fechada, ou controle com realimentação. Entretanto, quando o sinal de saída não influencia na ação de controle, ou seja, a saída não é verificada a título de comparação com a referência, esse sistema é denominado de controle de malha aberta (FRANKLIN *et al.*, 2013; CAMPOS, 2018). Além do mais, a diferença entre o sinal de referência e o sinal de saída é conhecida como erro.

O controlador Proporcional, Integral e Derivativo, conhecido por PID, está presente na maioria dos sistemas de controle e é o mais utilizado nas indústrias, no qual na literatura contém diversas regras de sintonia e métodos de sintonia automática (OGATA, 2010). Esse tipo de controlador pode apresentar uma grande quantidade de malhas de controle, que se encarregam de manter as variáveis do processo, como vazão, temperatura e nível em um valor definido (A. B. Maia *et al.*, 2020).

O controlador PID apresenta 3 (três) parâmetros associados ao processo de controle, tais como: Ganho Proporcional (K_p), Tempo Integral (T_i) e Tempo Derivativo (T_d). Com isso, o termo K_p simboliza um ganho ajustável de um amplificador, ao passo que o fator T_i está associado a contornar problemas no sinal de saída em regime permanente, no qual procura fazer com que o erro seja nulo. Já o parâmetro T_d depende da taxa de variação do sinal de erro, e tem o intuito de antecipar a resposta do controlador, para assim convergir mais rápido para a referência (OGATA, 2010; CAMPOS, 2018).

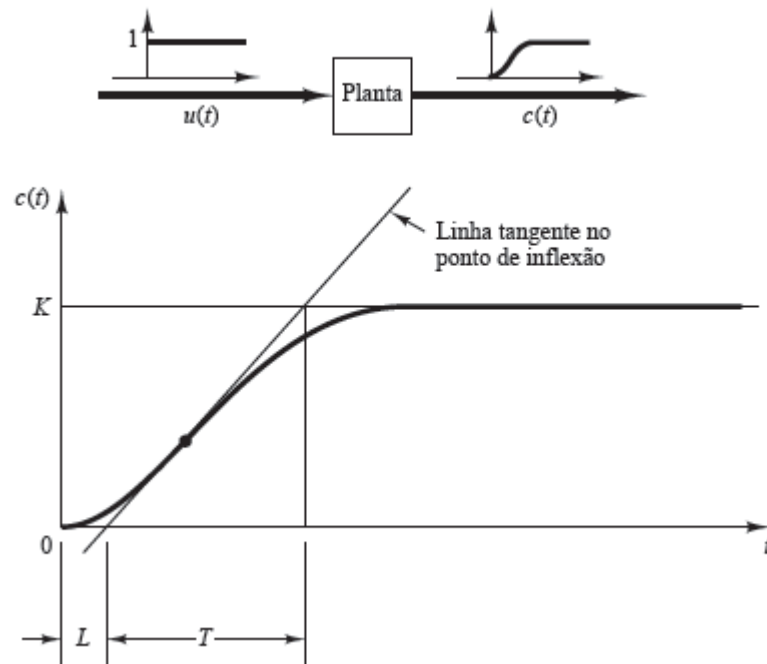
Para determinar os parâmetros que garantam um bom desempenho é necessário realizar um processo de sintonia do controlador, em que o trabalho proposto por Ziegler e Nichols (1942) apresenta 2 (dois) métodos para essa sintonia (OGATA, 2010). O primeiro método, conhecido como curva de reação, se baseia na resposta ao degrau no processo de malha aberta, à medida que o segundo, ou método do ponto crítico, consiste em trabalhar no sistema de malha fechada somente com a ação proporcional do controlador, de modo que gradativamente essa ação é aumentada até que se observe oscilações sustentadas na saída desse sistema (A. B. Maia *et al.*, 2020).

2.4.1. Método da Curva de Reação

O método da curva de reação consiste em obter a resposta dinâmica da planta, em malha aberta, a uma entrada tipo degrau $u(t)$, no qual a curva do sinal de saída $c(t)$ apresentará o formato S quando não há a presença de integradores, nem de polos conjugados complexos dominantes na planta (OGATA, 2010).

A curva de formato S é caracterizada através de 2 (duas) constantes, o tempo de atraso L e a constante de tempo T , no qual essas constantes 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), como ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Curva de formato *S* a resposta ao degrau unitário de uma planta.



Fonte: OGATA (2010).

Com isso, 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), de acordo com a Equação 11.

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

Assim, para o método da curva de reação, Ziegler e Nichols propuseram que os parâmetros do controlador sejam determinados de acordo com a Tabela 1.

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

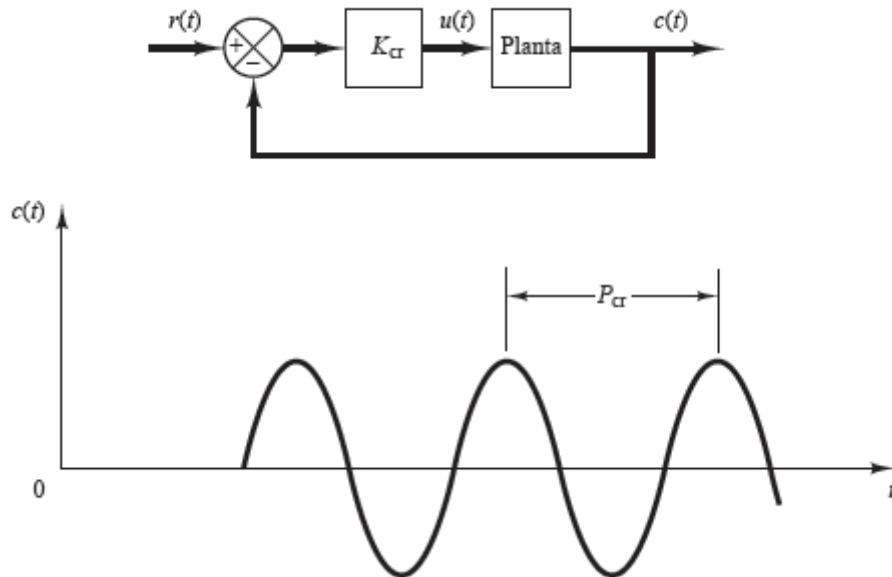
Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
<i>P</i>	$\frac{T}{L}$	∞	0
<i>PI</i>	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
<i>PID</i>	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

Fonte: Adaptado de OGATA (2010).

2.4.2. Método do Ponto Crítico

O método do ponto crítico utiliza somente a ação Proporcional, ou seja, $T_i = \infty$ e $T_d = 0$, para o sistema em malha fechada. Com isso, o K_p é elevado até um valor crítico K_{cr} , no qual a saída apresenta oscilações sustentadas pela primeira vez (OGATA, 2010). Dessa forma, o ganho crítico K_{cr} e o seu período crítico P_{cr} correspondente, são determinados como ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Oscilação sustentada com período P_{cr} para o método do ponto crítico.



Fonte: Adaptado de OGATA (2010).

Portanto, para o método do ponto crítico, Ziegler e Nichols propuseram que os parâmetros do controlador sejam determinados de acordo com a Tabela 2.

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

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

Fonte: Adaptado de OGATA (2010).

2.4.3. Função de Transferência do Controlador P

Em um controlador que possui somente a ação proporcional apresenta a relação entre o sinal de controle $u(t)$ e o sinal de erro $e(t)$, conforme a Equação 12. Este tipo de controlador geralmente apresenta erro de regime permanente para o sinal de referência fixo, de modo que quando maior for o ganho K_p menor será o erro (FRANKLIN *et al.*, 2013; CAMPOS, 2018).

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

Com isso, a função de transferência do Controlador P no domínio de Laplace está ilustrada na Equação 13.

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

2.4.4. Função de Transferência do Controlador PI

Em um controlador que possui a ação proporcional juntamente com a integral, apresenta a seguinte relação entre o sinal de controle $u(t)$ e o sinal de erro $e(t)$, como visto na Equação 14. Além disso, a adição do termo integral auxilia no problema do controlador P, de modo que a saída desse termo consiste em um somatório de valores de anteriores de $e(t)$, que é adicionado ao controlador e, assim contornar o erro de regime permanente (FRANKLIN *et al.*, 2013; BARROSO, 2019).

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

Com isso, a função de transferência do Controlador PI no domínio de Laplace está apresentada 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

O controlador que apresenta as ações proporcional, integral e derivativa, consiste em uma junção do controlador PI com o termo derivativo. Dessa forma, a relação entre o sinal de controle $u(t)$ e o sinal de erro $e(t)$, é visto na Equação 16. Com isso, a ação do termo derivativo tem dependência na taxa de variação do erro, no qual tende a antecipar a correção do sinal do erro, para assim diminuir o tempo de resposta e melhorar a estabilidade do sistema (OGATA, 2010; CAMPOS, 2018).

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

Com isso, a função de transferência do Controlador PID no domínio de Laplace está ilustrada na Equação 17.

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

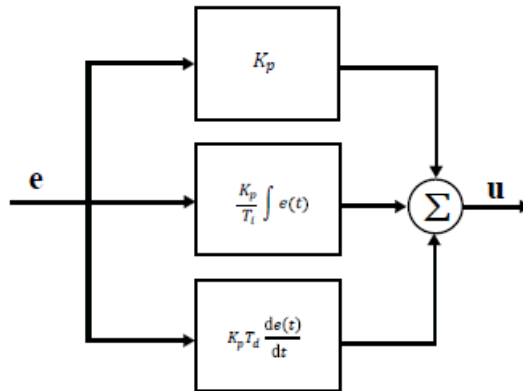
Nas Figuras 6 e 7, estão ilustradas as formas PID paralela ideal e PID série, respectivamente. O controlador PID é implementado em sua maioria das vezes na forma paralela ideal, que pode ser apresentado pelo Ganho Integral K_i e Derivativo K_d , os quais se relacionam com Ganho Proporcional K_p conforme as Equações 18 e 19, respectivamente.

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

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

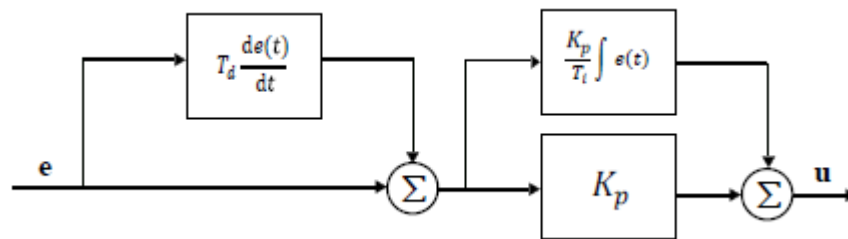
Na Figura 8 está ilustrado um sistema de malha fechada com um controlador PID.

Figura 6 – Diagrama de blocos do controlador PID na forma paralelo ideal.



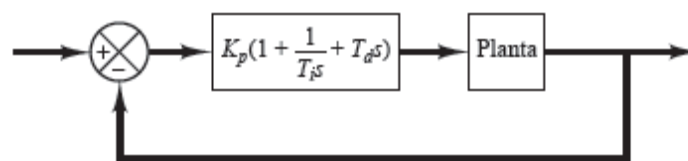
Fonte: PINTO (2014).

Figura 7 - Diagrama de blocos do controlador PID na forma série.



Fonte: PINTO (2014).

Figura 8 – Controle PID de uma planta genérica.



Fonte: OGATA (2010).

2.5. MÉTODO DO RELÉ PARA SINTONIA PID

O método do relé foi proposto por Aström e Hägglund (1984), e consiste em uma técnica baseada em frequência (PINTO, 2014), operando com um relé em malha fechada, de modo a gerar um sinal de controle. Portanto, quando a variável de processo alcançar valores definidos como limites, o relé altera o sinal de controle, gerando oscilações no processo (A. B. Maia *et al.*, 2020).

Os experimentos realizados com relé em malha de realimentação se tornaram populares após o trabalho de Aström e Hägglund, objetivando identificar a planta dos processos através da obtenção do ganho crítico e da frequência crítica. Portanto, deixa-se automático o método do ponto crítico para o controlador PID proposto por Ziegler e Nichols, que se baseia em um experimento simples de identificar a frequência, entretanto, é difícil automatizar e/ou executar esse experimento, uma vez que o funcionamento do processo está próximo do limite da estabilidade, o que chega a ser perigoso para a operação de uma planta industrial (COELHO *et al.*, 2004).

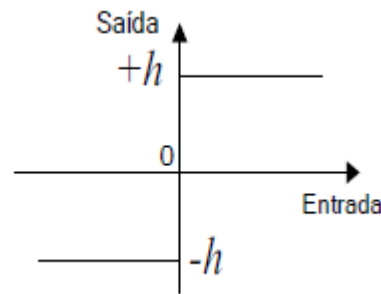
A utilização de métodos automáticos, para fornecer parâmetros eficazes ao processo, na sintonia de controladores PID, aumenta a confiabilidade e gerar grandes benefícios ao sistema de controle. Além disto, na prática o modelo dinâmico mais manipulado nos processos industriais pode ser modelado através de funções de transferência de primeira ou de segunda ordem com atraso de transporte, em que o uso do método do relé além de ser bastante empregado para realizar a sintonia dos controladores PID, também identifica o modelo do sistema (A. B. Maia *et al.*, 2020; COELHO *et al.*, 2004).

A abordagem do relé se baseia na modelagem da não-linearidade de sua função descritiva, como também na interpretação do diagrama de Nyquist, para obter informações sobre a frequência do processo (COELHO *et al.*, 2004). Essa função descritiva associa a componente fundamental harmônica da saída como a significativa, uma vez que os harmônicos superiores da saída para um elemento não-linear apresentam frequentemente amplitudes menores em comparação a componente fundamental. Além disto, como a maioria dos sistemas de controle utilizam filtros passa-baixas, as componentes harmônicas superiores são atenuadas quando se compara a fundamental (PINTO, 2014).

Através da saída do processo e da especificação do relé é possível estimar a função de transferência da planta em malha aberta, no qual existe 2 (dois) tipos de relés para este ensaio, o sem histerese e o com histerese. Além do mais, a histerese é implementada no relé quando existe a presença de ruído, no qual sem a histerese o relé pode chavear nos estados liga e desliga e, com isso, apresentar um comportamento randômico. Assim, em aplicações práticas a largura da histerese deve ser estimada de acordo com o nível de ruído, de pelo menos o dobro da amplitude desse nível (COELHO *et al.*, 2004).

Na Figura 9, ilustra-se a curva característica entrada-saída do relé sem histerese.

Figura 9 - Curva característica entrada-saída do relé sem histerese.



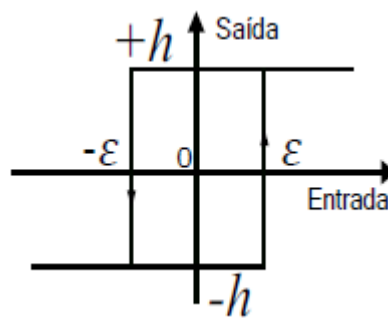
Fonte: Adaptado de PINTO (2014).

Assim, a função descritiva $N(a)$ do relé sem histerese é vista na Equação 20, em que a é a amplitude de oscilação do sinal de saída do processo (COELHO *et al.*, 2004).

$$N(a) = \frac{4h}{\pi a} \quad (20)$$

Na Figura 10, ilustra-se a curva característica entrada-saída do relé com histerese ε , no qual essa histerese faz com que o sinal de saída apresente um atraso em relação à entrada (PINTO, 2014).

Figura 10 - Curva característica entrada-saída do relé com histerese.



Fonte: Adaptado de PINTO (2014).

Dessa forma, a função descritiva $N(a)$ do relé com histerese é apresentada na Equação 21.

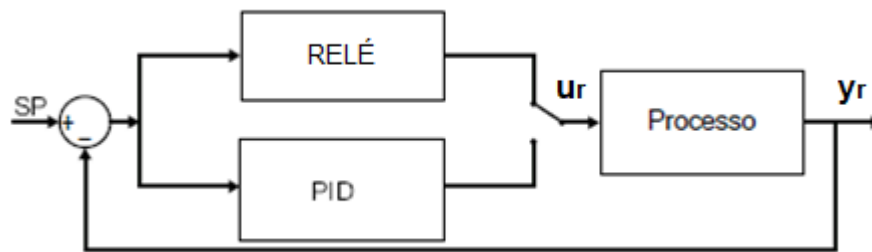
$$N(a) = \frac{4h}{\pi a} \angle -\sin^{-1}(\varepsilon/a) \quad (21)$$

2.5.1. Sintonia do Controlador PID

A sintonia do controlador pode ser automatizada com a inclusão de um relé que opera em malha fechada, como ilustrado na Figura 11. Com isso, o usuário deve suspender o sinal de controle proveniente do controlador PID, e submeter o processo ao sinal gerado através do relé (A. B. Maia *et al.*, 2020).

Em que, **SP** é o sinal de referência e **y_r** é o sinal de saída do sistema, ou seja, a variável de processo.

Figura 11 – Estrutura fundamental para o método do relé em malha fechada.



Fonte: Adaptado de PINTO (2014).

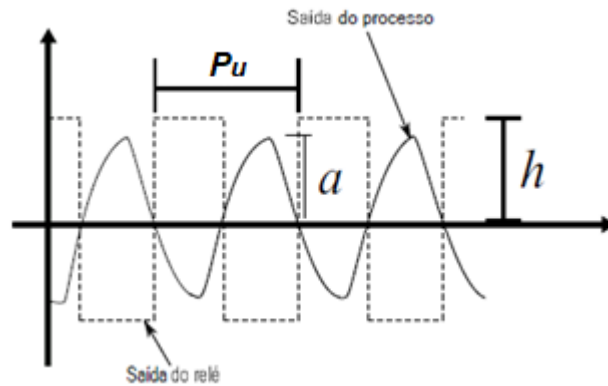
Caso o relé da Figura 11 seja sem histerese, a comutação segue a seguinte regra:

- Se o $erro(t) \geq 0$, então $u(t) = h$
- Se o $erro(t) < 0$, então $u(t) = -h$

Assim, na Figura 12, ilustra-se a saída do processo via ensaio do relé sem histerese, no qual é possível determinar o período crítico **P_u**. Além disso, o ganho crítico **K_u** para esse tipo de ensaio pode ser determinado de acordo com a Equação 22. Com isso, a partir destes dois parâmetros e das regras de sintonia de Ziegler- Nichols para o método do ponto crítico, vistas na Tabela 2, pode-se realizar a sintonia do controlador PID.

$$K_u = \frac{4h}{\pi a} \quad (22)$$

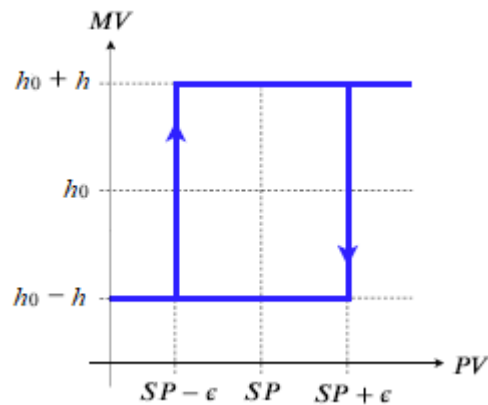
Figura 12 - Saída do processo via ensaio do relé sem histerese.



Fonte: Adaptado de PINTO (2014).

Na Figura 13, ilustra o funcionamento do relé com histerese, de modo que o sinal de controle u_r varia entre $h_0 - h$ e $h_0 + h$ e, com isso o sinal de saída apresenta oscilações sustentadas.

Figura 13 - Funcionamento do relé realimentado com histerese.



Fonte: Adaptado de A. B. Maia *et al.* (2020).

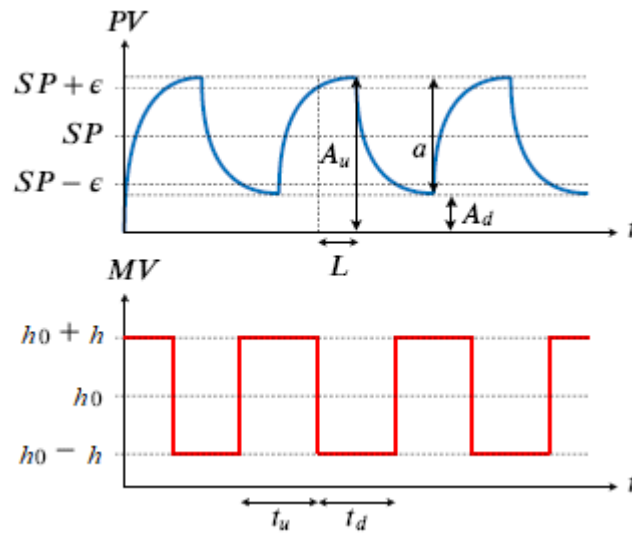
Dessa forma, a comutação do relé com histerese da Figura 13 segue a seguinte regra:

- Se o $erro(t) \geq SP + \epsilon$, então $u(t) = h_0 + h$
- Se o $erro(t) < SP - \epsilon$, então $u(t) = h_0 - h$
- Se $SP - \epsilon < erro(t) < SP + \epsilon$, então $u(t) = u(t-1)$

A Figura 14, ilustra o comportamento do sinal de saída quando o sistema é submetido ao sinal do relé da Figura 13. Com isso, é possível notar que o período crítico P_u é determinado

ao somar os tempos em que o relé fica ligado e desligado, ou seja, $t_u + t_d$. O atraso de transporte L ou tempo morto, é obtido ao medir o tempo que o sinal de saída leva para atingir a amplitude de pico A_u , após o chaveamento do relé entre ligado/desligado. O valor de a corresponde a diferença entre as amplitudes máxima e mínima do sinal de saída, ou seja, $A_u - A_d$ (A. B. Maia *et al.*, 2020).

Figura 14 – Sistema operado pelo relé realimentado com histerese.



Fonte: Adaptado de A. B. Maia *et al.* (2020).

Existe um critério a ser adotado para o sinal de controle, entre os tempos t_u e t_d , como também com o período P_u , conforme a Equação 23. Esse critério foi adotado no trabalho de A. B. Maia *et al.* (2020), e visa que o valor absoluto entre a diferença desses tempos em relação ao período, represente um valor inferior a 10%.

$$\left| \frac{t_u - t_d}{P_u} \right| < 0,1 \quad (23)$$

Se a Equação 23 for satisfeita, o ganho crítico K_u é determinado de acordo com a Equação 24. Com isso, em posse do ganho crítico e do período crítico é possível determinar os parâmetros do controlador PID a partir do método do ponto crítico de Ziegler e Nichols, através da Tabela 2.

$$K_u = \frac{4h}{\pi\sqrt{a^2 - \varepsilon^2}} \quad (24)$$

2.5.2. Identificação do Modelo

A identificação do modelo de primeira ordem com atraso de transporte pode ser obtida a partir da Equação 25, no qual o Ganho Estático K da planta é determinado através do quociente entre a integral do sinal de saída pela integral do sinal de controle, conforme a Equação 26 (A. B. Maia *et al.*, 2020).

$$G(s) = \frac{K e^{-Ls}}{\tau s + 1} \quad (25)$$

$$K = G(0) = \frac{\int_0^{P_u} y_r(t) dt}{\int_0^{P_u} u_r(t) dt} \quad (26)$$

Para determinar o parâmetro τ é necessário primeiramente obter a constante de tempo normalizada θ (A. B. Maia *et al.*, 2020). Dessa forma, a constante de tempo normalizada e a constante de tempo podem ser calculadas conforme as Equações 27 e 28, respectivamente.

$$\theta = \ln \frac{(d_0 + d)K - \epsilon}{(d_0 + d)K - A_u} \quad (27)$$

$$\tau = t_u \left(\ln \frac{2dKe^\theta + d_0K - dK + \epsilon}{dK + d_0K - \epsilon} \right)^{-1} \quad (28)$$

2.6. MÉTRICAS DE DESEMPENHO

Em sistemas de controle moderno é utilizado um parâmetro, conhecido como índice de desempenho, para verificar quantitativamente o desempenho do sistema de controle. Dessa forma, o controle deve ser desenvolvido de tal maneira a minimizar esse índice, para assim certificar um ótimo desempenho do processo (CAMPOS, 2018).

Além disso, as características do desempenho de um sistema de controle são especificadas através do transitório da resposta a um degrau, no qual quando a resposta ao degrau é conhecida, é possível determinar a resposta para qualquer tipo de entrada (OGATA, 2010). Assim, durante a resposta transitória, o sistema apresenta alguns parâmetros no domínio do tempo importantes, em que é possível realizar uma análise sobre o comportamento da variável de controle através desses parâmetros.

2.6.1. Índice IAE

Um dos índices de desempenho mais utilizado é conhecido por Integral do Erro Absoluto (**IAE**), descrito na Equação 29, no qual consiste na integração do erro no tempo (PINTO, 2014).

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt \quad (29)$$

2.6.2. Índice ITAE

Devido os erros iniciais do processo de integração serem bastantes significativos e, com o intuito de oferecer mais destaque aos erros que acontecem mais posteriormente na resposta do sistema, ou seja, em regime permanente, foi desenvolvido a Integral do Erro Absoluto ponderado pelo Tempo (**ITAE**), descrito na Equação 30 (CAMPOS, 2018).

$$ITAE = \int_0^T t \cdot |e(t)| dt \quad (30)$$

2.6.3. Índice ISE

Um índice análogo ao **IAE**, é a Integral do Erro ao Quadrado (**ISE**), que como o próprio nome sugere, consiste na integral do erro ao quadrado no tempo. Esse índice pode ser determinado como ilustrado na Equação 31 (PINTO, 2014).

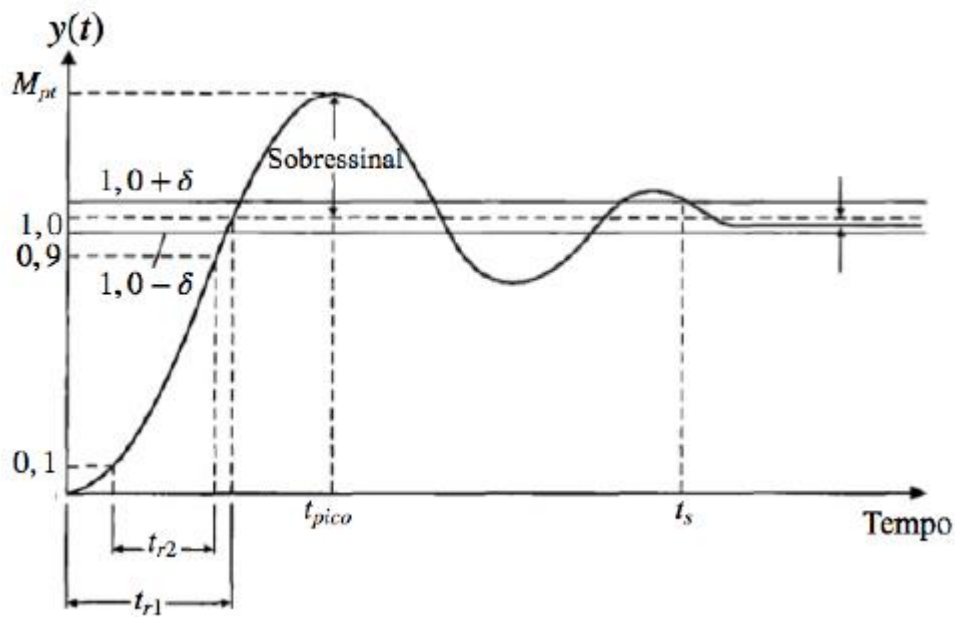
$$ISE = \int_0^T e(t)^2 dt \quad (31)$$

2.6.4. Tempo de Subida

O tempo de subida (t_r) representa a rapidez que o processo responde a um degrau de referência. Em sistemas subamortecidos com sobressinal, ou seja, sistemas que apresentam oscilações antes de estabilizar, como também possuem polos complexos conjugados, o tempo de subida indica o tempo que a variável de controle leva entre 0% a 100% para alcançar o sinal

de referência. Já para sistemas superamortecidos, que consiste em sistemas de resposta mais lenta e polos reais distintos, esse tempo corresponde ao intervalo entre 10% a 90%, no qual a variável de controle demora em relação a referência (BARROSO, 2019). Com isso, na Figura 15, ilustra-se os tempos de subida t_{r1} e t_{r2} , para sistemas subamortecidos e superamortecidos, respectivamente.

Figura 15 – Resposta ao degrau unitário de um sistema de controle genérico.



Fonte: CAMPOS (2018).

2.6.5. Tempo de Acomodação

O tempo de acomodação (t_s) representa o tempo que a curva de resposta da variável de controle se acomoda dentro de uma faixa percentual, no qual normalmente essa faixa corresponde a $\pm 2\%$ ou $\pm 5\%$, em relação ao sinal de referência (OGATA, 2010). Assim, na Figura 15, o tempo de acomodação corresponde ao tempo, a partir do qual, o sinal de saída $y(t)$ permanece dentro da faixa entre as retas $y(t) = 1,0 \pm \delta$ (CAMPOS, 2018).

2.6.6. Sobressinal

O sobressinal (**OVS**) da variável de controle para uma referência tipo degrau é determinado de acordo com a Equação 32, em que M_{pt} corresponde ao valor máximo que essa

variável pode alcançar durante o transitório e **ref** representa o sinal de referência, no qual a variável de processo deve assumir no regime permanente (BARROSO, 2019).

$$OVS = \frac{M_{pt} - ref}{ref} 100\% \quad (32)$$

2.7. TRABALHOS REALIZADOS

Em BARROSO (2019), realizou-se o controle de posição através de um atuador com LMF, no qual foi utilizado uma plataforma composta por uma viga de aço engastada, em que os objetivos do trabalho estão voltados para caracterizar o material, modelar matematicamente o sistema, simular os modelos obtidos em *software* e comparar com resultados experimentais e, além disso, aplicar um sistema de controle em malha fechada da deformação da viga. As estratégias de controle utilizados são PI e PID, em que os resultados foram validados de acordo com o índice de desempenho ISE, tempo de subida, tempo de acomodação e sobressinal. Para validar o modelo analítico, de modo a certificar se os conceitos matemáticos são adequados, foi utilizado o *software* de simulação MATLAB R2018a e sua ferramenta de simulação Simulink, para construir o modelo da plataforma em malha aberta. O sistema apresenta uma potência mínima necessária de 2,4 W, equivalente a 50% do ciclo máximo de trabalho do PWM, que é capaz de produzir uma transformação martensita-austenita completa e uma força suficiente para deformar a viga até 350 $\mu m/m$. Apesar dos controladores PI e PID serem capaz de controlar a planta de maneira satisfatória, foi possível notar que o controlador PI apresentou desempenho inferior em relação ao controlador PID, devido a sua menor complexidade e robustez, com a ausência do termo derivativo. Entre os controladores PID projetados pelos métodos da Curva de Reação e do Ponto Crítico, o que apresentou melhor desempenho foi o que foi projetado através do método do Ponto Crítico.

Em CAMPOS (2018), foi proposto técnicas de controle que tentam contornar a necessidade de obter um modelo analítico de uma planta composta por um atuador de Níquel-Titânio, como também, busca alcançar uma representação matemática para essa planta, tanto por equações matemáticas que regem seus submodelos, quanto por métodos de identificação de sistemas. Afim de verificar o funcionamento do modelo analítico da planta em malha aberta, foram aplicados um conjunto de sinais do tipo degrau, em que os valores do ciclo de trabalho escolhidos foram: 75%, 70 %, 65% e 55%. E, em seguida, foi implementado um modelo identificado de primeira ordem com atraso de transporte, através do método da curva de reação,

em que foi comprovado que o modelo identificado se aproximou melhor do comportamento real da planta, em comparação ao modelo analítico obtido via modelagem, para os mesmos ciclos de trabalho. Com isso, foi projetado controladores PI e PID, visto que os controladores P apresentam erros de controle muito altos. Além disso, foi implementado um controlador Fuzzy-PID híbrido com intuito de conferir a seleção dos ganhos do controlador PID. Para análise de resultados foram utilizados 4 (quatro) cenários distintos: referência quadrada com e sem carga; e referência senoidal com e sem carga. Com isso, para os controladores PI e PID mais agressivos, quem apresentou melhor resposta em todos os cenários foi o controlador PID. Já para os controladores com agressividade normal, tanto o PI quanto o PID apresentaram uma resposta razoável para situações sem carga, enquanto para situações com carga os controladores PI obtidos via ponto crítico não apresentaram uma robustez boa em relação à regulação da deformação da viga. Para os controladores menos agressivos, o controlador PID apresentou respostas satisfatórias ao rastreo do sinal de referência, entretanto o controle PI não foi capaz de rastrear a referência para situação de carregamento mecânico. O controlador híbrido apresentou mais robustez para situações com carga mecânica, no qual ocorreu sobressinal apenas para esta situação de carregamento. Dessa forma, os controladores projetados através da curva de reação e o controlador híbrido, apresentaram melhor compromisso entre índice de desempenho e carregamento mecânico.

Em PEQUENO (2012), foi implementado um controle de posição de equilíbrio de uma viga em balanço, que contém um atuador de Liga com Memória de Forma e extensômetros como sensores, com aplicação de diferentes técnicas de controle. Para a aquisição e controle de dados foi utilizado o *software* de instrumentação virtual LabView, executado em um microcomputador pessoal, equipado com uma placa PCI-Express fabricada pela *National Instruments*, modelo PCI-6036e, conectada à plataforma por meio de um bloco modelo BNC-2110. Com esse sistema de aquisição e controle de dados, implementou-se controladores PID com sintonia automática dos parâmetros através de uma ferramenta de *Auto-tuning* do LabView, como também sintonia do controlador através do método geométrico das raízes. A sintonia foi realizada tanto para o caso do acionamento por fonte de tensão, como para o acionamento por fonte de corrente, em que os ensaios foram executados com valores baixos de frequência, para assim ser possível o controlador acompanhar o sinal de referência. A frequência inicial foi de 30 *mHz*, que foi incrementada para 50 *mHz* e depois para 70 *mHz*. Outra variável nos ensaios foi a carga imposta na extremidade livre da viga, no qual as condições foram aproximadamente 0N, 1N e 3N. Para garantir que o sistema funciona em vários tipos de excitação, os sinais de entrada foram variados entre onda senoidal, quadrada e

triangular. Foi verificado a potência elétrica para os ensaios, em que a potência máxima da fonte de tensão foi de 6,2 W, enquanto que para a fonte de corrente foi de 6,7 W. Foi verificado que, baseado em resultados gráficos e índices de desempenho calculados, o controle realizado com fonte de corrente apresentou melhores resultados em relação ao controle realizado com fonte de tensão. Além disso, foi constatado que a sintonia do controlador através do método do lugar geométrico das raízes, obteve melhores resultados do que a sintonia feita de modo automático pelo LabView.

No trabalho de A. B. Maia et al. (2020), foi aplicado o método do relé para identificar regiões diferentes de um sistema não linear, aproximá-las às de um sistema linear de primeira ordem com atraso de transporte e sintonizar controladores do tipo PI para estas regiões. O diagrama de processo é composto por dois tanques acoplados através de uma tubulação plástica, no qual o Tanque 1 funciona como reservatório de água que abastece o Tanque 2 através de uma bomba centrífuga, cuja a saída está conectada a uma válvula de abertura proporcional e acionamento pneumático. O objetivo do trabalho é controlar o nível do Tanque 2 através da velocidade da bomba. Com isso, utilizou-se uma referência no nível do Tanque 2 de 50% para sintonizar um controlador PI, além de obter a resposta do sistema em malha fechada para o controlador PI de ganhos fixos sintonizados em 50% e ganhos escalonados, para 4 regiões diferentes: 8%, 18%, 68% e 82% de nível. Embora todos os casos o sistema tenha rastreado a referência, o comportamento do *overshoot* e do tempo de acomodação evidenciam a não linearidade da planta, como também a lentidão do controle PI de ganhos fixos para controlar o nível do Tanque 2 para regiões distantes da região que ele foi sintonizado. O PI de ganhos escalonados atendeu a especificação de *overshoot* máximo de 25% para todas as regiões, além da resposta do sistema ser mais rápida nos níveis de 8% e 18%, e o tempo de acomodação ser maior nas regiões de 68% e 82%.

No trabalho de PINTO (2014), foi proposto uma ferramenta de sintonia e autossintonia PID através do método do relé com histerese, além de utilizar algumas técnicas de avaliação de desempenho de malha de controle de processo, tais como: IAE, ISE, Goodhart, variância de sinais e índice de Harris. Os resultados dos testes realizados foram decorrentes de duas plantas simuladas (Planta simulada de temperatura da Altus e Sistema simulado de 5 tanques acoplados) e duas plantas reais (malha de vazão e malha de nível). Assim, os testes nas plantas reais foram realizados no CENPES no pólo industrial da Petrobras em Atalaia, Aracaju-SE. A linguagem de programação utilizada foi o Java, através da IDE NetBeans e a comunicação com a planta foi via OPC (*OLE for Process Control*), no qual é pré-requisito para o funcionamento do *software* e, além disto, a biblioteca usada para a comunicação OPC foi a JeasyOPC. O

primeiro teste foi realizado em uma planta didática T5552 da Amatrol, para o controle de nível e vazão, em que a planta apresentou ruído e erro de medição nos sensores. Assim, os testes consistiram em levar a planta até o ponto de operação de 3,63 polegadas (nível) do tanque, utilizada como referência de malha fechada para o teste do relé, no qual a abertura da válvula neste ponto de operação foi de 73,1% e a amplitude de oscilação do relé foi de 24%. Além disso, a histerese foi fixada em 0,1 polegadas, que corresponde a duas vezes a amplitude do ruído e o tempo de amostra foi de 1 segundo. Após a coleta de dados como, ganho estático, constante de tempo e atraso de transporte, foi utilizado as tabelas de Ziegler-Nichols, Cohen-Coon e Ziegler-Nichols com fator “detuning” para obter as sintonias PI, devido a existência de um ruído, o que faz com que a ação derivativa deixe o sistema instável. A melhor sintonia, em comparação ao método do relé com e sem histerese, foi a de Ziegler-Nichols com fator “detuning” através do relé com histerese, visto que o relé sem histerese apresenta um desempenho inferior quando o sistema muda de referência em torno do ponto de operação.

2.8. SOFTWARE MATLAB/SIMULINK

O MATLAB (MATrix LABoratory) consiste em um *software* interativo, que tem a capacidade de realizar cálculos, programação e visualização gráfica, no qual é utilizado uma linguagem matemática familiar para a solução de diversos problemas. Além disso, o MATLAB possui vários módulos que agrupam funções para diversas aplicações, onde uma ferramenta bastante conhecida dentre esses é o SIMULINK (CARVALHO, 2015).

O SIMULINK foi desenvolvido pela companhia MathWork, no qual consiste em uma ferramenta empregada para modelagem, análise e simulação de sistemas dinâmicos. Além disto, este programa pode ser utilizado em sistemas lineares e não lineares, como também em discretos e contínuos no tempo (CARVALHO, 2015).

Independentemente de ser uma ferramenta específica, o SIMULINK trabalha em parceria com o *software* MATLAB, em que este utiliza linhas de comando, enquanto que o SIMULINK usa uma interface gráfica ao usuário (GUI), que é representado por diagramas de blocos.

Com o auxílio do *software* SIMULINK pode-se realizar modelagem matemática de equações diferenciais para distintas aplicações na área de engenharia, em especial em sistemas dinâmicos, no qual é possível simular graficamente (LOBO, 2017).

3. METODOLOGIA PARA MODELAGEM E CONTROLE

Neste trabalho, a modelagem, controle e simulação da deformação de uma viga simplesmente engastada foi realizada através do *software* MATLAB/SIMULINK, utilizando o método de resolução de Euler de 1ª ordem com tempo de amostragem de 0,01 s.

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 simulação do controle, utilizou-se o controlador PI e PID com sintonia via relé com histerese.

3.1. MODELO TÉRMICO DO FIO ATUADOR

O modelo térmico do fio de LMF foi implementado conforme a Equação 3, no qual os parâmetros necessários presentes nessa equação, foram retirados do trabalho de BARROSO (2019), e da folha de dados de DYNALLOY (2021), como ilustrados na Tabela 3.

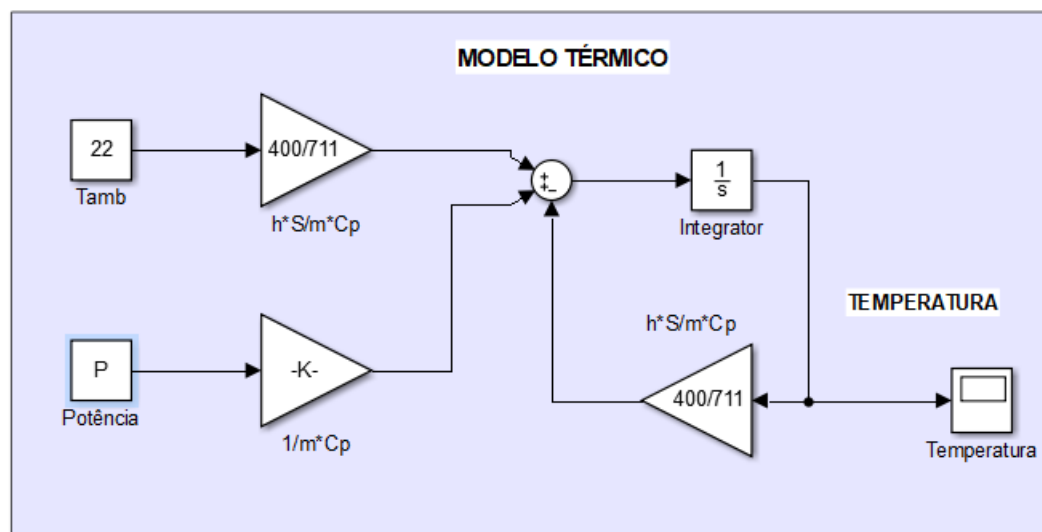
Tabela 3 – Parâmetros do modelo térmico

Parâmetro	Valor	Fonte
d	0,2mm	Experimental
l	789mm	Experimental
S	$4,96 \cdot 10^{-4} m^2$	Experimental
V	$2,48 \cdot 10^{-8} m^3$	Experimental
T_{amb}	22°C	Experimental
m_{LMF}	$1,58 \cdot 10^{-4} kg$	Experimental
ρ_{LMF}	$6,450 kg/m^3$	Fabricante
c_p	837 J/kg.K	Fabricante
k	1.800 W/(m.K)	Fabricante
R_{LMF}	29Ω/m	Fabricante
h	150 W/m ² . °C	Fabricante

Fonte: Adaptado de BARROSO (2019).

Com isso, na Figura 16 está ilustrado o modelo térmico do fio de LMF implementado através do *software* MATLAB/SIMULINK, no qual esse modelo tem como entrada a potência elétrica e como saída a temperatura no fio.

Figura 16 – Modelo térmico implementado através do *software* MATLAB/SIMULINK.



Fonte: Autoria própria (2021).

Inicialmente a entrada do sistema assumiu um degrau de 3,5 W durante 30 segundos e, em seguida um degrau de 0 W por mais 30 segundos, para assim investigar o comportamento das variáveis associadas ao fio atuador de LMF e a viga simplesmente engastada, ao aquecimento e resfriamento. As variáveis em estudo nesta etapa inicial foram: temperatura, fração martensita, deformação do fio, força no fio e deformação na viga. Com isso, durante os 30 segundos iniciais foram obtidas as repostas no tempo dessas variáveis, já a etapa de resfriamento serviu para analisar o comportamento histerético do material, em relação a temperatura.

Para a etapa de sintonia e controle de processo foi inserida na entrada do sistema o relé realimentado com histerese e após a sintonia, foi comutado para os controladores PI e PID na forma paralelo ideal.

3.2. MODELO DE MUDANÇA DE FASE DO FIO ATUADOR

O modelo de mudança de fase do fio de LMF foi implementado conforme as Equações 4 e 5, no qual os parâmetros necessários presentes nessas equações são as temperaturas de transformação. Essas temperaturas foram retiradas do trabalho de BARROSO (2019), como ilustrados na Tabela 4. Essas temperaturas estão associadas ao comportamento histerético do fio e foram utilizadas na fase inicial de aquecimento e resfriamento do sistema, quando aplicado e retirado o degrau de potência elétrica.

Tabela 4 – Temperaturas de transição do fio.

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

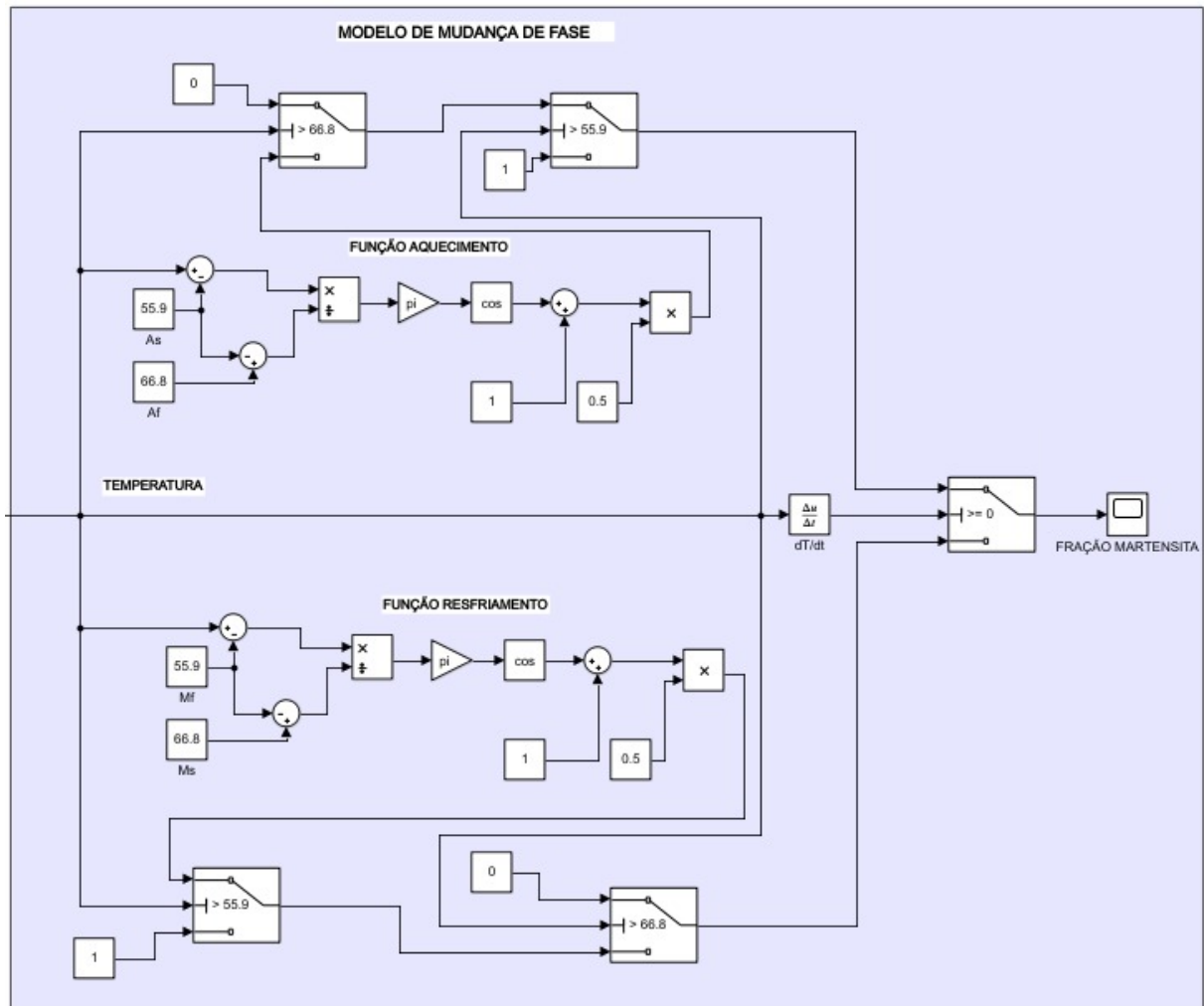
Fonte: Adaptado de BARROSO (2019).

Apesar de apresentar diversas vantagens, a utilização desses atuadores para controle de posição enfrenta dificuldades na caracterização de parâmetros, devido a sua variação no tempo e, consequentemente na sua modelagem matemática do sistema analítico (BARROSO, 2019). O principal inconveniente tratando-se dessas ligas é o fato de que o controle de posição baseado em sistemas mecânicos com atuadores de LMF, nem sempre é possível, visto que é difícil modelar precisamente o comportamento deste material, cujo a característica da mudança de fase, responsável pelo EMF, apresenta um comportamento histerético (CAMPOS, 2018).

Devido a este modelo analítico apresentar dificuldades de ser descrito precisamente, fato este relatado nos trabalhos de BARROSO (2019) e CAMPOS (2018), no qual nem sempre é possível realizar o controle de posição em sistemas mecânicos que possui atuadores de LMF, devido ao seu comportamento histerético, foi feito uma adaptação nas temperaturas de transformação do fio de LMF, fazendo a histerese ser nula somente na etapa de sintonia e controle. Assim, as temperaturas de transição da fase martensítica utilizadas nessa etapa serão: $M_f = A_s$ e $M_s = A_f$.

Dessa forma, na Figura 17 está ilustrado o modelo de mudança de fase do fio de LMF implementado através do *software* MATLAB/SIMULINK, no qual esse modelo tem como entrada a temperatura do fio e como saída a fração martensítica.

Figura 17 - Modelo de mudança de fase implementado através do *software* MATLAB/SIMULINK.



Fonte: Autoria própria (2021).

3.3. MODELO DO SISTEMA MECÂNICO DO FIO ATUADOR

O modelo do sistema mecânico do fio de LMF foi implementado conforme as Equações 6, 7 e 8, no qual os parâmetros necessários presentes nessas equações foram retirados do trabalho de BARROSO (2019), como ilustrados na Tabela 5.

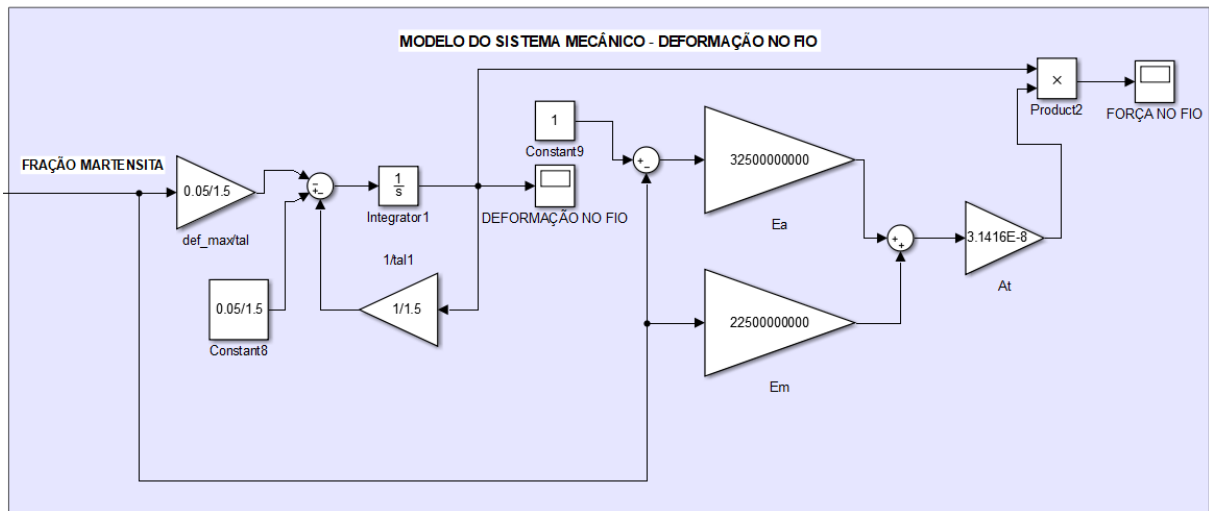
Tabela 5 – Parâmetros mecânicos do material.

Parâmetro	Valor
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 (2019).

Com isso, na Figura 18 está ilustrado o modelo do sistema mecânico do fio de LMF implementado através do *software* MATLAB/SIMULINK, no qual esse modelo tem como entrada a fração martensítica do fio e como saída a força gerada no fio.

Figura 18 - Modelo do sistema mecânico implementado através do *software* MATLAB/SIMULINK.



Fonte: Autoria própria (2021).

3.4 MODELO DA VIGA SIMPLEMENTE ENGASTADA

O modelo da viga engastada foi implementado conforme a Equação 10, no qual descreve o comportamento da variável de processo, a deformação na viga. Além disso, os parâmetros necessários desta equação, foram retirados do trabalho de BARROSO (2019), como ilustrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros da viga engastada.

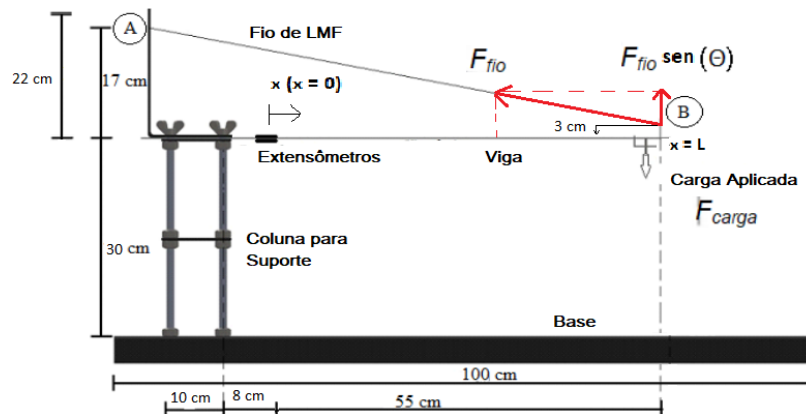
Parâmetro	Valor
L	55 cm
a	26 mm
b	2 mm
E_{viga}	$20,6 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$
ρ_{viga}	7.860 kg/m^3
I	$1,73 \cdot 10^{-11} \text{ m}^4$

Fonte: Adaptado de BARROSO (2019).

Para determinar o ângulo θ associado a componente vertical da força do fio, presente na Equação 10, utilizou-se a relação trigonométrica do arco tangente para os valores ilustrados na Figura 19. Assim, foi determinado como a seguir:

$$\theta = \text{tg}^{-1} \left(\frac{14 \text{ cm}}{73 \text{ cm}} \right) = 10,8564^\circ = 0,18948 \text{ rad}$$

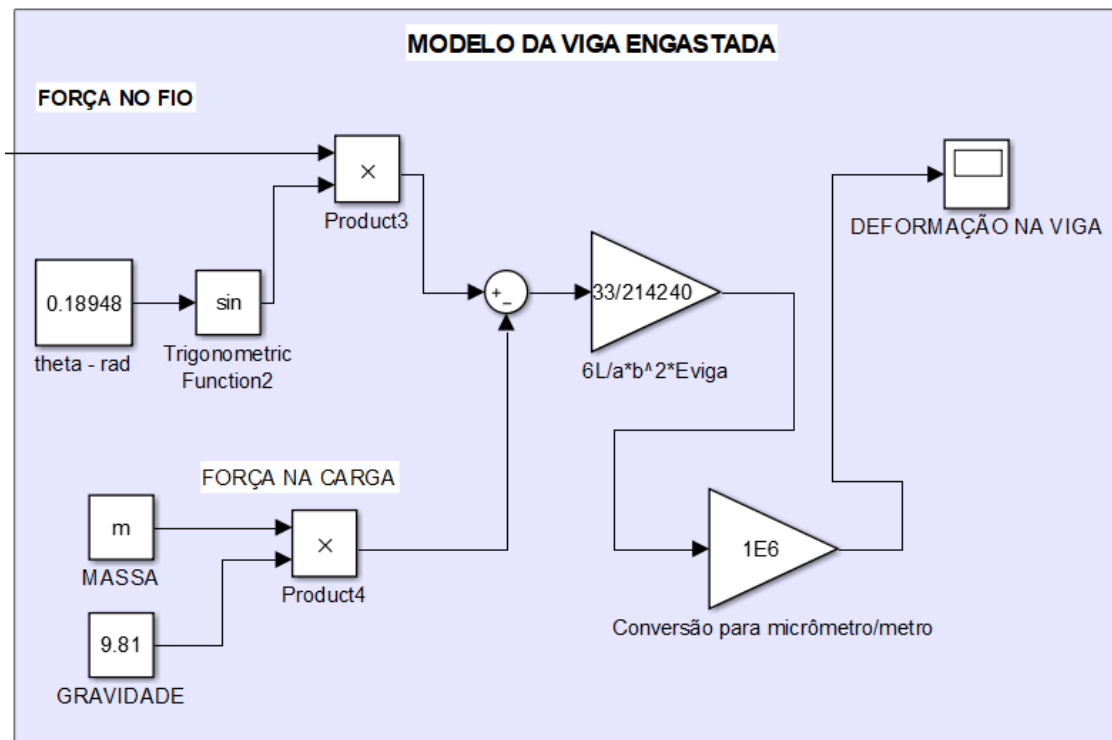
Figura 19 – Representação das dimensões da viga engastada.



Fonte: BARROSO (2019).

Portanto, na Figura 20 está ilustrado o modelo da viga engastada, com atuador de LMF, implementado através do *software* MATLAB/SIMULINK, no qual esse modelo tem como entradas a força no fio e uma carga (massa) facultativa, e como saída a deformação na viga, que representa a variável de controle. O sistema foi simulado com e sem carga mecânica, no qual o valor utilizado será apresentado na etapa de sintonia e controle.

Figura 20 - Modelo da viga engastada implementado através do *software* MATLAB/SIMULINK.



Fonte: Autoria própria (2021).

3.5. SINTONIA E CONTROLE DE PROCESSO

A configuração do relé utilizada neste trabalho foi desenvolvida, de forma alternativa ao método original, por Yu (2006), no qual é utilizado o relé com histerese como forma preventiva de possíveis ruídos no sinal de saída do processo (A. B. Maia et al., 2020). Após a modelagem da planta foi aplicado a estratégia de controle em malha fechada, para manter a deformação na extremidade da viga engastada sobre valores desejados. Na Figura 21, ilustra-se o esquemático do ensaio via relé e o controlador PID, montado com o auxílio do *software* MATLAB/SIMULINK, em que foi inserido uma chave que comuta entre o relé e o controlador PID, como também um bloco de saturação que limita os níveis de potência inseridos na planta, no qual o intuito foi evitar valores de potência não aceitáveis para o processo. Os limites adotados foram de 0 W a 10 W.

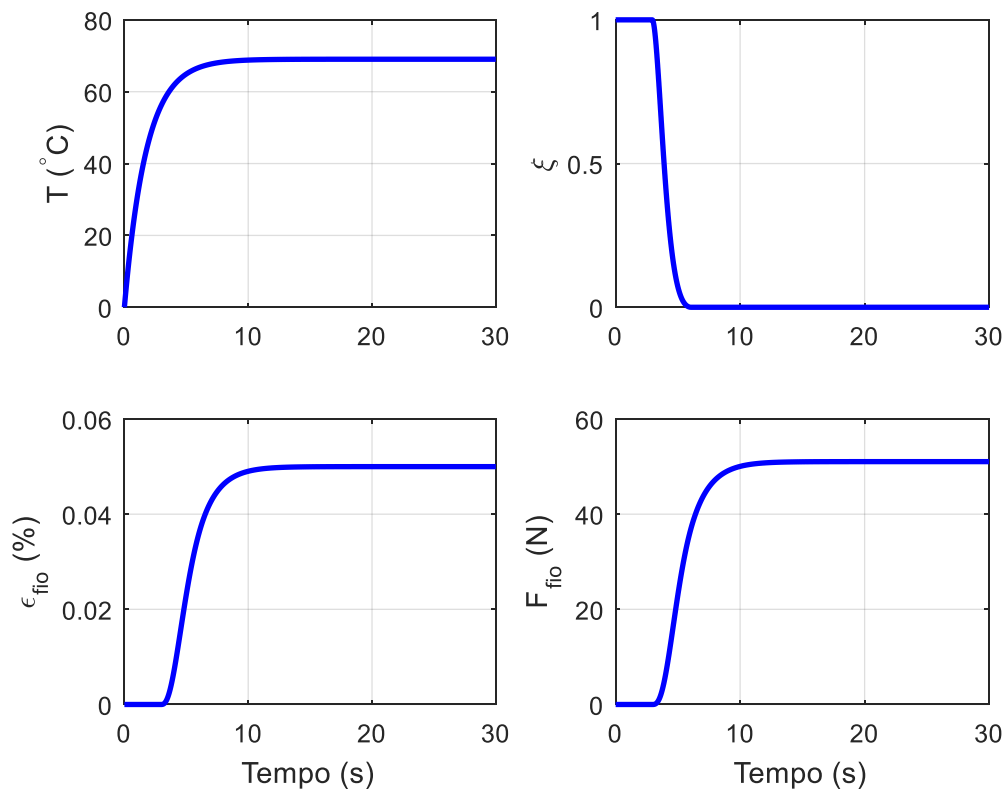
Para a implementação do controlador PI foi utilizado o mesmo esquemático apresentado na Figura 21, de modo que o termo derivativo T_d foi zerado para esse tipo de controlador. Os ensaios para a sintonia via relé com histerese ocorreram com e sem carga mecânica, no qual o valor utilizado foi 0,200 kg, para os controladores PI e PID. Para o relé foram utilizados os

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. RESULTADO DO MODELO

Na Figura 22, está ilustrado a resposta do modelo do atuador de LMF ao degrau de Potência elétrica, em relação ao tempo. Essa resposta refere-se ao aquecimento do fio de LMF, no qual é possível notar o comportamento das variáveis Temperatura, Fração martensita, Deformação do fio e Força no fio.

Figura 22 - Resposta para o aquecimento do modelo do atuador de LMF ao degrau de Potência elétrica.



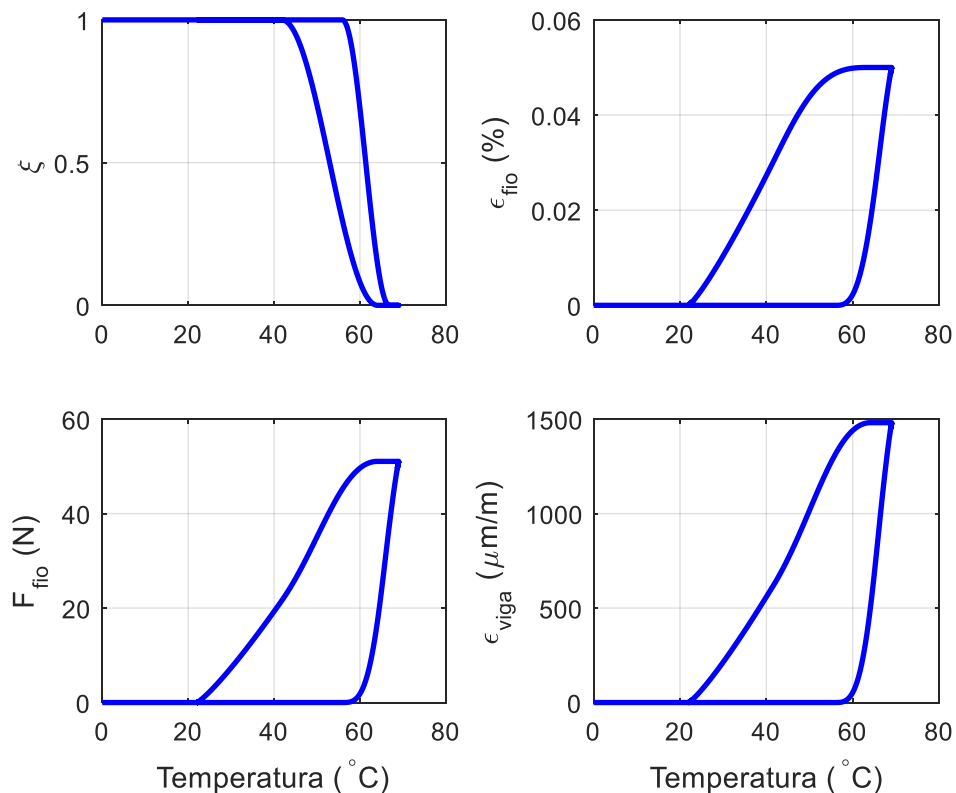
Fonte: Autoria própria (2021).

A Temperatura do fio de LMF apresentou um valor de regime permanente de $69,04^{\circ}\text{C}$, a Fração martensita iniciou com o valor 1 (um) e finalizou em 0 (zero), o que comprova que o material teve sua transformação completa da fase martensítica para a fase austenita, no qual sua transformação começou em $2,95$ s e terminou em $6,08$ s. Este resultado já era esperado, visto que a temperatura atingida foi superior a temperatura final da fase Austenita, que consiste em

66,8 °C. Já a Deformação no fio alcançou seu valor de máxima deformação recuperável, que representa 5 %, e a Força no fio chegou a um valor em regime permanente de 51,05 N.

A Figura 23, ilustra o comportamento do sistema no aquecimento e resfriamento, em função da Temperatura, no qual é possível notar o comportamento histerético do atuador e, consequentemente, da viga simplesmente engastada. Esta análise foi realizada sem carga e, com isso, a Deformação na viga atingiu um valor máximo de 1481 $\mu\text{m}/\text{m}$. Além disso, é notável o caminho da transformação de fase martensítica em austenita, que inicia em 55,9 °C e finaliza em 66,8 °C, e o caminho distinto da transformação de fase austenita em martensítica, que começa em 64,1 °C e termina em 41,8 °C. Essa distinção de caminho é característica dos materiais de LMF, no qual é gerado a histerese do material.

Figura 23 - Resposta para o aquecimento e resfriamento do modelo do atuador de LMF ao degrau de Potência elétrica.



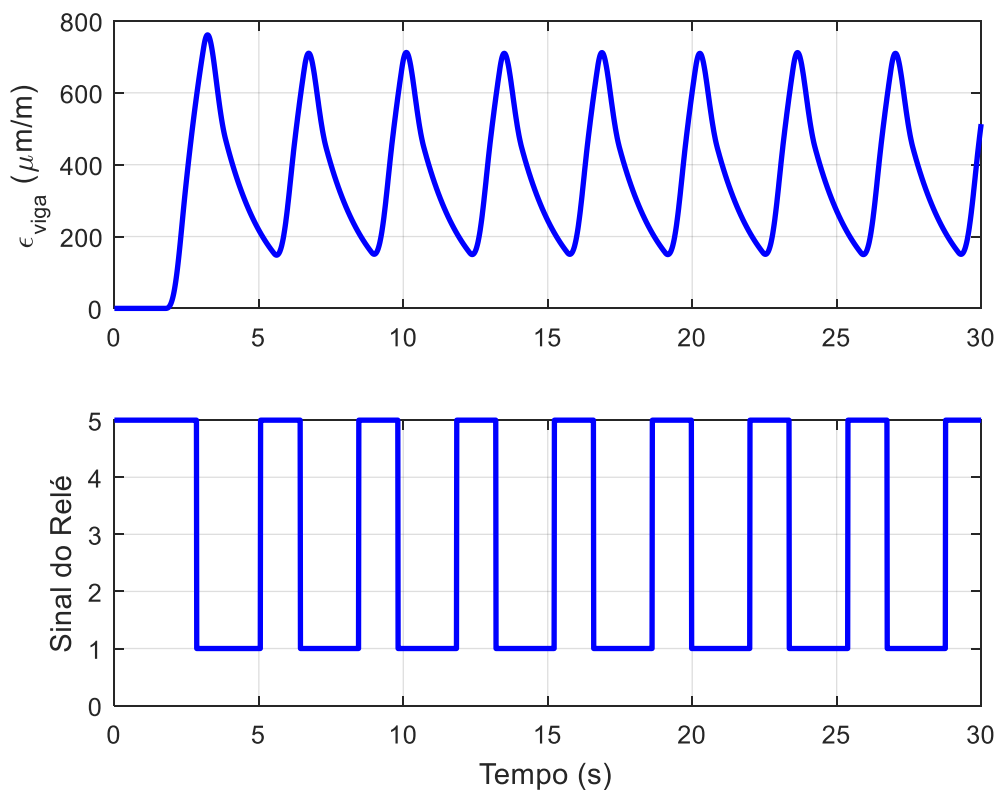
Fonte: Autoria própria (2021).

4.2. RESULTADO PARA SINTONIA VIA MÉTODO DO RELÉ E CONTROLE

4.2.1. Resultado para o Processo Sem Carga Mecânica

Na Figura 24, ilustra-se o resultado do ensaio do relé realimentado para o processo sem a presença da carga mecânica, no qual contém o sinal de saída do processo, ou seja, a variável de controle e a saída do relé.

Figura 24 – Resultado do ensaio do relé para o processo sem carga mecânica.



Fonte: Autoria própria (2021).

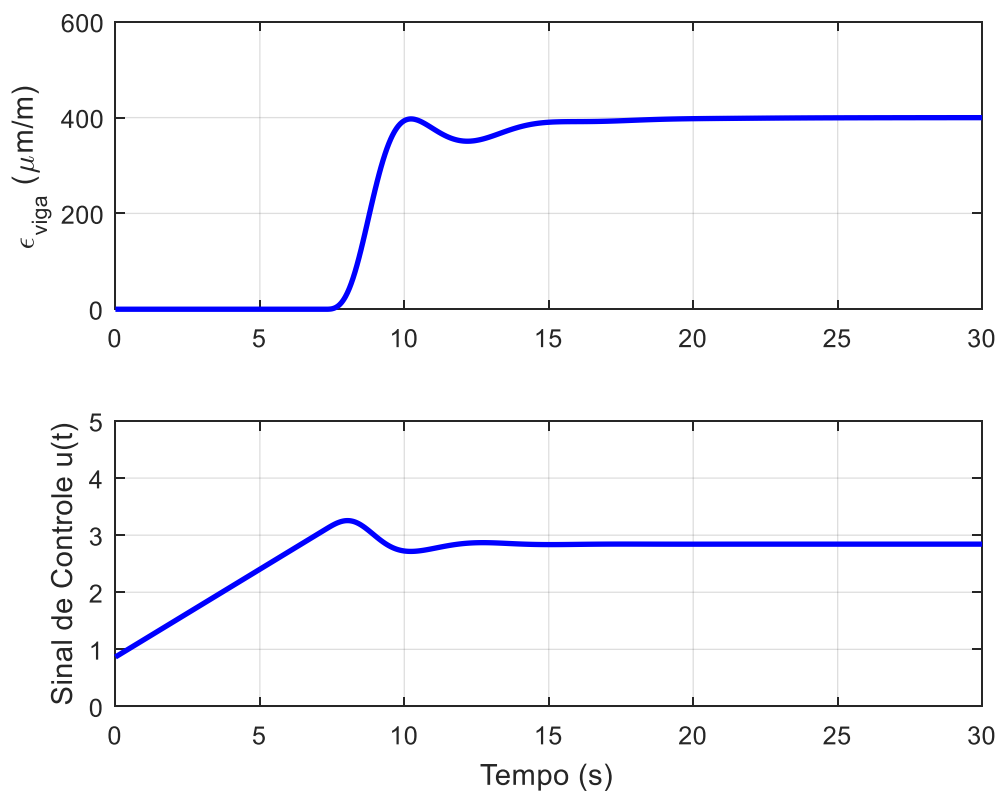
De acordo com a Figura 24 é possível perceber as oscilações da variável de controle do processo, a Deformação na viga simplesmente engastada, como também a comutação do relé entre os estados liga e desliga, obedecendo as regras de comutação do relé com histerese, como apresentado no embasamento teórico deste trabalho.

Na Equação 33, é visto a identificação do modelo de primeira ordem com atraso de transporte, para o processo sem carga mecânica, na qual foi determinada a partir do ensaio do relé.

$$G(s) = \frac{143,8 e^{-0,28s}}{0,3026 s + 1} \quad (33)$$

Na Figura 25, ilustra-se a resposta ao degrau para o sistema sem carga controlado através do controlador PI, como também o sinal de controle deste processo, no qual os valores dos parâmetros desse controlador são vistos na Tabela 7. Com isso, é possível notar que o sistema conseguiu convergir para a referência, contudo levou cerca de 7 s para responder ao sinal de controle, além de não apresentar sobressinal.

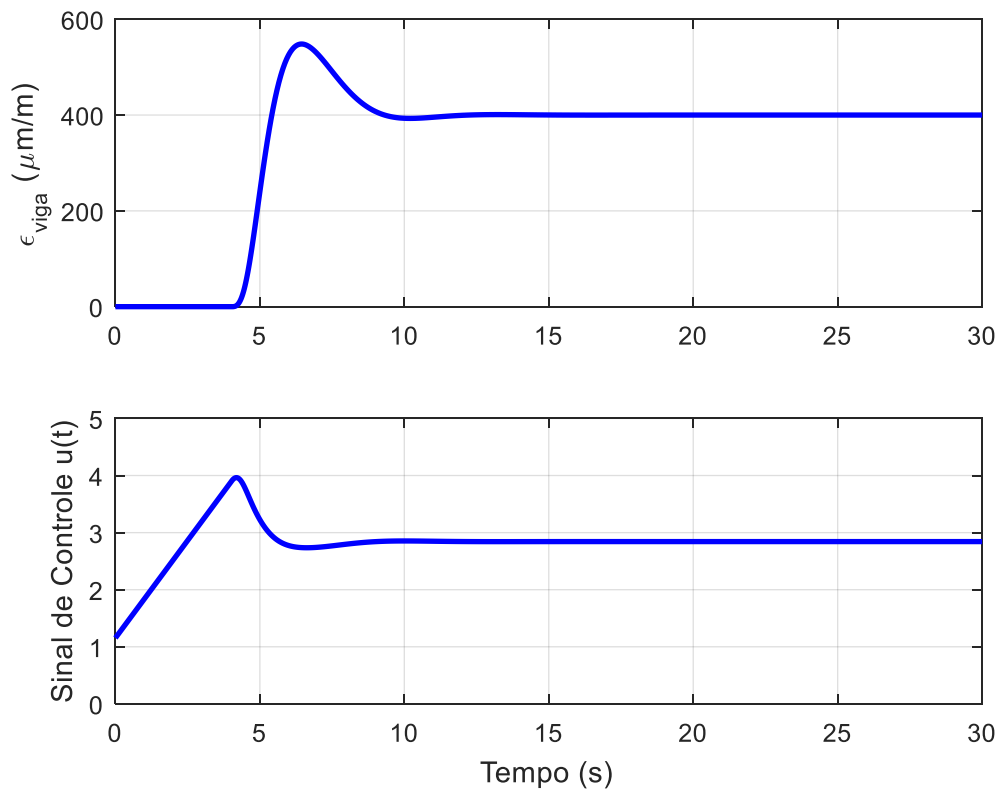
Figura 25 – Resposta ao Degrau para o sistema sem carga controlado pelo controlador PI.



Fonte: Autoria própria (2021).

A Figura 26, ilustra a resposta ao degrau e o sinal de controle para o sistema sem carga controlado através do controlador PID, em que seus parâmetros estão presentes na Tabela 7. Dessa forma, é notado que o sistema conseguiu convergir mais rápido para a referência, quando comparado ao controle PI, fato este devido a adição do termo derivativo que antecipa a correção do sinal do erro. Além disso, o sistema levou menos tempo para responder ao sinal de controle, cerca de 4 s, como também apresenta sobressinal superior a resposta obtida pelo controlador PI.

Figura 26 - Resposta ao Degrau para o sistema sem carga controlado pelo controlador PID.



Fonte: Autoria própria (2021).

Nas Tabelas 7 e 8 são apresentados o Ganho Proporcional (K_p), Tempo Integral (T_i), Tempo Derivativo (T_d), índice IAE, índice ITAE, índice ISE, Tempo de Subida (t_r), Tempo de Acomodação (t_s) e Sobressinal (*ovs*), para os controladores PI e PID, respectivamente, como forma de análise comparativa entre estes resultados.

Tabela 7 – Análise comparativa entre os parâmetros dos controladores PI e PID para o sistema sem carga.

Controlador	K_p	T_i	T_d
PI	0,0022	2,8167	0
PID	0,0029	1,6900	0,4225

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 8 - Análise comparativa entre as variáveis associadas a resposta do sistema sem carga para os controladores PI e PID.

Controlador	IAE	ITAE	ISE	t_r	t_s	<i>ovs</i>
PI	79,47	1269	218	10,23 s	16,61 s	0,00%
PID	84,77	1283	243,3	5,41 s	8,89 s	37,08%

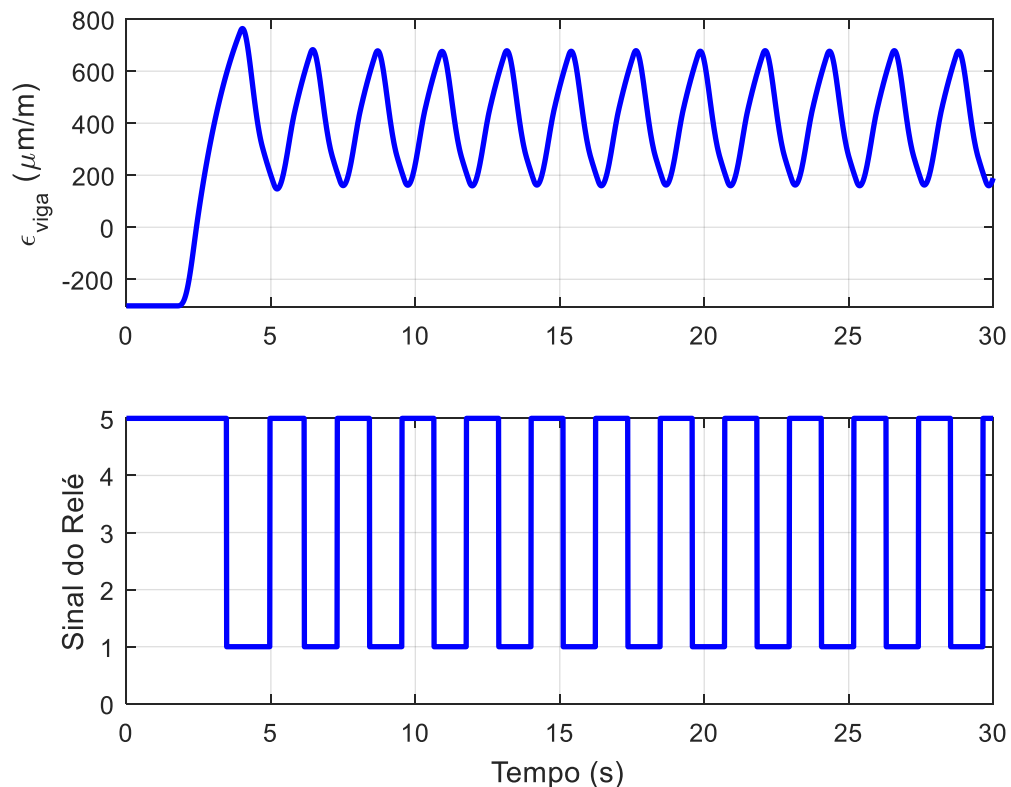
Fonte: Autoria própria (2021).

Após uma análise comparativa entre os resultados apresentados nas Tabelas 7 e 8, pode-se afirmar que o sistema controlado através do controlador PI apresentou um desempenho melhor em relação aos índices IAE, ITAE e ISE, entretanto o sistema controlado pelo controlador PID se mostrou mais rápido, no qual o Tempo de Subida foi alcançado em 5,41 s, ao passo que para o controle PI foi em 10,23 s, uma diferença de 4,82 s, já para o Tempo de Acomodação do controle PID, o valor chega a ser aproximadamente a metade do tempo em relação ao controle PI. Em termos de Sobressinal o controlador PI se mostra com um valor nulo e o controlador PID apresenta um valor de 37,08%. Com isso, para aplicações que exigi melhor rapidez ao tempo de resposta o controlador PID se mostrou mais eficiente, já se comparados aos índices IAE, ITAE e ISE, o controlador PI possui melhor desempenho.

4.2.2. Resultado para o Processo Com Carga Mecânica

De forma análoga a seção anterior, a Figura 27, ilustra o resultado do ensaio do relé realimentado para o processo com a presença da carga mecânica, no qual apresenta o sinal de saída do processo e o sinal de saída do relé.

Figura 27 - Resultado do ensaio do relé para o processo com carga mecânica.



Fonte: Autoria própria (2021).

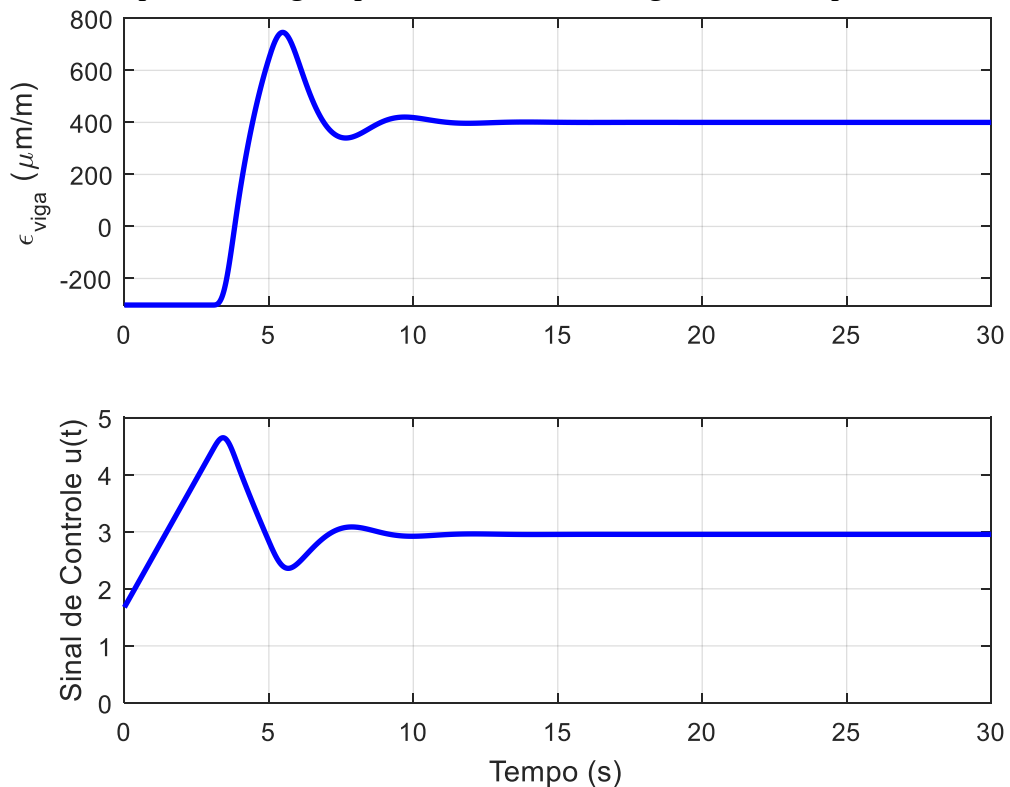
Com isso, conforme a Figura 27 é possível perceber, assim como no ensaio da seção anterior, as oscilações da variável de controle do processo e o chaveamento do relé entre os estados liga e desliga, obedecendo as regras de comutação para o relé com histerese.

Na Equação 34, é apresentado a identificação do modelo de primeira ordem com atraso de transporte, para o processo com carga mecânica.

$$G(s) = \frac{137,1 e^{-0,27s}}{0,2571 s + 1} \quad (34)$$

A Figura 28, ilustra a resposta ao degrau para o sistema com carga mecânica, controlado por meio do controlador PI, como também é visto o sinal de controle para este processo, no qual os parâmetros desse controlador estão presentes na Tabela 9. Assim, é possível perceber que o sistema respondeu mais rápido ao sinal de controle, tanto em relação ao controle PI, quanto em comparação ao controle PID, ambos sem carga mecânica, em que este tempo foi em torno de 3 s. Além disso, o sistema convergiu para a referência com um tempo inferior de quando estava sem a carga e o sobressinal apresentado foi não nulo, diferentemente do PI da seção anterior.

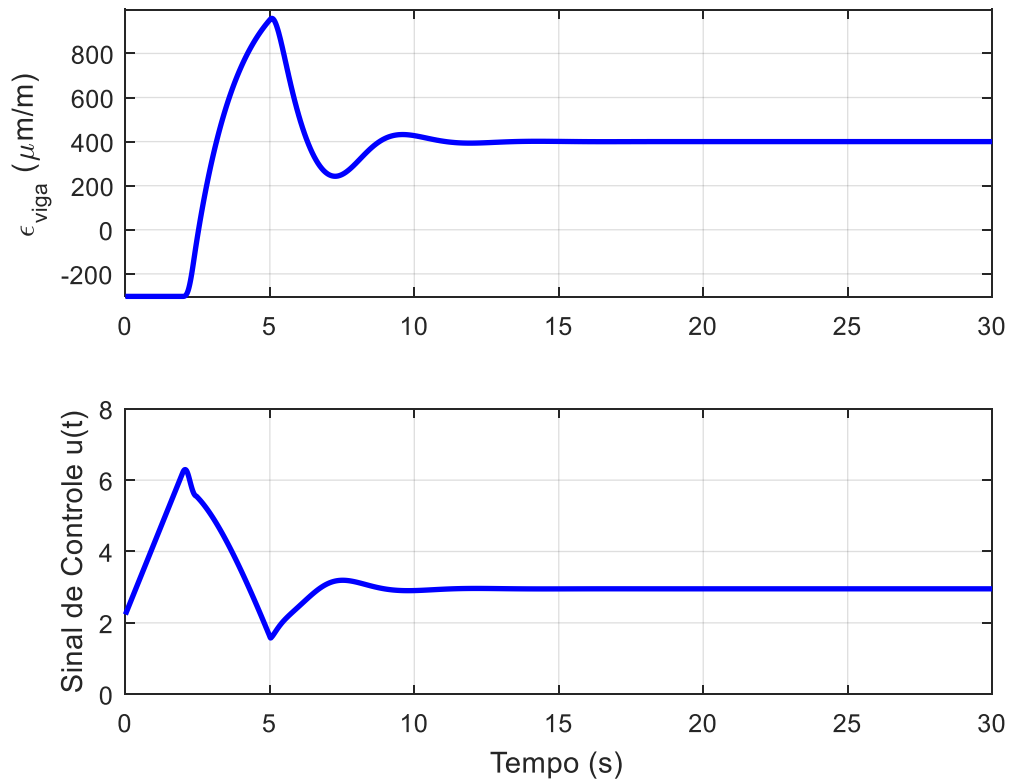
Figura 28 - Resposta ao Degrau para o sistema com carga controlado pelo controlador PI.



Fonte: Autoria própria (2021).

Na Figura 29, ilustra-se a resposta ao degrau e o sinal de controle para o sistema com carga mecânica, controlado através do controlador PID, em que seus parâmetros estão presentes na Tabela 9. Com isso, é possível notar que esse sistema foi o que respondeu mais rápido ao sinal de controle, cerca de 4 s, quando comparado aos demais controle vistos anteriormente, tanto sem carga quanto com carga. No entanto, o seu sobressinal foi o maior, comparado aos demais sistemas já vistos.

Figura 29 - Resposta ao Degrau para o sistema com carga controlado pelo controlador PID.



Fonte: Autoria própria (2021).

Assim como na seção anterior, a análise comparativa entre os parâmetros dos controladores PI e PID, e entre as variáveis associadas a resposta do sistema com carga para esses controladores, é realizada através de tabelas. Dessa maneira, nas Tabelas 9 e 10 estão ilustrados esses dados, de forma comparativa.

Tabela 9 – Análise comparativa entre os parâmetros dos controladores PI e PID para o sistema com carga.

Controlador	K_p	T_i	T_d
PI	0,0024	1,8583	0
PID	0,0032	1,1150	0,2788

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 10 - Análise comparativa entre as variáveis associadas a resposta do sistema com carga para os controladores PI e PID.

Controlador	IAE	ITAE	ISE	t_r	t_s	ovs
PI	90,23	1335	276,2	4,44 s	10,64 s	86,53%
PID	93,92	1338	309,6	3,15 s	10,74 s	139,75%

Fonte: Autoria própria (2021).

Após a realização da análise comparativa entre os resultados expostos nas Tabelas 9 e 10, pode-se concluir que o sistema controlado através do controlador PI apresentou melhor performance tanto em comparação aos índices IAE, ITAE e ISE, quanto em relação ao Tempo de Acomodação e ao Sobressinal, no qual o controle PID só apresentou o Tempo de Subida inferior ao controle PI, mas não chega a ser significativa. Além disso, o sobressinal do sistema controlado por meio do controlador PID exibiu um valor bastante alto, que correspondeu a 139,75%, assim como o sobressinal do controlar PI alcança um valor alto de 86,53% e, em relação aos índices, tanto o IAE quanto o ITAE apresentam valores próximos, ao passo que somente o ISE mostrou-se com uma diferença de 33,4 a mais para o PID. Já para o Tempo de Acomodação, apesar do sistema controlado pelo controlador PI ter sido melhor, os valores chegam a ser próximos, em comparação ao controle PID. Portanto, para o sistema com carga mecânica, o controlador que apresentou o melhor desempenho foi o implementado com o controle PI.

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho, foi realizado a modelagem, controle e simulação da deformação de uma viga simplesmente engastada através do *software* MATLAB/SIMULINK, na qual foi observado o controlador PI e PID, com sintonia via relé com histerese, no controle da deformação através de um fio atuador de Liga de Memória de Forma.

As dificuldades encontradas ocorreram na sintonia e controle do modelo do atuador de LMF, no qual nem sempre é possível realizar o controle de posição para esses sistemas, devido ao seu comportamento histerético. Portanto, deve-se realizar uma adaptação somente na etapa de controle, em que as temperaturas de transição da fase martensítica foram adaptadas para $M_f = A_s$ e $M_s = A_f$. Já para a análise do modelo em reposta ao degrau, para o aquecimento e resfriamento, as temperaturas se mantiveram com seus valores, como indicadas no trabalho de BARROSO (2019) e, com isso, foi investigado o comportamento histerético desse tipo de atuador.

Como resultado, pode-se determinar o modelo da função de transferência da planta em malha aberta, no qual foi estimada para um modelo de primeira ordem com atraso de transporte, tanto para o sistema sem carga, quanto para o sistema com carga mecânica. Com isso, foi possível concluir que para o sistema sem carga o controlador PID se mostrou mais eficiente para aplicações que exige uma melhor rapidez, ao passo que se aplicação necessita de melhores índices IAE, ITAE e ISE, o controlador PI possui o melhor desempenho. Já para o sistema com carga mecânica, o controlador PI apresentou melhor desempenho em todos os aspectos, comparado ao controlador PID.

Portanto, todos os objetivos propostos foram alcançados e os resultados encontrados apresentaram concordância ao embasamento teórico apresentado nesse trabalho. Assim, espera-se que esse trabalho possa auxiliar os possíveis pesquisadores interessados em estudar o controle de posição de uma viga simplesmente engastada, através de um atuador de LMF.

6. TRABALHOS FUTUROS

Como perspectiva de trabalhos futuros é proposto a utilização de outros métodos de controle, para assim comparar qual método apresenta a melhor proposta de controle para deformação de uma viga simplesmente engastada com atuador de LMF. Além disso, propõe-se determinar outro modelo de mudança de fase de um fio de LMF, com o intuito de realizar o controle com a presença da histerese desse fio.

7. 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).

A. B. Maria, Otávio, *et al.* **Aplicação do Método do Relé para identificação e controle PID com escalonamento de ganhos de um sistema não linear**. *Anais do Congresso Brasileiro de Automática 2020*, sbabra, 2020. DOI. Org (Crossref), <https://doi.org/10.48011/asba.v2il.1354>.

Aström, K.J. e Hägglund, T. (1984). **Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins**. *Automatica*, 20(5), 645 -651.

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.

BEER, Ferdinand P. *et al.* **Mecânica dos Materiais**. 5. ed. Porto Alegre: Amgh Editora Ltda, 2011.

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.

CARVALHO, Anderson S.. **Estudo da Utilização do Matlab/Simulink Aplicado ao Controle de Sistemas a Eventos Discretos**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

COELHO, Antônio Augusto Rodrigues *et al.* **IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS DINÂMICOS LINEARES**. Florianópolis: Ufsc, 2004. 181 p.

DALTIN, Daniel Celso. **Controle de Vibrações em Estruturas Flexíveis utilizando Observador de Estados**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Bauru, 2017.

DYNALLOY, Inc. **Technicalcharacteristicsofflexinolactuatorwires**. Disponível em: <https://www.dynalloy.com/pdfs/TCF1140.pdf>. Acesso em: 06 nov. 2021.

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

GRANTE (Grupo de Análise e Projeto Mecânico). **Apostila de Extensometria**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 5ª Edição. São Paulo: PEARSON, 2004.

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.

LOBO, Felipe Machado. **Contribuições ao ensino de controle usando Matlab, Arduino e Hardware de baixo custo**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

MOUTINHO, Carlos Manuel Ramos. **CONTROLO DE VIBRAÇÕES EM ESTRUTURAS DE ENGENHARIA CIVIL**. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2007.

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

PALMA, Paulo Henrique Tozoni. **Identificação Experimental e Controle Ativo de Vibrações Aplicadas em Estruturas Inteligentes**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.

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.

PEREIRA, Fernando do Carmo. **ESTUDO DO CONTROLE DE VIBRAÇÕES EM PISOS POR MEIO DE ABSORVEDORES DE MASSA SINTONIZADA**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2014.

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.

SANTOS, Rodrigo Borges. **Controle Ativo de Vibrações em Estruturas Flexíveis Utilizando Desigualdades Matriciais Lineares (LMIs)**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2008.

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.

TEIXEIRA, R. L. **Uma Metodologia de Projetos de Controladores Híbridos Inteligentes com Aplicações no Controle Ativo de Vibrações Mecânicas**. 1 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, Brasil, maio de 2001.

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).

Yu, C. (2006). *Autotuning of PID Controllers - A Relay Feedback Approach*. Springer, 2 edition.

Ziegler, J.G. e Nichols, N.B. (1942). **Optimum settings for automatic controllers**. trans. ASME, 64(11).