



**CAIO DEMATEI CAVENAGHI**

**APLICAÇÃO DE ALGORÍTMOS OTIMIZADOS PARA  
SINTONIA DE CONTROLADORES NA PLANTA DO FERRO  
DE SOLDA**

**LAVRAS - MG  
2019**

**CAIO DEMATEI CAVENAGHI**

**APLICAÇÃO DE ALGORÍTMOS OTIMIZADOS PARA SINTONIA DE  
CONTROLADORES NA PLANTA DO FERRO DE SOLDA**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia de Controle e Automação, para a obtenção do título de Bacharel.

**Prof. Dr. Leonardo Silveira Paiva**  
**Orientador**

**Lavras – MG**  
**2019**

*Aos meus pais Mary e Paulo Cesar e minha irmã Aline  
com todo o meu amor, carinho e gratidão.*

*Dedico*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de desfrutar de momentos únicos que a vida nos proporciona, me deu força e sempre renovou minhas esperanças em todos os momentos.

Aos meus pais Mary e Paulo Cesar que me sempre estiveram ao meu lado independente das intempéries que a vida nos apresenta com muito amor e incentivo para que eu pudesse alcançar os meus sonhos, sempre presentes me aconselhando a tomar as melhores decisões.

À minha irmã Aline, em quem sempre me espelhei como profissionalmente, mas principalmente como pessoa estando sempre ao meu lado, com todo suporte e paciência.

Ao meu orientador Leonardo Paiva, principalmente pela oportunidade, ensinamentos, pela amizade e confiança demonstradas ao longo do tempo.

Aos professores da Engenharia de Controle e Automação que se empenharam muito e dedicaram tempo e conhecimento ao longo de toda a minha formação acadêmica.

Aos meus supervisores e amigos da Usina Virgolino de Oliveira S/A. Operadores, supervisores, superintendentes e gerentes da Raízen Combustíveis pelas oportunidades de aprendizado e todo suporte ao longo desse pequeno início profissional.

Aos amigos do Threshold, somando forças ano após ano nas disciplinas do curso de Engenharia de Controle e Automação. Aos amigos da República Perdição, sempre presentes nos momentos de vitórias e derrotas. Muito decepcionados as minhas visitas no final do curso. E que todos esses momentos vividos juntos nunca caiam no esquecimento e sempre sejam lembrados com muita felicidade e nostalgia.

MUITO OBRIGADO

## RESUMO

Durante a Revolução Industrial, no início do século XVIII, os controladores passaram a ser largamente utilizados, visto a necessidade de otimizar os processos. Dentre os diversos tipos de controladores, os PID (Controlador Proporcional Integral Derivativo) apresentam diversas vantagens e por isso estão presentes em diversos processos industriais e, conseqüentemente, diretamente ligados aos conceitos de engenharia. Apesar de serem amplamente utilizadas, grande parte das malhas de controle das indústrias se encontram mal sintonizadas, causando desvantagens e/ou prejuízos. Sendo assim, a sintonização de controladores, além de gerar rentabilidade ao processo, aumenta a estabilidade e as perspectivas de crescimento das indústrias. Diante de tal cenário, neste trabalho foi averiguada a confiabilidade de métodos de sintonia por meio das funções de otimização *Fminsearch*, *Pattersearch* e *Fmincon* aplicados a um controlador PID da planta do ferro de solda. A ferramenta de implementação utilizada para implementar os métodos foi o software MatLab/Simulink. Os ensaios foram realizados seguindo a metodologia de sintonia de controladores proposta por Ziegler-Nichols, e tendo seu refinamento realizado por meio das funções de otimização dispostas na *toolbox* do software MatLab. Os testes realizados com as funções *fminsearch*, *fmincon* e *patternsearch* refletiram em uma boa performance quando comparados aos índices de desempenho apenas para a primeira das funções apresentadas para os resultados de otimização analisadas. Após este estudo foram aplicados à planta os valores dos ganhos encontrados e foram analisados os resultados reais das saídas sob o efeito das funções de otimização que se mostraram mais compatíveis. Por fim, foram discutidas suas vantagens e desvantagens.

**Palavras-chave:** *Controladores, PID, Otimização, Sintonia, Métodos.*

## ABSTRACT

During the Industrial Revolution, in the early eighteenth century, controllers were widely used, given the need to optimize processes. Among the different types of controllers, PID (Proportional Integral Derivative Controller) controllers that include several advantages and because of this they are present in various industrial processes and, consequently, directly linked to engineering concepts. Although widely used, most machine control loops are mismatched, causing advantages and/or losses. Thus, a tuning of controllers, in addition to generating profitability in the process, increases the stability and growth prospects of the industries. In this work, the use of tuning methods was calculated using the optimization functions *Fminsearch*, *Pattersearch* and *Fmincon* Applications to a PID driver of the soldering iron plant. The implementation tool used to implement the methods was MatLab/Simulink software. The tests were performed following a tuning control methodology proposed by Ziegler-Nichols, and were refined using the optimization functions provided in the MatLab software toolbox. The tests reflected in a good performance when compared to the performance indexes only for one of the three optimization functions analyzed. After this study, they were used on a plant with gain values found and analyzed based on actual sales results on the effect of optimization functions that show the most used and discussed about their advantages.

**Keywords:** *Controllers, PID, Optimization, Tuning, Methods.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ação de Controle Liga/Desliga.....	17
Figura 2 – Ação de Controle Liga/Desliga com intervalo diferencial.....	18
Figura 3 – Representação do Diagrama de Blocos de um Controlador Proporcional.....	19
Figura 4 – Representação do Diagrama de Blocos de um Controlador Integral.....	20
Figura 5 – Representação do Diagrama de Blocos de um Controlador Derivativo.....	21
Figura 6 – Diagrama de Blocos para um Controlador PID.....	24
Figura 7 – Resposta ao degrau unitário de uma planta.....	27
Figura 8 – Curva de resposta em forma de S.....	28
Figura 9 – Sistema de MF com um Controlador proporcional.....	29
Figura 10 – Oscilação sustentada com Período $P_{cr}$ .....	29
Figura 11 – Resposta típica do sinal de controle de um sistema PID de MF.....	32
Figura 12 – Planta do ferro de solda e principais componentes.....	40
Figura 13 – Interface do usuário do Software LabVIEW.....	41
Figura 14 – Interface do ident do MatLab.....	45
Figura 15 – Interface Interface de configuração de um modelo de processo – ident.....	46
Figura 16 – Figura de saída de um modelo estimado no ident.....	45
Figura 17 – Diagrama de Blocos implementado no Simulink.....	48
Figura 18 – Diagrama de Blocos da metodologia implementada.....	49
Figura 19 – Curva de aproximação do modelo em resposta ao degrau unitário.....	51
Figura 20 – Sinal de saída para a otimização $fminsearch$ no método IAE.....	54
Figura 21 – Sinal de erro para a função $fminsearch$ no método IAE.....	55
Figura 22 – Sinal de saída para a otimização $fminsearch$ no método ITAE.....	55
Figura 23 – Sinal de erro para a função $fminsearch$ no método ITAE.....	56
Figura 24 – Sinal de saída para a otimização $fminsearch$ no método MSE.....	56
Figura 25 – Sinal de erro para a função $fminsearch$ no método MSE.....	57
Figura 26 – Sinal de saída para a otimização $fminsearch$ no método ISE e ITSE.....	58
Figura 27 – Sinal de erro para a função $fminsearch$ no método ISE e ITSE.....	58
Figura 28 - Resposta do sistema com os ganhos iniciais.....	60
Figura 29 – Resposta do sistema real para a função IAE.....	61
Figura 30 – Resposta do sistema real para a função ITAE.....	62
Figura 31 – Resposta do sistema real para a função MSE.....	62

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Efeitos das ações do controlador PID sobre o processo e a função de ganho .....	25
Quadro 2 – Efeitos na saída de um Controlador PID em MF.....	26
Quadro 3 – Efeitos das ações do caontrolador PID sobre o processo e a função do ganho .....	28
Quadro 4 – Regra de sintonia baseada no ganho ganho crítico $K_{cr}$ e no Período crítico $P_{cr}$ ...	30
Quadro 5 – Trabalhos utilizando o Método de Ziegler-Nichols.....	30



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Legendas da Figura 5 .....	32
Tabela 2 – Ganhos do controlador para a função <i>fminsearch</i> .....	52
Tabela 3 – Ganhos do controlador para a função <i>patternsearch</i> .....	52
Tabela 4 – Ganhos do controlador para a função <i>fmincon</i> .....	52
Tabela 5 – Valores de desempenho para a planta real.....	59

## LISTA DE SIGLAS

FO	Função Objetivo
IAE	<i>Integral of Absolute Error</i>
ID	Índice de Desempenho
ISE	<i>Integral of the Square Error</i>
ITAE	<i>Integral of Time Absolute Error</i>
ITSE	<i>Integral of Time-Weighted Squared Error</i>
MSE	Mean of the Squared Error
PD	Proporcional Derivativo
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
PSQ	Programação Sequencial Quadrática
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
ST	<i>Setpoint</i>
UFLA	Universidade Federal de Lavras

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>MOTIVAÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
<b>3.1</b>	<b>Controladores.....</b>	<b>15</b>
<b>3.1.1</b>	<b>Ações de controle .....</b>	<b>16</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Tipos de controladores .....</b>	<b>21</b>
<b>3.2</b>	<b>O Controlador PID .....</b>	<b>23</b>
<b>3.3</b>	<b>Métodos de sintonia de controladores.....</b>	<b>26</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Método Ziegler-Nichols .....</b>	<b>27</b>
<b>3.4</b>	<b>Índice de desempenho de Sistemas de Controle.....</b>	<b>31</b>
<b>3.4.1</b>	<b>Integral do Erro Absoluto – IAE.....</b>	<b>33</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Integral do Erro Absoluto multiplicado pelo Tempo - ITAE .....</b>	<b>33</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Média do Erro Quadrático - MSE .....</b>	<b>34</b>
<b>3.4.4</b>	<b>Integral do Erro Quadrático - ISE.....</b>	<b>34</b>
<b>3.4.5</b>	<b>Integral do Erro Quadrático multiplicado pelo Tempo - ITSE .....</b>	<b>35</b>
<b>3.5</b>	<b>Funções de otimização .....</b>	<b>35</b>
<b>3.5.1</b>	<b>Rotina Fminsearch.....</b>	<b>36</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Rotina Fmincon.....</b>	<b>37</b>
<b>3.5.3</b>	<b>Rotina Patternsearch.....</b>	<b>38</b>
<b>3.5.4</b>	<b>Reconhecendo as aplicações das funções de otimização.....</b>	<b>38</b>
<b>3.6</b>	<b>Planta de Ferro de Solda .....</b>	<b>39</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>42</b>
<b>4.1</b>	<b>Ferramenta de Desenvolvimento e Ajuste do Controlador PID – MatLab .....</b>	<b>42</b>
<b>4.2</b>	<b>Estudo da Planta e obtenção dos dados .....</b>	<b>42</b>
<b>4.3</b>	<b>A Modelagem .....</b>	<b>43</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Procedimentos para a Modelagem e Função de Transferência.....</b>	<b>43</b>
<b>4.4</b>	<b>Procedimentos para o controle .....</b>	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>50</b>
<b>5.1</b>	<b>Resultados de modelagem .....</b>	<b>50</b>
<b>5.2</b>	<b>Resultados Teóricos.....</b>	<b>51</b>
<b>5.2</b>	<b>Resultados Aplicados à Planta Real.....</b>	<b>58</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>63</b>
<b>7</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>64</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>65</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O controle automático apresenta um papel fundamental no desenvolvimento e avanço da engenharia e da ciência. Trabalhos importantes desenvolvidos no início dos estudos da teoria de controle são significativos no controle automático até os dias de hoje, como por exemplo o controle de velocidade de máquinas a vapor, desenvolvida no século XVIII por James Watt.

Com o passar dos anos, cada vez mais o controle automático de processos foi se tornando importante e parte integrante dos mais variados processos industriais modernos. Atualmente, é aplicado majoritariamente a níveis industriais, e está presente em praticamente todas as atividades adjacentes, que relacionam a entrada de matéria prima e produto final da operação, como por exemplo na produção fabril e no controle da planta.

O sistema de controle é uma interconexão de componentes que formam uma configuração responsável por produzir uma resposta desejada ao mesmo tempo, uma relação de causa e efeito. A ação de controle de um sistema está relacionada ao uso de controladores. O controlador é um equipamento responsável pelo controle do processo industrial, ou parte dele. Este tem como finalidade a busca do desempenho ótimo do sistema e a rentabilidade de processos, dos mais variáveis cunhos industriais, por meio de algoritmos de controle específicos, tais como PID, realimentação de estados, lógica *fuzzy* ou redes neurais.

Dentre os diversos tipos de controladores, o Controlador Proporcional Integral Derivativo, também conhecido como PID, é considerado o mais popular e o mais utilizado em malhas de controle, devido à sua simplicidade, eficiência e base teórica bem desenvolvida além de simplificada. Este controlador utiliza a combinação dos modos proporcional, integral e derivativo, que consolidam suas características, transformando em vantagens e desvantagens de um controlador PI em vantagens de um controlador PD. Apesar do constante crescimento da tecnologia na área de controle de processos, o controlador PID ainda é o mais utilizado, porém nem sempre devidamente sintonizado.

Nos estudos de controladores são dispostas diversas técnicas para sintonia, sejam pelos métodos baseados na análise do lugar geométrico de raízes, análises de erros e até Ziegler-Nichols e Cohen Coon, dentre outros abordados nos conteúdos literários. Em contrapartida, estes primeiros métodos pontuados requerem um prévio conhecimento sobre a variável manipulada para que os resultados obtidos tenham valores aceitáveis independente dos processos que estão inseridos.

Além dos métodos de sintonia, existem critérios que regem e classificam a qualidade de um sistema de controle, os quais passam sucintamente pelos pontos de desempenho, tratamento

de sinais ruidosos e com restrições, além de estabilidade de sistema estático e dinâmico e seu comportamento após ações externas e perturbações. Todas pontuações estão intrinsicamente ligadas à estrutura do controlador e por consequência a seus parâmetros. Desta forma, os índices de desempenho de um sistema visam minimizar o valor do erro, que nada mais é do que a área do sistema que corresponde a diferença do valor de referência que se pretende atingir com o valor medido.

Otimizar o erro de uma planta está intrinsicamente ligado ao entendimento completo dos fatos que são determinantes à geração desta variável de erro. A procura de tais valores ótimos para os ganhos do controlador PID é realizada via manipulação de determinados operadores. Sendo assim, a explicação prática dessa variável, o erro, que está como um dos pontos focais do presente estudo, nada mais é do que a composição da somatória das áreas que oscilam em torno da variável desejada. De forma que, minimizar esse valor deve estar associado aos índices de desempenho que são naturais dos conceitos de controle de sistemas.

Neste sentido, o presente trabalho visa a busca por valores ótimos para os ganhos do controlador PID combinado a métodos de sintonia e funções de desempenho, para refinar o controle da planta do ferro de solda. Como suporte a esse estudo foi utilizada a *toolbox* de otimização presente no software MatLab e Simulink. Dentre as diversas rotinas presentes na *toolbox*, a *fminsearch*, *pattersearch* e *fmincon* se aplicam e foram utilizadas neste trabalho. A escolha dessas funções deu-se pela familiaridade, o reconhecimento das suas aplicações e os resultados apresentados em práticas anteriores. Tais aplicações foram amplamente abordadas durante o curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Lavras.

## 2 MOTIVAÇÃO

A motivação para o estudo do tema aqui proposto, Aplicação de Algoritmos Otimizados para a Sintonia de Controladores na Planta do Ferro de Solda, se dá ao fato de explorar os conceitos de otimização que reflitam futuramente no melhor cenário para a performance de processos aplicáveis na indústria. Tal estudo está fundamentado em analisar os resultados teóricos obtidos e, posteriormente, aplicá-los sob o comportamento de otimizar o valor do erro da planta de ferro de solda alocada no Departamento de Automática da Universidade Federal de Lavras.

### 2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo validar, analisar e comparar as implementações otimizadas dos modelos teórico e prático propostos, fazendo o uso de funções de otimização e a técnica de sintonia de controladores de Ziegler-Nichols aplicadas a um processo de nível industrial, representada pela planta do ferro de solda. Toma-se como parâmetros a resposta dinâmica do comportamento do processo e a resiliência do sistema em se manter próximo ao valor de referência, mesmo sob a ação de eventuais distúrbios, de modo a verificar se a resposta do processo se mantém nos valores de referência aceitáveis.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Revisar e aprofundar os conceitos de controle de sistemas, focando nos métodos mais utilizados para resolução de problemas da sintonia dos controladores;
- Estudar e revisar a linguagem de programação vigente no *software* do MatLab/Simulink aliado ao ambiente de desenvolvimento das simulações realizadas;
- Estudar uma ferramenta que possibilite a interface entre implementações em linguagem de programação a diagramas de blocos elaborados no Simulink que atendam aos resultados esperados;
- Estudar as funções de otimização do MatLab;
- Estudar e pontuar os conceitos sobre os Índices de Desempenho, baseados na análise de erro e nas métricas de controle de sistemas;

- Comprovar, por meio de testes, os resultados da utilização de métodos de otimização para determinar os ganhos ótimos de controladores;
- Testar na planta real e avaliar o desempenho das funções de desempenho que foram aplicadas na planta do ferro de solda.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Contextualizado no campo estudado neste presente trabalho, os controladores e duas principais estruturas além de suas ações de controle serão desenvolvidos neste referencial teórico. Além disso, tanto as funções de otimização, quanto o método de sintonia de Ziegler-Nichols serão abordados e anexados ao contexto de suas funções e aplicabilidade ao estudo.

#### 3.1 Controladores

Os primeiros sistemas de controle, desenvolvidos ao final do século XVIII e início do século XIX, foram reflexos de um aumento da demanda relacionada às inovações de costumes da época. As indústrias têxteis foram uma das maiores responsáveis por fomentar a ideia de inovação dos processos industriais, de modo que, antes das “facilidades” que os sistemas de controle proporcionavam. As implementações eram baseadas em enormes linhas de montagem dispostas de engenhosos dispositivos mecânicos, os quais eram responsáveis por apenas parte das operações industriais (OGATA, 2007). Geralmente esses maquinários desenvolviam atividades críticas e repetitivas, o que decrementava substancialmente a vida útil dos equipamentos, mas em contrapartida gerava uma enorme produtividade quando comparada à mão de obra humana associada ao processo.

Praticamente quase todo processo industrial precisa de algum tipo de controlador que independa de sua natureza construtiva para garantir uma operação segura a todos que estão envolvidos e que seja economicamente viável. Esse processo pode ser, em um nível mais simples, uma planta de acionamento automático de um sistema de irrigação de jardim ou até mesmo extremo oposto onde a planta pode ser uma linha de produção automotiva com diversos manipuladores robóticos dispostos do mais fino ajuste na montagem de um carro recém-fabricado.

O controlador monitora o estado real do processo de uma planta através de um número variado de transdutores, os quais são responsáveis em converter as grandezas físicas de, por exemplo, posição ou velocidade em sinais elétricos que conectam com as entradas dos controladores. Como definido anteriormente, o controlador utiliza um algoritmo de controle embutido para que seja possível inferir os cálculos de suas saídas. De modo que, esses sinais elétricos advindos da saída do controlador, são conectados aos atuadores. Estes por fim, são responsáveis por responderem fisicamente as demandas impostas pelo controlador.



Em meados dos anos 70, a informática se tornou imprescindível nos processos industriais. A facilidade que esse meio trouxe ao campo industrial permitiu ao desenvolvedor permutar o controle dos sistemas de forma muito mais simples, do que antigos os processos baseados em ligações elétricas, as unidades fabris com apenas uma mudança de programação. Entretanto tais computadores não eram construídos para o ambiente “hostil”, encontrado na maioria das plantas industriais. Seu tamanho exageradamente grande e ainda com um preço muito alto eram empecilhos aos investidores da época. Fato que, em contra resposta às intempéries criadas pelos computadores da época impulsionou-se a necessidade de desenvolver um novo modelo de controlador, o controlador lógico programável - CLP (FILHO, 2014).

### **3.1.1 Ações de controle**

Ação de controle nada mais é do que o tipo de processamento o que controlador da planta realiza sobre o sinal de erro para gerar um sinal corretivo que posteriormente será aplicado no atuador. As construções matemáticas são baseadas na resposta da modelagem de uma malha de processo que está sendo controlado.

A essência de um controlador está basicamente associada a realizar operações matemáticas com o intuito de comparar dois sinais distintos, sendo que, o primeiro se trata do sinal de entrada da planta, e o segundo, da referência estipulada (KAGUEYAMA, 2011). Após a obtenção da diferença entre o sinal comparado e o erro, pode-se determinar o sinal de controle a ser aplicado ao sistema. Tais operações matemáticas simbolizam o que é chamado de ações de controle. As ações de controle mais conhecidas estão nomeadas abaixo:

- a) Ação On/Off (Liga/Desliga);
- b) Ação Proporcional;
- c) Ação Integral;
- d) Ação Derivativa.

Os quatro modos designados de ações de controle reagem de forma distinta ao erro presente no processo, e por isso, torna-se imprescindível a compreensão destas, para o entendimento da sintonia de controladores PID que será posteriormente apresentado nesse trabalho.

### 3.1.1.1 Ação de controle *On/Off*

Com várias formas de ser referenciada, 0-1, liga/desliga ou controle radical (totalmente aberto ou totalmente fechado), a ação de controle do *On/Off* é discreta e não contínua. A saída do controlador só assume dois valores positivos e restritivos: 0 ou 100%. Seguindo esse comportamento, é amplamente utilizado para o controle simples de plantas com dinâmica lenta. Esse controle reflete limitações no que diz respeito ao comportamento dinâmico e em regime permanente do sistema em malha fechada, fato que fica evidenciado sua aplicação relacionada a controles que não requerem alta precisão nem um bom desempenho dinâmico. A Figura 1 representa a ação do controle.

Sendo o sinal de saída do controlador  $u(t)$  e o sinal do erro atuante  $e(t)$ , nesse tipo de controle o sinal de  $u(t)$  permanece em um valor máximo (Equação 1) ou em um valor mínimo (Equação 2), dependendo do sinal de erro atuante (OGATA, 2010).

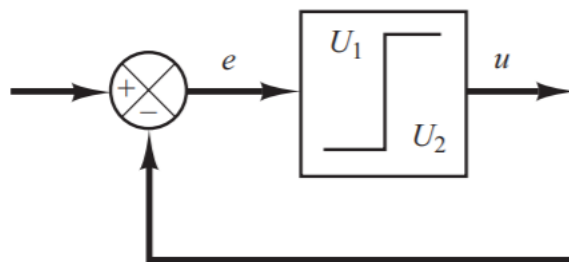
$$u(t) = U_1 \quad \text{para } e(t) > 0 \quad (1)$$

$$u(t) = U_2 \quad \text{para } e(t) < 0 \quad (2)$$

sendo  $U_1$  e  $U_2$  constantes.

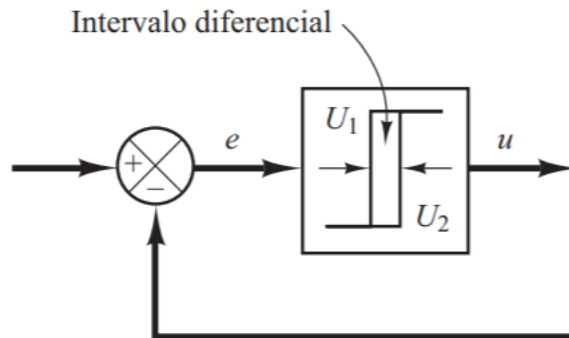
As Figuras 1 e 2 apresentam o diagrama de blocos para a ação de controle liga/desliga.

Figura 1 – Ação de Controle Liga/Desliga



Fonte: Ogata, 2010

Figura 2 – Ação de Controle Liga/Desliga com intervalo diferencial



Fonte: Ogata, 2010

O intervalo em que o sinal de erro atuante varia, antes de ocorrer a comutação, é chamado de intervalo diferencial ou histerese, como indicado na Figura 2. Este intervalo faz com que a saída do controlador mantenha seu valor atual até que o sinal de erro tenha atingido o novo estado desejado.

### 3.1.1.2 Ação de Controle Proporcional

O movimento de controle com ação *On/Off* reflete uma mudança brusca de estado, fato que resulta em uma oscilação no resultado do controle. Como forma de ser evitado esse tipo de comportamento, foi desenvolvido um tipo de ação de natureza corretiva, a qual é produzida de forma a ser proporcional ao valor desse desvio apresentado, sendo assim, reconhecida como ação proporcional. A ação corretiva do controlador tem peso proporcional ao valor do desvio entre a medição e o ponto de ajuste, e dessa forma caracteriza uma ação de controle contínua, analógica e uniforme, cuja saída do controlador é proporcional à amplitude do erro (PALM, 1986).

Sua aplicação está diretamente ligada a processos que exijam pequena variação de carga ou desvios do ponto de ajuste ótimo. De acordo com Silva (2010), esse tipo de controlador é aplicado em processos onde a estabilidade é mais importante que a igualdade da medição com o ponto de ajuste.

A ação de controle proporcional está intrinsicamente ligada ao sinal de entrada, ou seja, um controlador proporcional consiste basicamente em um amplificador de ganho ajustável, de modo que a ação proporcional produz um sinal de saída de saída proporcional à amplitude do erro.

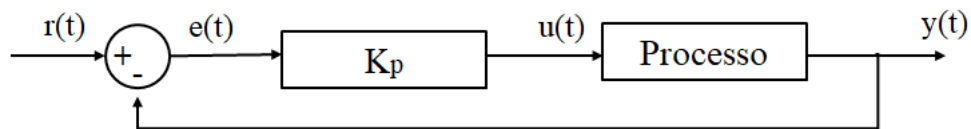
A razão entre a saída e a entrada do controlador é conhecida como ganho proporcional  $K_p$ , sendo que, quanto maior for o valor deste ganho, menor será o erro atuante em regime estacionário e maior o tempo de acomodação, podendo causar desestabilizações no sistema. A relação entre entrada e saída do controlador é dada pela Equação 3 (OGATA, 2010).

$$u(t) = K_p e(t) \quad (3)$$

sendo  $u(t)$  a relação entre a saída do controlador,  $K_p$  o ganho proporcional e  $e(t)$  o sinal do erro atuante.

O diagrama de blocos do controlador proporcional pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 – Diagrama de blocos do controlador proporcional



Fonte: Fermino, 2014

### 3.1.1.3 Ação de Controle Integral

A ação de controle proporcional, apesar de eliminar as oscilações provocadas pelo controlador liga-desliga, não elimina o erro do sistema em regime permanente, fato que, pode ser resolvido utilizando a ação de controle integral.

Quando se trata de uma ação de controle integral, a principal diferença a ser abordada frente as outras ações é: sua atuação ao longo do tempo quando houver distinções entre o valor desejado e o valor medido. Dessa forma, adiciona-se um sinal corretivo integrado no tempo, com o objetivo minimizar gradualmente a nulo o desvio permanente deixado pela ação proporcional. Se o valor do ganho integral é baixo, o sistema pode levar muito mais tempo para atingir o valor de referência, porém em contrapartida, se o valor do ganho for muito alto o sistema tende à instabilidade. As Equações 4 e 5, apresentam a relação entre  $u(t)$  e  $e(t)$ , com o ganho integrativo (OGATA, 2010).

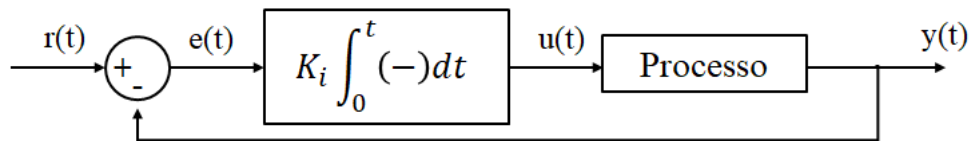
$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \quad (4)$$

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

sendo  $K_i$ , uma constante ajustável.

A Figura 4 apresenta o diagrama de blocos do controlador integral.

Figura 4 – Diagrama de blocos do controlador integral



Fonte: Fermino, 2014

### 3.1.1.4 Ação de Controle Derivativo

Para a ação de controle derivativo, o sinal de entrada do controlador é proporcional ao erro e sua respectiva taxa de variação, ou seja, a ação derivativa se antecipa em relação ao erro. De modo que, quando um sinal de erro proveniente do sinal de saída é assimilado pelo controlador, a ação derivativa detecta a sua velocidade de variação e produz uma componente corretiva proporcional a essa variação (OGATA, 2003).

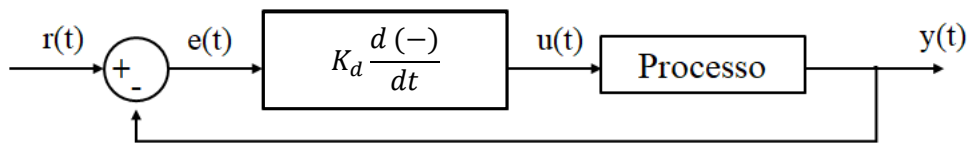
É comum, e de forma precipitada, dizer que todas as variações lentas necessitam de ação derivativa. Porém a lentidão da variação é de fato uma condição necessária, contudo não suficiente para justificar a aplicação unicamente de um controle com ação derivativa. Julga-se fundamental, além do ponto já citado, que se tenha uma variação rápida da carga do processo para que a ação derivativa seja de fato aplicada. O processo lento que sofre variação lenta da carga não necessita da ação derivativa (SILVA, 2010). A Equação 6, apresenta a ação de controle derivativa (OGATA, 2010).

$$u(t) = K_d \frac{d e(t)}{dt} \quad (6)$$

sendo  $K_d$ , o ganho derivativo.

A Figura 5 apresenta o diagrama de blocos do controlador derivativo.

Figura 5 – Diagrama de blocos do controlador derivativo



Fonte: Fermino, 2014

### 3.1.2 Tipos de controladores

Em diversos processos, para que o objetivo da planta seja alcançado de forma eficaz, é necessária a utilização de uma ou mais ações de controle em conjunto. Diante dessas combinações e dos diversos tipos de controladores, os principais são: Controlador Proporcional (P), Controlador Proporcional Integral (PI), Controlador Proporcional Derivativo e Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID).

#### 3.1.2.1 Controlador Proporcional (P)

Como o próprio nome diz, o controle proporcional está diretamente ligado ao sinal de sua entrada, apresentando natureza muito parecida a de um amplificador de ganho ajustável. Esse controlador utiliza a ação de controle proporcional, já mencionada anteriormente. Logo, a equação de transferência é dada pela Equação 7 (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006).

$$U(s) = K_p e(s) \quad (7)$$

A resposta de uma planta de controle, para um controlador dessa característica pode tanto refletir positivamente, convergindo o valor de entrada mais próximo ao valor de referência, como também negativamente, de modo que, para um ganho exageradamente elevado, refletiria em uma saída que excederia o *setpoint* esperado e conseqüentemente, a resposta em regime transitório poderia colocar o sistema em oscilação permanente.

#### 3.1.2.2 Controlador Proporcional Integral (PI)

O Controlador PI, também conhecido como compensador em atraso, estabiliza o processo permitindo que a variável controlada seja igual ao ajuste (ASTROM, 1995). Trata-se de uma

combinação da ação proporcional com uma ação integral de diferentes ponderações em relação ao sinal de entrada. A componente integral elimina o erro estacionário de posição.

Quando se trata de um erro escalar grande, o controlador proporcional predomina sobre o integrador. Ao decorrer do tempo, o sistema vai se aproximando cada vez mais do objetivo, ou seja, do valor de referência, de modo que a ação proporcional se torne cada vez menos influente, até que o “domínio” da ação passa a ser do integrador. Para o controlador PI a equação de transferência é representada pela Equação 8 (KUO, 1985).

$$U(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{sT_i} \right) e(s) \quad (8)$$

sendo  $T_i$  o tempo integral, isto é, o tempo necessário para que a contribuição da ação integral se iguale à ação proporcional.

O controlador PI é utilizado em sistemas que apresentam alterações de carga, sempre que a utilização apenas do controlador P não seja, por si só, capaz de reduzir o erro estacionário a um nível aceitado.

### 3.1.2.3 Controlador Proporcional Derivativo (PD)

Análogo ao controlador PI descrito anteriormente, o controlador PD ou compensador em avanço possibilita a alteração da resposta transitória do sistema. Sua construção parte da combinação do controle proporcional ao controle derivativo, onde esse último tem sua saída proporcional à variação do erro. Dessa forma, se o erro estiver oscilando de forma muito intensa, o controlador atua fortemente visando atenuar ou eliminar essa variação. O controlador PD pode alterar o comportamento de um sistema subamortecido para um sobre-amortecido ou criticamente amortecido. A ação derivativa nesse controlador tem como maior característica a sua resposta relativamente mais rápida aos demais. Entretanto esse ponto normalmente também evidencia um desvio em regime permanente do sistema. A equação de transferência do controlador PD é descrita pela Equação 9 (KUO, 2003).

$$U(s) = K_p (1 + sT_d) \quad (9)$$

sendo  $T_d$  o tempo derivativo, isto é, o tempo antecipado pela ação derivativa relativo à ação proporcional.

### 3.1.2.4 Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID)

O controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo) é o tipo de ação de controle mais robusto e sofisticado dentre os modelos apresentados. Tem sua utilização primordial em sistemas de controle em malha fechada. A combinação dos modos proporcional, integral e derivativo consolidam as características do controlador PID que resulta das vantagens e desvantagens de um controlador PI, e das vantagens de um controlador PD.

Nesse controlador, a ação integral objetiva atenuar o erro estacionário, comumente causado por grandes variações de carga. As ações dão efeito de estabilidade, permitindo dessa forma, acréscimo ao valor do ganho e a redução a tendência das oscilações, refletindo numa velocidade de resposta superior quando comparada ao controladores P e PI. Os três modos de controle, combinados, são representados pela Equação 10 (OGATA, 2010).

$$U(s) = K\left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d\right) \quad (10)$$

Tendo em vista todas as qualificações apresentadas do PID, seu uso abrangente na indústria, facilidade de câmbio entre os mais variados processos industriais. O presente trabalho utilizou o controlador em questão, combinado a métodos de sintonia e funções de desempenho, para refinar o controle da planta do ferro de solda, que serão apresentados posteriormente nesse estudo. Diante desse cenário, foi realizado um estudo mais aprofundado sobre esse tipo de controlador.

## 3.2 O Controlador PID

A ascensão da utilização de controladores PID se deu em meados de 1942, reflexo de um período muito conturbado na história moderna. A necessidade de um desenvolvimento acelerado, inovações em todos os campos do conhecimento foram demandas cruciais para o crescimento massivo de novas formas de industrialização. Muitas empresas envolvidas no processo de “modernização” sofriam com a mudança de escopo de trabalho muitas vezes de forma forçada por órgãos governamentais que fomentavam insumos militares frente ao pico de movimentação gerado pela 2ª Guerra Mundial. Dessa forma, o controlador PID acabou se tornando mais popular, devido a sua lógica de controle por malha de realimentação genérico e facilidade de ser cambiado aos mais diversos processos. Eles proveem desempenho robusto e

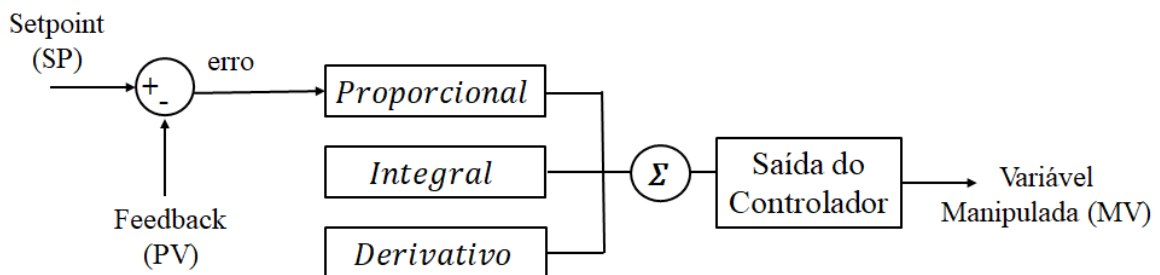


seguro para a maioria dos sistemas, quando ajustados para assegurar um desempenho satisfatório (MORADI, 2002).

Atualmente, o uso de controladores PID se apresenta como o principal método de controle das plantas industriais das mais variadas gamas. É estimado que 85% das malhas de controle das plantas dos processos industriais utilizam esse controlador, principalmente pelo fato de possuir somente três parâmetros a serem ajustados (CAMPOS; SAITO, 2004). Segundo Astrom e Hagglund (2004), um levantamento realizado em mais de 11000 controladores presentes em refinarias, indústrias químicas e indústrias de papel e celulose, 97% dos controladores apresentavam estrutura PID.

Nesse controlador, a ação integral está associada em atenuar o erro estacionário comumente causado por grandes variações de carga. A ação derivativa permite o efeito de estabilidade permitindo, dessa forma, acréscimo ao valor do ganho e a redução à tendência das oscilações, refletindo numa velocidade de resposta superior quando comparado ao controlador P e PI. Dessa forma, o controlador PID calcula um valor de erro  $e(t)$ , como sendo a diferença entre uma variável de saída  $y(t)$  do processo medido e um valor de referência,  $r(t)$ , isto é, o controlador tenta minimizar o erro, ajustando a variável de controle do processo  $u(t)$ . E assim o processo se repete de modo que o erro tenda ao valor nulo (SARAIVA, 2011), conforme indicado na Figura 6.

Figura 6 – Diagrama de Blocos para um Controlador PID



Fonte: Fermino, 2014

Como já mencionado, o controle PID é o tipo de controle mais robusto para sistemas em malha fechada, onde sua função básica é atuar de forma eficiente sobre a variável a ser manipulada por meio de uma combinação adequada das três ações de controle. O Quadro 1 apresenta os efeitos das ações do controlador PID sobre o processo e a função do ganho.

Quadro 1 – Efeitos das ações do controlador PID sobre o processo e a função do ganho

<b>Ação</b>	<b>Função da Ação</b>	<b>Função do ganho</b>
Proporcional	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ação de controle imediata e proporcional ao valor do erro corrente.</li> <li>- Aumenta a velocidade de resposta do sistema.</li> <li>- Não corrige erro de regime permanente.</li> <li>- Torna a resposta mais oscilatória à medida que o ganho aumenta.</li> </ul>	Determinar a amplitude da ação, ou seja, determinar quanto o erro instantâneo deve influenciar na correção da planta.
Integral	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ação de controle gradual, proporcional a integral do erro.</li> <li>- Responde ao passado do erro enquanto este for diferente de zero.</li> <li>- Elimina o erro de regime permanente (<i>offset</i>).</li> <li>- Reduz o tempo de subida.</li> </ul>	Determinar a amplitude da ação, ou seja, determinar quanto o acúmulo do erro deve influenciar na correção da planta.
Derivativo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ação antecipatória, resposta proporcional à derivada do erro.</li> <li>- Provoca amortecimento e permite o aumento do ganho proporcional.</li> <li>- Não corrige o erro de regime permanente.</li> <li>- Melhora o desempenho do processo durante os transitórios.</li> </ul>	Determinar a amplitude da ação, ou seja, determinar quanto a variação do erro deve influenciar na correção da planta.

Fonte: Andrade e Souza, 2010.

No Quadro 2 são representados os efeitos sob a resposta em um sistema em malha fechada ao se acrescentar os modos proporcional, integral e derivativo. As correlações não são perfeitas. Entretanto quando se usa como referência os parâmetros do controlador, pode-se inferir as suposições.

Quadro 2 – Efeitos na saída de um Controlador PID em malha fechada

<b>Resposta</b>	<b>Tempo de Subida</b>	<b>Sobrelevação</b>	<b>Tempo de Estabilização</b>	<b>Erro Estacionário</b>
<b>Proporcional</b>	Decréscimo	Acréscimo	Inalterado	Decréscimo
<b>Integral</b>	Decréscimo	Acréscimo	Acréscimo	Zero
<b>Derivativo</b>	Inalterado	Decréscimo	Decréscimo	Inalterado

Fonte: Andrade e Souza, 2010.

Esses adjetivos relacionados ao controlador PID confirmam o porquê de ser amplamente utilizado em plantas industriais e assim, objeto de estudo para muitos correlacionados a sua aplicação. Além disso, o controlador PID torna-se a ferramenta mais útil quando não se sabe o modelo matemático do sistema a ser trabalhado. Tudo isso está relacionado intrinsecamente aos parâmetros do controlador, em suas funções de desempenho empregadas.

Tendo em vista o atendimento ao conjunto de especificações exigidas para um determinado problema, é necessário realizar a sintonia do controlador, isto é, o ajuste dos ganhos ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ). É a partir daí que surgem as técnicas de sintonia que, segundo Guimarães (2013), promovem uma melhor resposta ao sistema diante da situação-problema.

### 3.3 Métodos de sintonia de controladores

É considerado sintonia de controladores o processo de selecionar parâmetros do controlador que garantem uma dada especificação de desempenho. Esses parâmetros são normalmente definidos por meio de determinações prévias e conhecidas do sistema, entretanto são a maior dificuldade de sintonizar um controle, de modo que muitas vezes não há nenhum modelo matemático disponível para ajustar o controle de uma planta.

Na grande maioria dos processos aplicados na indústria, o não conhecimento de padrão matemático para determinada planta requer que o processo de sintonia seja realizado de forma manual, ou seja, por meio de tentativas e erros, ou analiticamente por meio de gráficos sobre a resposta do sistema. Com isso é possível ajustar os parâmetros na medida que a saída se aproxima em um valor aproximado ao valor de referência. Entretanto tal técnica implica em muita experiência do operador, tempo e até mesmo paciência para o ajuste perfeito dos ganhos.

As especificações estabelecidas de forma equilibrada refletem em um bom método de sintonia. Além disso, sabe-se que atualmente existem diversos métodos de sintonizar um

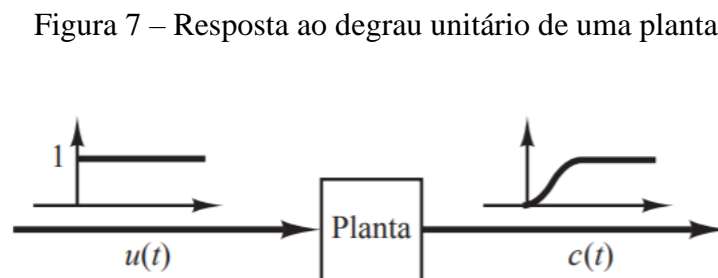
controlador, tanto para seu regime estacionário quanto para o seu regime transitório, de forma coerente para as referências apresentadas e amortecendo eventuais perturbações (OGATA, 2010).

Sendo assim, define-se que cada método possui o seu conjunto de parâmetros específicos, e embora haja inúmeros métodos de ajuste para a maioria dos casos, são amplamente utilizados e conhecidos: o ajuste manual ou Método de Aproximações Sucessivas ou Tentativa e Erro, Cohen-Coon, Chien-Hrones-Reswick e Ziegler-Nichols, sendo este último o pioneiro e abordado neste trabalho.

### 3.3.1 Método Ziegler-Nichols

Em 1942, Ziegler e Nichols apresentaram as primeiras regras para a sintonia de controladores PID baseadas na resposta ao degrau ou no valor de  $K_P$ . Tais regras sugerem um conjunto de valores  $K_P$ ,  $T_i$  e  $T_d$  que proporcionam uma operação estável ao sistema. O critério de ajuste de parâmetros se baseia na avaliação da amplitude e frequência das oscilações do sistema no limite de estabilidade (OGATA, 2010). Existem dois métodos das regras de sintonia de Ziegler-Nichols, sendo eles o primeiro e o segundo método.

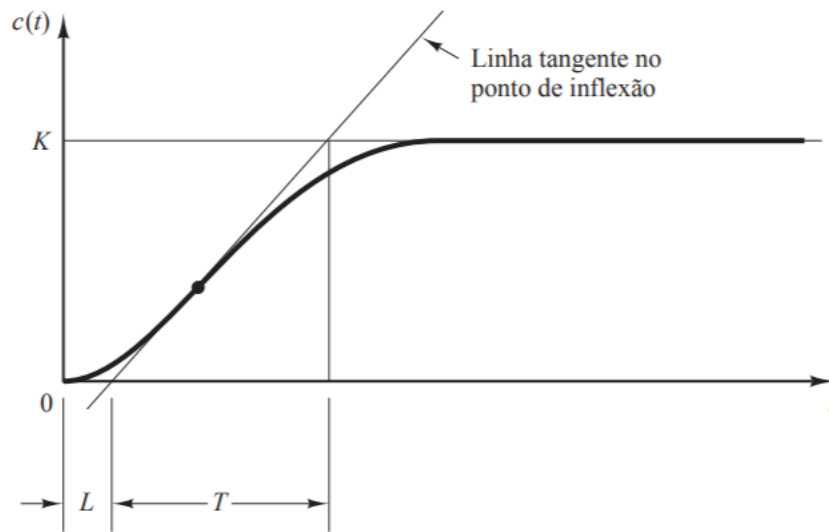
a) **Primeiro método:** neste método, usado para malhas abertas, é possível obter experimentalmente a resposta a uma entrada em degrau unitário, como representado pela Figura 7.



Fonte: Ogata, 2010.

A curva obtida por esse método apresenta um aspecto de um S, onde  $u(t)$  representa o degrau unitário e  $c(t)$  a resposta da planta ao sinal de entrada. Caso a planta não possua integradores ou polos complexos conjugados dominantes, como representado pela Figura 8.

Figura 8 – Curva de resposta em forma de S



Fonte: Ogata, 2010.

A curva de resposta em S pode ser gerada experimentalmente ou por meio de uma simulação dinâmica da planta. Essa curva é caracterizada por duas constantes  $L$  (atraso) e  $T$  (tempo), que são determinadas por meio do desenho de uma linha tangente ao ponto de inflexão da curva e pela determinação da intersecção da linha tangente com o eixo X, relativa ao tempo e a linha  $c(t) = K$  (OGATA, 2010). O Quadro 3 apresenta as equações para os parâmetros baseadas na resposta ao degrau da planta para os principais tipos de controladores.

Quadro 3 – Efeitos das ações do controlador PID sobre o processo e a função do ganho

Tipo de controlador	$K_P$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

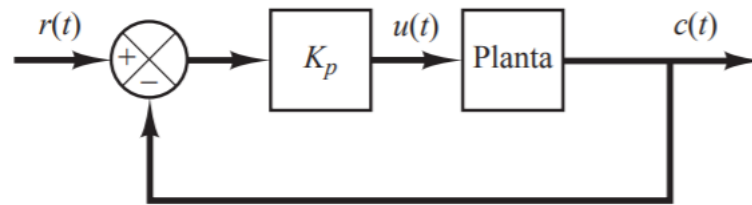
Fonte: Ogata, 2010.

b) **Segundo método:** o método para sintonia de controladores em malha fechada, que será utilizado neste estudo, está embasado na resposta do processo e na estrutura do controlador implementado. Como uma tratativa vantajosa, é um método que dispensa a necessidade de se conhecer os parâmetros do processo para calcular as ações de controle. Logo, é indicado a

processos que são estáveis, porém, não tem uma boa aplicabilidade para processos que o tempo de atraso são altos. Entretanto para o estudo da planta do ferro de solda, que será posteriormente apresentada, tem-se o modelo matemático para a inferência dos parâmetros.

Nesse método, é utilizado apenas a ação de controle proporcional, como representado pela Figura 9.

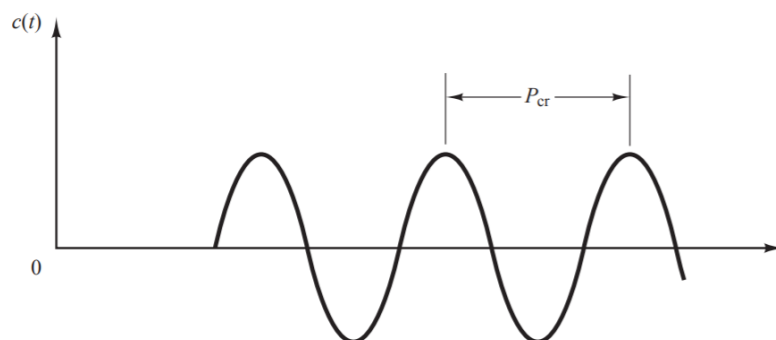
Figura 9 – Sistema de malha fechada com um controlador proporcional



Fonte: Ogata, 2010

No segundo método são fixados  $T_i = \infty$  e  $T_d = 0$ , o ganho proporcional ( $K_P$ ) aumentado gradativamente até se obter uma resposta oscilatória com amplitude constante, onde é determinado o ganho crítico ( $K_{CR}$ ) e o período de oscilação ( $T$ ). O ganho crítico ( $K_{CR}$ ) é considerado o ganho do controlador proporcional que gerou uma resposta oscilatória na variável controlada no limite da estabilidade, tal resposta oscilatória possui um período de oscilação ( $T$ ). O sistema será considerado instável se o ganho do controlador for maior que  $K_{CR}$  (FILHO, 2014). Os valores de  $K_{CR}$  e do período  $P_{CR}$  são determinados experimentalmente, conforme representado pela Figura 10.

Figura 10 – Oscilação sustentada com período  $P_{CR}$



Fonte: Ogata, 2010

Neste método, Ziegler-Nichols sugerem escolher os valores dos parâmetros de acordo com as fórmulas representadas no Quadro 4.

Quadro 4 – Regra de sintonia baseada o ganho crítico  $K_{CR}$  e no período crítico  $P_{CR}$

Tipo de controlador	$K_P$	$T_i$	$T_d$
P	$0,5 K_{CR}$	$\infty$	0
PI	$0,45 K_{CR}$	$\frac{1}{1,2} P_{CR}$	0
PID	$0,6 K_{CR}$	$0,5 P_{CR}$	$0,125 P_{CR}$

Fonte: Ogata, 2010

Como já mencionado, o presente trabalho utiliza o método de sintonia de Ziegler-Nichols para malha fechada. Por se tratar de um modelo de sintonia mundialmente conhecido e amplamente aplicado na indústria, atualmente existe uma vasta gama de trabalhos aplicando o método de sintonia de controladores de Ziegler-Nichols. Tais estudos abordam a aplicação tanto para controle em Malha Fechada (MF) quanto para controle em Malha Aberta (MA). O Quadro 5 apresenta os métodos, tipos de processo e os resultados já encontrados nos trabalhos consolidados nesta área de pesquisa.

Quadro 5 – Trabalhos utilizando o Método de Ziegler-Nichols

Método	Função	Tipos de Processo	Índice de Desempenho	Resultados	Referências
Ziegler-Nichols em MF	1ª Ordem	Controle de PH em um Reator	Algoritmos Genéticos	Tempo de Subida: 4,5 s Sobressinal: 2,22%	ADHIKARI; CHOUBEY; SINGH, (2012)
Ziegler-Nichols em MA	1ª Ordem	Unidade de Decantação	ZN ITAE IMC	Tempo de Subida: 1,48 s	AGUIRRE, 2014
Ziegler-Nichols em MF	2ª Ordem	Motor de Corrente Contínua	ISE ITAE ITSE	Tempo de Subida: 28,8 s	CARDOSO, 2013

Quadro 5 – Trabalhos utilizando o Método de Ziegler-Nichols (continua)

<b>Método</b>	<b>Função</b>	<b>Tipos de Processo</b>	<b>Índice de Desempenho</b>	<b>Resultados</b>	<b>Referências</b>
Ziegler-Nichols em MF	2ª Ordem	Evolução Natural	Algoritmos Genéticos	-	A. BARBERÁ, 2009

Fonte: do autor, 2019

Além de determinar o método de sintonia para o controlador, é necessário conhecer sobre os índices de desempenho que permitem avaliar as sintonias realizadas.

### 3.4 Índice de desempenho de Sistemas de Controle

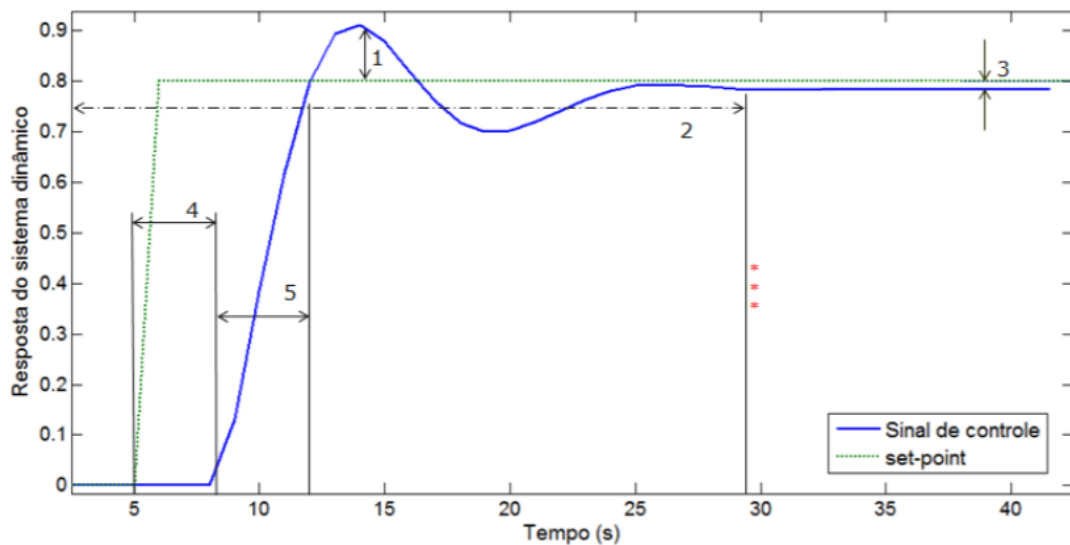
Para avaliar o desempenho e a sintonia dos controladores PID são utilizadas técnicas de avaliação, como por exemplo os critérios de desempenho. A estabilidade é o principal critério para o ajuste do controle de um processo. Baseando em autores como Campos e Teixeira (2006), Ogata (2007) e Prado Guimarães (2013), pode-se citar os critérios mais conhecidos e utilizados para esse tipo de avaliação (FILHO, 2014):

- a) **Tempo morto:** é relacionado ao atraso de tempo entre o instante que ocorre a variação da variável do processo e quando a mudança é observada;
- b) **Tempo de primeira ordem:** é considerado o tempo que o sistema demora, após iniciada a variação, para chegar ao total de 63% da variação total final;
- c) **Tempo de subida:** é relacionado ao tempo que o sistema leva para ir de 10% a 90% do valor do estado estacionário, ou valor final;
- d) **Percentual de Sobressinal (Overshoot):** é relacionado ao valor que a variável de processo ultrapassa o valor final e alcança o seu maior valor, sendo expresso como uma porcentagem do valor final;
- e) **Tempo de estabilização:** é o tempo que a variável do processo demora para alcançar um patamar de porcentagem de 2% ou 5% do valor final. Para o referido estudo foi levado em conta o critério 2%;
- f) **Erro de regime permanente:** é a diferença final entre as variáveis do processo e o SP em regime permanente.



Além da estabilidade, outros fatores como o regime transitório e o erro de regime permanente devem também receber também atenção especial. Pelo fato de o sistema físico de controle conter energia armazenada, a saída do sistema não segue a entrada de imediato, porém apresenta uma resposta transitória antes que o regime permanente seja alcançado (OGATA, 2007). Esses fatores podem ser calculados por meio do acompanhamento da trajetória da variável controlada em relação ao *setpoint* (valor de referência). A Figura 11 permite a visualização dos parâmetros e a Tabela 1 apresenta as legendas.

Figura 11 – Resposta típica do sinal de controle de um sistema PID de malha fechada



Fonte: Filho, 2014

Tabela 1 – Legendas da Figura 5

Número	Significado
1	Máximo Sobressinal
2	Tempo de estabilização
3	Erro de regime permanente
4	Tempo morto
5	Tempo de subida
<***	Resposta transitória
>***	Regime permanente

Fonte: Filho, 2014

Ajustar os ganhos do controlador nada mais é do que buscar a melhor condição do desempenho de um sistema de controle PID, de forma que tal índice de desempenho é calculado

durante um intervalo de tempo  $t$ , compreendido entre  $0 \leq t \leq t_s$ , onde  $t_s$ , é o tempo estabelecido do sistema. Quando se trabalha de problemas de otimização, é imprescindível a existência de métricas que indiquem a quão ótima é a solução encontrada, ou seja, que seja capaz de mensurar o desempenho das funções de otimização. Para isso, utiliza-se o comportamento da resposta transitória do sistema de controle e índices que traduzem o desempenho do sistema (OGATA, 1993). Sendo assim, para o estudo nesse trabalho os índices utilizados foram IAE, ITAE MSE, ISE e ITSE. O índice de desempenho é uma medida quantitativa do desempenho de um sistema e é escolhido de modo que seja colocada ênfase nas especificações consideradas cruciais do sistema, os quais serão apresentados em seguida nesse estudo (ALT, 2003).

### 3.4.1 Integral do Erro Absoluto – IAE

O critério da Integral do Erro Absoluto (IAE) leva em consideração o módulo do erro, o qual equivale a soma das áreas que oscilam acima e abaixo do valor de referência, de modo que, o torna amplamente utilizado em diversos projetos devido a sua simplicidade de implementação. Um sistema projetado com esse critério tem uma resposta com sobressinal, porém não demasiadamente oscilante e com características transitórias aceitáveis (FERMINO, 2014). Ou um sistema que tem um amortecimento razoável, mas que não apresenta um *range* muito completo quanto a variações de parâmetros do controlador PID. Matematicamente o IAE é definido pela Equação 11 (OGATA, 1993).

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt \quad (11)$$

### 3.4.2 Integral do Erro Absoluto multiplicado pelo Tempo - ITAE

No modelo em questão o erro absoluto é ponderado pela grandeza do tempo. Para um erro inicial relativamente grande ao sistema como, por exemplo, resposta ao degrau unitário têm uma pequena ponderação, por outro lado, para erros que têm efeito retardado na resposta transitória do sistema há uma grande ponderação de tal termo. A principal característica para um sistema desenvolvido sob essa metodologia é o fato de o sobressinal na resposta transitória ser pequeno e as oscilações então amortecidas.

Esse critério reflete uma variedade de parâmetros selecionáveis para o controlador PID. Desta forma, representa uma versão melhorada sobre o critério apresentado anteriormente (IAE), de modo que ITAE penaliza erros que se mantêm ao longo do tempo.

Matematicamente o ITAE é definido pela Equação 11 (OGATA,1993).

$$ITAE = \int_0^T t|e(t)|dt \quad (11)$$

### 3.4.3 Média do Erro Quadrático - MSE

O critério em questão reflete todas as variações e desvios em relação ao valor de referência. É positivamente lembrado quanto a sua representatividade sobre a sua resposta em função de avaliação pura ou híbrida (GRIFFIN, 2003). Matematicamente é definido pela Equação 12,

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^2(i) \quad (12)$$

sendo N o número de amostras a serem utilizadas pelo PID.

### 3.4.4 Integral do Erro Quadrático - ISE

O critério da Integral do Erro Quadrático tem como ponto positivo a facilidade prática de sua implementação experimental. Além disso, proporciona grandes ponderações a erros grandes aliado a pequenas ponderações a erros pequenos. Entretanto, o critério apresenta pouca robustez de seletividade, de modo que as variações nos parâmetros do controlador PID refletem a pequenas variações no índice do critério.

Claramente o sistema projetado embasado nesse critério apresenta rápida resposta, porém baixa estabilidade, gerando oscilações predominantes no regime transitório. Matematicamente é definido pela Equação 13 (OGATA, 1993).

$$ISE = \int_0^T e^2(t)dt \quad (13)$$

### 3.4.5 Integral do Erro Quadrático multiplicado pelo Tempo - ITSE

O critério pondera um erro inicial grande, porém com peso pequeno, ou seja, na medida em que os erros ocorrem de forma mais tardia na resposta transitória serão cada vez mais penalizados, de modo que esse critério apresenta melhor seletividade comparado ao critério anterior comparado ao critério ISE na identificação dos parâmetros do controlador PID. Matematicamente o ITSE é definido pela Equação 14 (OGATA, 1993).

$$ITSE = \int_0^T te^2(t)dt \quad (14)$$

Apresentados os índices de desempenho, fica o questionamento de como eleger o que mais atende os critérios de otimização para os mais diversos problemas estudados. De modo que, um sistema só é dito como ótimo quando o índice de desempenho selecionado reduz o valor do erro ponto mínimo para o sistema analisado.

### 3.5 Funções de otimização

Os problemas de otimização são geralmente problemas de maximização ou de minimização de função de uma ou mais variáveis de algum determinado domínio, de modo que, em alguns casos existe também um conjunto de restrições nas variáveis estudadas. Dessa forma, para o entendimento mais completo dos algoritmos de otimização, tem-se como pilar o conhecimento dos conceitos e definições usualmente utilizados nessa literatura. Para o presente estudo, os conceitos primordiais são:

- a) **Função Objetivo:** função de uma ou mais variáveis de projeto que se deseja otimizar, minimizando-a ou maximizando-a;
- b) **Ponto Ótimo:** ponto formado pelas variáveis que limitam a função objetivo e satisfazem o conjunto de restrições;
- c) **Valor Ótimo:** valor da função objetivo no ponto ótimo.

As características das funções de otimização do MatLab que serão aprofundadas nesse tópico estão inseridas e fazem parte da *toolbox* de Otimização, onde se encontra um conjunto de códigos pré-definidos, dos quais as funções de otimização também são contempladas. Nesta

ferramenta existem diversas rotinas, onde se aplica também a problemas genéticos. Entretanto para esse estudo, as rotinas que serão aproveitadas são denominadas *fminsearch*, *fmincon* e *patternsearch*, que inclusive já tiveram suas escolhas justificadas na seção de Introdução do presente trabalho, de modo que, tais escolhas possuem algumas restrições a serem pontuadas em seu tratamento.

### 3.5.1 Rotina Fminsearch

Primeiramente, para que seja possível entender a lógica da construção do algoritmo *fminsearch* é necessário apresentar os conceitos básicos do método Simplex. O método Simplex nada mais é do que uma técnica utilizada para se determinar, numericamente, a solução ótima de um modelo de programação linear. Dessa forma, para iniciar o método, tem-se como base uma solução inicial viável que também é conhecida como “semente”, que nada mais é do que inferências de valores cabíveis como solução.

A função *fminsearch* tem como primeiro argumento a Função Objetivo (FO) que se deseja minimizar; feito isso, o segundo argumento são as conhecidas “sementes”. A partir desses dados são executadas as iterações da função. Sempre que o valor converge a um dos valores de chute inicial, tem-se o indicativo de encontrar os mínimos locais da função, esses já têm alguma chance de serem promovidos posteriormente a um mínimo global.

Uma observação importante, para análises mais minuciosas, é que o método possibilita mostrar todo o percurso trilhado desde o uso do chute inicial até convergir ao mínimo global, pela disponibilidade da propriedade “*display*” para “*iter*” por meio do comando “*optimset*” disponível no MatLab. Para mais esclarecimentos sobre o tema, o leitor pode dispor de uma pesquisa mais apurada na ferramenta de Ajuda do *software* MatLab.

O *fminsearch* geralmente consegue lidar com a descontinuidade, principalmente se ela não estiver alocada dentro do *range* próximos ao valor da solução. Além disso o método pode fornecer apenas soluções locais, e trabalha apenas com números reais e por consequência, deve retornar apenas números reais. Fato que, para o uso de variáveis complexas, deve-se dividir as parcelas em reais e imaginárias. Por se tratar de um método de exploração do espaço de soluções, a função *fminsearch* utiliza o método conhecido como “*hill climbing*”, ou subida da encosta, que tem como princípio avaliar os pontos adjacentes do espaço de procura, movendo-se na direção que minimiza o resultado da função objetivo (PAIVA, 2014).

### 3.5.2 Rotina Fmincon

Na otimização restrita, o objetivo geral é transformar o problema macro em subproblemas que representem menor grau de dificuldade para resolução, usando como base para esse processo um método iterativo. Uma característica marcante de métodos antigos é a conversão do problema restrito para um problema mais básico, entretanto sem restrições, usando uma função de penalidade para tais fatores que estão próximos ou até mesmo além do limite da restrição. Dessa maneira o primeiro problema exposto, com suas restrições, é resolvido usando uma sequência de otimizações sem restrições parametrizadas que convergem para a solução do problema inicialmente proposto.

Análogo ao método *fminsearch*, o *fmincon*, usa um método de programação quadrática e sequencial (PQS). Nesse método, a função resolve os subproblemas de programação quadrática a cada iteração, e por consequência atualiza uma estimativa de valor de mínimos ou máximos da função objetivo. Mais informações desse método de procura podem ser encontradas nos documentos de ajuda do MatLab (GUIDE MATLAB, 2019).

A Equação do *fmincon* é representado pela Equação 15.

$$\text{Min } f(x) \text{ sujeito a } \begin{cases} c(x) \leq 0 \\ ceq(x) = 0 \\ A \cdot x \leq b \\ Aeq \cdot x = beq \\ lb \leq x \leq ub \end{cases} \quad (15)$$

onde  $x$ ,  $b$ ,  $beq$ ,  $lb$  e  $ub$  representam vetores,  $A$  e  $Aeq$  são matrizes,  $c(x)$  e  $ceq(x)$  são funções que tem como retorno vetores e  $f(x)$  é uma função que retorna um escalar. De modo que  $f(x)$ ,  $c(x)$  e  $ceq(x)$ , admitem ser funções lineares ou não lineares. O algoritmo localiza o mínimo de um problema especificado pelos parâmetros, onde  $x$ ,  $lb$  e  $ub$  são argumentos que definem o limite das restrições (PAIVA, 2014).

Como pontuado anteriormente, a função *fmincon* realiza uma pesquisa linear usando uma função muito semelhante a outros métodos de programação numérica para convergência de raízes, além disso se diferencia dos demais pelos pontos:

- a) Viabilidade respeitando os limites das restrições;
- b) Robustez para os resultados;
- c) Rotinas de álgebra linear reformuladas.

### 3.5.3 Rotina *Patternsearch*

O algoritmo *patternsearch* trabalha utilizando um conjunto de pontos padrão que, dependendo do comportamento da Função Objetivo (FO), pode ser expandido ou reduzido dentro de um determinado padrão estabelecido, por *default*, no MatLab, e assim o critério de parada para esta função ocorre quando um determinado padrão mínimo é atingido. Apresenta como objetivo determinar o ponto ótimo de uma função não linear utilizando a técnica de comparação de um conjunto de valores dados pelos pontos de uma certa região no espaço de pesquisa.

A função *patternsearch* além de encontrar o mínimo de uma função não linear utilizando o método de procura padrão (Pattern Search), também utiliza um algoritmo de busca direta generalizado (Generalized Pattern Search - GPS) (GUIDE MATLAB, 2019).

Como já mencionado, todos os métodos convergem para um resultado tendo como chutes iniciais valores para suas sementes, que nada mais são do que estimativa dos possíveis parâmetros. Fato que, para alguns modelos, torna-se muito difícil inferir bons parâmetros como sementes, de modo que para a maioria dos casos utiliza-se algum tipo de conhecimento prévio sobre o problema. De qualquer forma, é importante, ao menos, evitar a utilização de sementes com valores absurdos.

### 3.5.4 Reconhecendo as aplicações das funções de otimização

Como já mencionado a função *fminsearch*, que está presente na *toolbox* de otimização do MatLab, é específica para problemas com restrições lineares ou não lineares de várias variáveis. Esta função utiliza o método de Programação Quadrática Sequencial (PSQ). O método PSQ tem-se mostrado de grande eficiência para problemas de programação não lineares em relação ao sucesso das soluções encontradas (GUIDE MATLAB, 2019). A cada iteração o problema a ser tratado é dividido em subproblemas, de forma a facilitar a busca do ponto ótimo, e estes por sua vez são resolvidos por programação quadrática.

A segunda função a ser resumida, *patternsearch*, é um método de procura direta em padrões, que tem como objetivo determinar o ponto ótimo de uma função não linear utilizando como técnica de otimização a comparação de um conjunto de valores dados pelos pontos de uma certa região no espaço de pesquisa. Este método não utiliza derivadas da Função Objetivo e tende a ser um método de busca exploratória que tem como referência o comportamento da FO.

Por fim, mas não menos importante, a terceira função a ser reapresentada, a *fmincon*. Assim como a *fminsearch*, também utiliza o método de PSQ. Entretanto é restritiva, ou seja, seu foco de resolução está voltado a problemas multidimensionais não lineares com restrições (PAIVA, 2014).

Tais métodos de otimização procuram a solução a partir de uma semente. A semente é uma estimativa da solução e, quanto mais próxima estiver da solução, maior sucesso terá a otimização. Dependendo do tipo de problema, a dedução das sementes pode ser mais simples ou mais complexa. Neste sentido serão utilizados os valores dos parâmetros  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  encontrados pelo método de Ziegler-Nichols, para sistemas auto ajustáveis, que garante que as sementes possuem valores aceitáveis para iniciar as simulações.

Apresentadas as funções de desempenho que foram abordadas nesse estudo, será agora introduzido o modelo que foi estudado para realizar os comparativos das funções descritas acima, a planta de ferro de solda.

### 3.6 Planta de Ferro de Solda

Em um sistema térmico há sempre calor envolvido, seja seu acúmulo ou sua transferência. Calor pode ser transferido por três modos básicos: condução, convecção e radiação. Geralmente o fluxo de calor não é uniforme, de modo que uma ou duas dessas modalidades se sobressaem. Ao contrário do que acontece na realidade, quando se analisa um sistema térmico, é levando em conta como temperatura total aquela mensurada em um único ponto do corpo em análise, fato que, distancia-se da veracidade do fenômeno onde a temperatura é distribuída, de forma não uniforme sobre toda a extensão do corpo analisado.

Os sistemas térmicos são amplamente utilizados na indústria. Sistemas de arrefecimento, tais como os de motores de carros, motocicletas ou de plantas industriais de altos-fornos tem seu estudo térmico como ponto crucial para um bom desempenho dinâmico do processo ou da eficiência ao redor desses equipamentos.

Com o intuito de compreender melhor o funcionamento de um sistema térmico, bem como aplicá-lo aos estudos abordados nessa construção textual como modelo de controle. Neste trabalho utilizou-se uma planta constituída por um ferro de solda para a simulação de um sistema térmico seco. O objetivo para a primeira etapa foi obter um modelo matemático de um sistema térmico seco realizando o controle da temperatura do sistema para fins de sintonia de controladores.



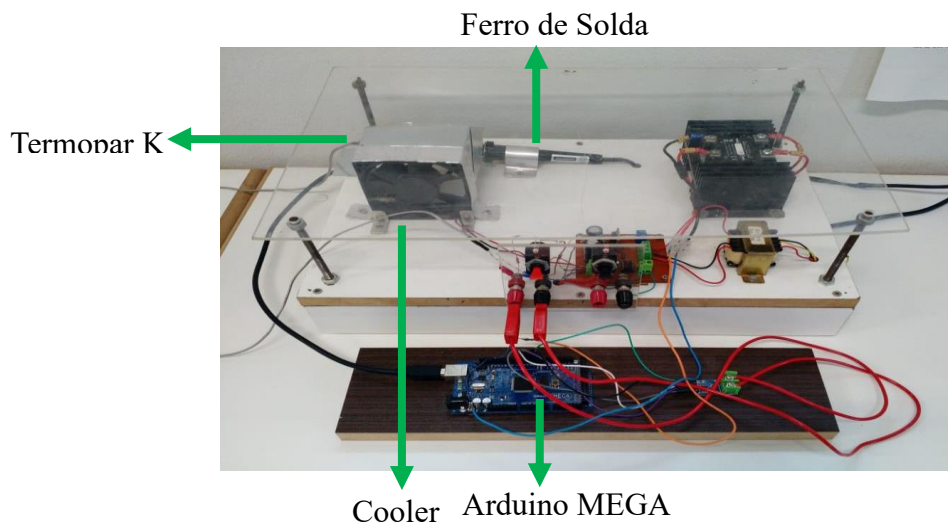
O sistema térmico é composto por um ferro de solda de 40W, um termopar, um relé de estado sólido com tensão contínua de controle de 4V a 32V e capacidade de carga de até 25A (24V a 330V), um *cooler* para o resfriamento do sistema, um microcontrolador Arduino para a aquisição de dados e uma aplicação desenvolvida no *software* Labview. Nesta aplicação foi desenvolvido um programa para aquisição/controlar dos sinais do sistema.

Antes de apresentar os estudos relacionados ao modelo de otimização da planta do ferro de solda, é de suma importância indicar alguns conceitos para o entendimento mais completo desse estudo.

Primeiramente, tem-se o Termopar, um sensor de temperatura que utiliza da junção de dois metais de propriedades diferentes, o qual, em contato com uma diferença de temperatura gera uma tensão elétrica por meio do conhecido efeito *Seebeck*. Tem-se uma enorme variedade, de termopares no mercado de modo que está sendo aplicado na planta estudada é o do tipo K, sua faixa de operação tem o *range* de 0 a 1926°C, equivalendo a uma tensão que flutua entre 0 V a 51m V.

O microcontrolador Arduino tem como função compor o sistema de aquisição e gerenciamento dos dados obtidos da saída do Termopar. Além disso, para o referido trabalho, ele tem a filosofia similar ao de um controlador no processo, já que recebendo os sinais do sensor do Termopar tipo K emite esses sinais de forma correspondente ao atuador, que no caso, é o ferro de solda. A Figura 12 representa a planta de controle supracitada e seus componentes principais.

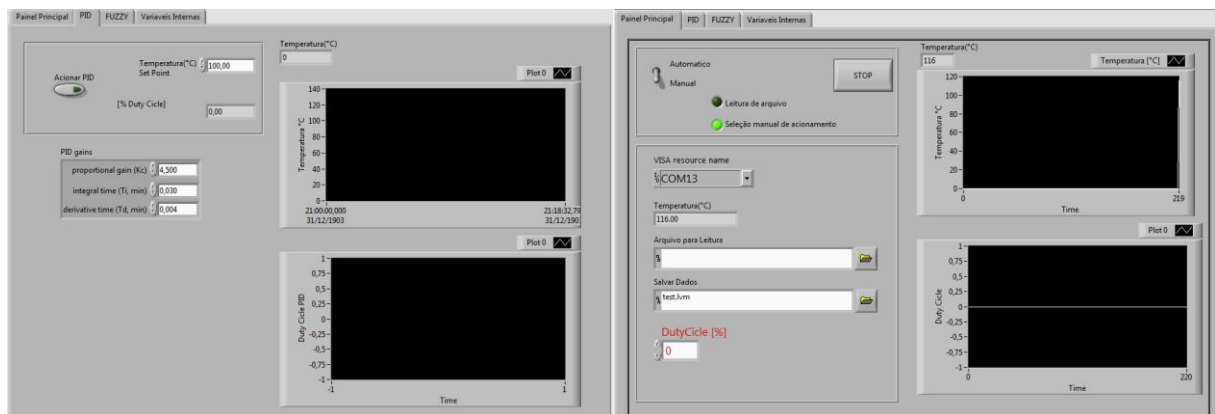
Figura 12 – Planta do Ferro de Solda e principais componentes



Fonte: do autor, 2019.

Já o LabVIEW nada mais é do que um *software* que facilita a interação virtual de *hardwares*, possibilitando a análise de dados e o processamento de sinais. Para o caso estudado, o *software* do LabVIEW foi usado para monitorar a planta do ferro de solda em tempo real, gerando um relatório que foi posteriormente analisado no *software* MatLab. A Figura 13 apresenta a interface de usuário do LabVIEW.

Figura 13 – Software LabVIEW



Fonte: do autor, 2019.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A composição da planta do ferro de solda está alinhada com as composições lógicas implementadas pelas funções de otimização, dito isto, é apresentado nesta seção as ferramentas que permitiram a organização e a forma de como os modelos matemáticos foram obtidos.

### 4.1 Ferramenta de desenvolvimento e ajuste do controlador PID – MatLab

São conhecidas inúmeras aplicações especializadas que também proporcionam um ambiente de desenvolvimento, com linguagem específica para a configuração da sintonia de controladores. Contudo, como escopo deste trabalho a ferramenta do MatLab (versão 2015a) dispõe de todos os parâmetros necessários para resultados satisfatórios, além da familiaridade de implementação visto que a ferramenta foi muito utilizada durante o curso de Engenharia de Controle e Automação. Têm-se disponíveis as funções de otimização que serão utilizadas como bases de comparativo ao modelo apresentado para o processo estudado. Além de uma gama de ferramentas como suas *toolbox* que auxiliam ao usuário/desenvolvedor a inferir aproximações pertinentes aos sistemas estudados, sejam estes de cunho teórico ou modelos práticos.

Deve-se salientar a importância do Simulink, ferramenta integrada ao software do MatLab que permite a representação de problemas e análises de processos por meio da composição com diagrama de blocos representativos do sistema a ser estudado e o *toolbox Ident* que se dispõe como ferramenta para a modelagem matemática da planta do ferro de solda.

Devidamente apresentadas as ferramentas de desenvolvimento do presente estudo, é possível agora analisar os métodos representados nesta seção com maior clareza.

### 4.2 Estudo da planta e obtenção dos dados

Para modelar o sistema, primeiramente foi necessário decidir a melhor forma de realizar um ensaio na planta de forma que se possa observar o comportamento do sistema, como a ordem da resposta do ensaio, se o sistema possui tempo morto (e estimá-lo), além de verificar a linearidade do sistema. Os ensaios foram realizados na planta do laboratório de controle do Departamento de Automática da Universidade Federal de Lavras (UFLA) e a coleta de dados se deu por meio do software do LabVIEW, em que foi gerado, como saída, uma série de arquivos base no formato de texto que representaram a variação da temperatura ao decorrer do tempo de amostragem.

Contextualizando o leitor sobre o conceito de PWM (Pulse Width Modulation) ou modulação por largura de pulso, o qual tem parte integrante como estímulo do processo. Visto que o *duty cycle* (ciclo de trabalho) encaixa-se como um conceito importante ao circuito PWM, refletindo a largura do pulso, ou seja, corresponde a fração de tempo que este se encontra em estado ativo, fornece desta forma um valor de tensão mais estável planta controlada (MICHELS, 2012).

Sendo assim, para se obter os resultados via LabVIEW foi necessário estimular o sistema da planta do ferro de solda por meio de sinais do tipo degrau, aplicando-se um *duty cycle* de 100% a sua entrada, de modo que a temperatura iniciasse o seu curso de variação crescente.

Após a execução dos experimentos na planta, foi possível inferir a modelagem do sistema, tomando como base os arquivos coletados durante o experimento na planta do ferro de solda por meio da *toolbox* de Sistema de Identificação (*systemIdentification*), denominado *Ident*.

O *Ident* é uma aplicação para a construção de modelos matemáticos de sistema dinâmicos a partir de dados de entrada e saída. A *toolbox* fornece técnicas como minimização de erros e identificação de sistemas para a representação de modelos de dinâmica com não linearidade (MATLAB, 2019), como será representado nesta seção.

Novamente, após coletados os arquivos e adicionados ao ambiente de desenvolvimento do MatLab, transforma-se a base de texto em vetores numéricos, e por meio da leitura e modelagem no *Ident*, torna-se possível gerar gráficos da saída em relação ao tempo, inferindo o formato da Função de Transferência (FT) que rege o comportamento do sistema. Tais passos descritos neste tópico serão detalhados no texto subsequente.

### **4.3 A Modelagem**

Os procedimentos de modelagem foram realizados após a coleta dos dados via interface com o LabVIEW. De modo que para a obtenção da função de transferência do modelo representado nesse estudo utilizou-se a interface *ident* inserida do MatLab que já apresentada anteriormente.

#### **4.3.1 Procedimentos para a Modelagem e Função de Transferência**

Realizados os experimentos de aquisição em bancada, foi gerado um arquivo no formato .txt contendo os vetores de tempo, entrada (*Duty Cycle [%]*) e saída (temperatura do ferro de

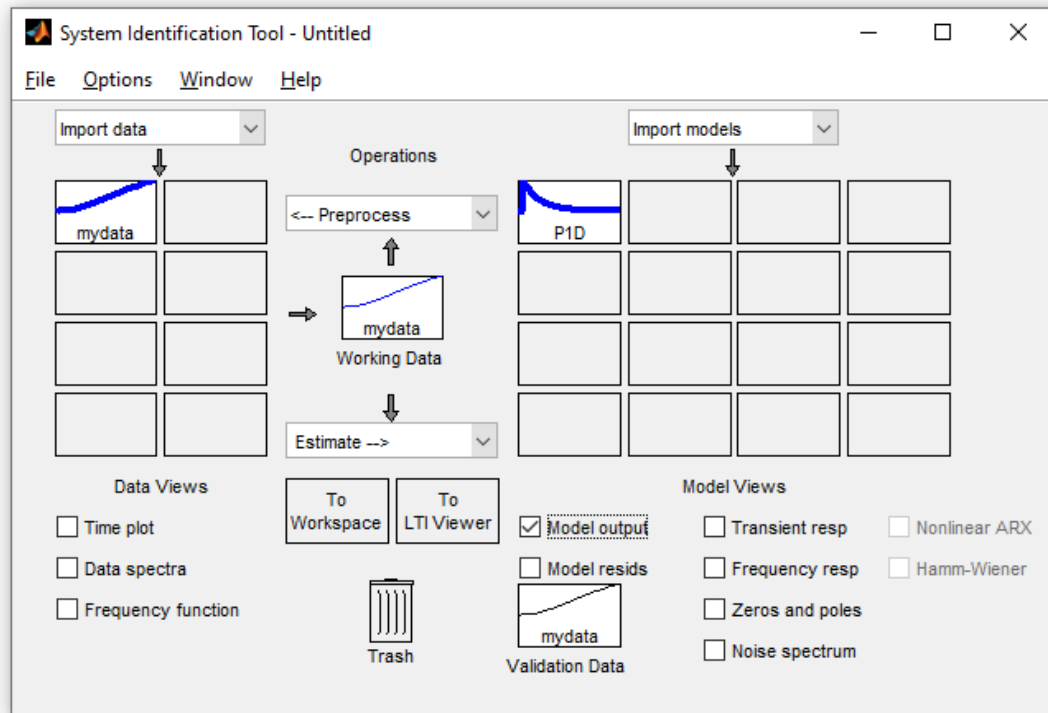
solda [°C]). Em posse de tais valores, pode-se obter a função de transferência do modelo térmico.

O bloco *ident* é contido na *toolbox* de identificação de sistemas do MatLab e consta de uma importante ferramenta para obtenção de modelos tanto lineares quanto não lineares. A ferramenta permite obtenção de funções de transferência comuns, funções de espaço de estados, modelos de processos (funções de transferência de 1ª ordem com atraso), modelos ARX lineares e não lineares, dentre outros. No escopo deste trabalho, foi utilizada uma função de modelo de processo. A função de processo a ser obtida pelo *ident* possui o formato descrito na equação (16):

$$G(s) = \frac{K_p e^{-T_d s}}{1 + T_p s} \quad (16)$$

A função  $G(s)$  possui três parâmetros a serem ajustados:  $K_p$  referente ao ganho estático do sistema,  $T_d$  que representa o atraso do sistema (ou tempo morto) e  $T_p$  que condiz à constante de tempo.

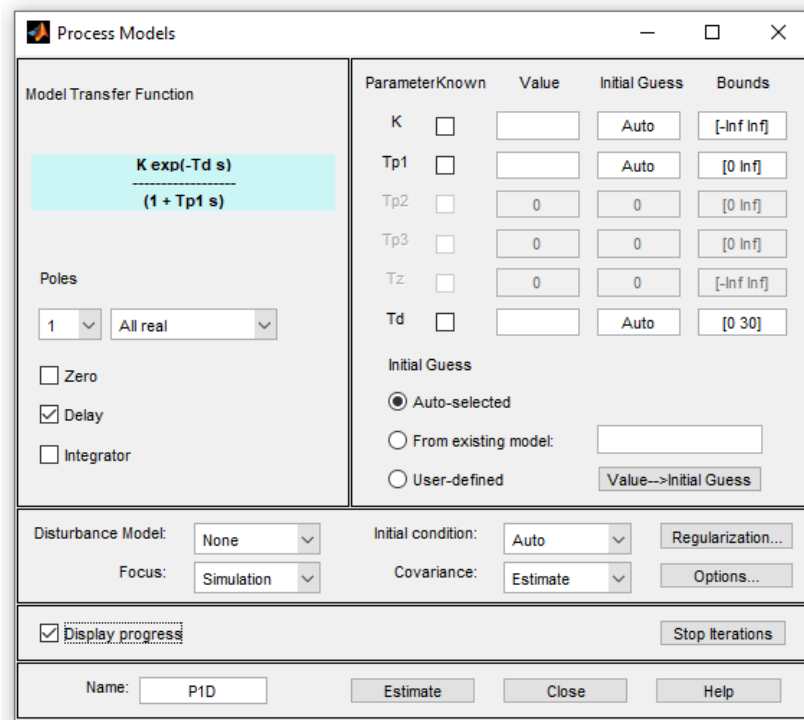
O *ident* obtém tal ajuste de parâmetros por diversos algoritmos de otimização, tais como: mínimos quadrados não-linear, Gauss-Newton, Gauss-Newton adaptativo, busca por gradiente, Levenberg-Marquardt, dentre outros métodos. Quando nenhuma função de ajuste é selecionada, o ajuste é feito automaticamente pelo método dos mínimos quadrados não-linear. A *toolbox* possui a seguinte interface mostrada na Figura 14:

Figura 14 – Interface do *ident* do MatLab

Fonte: do autor, 2019

Nesta interface, o usuário pode importar tanto os dados (em domínio do tempo ou frequência, por exemplo) quanto modelos prontos, como uma função de transferência ou modelo em espaço de estados. Também há possibilidade de realizar pré-processamentos, tais como: remoção de média, reamostragem (*resample*), selecionar a faixa de valores (*range*), entre outros. Após a seleção dos dados e a escolha do pré-processamento, o usuário escolhe o tipo de modelo que se deseja utilizar. Neste trabalho, não utilizou-se pré-processamento, porém utilizou-se o ajuste de parâmetros automático (mínimos quadrados não-linear). A Figura 15 mostra a tela de configuração para a estimação do modelo de processo.

Figura 15 – Interface de configuração de um modelo de processo – *ident*

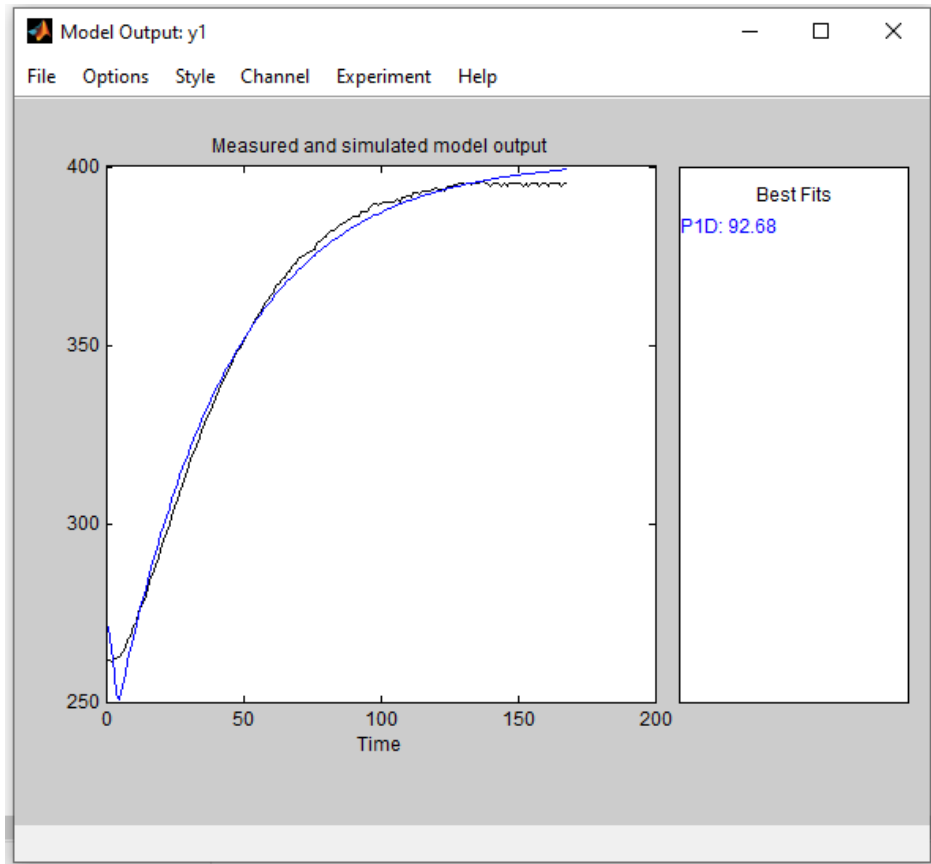


Fonte: do autor, 2019

Nesta tela, além de selecionar as opções de ajuste de parâmetros, o usuário pode escolher o número de polos e zeros no sistema, adicionador integrador, alocar condições iniciais para os parâmetros, usar regularização, aplicar distúrbios no modelo, dentre outras mais funcionalidades para o conhecimento do leitor.

Após a geração do modelo do processo, é possível visualizar na tela inicial (vide Figura 14) a saída do modelo estimado, sua taxa de acerto, visualizar os resíduos do modelo, dentre outras mais variáveis. Entretanto, como boa parte destas imagens fugiriam demasiadamente do escopo deste trabalho, apenas é apresentada um exemplo da saída do modelo na Figura 16, o qual foi obtido via dados coletados da planta do ferro de solda, porém não se apresentou como o melhor dos casos. O modelo com maior aproximação será apresentado na seção de Resultados e Discussões. Na figura também é possível ver o resultado de estimação.

Figura 16 – Figura de saída de um modelo estimado no *ident*



Fonte: do autor, 2019

#### 4.4 Procedimentos para o controle

Em sequência ao procedimento de modelagem, realizou-se o procedimento de controle da planta; para tal, foi utilizado um controlador PID. Tendo o controlador definido, as medidas de desempenho do sistema a uma entrada de referência,  $r(t)$ , dependerá dos parâmetros de P, I e D que forem ajustados ao controlador. O objetivo do controlador consiste em manter a saída do processo  $y(t)$  em um valor desejado ou de referência  $r(t)$ , ou seja, restringir ao máximo o sinal de erro  $e(t)$ .

Para o intuito de minimizar a componente do erro, a ação de controle  $u(t)$  é exercida sobre o processo seguindo a descrição matemática do controlador PID. Tal função é descrita em seu domínio do tempo na Equação 15 e a sua respectiva transformada de Laplace é mostrada na Equação 16.



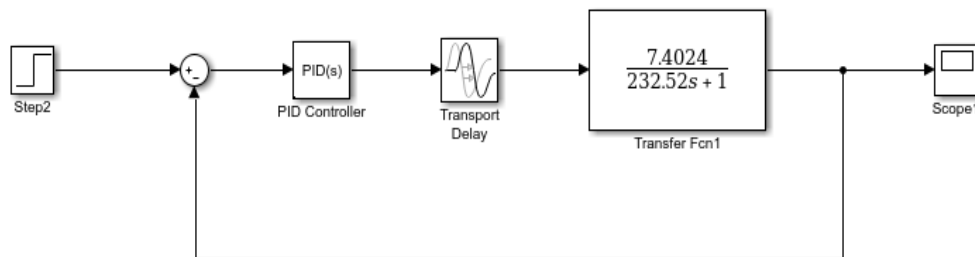
$$u(t) = K_P \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (15)$$

$$U(s) = K \left( 1 + \frac{1}{sT_i} + sT_D \right) \quad (16)$$

onde  $u(t)$  é o sinal de entrada aplicado e o erro  $e(t)$  é definido pela diferença entre o sinal de saída com a referência do sistema (*setpoint*).

Para simular o sistema, o MatLab apresenta uma grande vantagem, pois ao utilizar o Simulink, ferramenta integrada, permite a análise, projeto e simulação de sistemas de controle, e, com isso, foi possível desenvolver o diagrama de blocos representativo do sistema em estudo. Esta representação, em diagrama de blocos, pode ser visualizada na Figura 17.

Figura 17 – Diagrama de Blocos implementado no Simulink



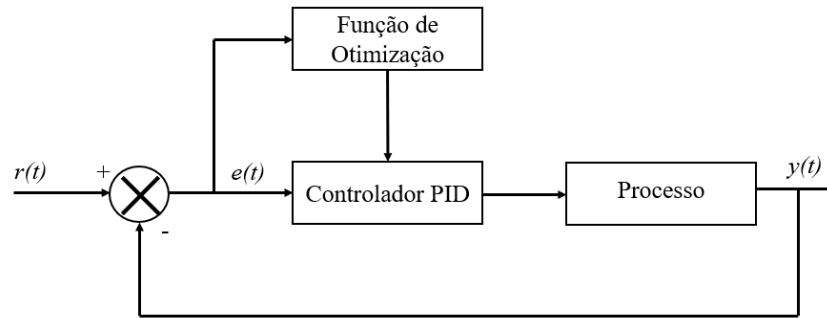
Fonte: do autor, 2019

Para a otimização dos parâmetros do controlador utilizou-se a simulação do sistema representado pelo diagrama de blocos da Figura 17. Esta simulação foi executada por meio do diagrama de blocos desenvolvido no Simulink. Executou-se o comando “sim” para as funções de avaliação já supracitadas com a finalidade de simular um ficheiro, este seria composto pelo diagrama de blocos do sistema controlado, como visto na Figura 17.

Para cada chamada dessa função, realiza-se uma nova simulação com os novos parâmetros do controlador PID. A função recebe como parâmetro o nome do ficheiro do Simulink e o tempo de simulação, e retorna o vetor com os valores de tempo, do erro e da saída do sistema. Ao final, é retornado o valor do erro, de modo a ser minimizado pelas funções de otimização. A Figura 18 representa o digrama esquemático da metodologia que foi adotada no procedimento. Tal procedimento é realizado de forma iterativa, em que, a cada nova iteração, os parâmetros do controlador são alterados obtendo um novo valor para a função custo, de maneira que os valores obtidos de custo atinjam um valor de convergência para a função de

otimização, ou seja, o valor da diferença das iterações seja menor que um valor de tolerância especificado.

Figura 18 – Diagrama de Blocos da metodologia implementada



Fonte: Paiva, 2014

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após apresentar a metodologia utilizada para a modelagem e o controle do sistema do ferro de solda será apresentado nesta seção os resultados obtidos para o modelo teórico que, posteriormente foram aplicados a planta. Com a finalidade de apresentar os comparativos entre tais modelos, foram gerados gráfico e análises descritivas.

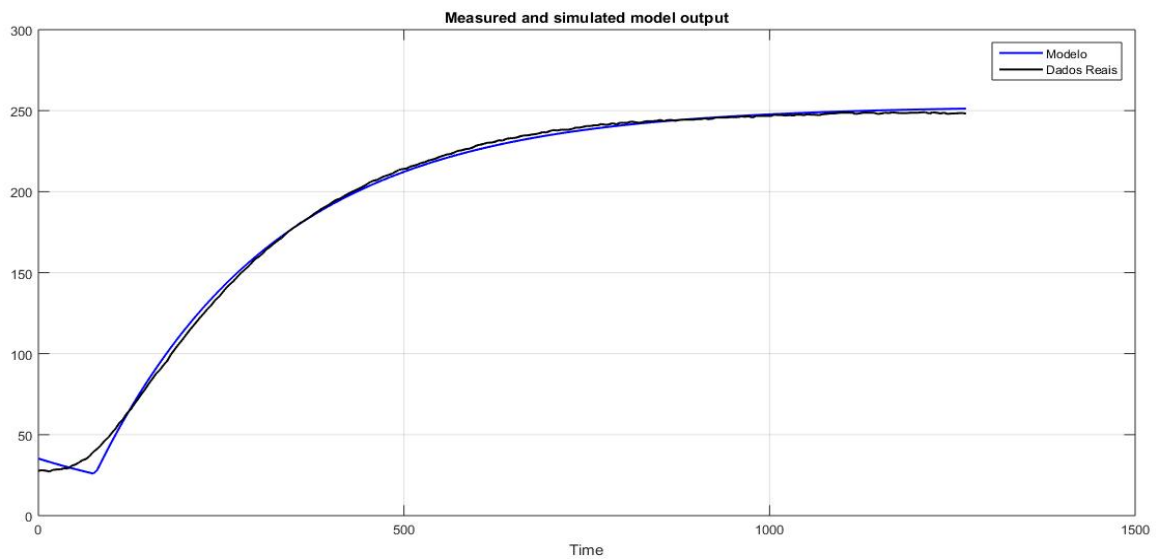
### 5.1 Resultados de modelagem

Os testes utilizando a ferramenta *ident* foram aplicados seis vezes, com o intuito de se apurar o resultado mais fiel e representativo a planta do ferro de solda. Em todas as suas simulações foram gerados dados base, os quais foram analisados um a um no *Ident*, de modo que, elegeu-se o comportamento mais próximo do sistema real. Notou-se que, o processo analisado tratava-se de um sistema não linear, com aproximação de 95,95%. A FT que melhor representou a dinâmica do processo está descrita a seguir pela Equação 17. Tais dados serão mais aprofundados na seção de Resultados e Discussões.

$$G1 = \frac{7,6691e^{-72,74s}}{245,83s + 1} \quad (17)$$

Analisando os resultados obtidos, concluiu-se que o sistema possui não linearidades, dado que os parâmetros das funções de transferência encontradas variavam de acordo com a faixa de operação do sistema. A FT apresentada pela Equação 17, faz referência a um sistema de primeira ordem com tempo de atraso. Esta estrutura foi selecionada devido a uma aproximação acima de 95,95% dos dados de entrada retirados da planta original, conforme pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 – Curva de aproximação do modelo em resposta ao degrau unitário



Fonte: do autor, 2019.

## 5.2 Resultados Teóricos

A determinação dos parâmetros do controlador PID via índices de desempenho de erro depende de uma solução inicial factível, ou seja, as “sementes”. Assim, inicialmente utiliza-se um chute inicial para o processo. Nessa seção será analisado o desempenho do sistema quando se utilizam as funções de otimização do MatLab. Como referido para as três funções apresentadas, utilizados como semente os valores referentes aos ganhos do controlador PID obtidos pelo método de Ziegler-Nichols. Esses valores iniciais foram:

$$K_p = 4,5$$

$$K_i = 2,5$$

$$K_d = 1,0$$

Para as funções de otimização, o ponto dado como semente corresponde a um local no espaço de possíveis soluções. De modo que, a busca pelo ponto ótimo ocorre a partir desse ponto inicial.

A Tabela 2 especifica os ganhos do controlador PID para as cinco funções objetivo utilizadas, a partir do algoritmo de otimização *fminsearch*.

Tabela 2 – Ganhos do controlador para a função *fminsearch*

<b>Método <i>Fminsearch</i></b>			
<b>Função Custo</b>	$K_p$	$K_i$	$K_d$
<b>IAE</b>	0.4484	0.0004	2.4377
<b>ITAE</b>	0.3686	0.0027	2.4496
<b>ISE</b>	5.458	-0.1187	1.5848
<b>ITSE</b>	5.458	-0.1187	1.5848
<b>MSE</b>	0.4425	0.0012	1.1062

Fonte: do autor, 2019.

Análogo a citada anteriormente, a Tabela 3 especifica os ganhos do controlador PID para as cinco funções objetivos utilizadas, a partir do algoritmo de otimização *patternsearch*.

Tabela 3 – Ganhos do controlador para a função *Patternsearch*

<b>Método <i>Patternsearch</i></b>			
<b>Função Custo</b>	$K_p$	$K_i$	$K_d$
<b>IAE</b>	-38.0001	1.5078	71.625
<b>ITAE</b>	-38.0001	1.5078	71.625
<b>ISE</b>	-53.0000	2.5000	63.000
<b>ITSE</b>	-53.0000	2.5000	63.000
<b>MSE</b>	-53.0000	2.5000	63.000

Fonte: do autor, 2019.

Por último, a Tabela 4 especifica os ganhos do controlador PID para as cinco funções objetivo utilizadas, a partir do algoritmo de otimização *fmincon*.

Tabela 4 – Ganhos do controlador para a função *fmincon*

<b>Método <i>Fmincon</i> - (P, I, D) <math>\geq 0</math> e soma = 1</b>			
<b>Função Custo</b>	$K_p$	$K_i$	$K_d$
<b>IAE</b>	0.8697	0.0000	0.1303
<b>ITAE</b>	0.0000	0.6122	0.3878
<b>ISE</b>	1.0000	0.0000	0.0000
<b>ITSE</b>	0.3545	0.3545	0.3545
<b>MSE</b>	0.0014	0.2787	0.7199

Fonte: do autor, 2019.

Vale salientar que, na configuração da função *fmincon*, os parâmetros do controlador PID foram atribuídos de modo que o somatório dos ganhos do PID fosse igual a 1 ( $K_p + K_i + K_d = 1$ ) e que os ganhos fossem maiores ou iguais a zero. Dado que ganhos negativos tendem a levar o sistema à instabilidade. Ou seja, foi aplicado um conjunto de restrições, sendo a

primeira correspondente ao somatório dos ganhos ser unitário e a segunda referente aos ganhos serem positivos.

Analisando os resultados obtidos, foram encontrados valores aceitáveis com a utilização da função *fminsearch*, a qual refletiu em valores aceitáveis de erro e, além disso, as saídas do sistema se mantiveram estáveis durante o regime permanente. Assim, foi possível inferir o tempo de subida (tempo para o sistema sair de 10% a 90% do seu valor final em regime permanente), tempo de estabilização – como critério 2% (tempo necessário para a curva de resposta alcançar e permanecer dentro de uma faixa em torno do valor final) além do percentual de sobressinal máximo. Todos esses pontos foram supracitados anteriormente no contexto de performance de sistemas de controle.

Entretanto, para as funções de otimização *patternsearch* e *fmincon*, os resultados gerados por ambas não foram satisfatórios. De modo que, nas representações gráficas apresentadas nas Figuras 26 e 27 refletiram saídas instáveis para o sistema (sinal de saída tendendo ao infinito). Entretanto, vale ressaltar que, para este estudo, as funções que não convergiram aos resultados condizentes ao contexto de sua natureza, neste caso, minimizar o erro do sistema de controle, por conseguinte, torna-se inexistente o interesse em apresentar tais dados, visto que, tanto dos sinais de saída ao longo do tempo, quanto dos sinais de erro ao longo do tempo apresentaram-se como um sistema instável. Desta forma as Figuras 26 e 27 estão presentes no trabalho apenas para exemplificar ao leitor a dinâmica de um sistema instável.

Cabe salientar que, para a função *fmincon*, foi utilizado apenas um conjunto de restrições, tal conjunto, se alterado, pode gerar resultados diferentes para os ganhos do controlador, refletindo nos resultados de desempenho do sistema.

Analisando novamente os resultados obtidos para as funções que não convergiram ao valor de referência esperado, pode-se pontuar que para a função *patternsearch* foi utilizado o padrão *default* do MatLab para a função, de modo que os mínimos locais encontrados na função custo não foram condizentes com a minimização esperada do valor do erro. Tal evidência encontrada pode ser decisiva para gerar os resultados obtidos. Uma inclusão de um conjunto adequado de restrições pode ser uma solução viável ao problema.

Enquanto para a função *fmincon* foi utilizado um conjunto simples de restrições, porém que não se mostraram perfeitamente adequadas ao problema. Caberia para essa função um novo arranjo para tal conjunto, de modo que novos valores para os ganhos sejam obtidos, o que poderia evitar saídas com comportamentos inconstantes da resposta do sistema.

As simulações feitas a seguir foram realizadas com os valores dos parâmetros supracitados do controlador PID obtidos pelo método de sintonia de controladores de Ziegler-

Nichols para sistemas de primeira ordem e refinadas pelas funções de otimização citadas anteriormente.

Em seguida, são apresentados os resultados gerados pela função de otimização *fminsearch* cujas funções de custo estão relacionadas com o sinal de erro oriundo da planta (sinal de referência subtraído pelo sinal de saída). Tais valores são representados na Tabela 2.

As Figuras 20 a 25 representam os sinais de saída e de erro oriundos de cada função custo (IAE, ITAE e MSE) para o processo de otimização *fminsearch*, dentro dos parâmetros de estabilidade exigidos. Além das representações gráficas, também são apresentados os índices de desempenho como o sobressinal (*overshoot*), o tempo de estabilização (critério de 2 %) e o tempo de subida (de 10 % a 90 %).

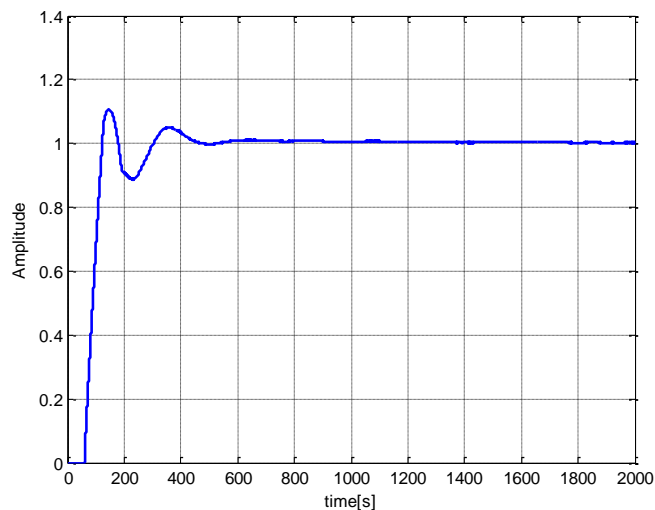
#### a) Integral do Erro Absoluto – IAE

Sobrelevação (*Overshoot*) = 10.8 %

Tempo de Acomodação = 425 s

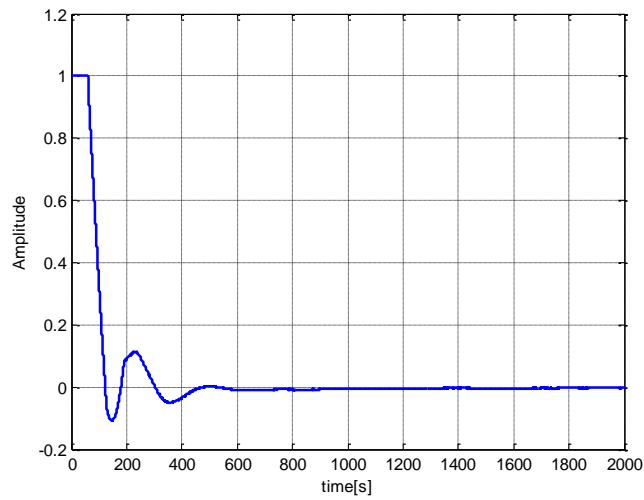
Tempo de Subida (10 % - 90 %) = 50.69 s

Figura 20 – Sinal de saída em função do tempo para a otimização *fminsearch* usando a função custo IAE



Fonte: do autor, 2019.

Figura 21 – Sinal de erro em função do tempo para a otimização *fminsearch* usando função custo IAE



Fonte: do autor, 2019.

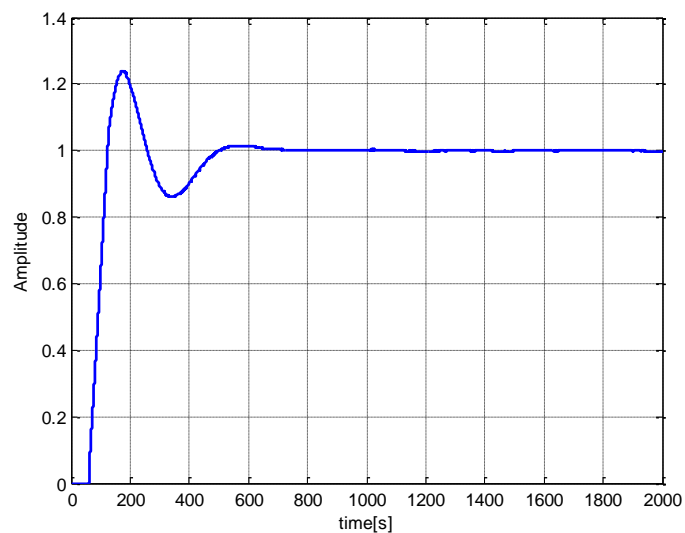
b) Integral do Erro Absoluto multiplicado pelo Tempo – ITAE

Sobrelevação (*Overshoot*) = 23.9 %

Tempo de Acomodação = 470 s

Tempo de Subida (10 % - 90 %) = 52.11 s

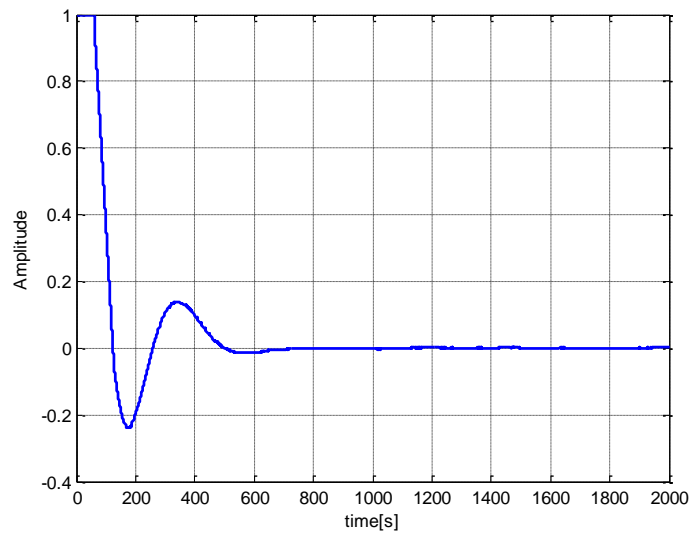
Figura 22 – Sinal de saída em função do tempo para a otimização *fminsearch* usando a função custo ITAE



Fonte: do autor, 2019.



Figura 23 - Sinal de erro em função do tempo para a otimização *fminsearch* usando função custo ITAE



Fonte: do autor, 2019.

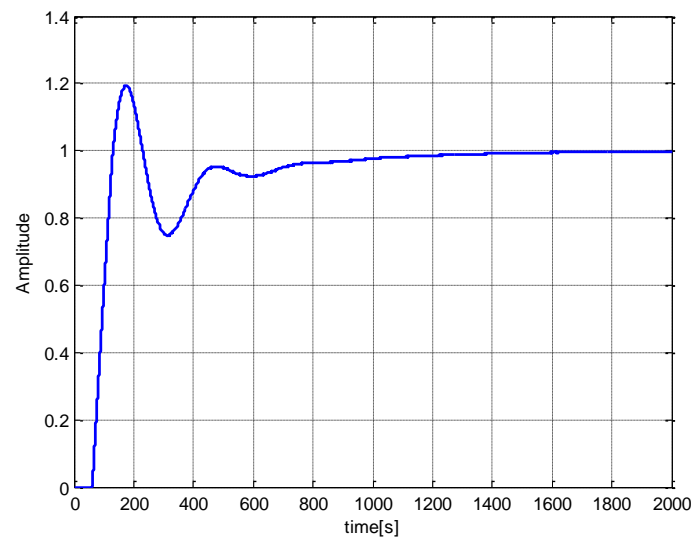
c) Média do Erro Quadrático – MSE

Sobrelevação (*Overshoot*) = 19.4 %

Tempo de Acomodação = 1060 s

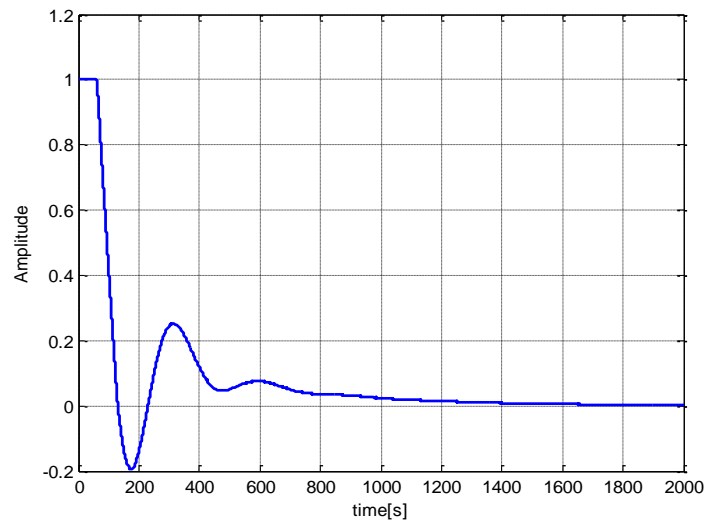
Tempo de Subida (10 % - 90 %) = 54.65 s

Figura 24 – Sinal de saída em função do tempo para otimização *fminsearch* usando função MSE



Fonte: do autor, 2019.

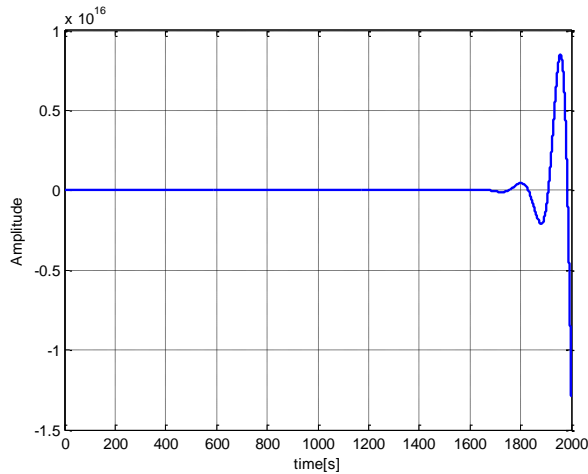
Figura 25 - Sinal de erro em função do tempo para a otimização *fminsearch* usando função custo MSE



Fonte: do autor, 2019.

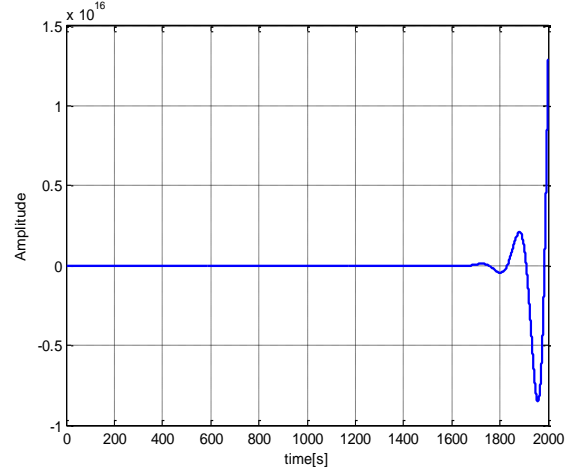
Para os custos referentes as funções ISE e ITSE, por se tratar de dois sistemas instáveis, não foram inferidos valores para os critérios de desempenho. Na Tabela 2 ambos os casos demonstraram valores negativos para o ganho integral  $K_i$ . Na teoria de controle é sabido que valores de ganhos negativos, como já citado nesse estudo, refletem comportamento de sistemas instáveis. Desta forma, para averiguar a veracidade dos testes foram substituídos os valores negativos por zero e então realizados novos testes. Entretanto o resultado encontrado não demonstraram um comportamento estável do sistema.

Figura 26 – Sinal de saída em função do tempo para otimização *fminsearch* usando função ISE e ITSE



Fonte: do autor, 2019

Figura 27 – Sinal de erro em função do tempo para a otimização *fminsearch* usando função custo ISE e ITSE



Fonte: do autor, 2019.

Novamente, evidenciando de forma mais detalhada os testes de otimização do controlador para a função *patternsearch* e *fmincon* que tiveram seus erros relacionados aos custos de otimização representados segundo a Tabela 3 e Tabela 4 respectivamente. Todas as funções de otimização estudadas apresentaram ganhos proporcionais negativos para o método *patternsearch*. Já para a função *fmincon* o conjunto de restrições contribuíram para as saídas insatisfatórias. Para ambas, os fatores contribuíram para a instabilidade. Sendo assim, sua representatividade não é cabível para o presente estudo.

## 5.2 Resultados Aplicados à Planta Real

Seguinte às simulações realizadas via MatLab/Simulink, foram aplicados os ganhos cujas simulações apresentaram natureza estável para o sistema na planta real do ferro de solda. Para isto, foi utilizada a interface de controle contida na aplicação do LabView para a planta. Durante o uso do controle, foram aplicados os ganhos do PID e após a estabilização da saída de acordo com o *setpoint* desejado (neste caso, 100°C). Por fim foi aplicada uma perturbação ao sistema por meio do acionamento do *cooler* com a finalidade de representar o tempo de recuperação após um distúrbio no sistema. Este último é bem característico a qualquer planta que se deseja inferir métodos de controle. O distúrbio nada mais é do que alguma alteração inesperada durante

o processo e faz com que o controlador detecte essa variação e aplique sinais ao atuador no intuito de minimizar as distorções do valor de referência, tendendo a levar o erro a zero.

Com o intuito de comparar os valores teóricos obtidos por meio de simulações realizadas no MatLab com as aplicadas na planta do ferro de solda, foi elaborada a Tabela 5 que representa o comportamento dinâmico dos ganhos do controlador PID adicionados à interface de controle do LabVIEW.

Tabela 5 – Valores de Desempenho para a planta real

<b>Método Fminsearch</b>				
<b>Função Custo</b>	Tempo de Subida (s)	Tempo de Acomodação (s)	Overshoot (%)	Tempo de Recuperação após Distúrbio (s)
<b>IAE</b>	156,11	1989,08	1,75	4728
<b>ITAE</b>	117,5	876,24	31,5	539
<b>MSE</b>	124,65	453,22	14,5	1439,7

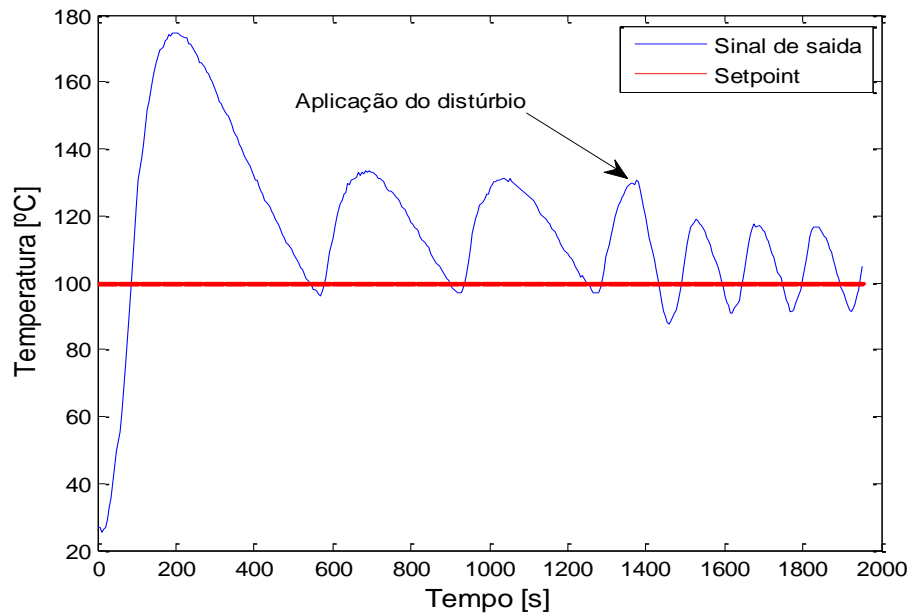
Fonte: do autor, 2019

Apresentados os resultados na Tabela 5, é muito importante salientar que os testes realizados na planta real diferem numericamente, porém retratam a dinâmica do sistema, tomando como base os dados encontrados no estudo teórico. Ou seja, foram aplicados ao controlador PID os ganhos encontrados durante os primeiros testes.

Cabe ressaltar que o comportamento de um sistema térmico tem dinâmica lenta, sua perda de calor depende muito das características físicas do sistema ou das formas como esse calor por ser dissipado. Sendo assim, o controlador PID tem importante atuação sobre a dinâmica do sistema, acelerando ou retardando a ação do calor dissipado na planta. Tais conceitos também justificam alguns valores de resposta discrepantes entre os modelos ideal e prático. Como é de se esperar, o modelo prático tem entraves externos que são ineficazes de se quantificar. Enquanto no modelo ideal, muitas variáveis estão acondicionadas para o funcionamento perfeito, o que não reflete a realidade de forma fiel.

A construção das comparações foi consolidada a partir da resposta do sistema aos ganhos do controlador inicialmente definidos com os valores das sementes. A dinâmica do sistema está representada na Figura 28.

Figura 28 – Resposta do sistema com os ganhos iniciais



Fonte: do autor, 2019

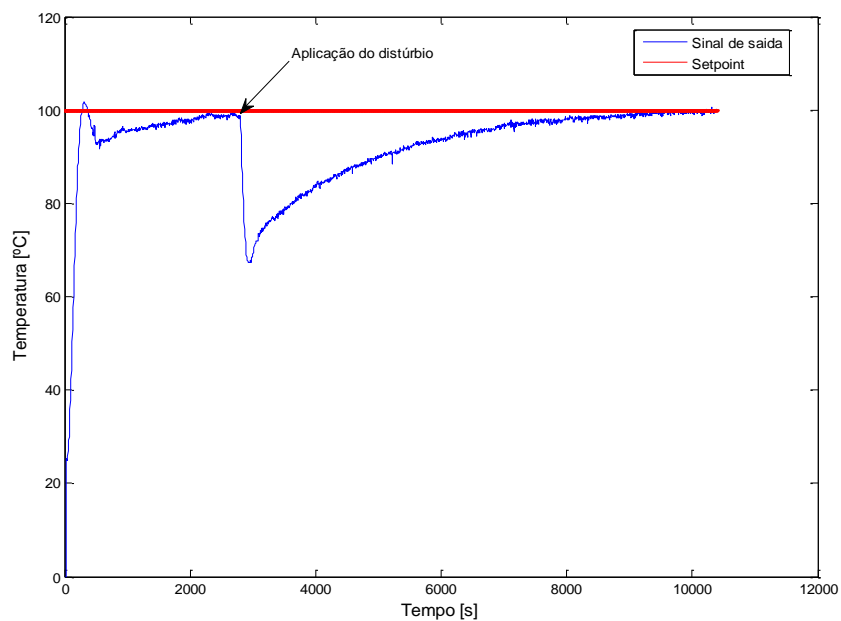
Pode-se entender que os valores inferidos para o chute inicial do sistema refletiram em um comportamento próximo a um sistema oscilatório, entretanto sempre em torno do valor de referência de temperatura definido. Além disso, o sinal de controle tem uma atuação similar ao controle do tipo Liga/Desliga, de modo que tal sinal de controle não gerou uma boa curva de resposta do sistema para manter o sinal de saída em *range* aceitável de erro. Contudo, quando aplicou-se um distúrbio ao sistema, o mesmo teve um comportamento rápido e buscou se manter em torno do valor de *setpoint*, porém ainda refletiu uma natureza de sistema oscilatório.

Fato que pode ser justificado pelo comportamento dos sistemas térmicos, como comentado anteriormente, que em geral tem um resfriamento mais lento após a ultrapassagem do valor de referência. Porém, com a ação do distúrbio, o sistema tem a perda de calor de forma mais eficiente, o que indicou uma faixa de controle mais otimizada.

Em sistemas reais, como o apresentado anteriormente, torna-se inevitável a presença de perturbações das mais variadas naturezas. Esses distúrbios do processo tendem a dificultar ou até mesmo incapacitar o controle eficiente de determinado sistema. Como forma de simular tais eventos, foram acrescentados distúrbios, com o acionamento do cooler com a finalidade de testar a resiliência dos controladores PID sintetizados. É importante pontuar que o estudo aqui demonstrado está embasado em uma planta estruturada para fins didáticos, bem como seus resultados de controle são aproximações de situações e equipamentos de projetos reais, amplamente utilizados na indústria.

Novamente, discorrendo sobre a Tabela 5 e detalhando a função de otimização IAE, que está representada na Figura 29, tomou-se como destaque o valor de máxima ultrapassagem do sistema (*overshoot*) muito inferior ao encontrado no estudo teórico representado na Figura 20. Esse atributo é muito válido para sistemas com controle de temperatura mais rigorosos a valores que excedam o valor de referência, como por exemplo no transporte de cargas alimentícias. Em contrapartida, a função IAE teve uma resposta muito lenta para os critérios de tempo de acomodação e recuperação após o distúrbio.

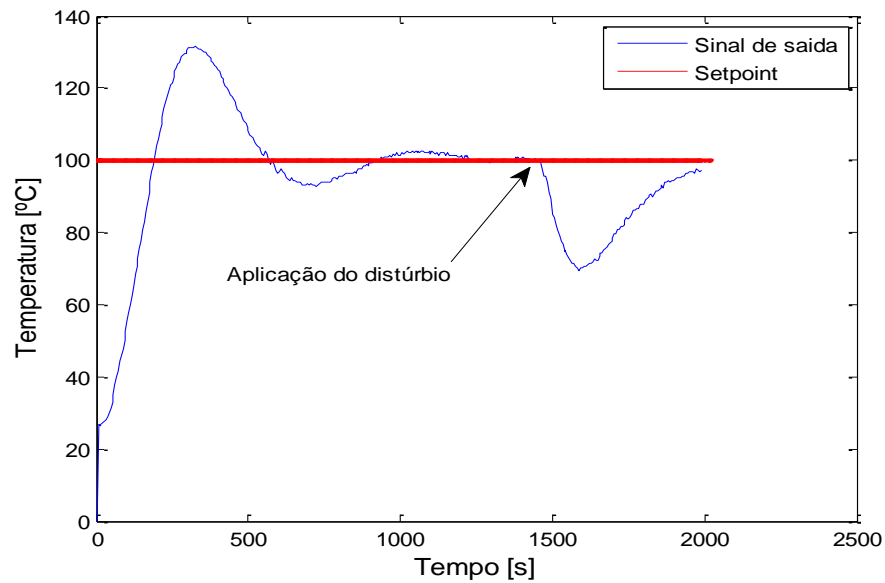
Figura 29 – Resposta do sistema real para a função IAE



Fonte: do autor, 2019

Para a função de otimização ITAE, tem-se como vantagens frente as demais funções analisadas o critério de tempo de subida e o tempo de recuperação após o distúrbio realizado pelo *cooler*. De modo que, para processos que necessitem um controle mais imediato, como um acionamento de *airbag* automotivo, a função se comporta com muita qualidade. Porém a sua máxima ultrapassagem é o ponto negativo como também foi evidenciado na Figura 22. A Figura 30 descreve a resposta do sistema real para a otimização *fminsearch* para a função ITAE.

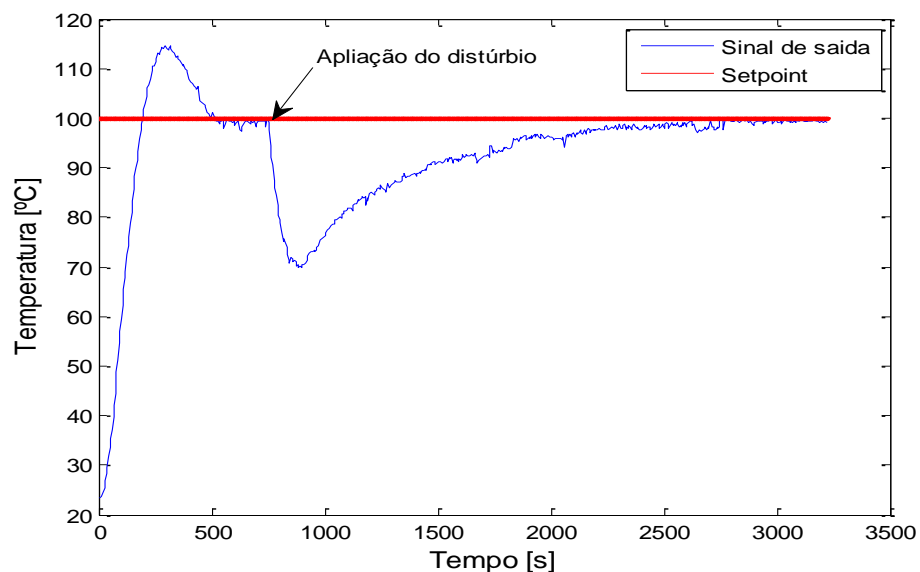
Figura 30 – Resposta do sistema real para a função ITAE



Fonte: do autor, 2019

Por fim, seguindo a mesma linha de análise das duas últimas funções apresentadas, a função MSE teve como ponto de destaque a composição do tempo de subida e do tempo de acomodação do sistema. Seu valor de máxima ultrapassagem foi próximo ao resultado teórico obtido representado na Figura 24. De modo que apresentou um comportamento composto muito interessante, mantendo-se ponderado a todos os critérios propostos para a análise. A Figura 31 apresenta a função MSE para o sistema real.

Figura 31 – Resposta do sistema real para a função MSE



Fonte: do autor, 2019

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho apresentado foram avaliadas técnicas de sintonia para controladores PID e suas variantes de construção, com a intenção de avaliar a robustez das funções de otimização por meio da análise de seus desempenhos e por fim inferir sobre qual das funções custo resulta em melhor performance do sistema. Tais funções foram estudadas e avaliadas por meio de índices de desempenho de erro para um modelo de planta de ferro de solda, do Laboratório de Controle da Universidade Federal de Lavras, no intuito de validar o processo frente a sintonia de Ziegler-Nichols atribuída de métodos de otimização. Para isso, uma modelagem adequada, com mais de 95% de precisão, foi essencial para que a simulação se aproximasse ao máximo do comportamento real da planta do ferro de solda, uma vez que toda implementação foi realizada com base nesta função transferência.

Para a sintonia do controlador por meio de índices de desempenho de erro pode-se constatar que apenas a função *fminsearch* conseguiu atender às expectativas de otimizar o processo, já que tanto a função *fmincon*, quanto a função *patternsearch* apresentaram resultados inconsistentes para o objetivo desejado. As oscilações em regime permanente refletiram em uma dinâmica instável, que não atenderiam aos índices de desempenhos esperados. De modo que as deixaram em segundo plano comparando os dados otimizados apresentados pela função *fminsearch*.

Após os resultados práticos realizados na planta do ferro de solda, para a função de otimização *fminsearch*, obteve-se valores relativamente condizentes aos encontrados nos estudos práticos. É claro que, existem discrepâncias naturais entre os dois modelos, entretanto pode-se inferir características peculiares a cada um deles, de modo que as suas aplicações são cabíveis dependendo do processo utilizado. Entretanto o foco desse estudo foi eleger a função que melhor otimizaria os valores do erro para a planta do ferro de solda. Desta forma, a função custo MSE apresentou os resultados mais compatíveis e constantes comparada as demais. Entretanto para melhores resultados, devem ser realizados outros ensaios de identificação de modo que a modelagem se torne ainda mais precisa, assim a aproximação da função de transferência seria cada vez mais fiel ao comportamento real da planta. O ideal seria validar novos testes para todas as rotinas, entretanto isso não se tornou viável neste estudo devido ao elevado tempo de execução dos testes com o processo de aquecimento e resfriamento da planta.



## 7 TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresenta uma linha de pesquisa embasada nos conceitos apresentados desde a construção até a implementação do modelo de controlador PID às evidências apresentadas devido a ações dos índices de desempenho. Diversos trabalhos já foram feitos para as técnicas de sintonia de controladores PID, todos com o intuito de representar modelos industriais aplicados aos controles dos mais variados processos de fabricação industrial. Esse caráter já aparece em alguns itens dos próprios métodos científicos, ou seja, exigem decisões variadas sobre margens de segurança, desempenho desejado do controlador aplicado, condições de trabalho da planta e margens de erro aceitáveis.

Porém o caráter prático é o que rege a essência da aplicação dos controladores em plantas de processos dessa forma, a visão de otimizar o processo ao máximo caminha ao lado da rentabilidade e do sucesso mercadológico.

Como trabalhos futuros pode-se propor a aplicação de outros métodos de sintonia como Cohen-Coon ou lógica Fuzzi para a sintonia de controladores PID na planta do ferro de solda estudada.

## 8 REFERÊNCIAS

ALT, G. H.; LAGES, W. F. Controle em Tempo Real de Sistemas Dinâmicos Através de Redes IP: Caracterização do desempenho do controle. **ISA Show South America 2003**, São Paulo, 2003.

ANDRADE, A. L., SOUZA, L. C. **Sintonia de controladores PID utilizando algoritmos genéticos**. 2010. 62 f. Monografia- IFF Campos Campus-Centro, Campos dos Goytacazes, 2010.

ASTROM, K. J.; T. HAGGLUND — **PID Controllers: Theory, Design, and Tuning**, Instrument Society of America, 1995.

ASTROM, K. J. de, HAGGLUND, T., Revisiting the Ziegler-Nichols step response method for PID control. **Journal of Process Control – Elsevier**, V. 14, Issue 6: 635-650, 2004.

CAMPOS, M. M.; SAITO, K. Sistemas inteligentes em controle e automação de processos. 1ª ed. Rio de Janeiro: **Editora Ciência Moderna Ltda.** p. 247, 2004.

CAMPOS, M. C. M. M. TEIXEIRA, H. C. G. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. 1ª ed. São Paulo: Edgard Blücher. p. 415, 2006.

FERMINO, F. **Estudo Comparativo de Métodos de Sintonia de Controladores PID** 2014. 90 f. Monografia- Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

DUARTE FILHO, M. **Síntese de controlador PID para controle de PH em um reator com otimização via algoritmos genéticos** . 2014. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2014.

GUIDE MATLAB, 2019. **MATLAB**. Versão R2019A. [S.I]: MathWorks, 2019.1 CD.

GUIMARÃES, A. O., **Algoritmo genético aplicado no controle de posição do rotor de um motor de corrente contínua com rejeição a distúrbios por ação feedforward**. 2013. 72 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Comunicação e Automação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Mossoró, 2013.

GRIFFIN, I. **On-Line PID Controller Tuning Using Genetic Algorithms**, M.Eng in Electronic Systems oriented by Ms Jennifer Bruton, 2003.

KAGUEYAMA, C. A. **Sintonia do controlador PID: Método de Ziegler Nichols Modificado**, 2011. 73 f. Monografia- Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2011.

KUO, B. **Automatic Control Systems**. Univ. of Illinois, Urbana-Champaign, 2003.

MATLAB **Genetic algorithm and direct search toolbox user's guide**, © COPYRIGHT 2004–2009 by The MathWorks, Inc, 2009.

MICHELS, LEANDRO, M. STEFANELLO, H. A. GRUNDLING, **Comparatic analysis of modified repetitve controllers for applications in PWM inverters**, 2012. 74f. Monografia- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

MORADI, M. H.; KATEBI, M. R.; JOHNSON, M. A. MIMO Predictive PID Controls. In: 15th Triennial IFAC World Congress. Barcelona – Espanha. p. 6, 2002.

OGATA, k. **Engenharia de Controle Moderno**. 5° edição. São Paulo: Editora Prentice Hall, 2010.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4° edição, 3ª reimpressão. São Paulo: Editora Prentice Hall, 2007.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4° edição. São Paulo: Editora Prentice Hall, 2003.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. São Paulo: Editora Prentice Hall, 1993.

OPTIMIZATION Toolbox: **Solve linear, quadratic, integer, and nonlinear optimization problems**. MathWorks, 2019.

PAIVA, L. S. **Aplicação de Algoritmos Genéticos para Sintonia de Controladores** . 2014. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) - Instituto Superior de Engenharia do Porto, Campos dos Goytacazes, 2014.

PALM, W. Control Systems Engineering. **Hardbound**, 1986.

SARAIVA, F. de A. **Métodos de Sintonia em Controladores PID: Métodos de Sintonia**. 2014. 90 p. Monografia- Centro Universitário La Salle - Unilasalle, [S. l.], 2011.

SILVA, G. S. **Controle de pH em máquina de produção de Cartão Multicamada**. 2010. 59 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)- Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. **Optimal settings for automatic controllers**. Transactions of the ASME, v. 64, p. 759-768, 1942.

WATANABE, W. O.; KUO, C. M. Observations on the Reproductive Performance of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) in Laboratory Aquaria at Various Salinities. **Aquaculture**, v. 64, p. 315-323, 1985.