

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA
CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

GUILHERME BUENO SILVEIRA

**IMPLEMENTAÇÃO DE TÉCNICAS DE CONTROLE EM UM FORNO
CONVENCIONAL ADAPTADO AO PROCESSO DE TORRA DE
MALTE**

FLORIANÓPOLIS, NOVEMBRO DE 2018.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA
CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

GUILHERME BUENO SILVEIRA

**IMPLEMENTAÇÃO DE TÉCNICAS DE CONTROLE EM UM FORNO
CONVENCIONAL ADAPTADO AO PROCESSO DE TORRA DE
MALTE**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheiro Mecatrônico.

Professor Orientador: Dr. Eng.
Francisco Rafael Moreira da Mota

FLORIANÓPOLIS, NOVEMBRO DE 2018.

IMPLEMENTAÇÃO DE TÉCNICAS DE CONTROLE EM UM FORNO CONVENCIONAL ADAPTADO AO PROCESSO DE TORRA DE MALTE

GUILHERME BUENO SILVEIRA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

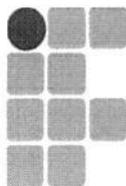
Florianópolis, 12 de dezembro de 2018.

Banca Examinadora:

Francisco Rafael Moreira da Mota

Adriano Regis

Cynthia Beatriz Scheffer Dutra



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS

DECLARAÇÃO DE FINALIZAÇÃO DE TRABALHO DE CURSO

Declaro que o(a) estudante **GUILHERME BUENO SILVEIRA**, matrícula n° **132002819-5**, do Curso de Engenharia Mecatrônica, defendeu o trabalho intitulado **IMPLEMENTAÇÃO DE TÉCNICAS DE CONTROLE EM UM FORNO CONVENCIONAL ADAPTADO AO PROCESSO DE SECAGEM DE MALTE**, o qual está apto a fazer parte do banco de dados da Biblioteca Hercílio Luz do Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

Florianópolis, 12 de dezembro de 2018.

Prof. Orientador do TCC: Francisco Mota

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente ao meu orientador, professor Francisco Rafael Moreira da Mota, sem o qual este trabalho não teria acontecido. Ao professor Adriano Regis, por generosamente disponibilizar o Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento, o forno utilizado no trabalho, o dispositivo MyRIO e seus conhecimentos sobre o universo cervejeiro.

Agradeço também a todos meus amigos e familiares, em especial aos parceiros de Projeto Integrador, que batalharam ao meu lado ao longo do curso.

"Em quase todos os casos, você pode construir o mesmo produto sem lógica fuzzy, mas ela é mais rápida e mais barata." (Lotfi A. Zadeh, 1988)

RESUMO

O crescimento na área das pequenas cervejarias e a ideia da produção de cerveja como hobby (*homebrewing*) vem crescendo cada vez mais desde a década de 1980. Com o aumento e as mudanças no consumo e na produção de cervejas artesanais, a inovação tecnológica e a automação de processos tornam-se fatores importantes para a redução de custos e aumento de produtividade. Dentre os componentes de uma cerveja está seu malte, fundamental para a fermentação alcoólica, além de aderir aromas e sabores singulares para a cerveja conforme o tipo de malte. Durante o processo de malteação da cevada, ocorre a germinação controlada dos grãos, a fim de que as enzimas necessárias para a quebra dos amidos se desenvolvam. A etapa final do processo de malteação envolve a secagem dos grãos, que são submetidos por diferentes períodos de tempo a temperaturas específicas para cada tipo de malte, conforme a receita que o cervejeiro deseja utilizar. Sendo a temperatura ao longo do processo de malteação um parâmetro de grande relevância, surge a necessidade de se estabelecer uma estratégia de controle para assegurar a qualidade final do malte e da cerveja como um todo. Dada sua simplicidade, os controladores PID (proporcional integral derivativo) são utilizados por grande parte da indústria oferecendo maior desempenho em diversas áreas da tecnologia. Contudo, dado o fato dos controladores PID serem controladores lineares, existem casos onde eles acabam não atingindo um desempenho ideal, com fatores como a faixa de variação de parâmetros e o tempo de operação impactando negativamente na performance do controlador. Para solucionar as imperfeições dos controladores clássicos, bem como elevar cada vez mais o desempenho de uma planta controlada, foram desenvolvidas ao longo dos anos diversas técnicas de controle. Dentre estas estratégias de controle, o presente trabalho busca analisar e comparar o desempenho do controlador PID com o controlador por Lógica Fuzzy. Utilizando um forno convencional adaptado ao processo de secagem de malte, foram implementadas estas duas técnicas para o controle de temperatura, destacando a eficiência de cada controlador para aplicação em planta real. Utilizou-se o software LabVIEW (National Instruments) como plataforma de controle e sistema supervisório, tornando possível ao usuário definir qual estratégia de controle e quais parâmetros utilizar para determinado tipo de malte em uma mesma interface. A partir da análise dos ensaios realizados, pode-se

confirmar que ambas as técnicas de controle analisadas, PID e Fuzzy, atenderam aos requisitos mínimos que se esperam de um controlador de temperatura para o processo de torra de grãos. O controlador Fuzzy se destacou por apresentar menores valores de sobressinal e menor oscilação de temperatura, quando em regime permanente.

Palavras-chave: Torra de Malte, Produção de Cerveja, Controle de Temperatura, Controlador PID, Lógica Fuzzy, LabVIEW.

ABSTRACT

The growth in small brewer industry and the idea of brewing as a hobby (homebrewing) has been increasing more and more since the 1980s. The increase and the change of how people consume and produce beers, make technological innovation and process automation become important factors in reducing costs and increasing productivity. Among their components, the malt is essential for alcoholic fermentation, besides adjoining aromas and unique flavors for beer according to different types of malt. In the barley malting process, occurs the controlled grain germination, so that the enzymes necessary for the breaking of the starches to develop. The final stage for the malting process involves kilning the grains, which are submitted for different periods of time to specific temperatures in each type of malt, according to brewer's recipe and preferences. Since the temperature during on malting process is a parameter of great relevance, becomes important to establish a control strategy that ensures the malt quality. Being a simple solution, PID controllers are used by great part of the industry to bring high performance in many areas of technology. However, given the fact that PID controllers are linear controllers, there are cases where they end up not achieving optimal performance, with factors such as the range of parameters variation and the operating time negatively impacting the controller performance. In order to solve those classic controllers' imperfections, as well as to increase more and more the performance of a controlled plant, several control techniques have been developed over the years. Among these control strategies, the present work analyzed and compared the performance of the PID controller with the Fuzzy Logic Controller. Using a conventional oven adapted to the malt kilning process, these two techniques were implemented for temperature control, highlighting the efficiency of each controller for real application. LabVIEW software (National Instruments) was used as a control platform and supervisory system, making possible for the user to define which control strategy and which parameters can be used in the same interface. From the analysis of the performed tests, it can be confirmed that both the control techniques, PID and Fuzzy, have met the minimum requirements that are expected from a temperature controller for the grain roasting process. The Fuzzy controller was characterized by lower values of overshoot and lower temperature oscillation, when in steady state.

Keywords: Malt Roasting, Brewing, Temperature Control, PID Controller, Fuzzy Logic, LabVIEW.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de alguns tipos de grão.	6
Figura 2 – Avaliação de processos perante sinais de teste.....	7
Figura 3 - Avaliação da curva pelo método de Ziegler/Nichols.....	8
Figura 4 - Avaliação da curva pelo método de Sundaresan/Krishnaswamy.	9
Figura 5 - Avaliação da curva pelo método de Smith.	9
Figura 6 – Avaliação da curva pelo método de Hägglund.	10
Figura 7 – Estrutura do forno adaptada para o processo de torra dos grãos.	12
Figura 8 – Exemplo de painel frontal e diagrama de blocos (LabVIEW). .	13
Figura 9 – National Instruments MyRIO.	15
Figura 10 - Sistema em malha fechada.....	15
Figura 11 – Sequência de sinais.	16
Figura 12 - Influência dos potenciômetros R_A e R_B	17
Figura 13 - Posição do sensor PT-100 no forno.....	17
Figura 14 – Circuito de acionamento da resistência.....	18
Figura 15 – Sinal da rede e pulsos de detecção de zero.....	18
Figura 16 – Circuito para detecção de zero.....	19
Figura 17 – Circuito para acionamento da alimentação da resistência. ...	20
Figura 18 – Exemplos de limitação da tensão de saída.	21
Figura 19 – Circuito de saída para acionamento do exaustor.	21
Figura 20 – Gabinete elétrico.	22
Figura 21 – Diagrama de blocos de comando do sistema, com bloco PID.	23
Figura 22 – Fluxograma principal.	24
Figura 23 – Código de tratamento do cruzamento por zero.	25
Figura 24 – Aquisição e controle de temperatura (PID).....	26
Figura 25 – Exemplo de conexões do bloco Fuzzy.	26
Figura 26 – Painel frontal.	27
Figura 27 – Curva ao degrau em malha aberta.....	28
Figura 28 – Comparação entre malha aberta e técnicas em estudo.	29

Figura 29 – Comparação entre a curva em malha aberta e o método escolhido.....	30
Figura 30 – Determinação do ganho pelo Lugar Geométrico das Raízes.	31
Figura 31 – Resposta ao degrau com $T_i = 20$ e $K_p = 4,3$	32
Figura 32 – Resposta ao degrau com $T_i = 60$ e $K_p = 4,3$	33
Figura 33 – Janela de criação e edição de sistemas fuzzy.	34
Figura 34 – Parâmetros de temperatura para referência de 120°C	36
Figura 35 – Parâmetros de duração para referência de 120°C	37
Figura 36 – Parâmetros de delay para referência de 120°C	37
Figura 37 – Parâmetros de temperatura para referência de 117°C	38
Figura 38 – Parâmetros de duração para referência de 175°C	38
Figura 39 – Parâmetros de delay para referência de 175°C	39
Figura 40 – Janela de simulação de sistemas Fuzzy.	40
Figura 41 – Desempenho do controlador PID no ensaio de 80°C a 150°C	41
Figura 42 – Desempenho do controlador PID no ensaio de 100°C a 170°C	42
Figura 43 – Três primeiras etapas da sequência de ensaio com perturbação a 175°C	44
Figura 44 – Quarta etapa do ensaio, com perturbação a 175°C	44
Figura 45 – Ensaio Fuzzy para referência de 120°C	46
Figura 46 – Ensaio Fuzzy para referência de 175°C	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de malte e parâmetros de operação.	5
Tabela 2 - Métodos de obtenção da função de transferência.....	29
Tabela 3 – Critério de Routh-Hurwitz.	33
Tabela 4 – Porcentagens de erro e sobressinal nos ensaios de validação do PID.	42
Tabela 5 – Variação de temperatura pós-perturbação e erro de regime permanente.	45
Tabela 6 - Variação de temperatura pós-perturbação e erro de regime permanente.	47

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Justificativa.....	3
1.2	OBJETIVOS.....	4
1.2.1	Objetivo Geral.....	4
1.2.2	Objetivos Específicos.....	4
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
2.1	Processo de torra dos grãos de cevada.....	5
2.2	Técnicas de Controle.....	6
2.2.1	Método de Ziegler e Nichols.....	7
2.2.2	Método de Sundaesan e Krishnaswamy.....	8
2.2.3	Método de Smith.....	9
2.2.4	Método de Hägglund.....	9
2.3	Controlador PID.....	10
2.4	Lógica Fuzzy.....	11
3	METODOLOGIA.....	12
3.1	LabVIEW e MyRIO.....	13
3.2	Sistema de Controle.....	15
3.2.1	Sensor de temperatura.....	16
3.2.2	Comando de sinais.....	17
3.3	Gabinete Elétrico.....	22
3.4	Diagrama de blocos.....	23
3.4.1	Sincronização por cruzamento de zero.....	24
3.4.2	Aquisição e controle de temperatura.....	25
3.5	Painel frontal.....	26
3.6	Experimentos de Malha Aberta.....	27
3.7	Cálculo dos parâmetros PID.....	30

3.8	Parâmetros Fuzzy	34
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	41
4.1	Resultados obtidos utilizando o controlador PID	41
4.2	Resultados utilizando lógica Fuzzy.....	45
4.3	Comparação de desempenho	47
5	Conclusões	48
	Referências	49

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o consumo de cerveja acompanha a própria história de colonização do país, com a importação de cervejas europeias pela família real portuguesa. Com a fundação da "Manufatura de Cerveja Brahma Villigier e Cia" em 1888 no Rio de Janeiro e posteriormente a "Companhia Antártica Paulista" em São Paulo, que o país começou sua própria produção de cerveja em grande escala, aumentando a popularidade desta bebida (Venturini, 2005).

A fabricação de cerveja é composta fundamentalmente por água, lúpulo, levedura e malte, sendo graças a este último que acontece a fermentação alcoólica, além da adesão de aromas e sabores singulares para a cerveja conforme o tipo de malte. O processo de malteação tem sua relevância dado o fato do grão de cevada (o grão mais comum utilizado como matéria-prima) apresentar difícil moagem e extração de açúcares. Durante a malteação ocorre a germinação controlada dos grãos, tornando-os mais flexíveis e fáceis de moer, bem como o desenvolvimento das enzimas necessárias para a quebra dos amidos (Tostes, 2015).

Segundo Venturi Filho (2005), o malte pode ser definido como o produto resultante da germinação de qualquer cereal a condições controladas. Dentre os cereais comumente utilizados na produção de cerveja, a cevada é um grão de fácil aplicabilidade ao processo de maltagem, sendo fonte de amido para conversão em açúcares (Borzani, 2001).

O processo de malteação pode ser dividido em três partes: primeiramente ocorre a maceração, onde os grãos de cevada são umidificados e se inicia o processo germinativo; em sequência ocorre a germinação controlada, em que o sistema enzimático do grão passa a agir no desenvolvimento do embrião; por fim, depois de atingido um ponto de germinação específico, o processo é finalizado através da secagem dos grãos, que são submetidos por diferentes períodos a temperaturas específicas para cada tipo de malte (Boulton, 2001).

O crescimento expressivo na área das pequenas cervejarias no país começou a partir da segunda metade da década de 1980, com o surgimento de dezenas de pequenos empreendimentos principalmente nas regiões Sul e Sudeste (Morado, 2009). Com o aumento e as mudanças no consumo e na produção de

cervejas artesanais, Ferreira (2011) aponta a inovação como fator importante para a sobrevivência das microcervejarias. Ferreira ainda da destaque a inovação do produto e o acesso à novas tecnologias como fatores de sucesso em pequenas e médias empresas.

Sendo a temperatura ao longo do processo de malteação um parâmetro de grande relevância, surge a necessidade de se estabelecer uma estratégia de controle para assegurar a qualidade final do malte e da cerveja como um todo (Porto, 2011). Dada sua simplicidade, os controladores PID (proporcional integral derivativo) são utilizados por grande parte da indústria, englobando cerca de 80% do parque industrial. No entanto, há casos em que os controladores PID apresentam desempenho a baixo do esperado por serem controladores lineares; e, até mesmo, casos onde os controladores PID operam de maneira manual dada a necessidade de constantes reajustes na planta em operação (Simões, 1999).

Uma solução para as imperfeições que são notadas nos modelos controladores clássicos provem, por exemplo, de controladores que utilizam lógica fuzzy ou lógica difusa. A lógica fuzzy é baseada em terminologias humanas, sendo capaz de expressar de maneira sistemática quantidades vagas ou imprecisas, permitindo por meio de regras heurísticas (provenientes da experiência do operador), o controlador possa executar suas operações de maneira automática, sem ajustes manuais (Simões, 1999).

Dessa forma, este trabalho tem por objetivo realizar o controle de temperatura de um forno convencional, responsável pela torra dos grãos de cevada no processo de secagem do malte. Serão utilizadas as técnicas de controle PID clássico e Lógica Fuzzy, comparando os desempenhos dos controladores e a qualidade do malte obtido.

Será utilizado como sistema supervisor e plataforma de controle o software LabVIEW da National Instruments, que irá controlar e monitorar todas as entradas e saídas do sistema. A proposta é que o usuário possa na mesma interface, definir qual estratégia de controle deve ser utilizada, os parâmetros de controle envolvidos no processo e o tipo de malte que se deseja obter. Com o decorrer dos ensaios serão estabelecidos parâmetros de controle referentes a diferentes tipos de malte, que podem ser acessados pelo usuário a fim de facilitar sua operação e garantir o malte para tipos específicos de cerveja.

1.1 Justificativa

Há um evidente avanço industrial em diversas áreas graças as técnicas de controle e instrumentação de processos, por estas influenciarem diretamente na redução de custos e no aumento da qualidade dos produtos desenvolvidos. O mercado de cervejas artesanais vem notavelmente crescendo ao longo das últimas décadas, aderindo cada vez mais investidores e entusiastas. Com um forno convencional apto a realizar o processo de malteação dos grãos e obter diferentes tipos de malte, o pequeno investidor tem parte de sua linha de produção automatizada, podendo ter mais tempo para o desenvolvimento criativo de receitas ao se livrar de processos manuais e repetitivos (Oliveira, 2016).

Outro fator que surte maior influência em pequenas cervejarias e pessoas que tem a produção de cerveja como hobby (*homebrewers*) é o preço do malte e seu armazenamento. Apesar da variedade de cervejas que podem ser obtidas por diferentes tipos de malte ser muito vasta, todas essas variações possuem um fator comum que é sua obtenção através da formação enzimática do mesmo tipo de grão de cevada. Ao invés de um pequeno produtor ter um gasto maior comprando quilos de diferentes tipos de malte (muitas vezes para testes em novas receitas, que podem vir a não ser aproveitadas) adquire-se apenas o grão em seu estado natural, submetendo-o ao processo de malteação com diferentes parâmetros de tempo e temperatura para a obtenção de diversos tipos de malte. Isso ainda facilita o armazenamento dos grãos (que devem ser protegidos do calor e da umidade) ao permitir que sejam guardados em um mesmo recipiente, sem comprometer todo o espaço disponível para os insumos, visto que tanto o lúpulo quanto a levedura também devem ser armazenados.

A ideia de variar os parâmetros (tempo e temperatura de torra) a fim de obter tipos únicos de malte também atrai a atenção dos cervejeiros por lhes proporcionar receitas exclusivas. Pequenas modificações no tipo de malte podem fornecer aromas e sabores que atendam de maneira mais efetiva os gostos pessoais dos cervejeiros e de seus clientes.

O método de sintonia de controladores PID desenvolvido por Ziegler-Nichols é baseado em valores dependentes da identificação da função de transferência do sistema, o que pode limitar a faixa de parâmetros utilizados, caso

estas se afastem muito do esperado pelo modelo (Oliveira, 2016). Mudanças significativas no ponto de operação podem implicar na queda de desempenho do controle, pois os parâmetros de controle são calculados a partir da função de transferência do processo obtida por linearização em torno do ponto de operação. Por exemplo, na aplicação abordada neste trabalho, para obter o malte de uma cerveja Pale americana, o forno chega a valores máximos de 80°C enquanto que o malte utilizado em cervejas escuras precisa ser aquecido a temperaturas em torno de 200°C (Porto, 2011). Apesar de sua simplicidade e eficiência, a estratégia de controle PID ainda pode apresentar elevados valores máximos de sobressinal ou longos tempos de acomodação, podendo acabar impactando negativamente no controle do sistema (Oliveira, 2016). Dada estas características do controlador PID, destaca-se a importância da avaliação de estratégias de controle mais avançadas, buscando identificar técnicas e parâmetros de controle que tenham um impacto mais positivo no processo de torra dos grãos.

Quanto a utilização do software LabVIEW como sistema supervisor e plataforma de controle, tal escolha permite que a mesma ferramenta que comanda os valores de tensão e corrente de saída para a planta (*hardware*) também será responsável por executar o algoritmo de controle do processo e permitir a análise dos resultados pelo usuário. O LabVIEW também apresenta uma biblioteca direcionada para as estratégias de controle clássico e avançado, tornando a investigação e comparação das técnicas de controle mais dinâmicas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Controlar a temperatura de um forno convencional adaptado para o processo de torra do malte.

1.2.2 Objetivos Específicos

- A. Comparar e analisar as estratégias de controle PID e Fuzzy.
- B. Obter diferentes tipos de malte a partir dos grãos de cevada.
- C. Utilizar o software LabVIEW para implementar as técnicas de controle (PID e Fuzzy) e supervisionar o processo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Processo de torra dos grãos de cevada

A secagem é caracterizada pela passagem do ar quente pela massa de grãos, com aumento gradual da temperatura até que os grãos fiquem secos e seu processo germinativo se encerre. Este aumento na temperatura dos grãos pode alterar sua cor, bem como seu aroma e seu sabor (Briggs, 1995). Dentre as faixas de temperatura ao qual o grão pode ser submetido, valores acima de 80°C começam a instaurar reações químicas nos grãos hidrolisados pela ação enzimática. Um dos principais produtos dessas reações é a melanoidina, formada a partir de 100°C pelos açúcares e aminoácidos, agregando sabor e aroma, além de coloração mais escura ao malte (Kunze, 1999).

Instaurar novas cores, sabores e aromas ao malte quando o processo vital dos grãos já está encerrado é conhecido como torra (*roasting*). O processo de torra tem como principais parâmetros o tempo e a temperatura a que os grãos serão submetidos. A Tabela 1 representa alguns tipos de malte obtidos por Johnson (2013), com os valores de tempo e temperatura utilizados:

Tabela 1 – Tipos de malte e parâmetros de operação.

Tipo de malte	Tempo (min)	Temperatura (°C)
Pale Gold Malt	20	120
Gold Malt	25	150
Amber Malt	30	175
Copper Malt	30	200

A Figura 1 representa alguns exemplos de malte que podem ser obtidos através do processo de torra dos grãos.

Figura 1 – Exemplo de alguns tipos de grão.



Fonte: Adaptado de JustBeer (2018)

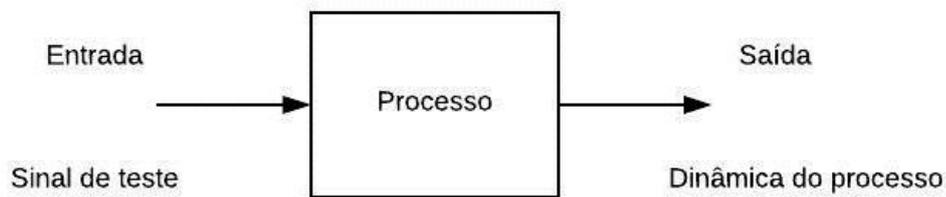
2.2 Técnicas de Controle

Com a necessidade da indústria em ter produtividade cada vez mais eficiente, as áreas de controle e automação se destacam por minimizar a necessidade de reprocessamento, aumentar a confiabilidade do sistema e liberar o operador de atividades manuais e repetitivas (Campos, 2010).

Controle é a técnica que consiste em medir a variável controlada e aplicar a variável manipulada ao sistema para corrigir o erro medido em relação à referência desejada. Um sistema de controle monovariável pode ser definido como um objeto de estudo que possua uma entrada, o sistema em si e uma saída, onde normalmente sabem-se previamente dois destes três elementos e busca-se definir o elemento restante. A modelagem e identificação de um sistema consistem na determinação de um modelo matemático deste sistema, que possa representar suas principais características e sua dinâmica (processo ou planta do sistema) (Coelho, 2004).

Na identificação de um sistema, podem-se enviar sinais específicos para a entrada e comparar as respostas do sistema (Figura 2). Os sinais de teste de entrada normalmente utilizados são: impulso, degrau, rampa e senoidal, sendo o sinal ao degrau escolhido para a modelagem do presente estudo.

Figura 2 – Avaliação de processos perante sinais de teste.



Fonte: Adaptado de Coelho (2004)

A partir da resposta ao degrau é possível identificar se um sistema é estável, oscilatório, ou possui atraso por exemplo. A resposta ao degrau permite de maneira preliminar que se analise a dinâmica do processo com uma simples interpretação gráfica. Desta forma, pode-se avaliar se o sistema é linear, confirmando se a curva da resposta ao degrau independe da amplitude de entrada (Brosilow, 2002).

Para a análise de um modelo de primeira ordem são comumente levados em consideração o ganho estático K , a constante de tempo τ e o atraso de transporte θ , sendo correlacionados pela seguinte função de transferência:

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

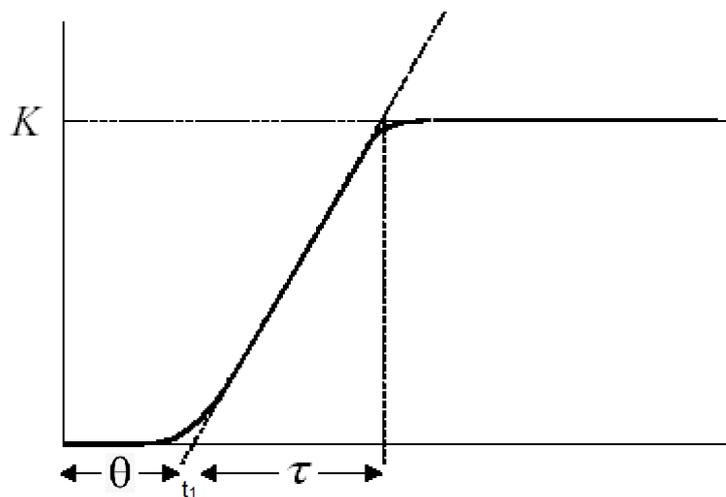
Podem ser encontrados na literatura diversos métodos baseados na resposta do processo ao degrau para identificação de K , τ e θ . Dentre tais métodos, este estudo pretende avaliar a modelagem apresentada por Ziegler/Nichols (1942), Sundaresan/Krishnaswamy (1977), Smith (1985) e Hägglund (1991) (Bento, 1989).

2.2.1 Método de Ziegler e Nichols

O trabalho de Ziegler e Nichols, em 1942, destaca-se por ser o primeiro a propor uma metodologia objetiva para a sintonia de controladores PID. Uma das propostas abordadas pela dupla era a de se obter a dinâmica do processo com um teste em malha aberta, onde se gera manualmente uma variação em degrau na saída do controlador (Δu).

Como pode ser observado na Figura 3, no método de Ziegler/Nichols é traçado uma reta que corresponde à tangente no ponto de máxima inclinação da curva. A constante de tempo τ deste método é calculada pelo intervalo de tempo entre t_1 e o instante em que a reta tangente toca o valor de atingido de regime permanente (K).

Figura 3 - Avaliação da curva pelo método de Ziegler/Nichols.

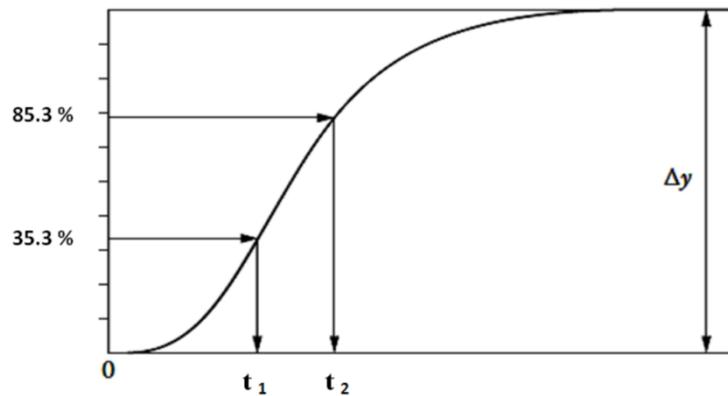


Fonte: Adaptado de Coelho (2004)

2.2.2 Método de Sundaresan e Krishnaswamy

O método de Sundaresan e Krishnaswamy evita a utilização do ponto de máxima inclinação para a estimação dos parâmetros do modelo paramétrico. Dois instantes de tempo t_1 e t_2 são estimados a partir da curva de resposta ao degrau. Para este método, tais tempos de resposta correspondem 35,3% e 85,3% da curva analisada, Figura 4.

Figura 4 - Avaliação da curva pelo método de Sundaresan/Krishnaswamy.

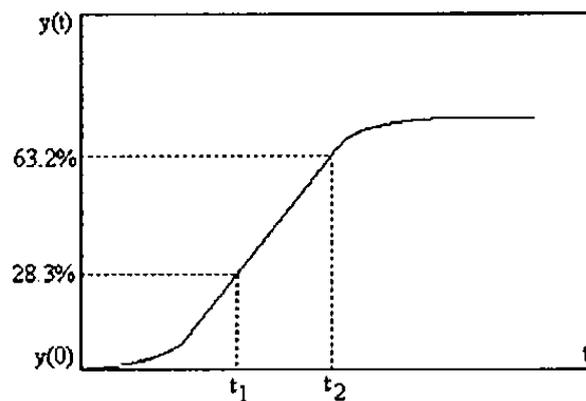


Fonte: Adaptado de Coelho (2004)

2.2.3 Método de Smith

Semelhante ao método anterior, como se pode observar na Figura 5, o método de Smith não utiliza o ponto de máxima inclinação para definição da constante de tempo τ . São utilizados os pontos t_1 e t_2 correspondentes a 28,3% e 63,2% da curva de resposta ao degrau.

Figura 5 - Avaliação da curva pelo método de Smith.



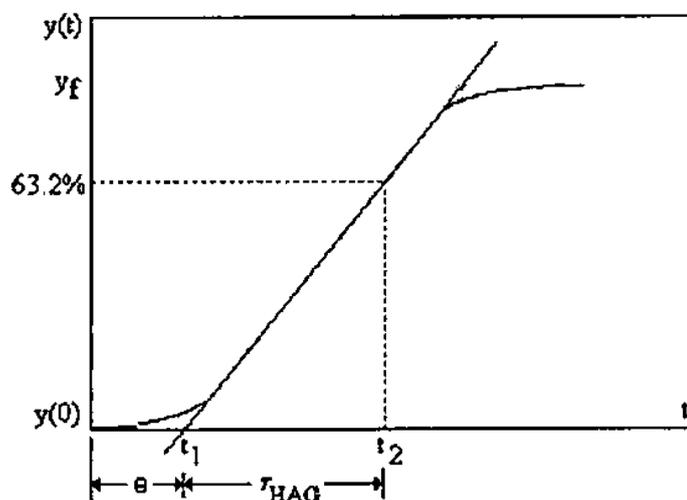
Fonte: Adaptado de Coelho (2004)

2.2.4 Método de Hägglund

O método de Hägglund assemelha-se aos métodos de Ziegler/Nichols e de Smith, por utilizar o instante t_1 coincidente ao ponto onde a reta tangente toca a

curva e como t_2 o valor de tempo correspondente a 63,2% da curva de resposta ao degrau, Figura 6.

Figura 6 – Avaliação da curva pelo método de Hägglund.



Fonte: Sistemas Dinâmicos Lineares (2004)

2.3 Controlador PID

Um sistema de controle em malha fechada exige um bloco controlador que comande o parâmetro de saída (variável manipulada), de modo a influenciar diretamente no comportamento geral do sistema. Através do controlador são ajustadas as características do sistema, podendo-se modificar, por exemplo, sua velocidade de resposta e o erro no regime permanente (Bento, 1989).

No controlador clássico PID (Proporcional-Integral-Derivativo), representado pela Equação 2, a variável proporcional (P) tem por objetivo elevar a velocidade de operação do sistema, a variável integrativa (I) tem por função assegurar um erro nulo no regime permanente e a variável derivativa (D) está principalmente atrelada a redução do sobressinal (Bento, 1989).

$$u(t) = Kp \cdot e(t) + Ki \int_0^t e(\tau) d\tau + Kd \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

No sistema estudado, visa-se automatizar o processo de secagem dos grãos para cervejeiros caseiros e de pequeno porte. Geralmente, tais usuários utilizam fornos comerciais e o processo é realizado da seguinte maneira: o aparelho

é previamente aquecido até o valor desejado de temperatura e, após alguns minutos de estabilização, o forno é brevemente aberto e os grãos são depositados no seu interior. A temperatura do forno e o tempo de aquecimento variam conforme o tipo de malte que se deseja obter.

Analisando-se o sistema que se deseja melhorar, destaca-se o fato de que o valor de sobressinal é irrelevante, visto que será aguardado certo tempo após a temperatura alvo ser atingida antes que grãos sejam depositados e submetidos ao processo. Por este mesmo motivo, a necessidade da variável derivativa (K_d ou T_d) torna-se menos relevante para o controlador a ser projetado.

2.4 Lógica Fuzzy

A lógica fuzzy ou lógica difusa busca atribuir um valor linguístico e um grau de pertinência às variáveis do sistema. Baseada na teoria dos conjuntos fuzzy, esta lógica é embasada na ideia de que o raciocínio exato corresponde a um caso limite do raciocínio aproximado. Neste tipo de lógica, os valores são expressos linguisticamente, de maneira abrangente e volúvel às implicações que o usuário deseja atribuir. São utilizadas terminologias como: muito, pouco, alto, baixo, mais ou menos, vários, frequentemente, em torno de, etc (Gomide, 1994).

A utilização da lógica fuzzy num sistema de controle tem por objetivo aplicar de maneira eficiente os conhecimentos de um especialista do processo (conhecimento heurístico), evitando a utilização de modelos matemáticos complexos (Corrêa, 2015).

Cada parâmetro de entrada recebe um valor de pertinência entre zero e um, caracterizando seu nível de influência sobre os parâmetros de saída. Tais variáveis de entrada e saída são vinculadas através de regras de associação que utilizam terminologias linguísticas, como muito ou pouco (Passino, 1997).

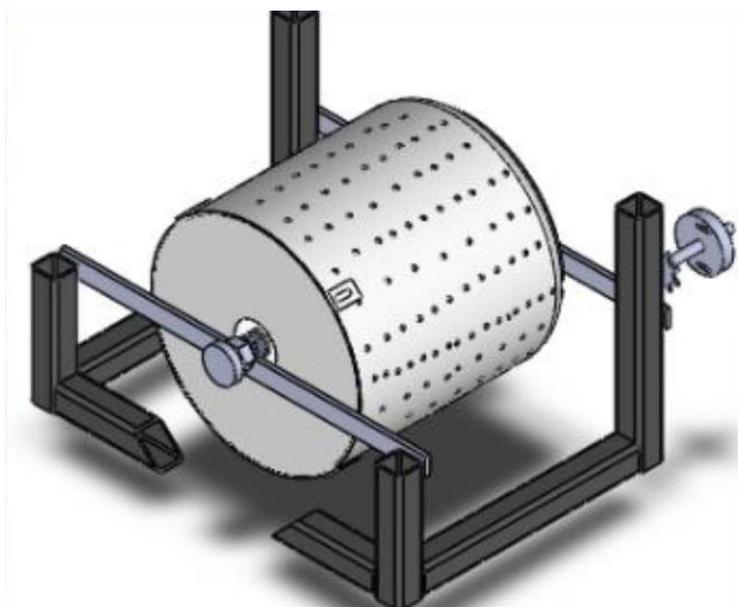
O exemplo a seguir ajuda a ilustrar a estrutura de um sistema de controle fuzzy: quando a temperatura registrada for considerada “baixa” o controlador deve enviar sinais “maiores” para o atuador aquecer a planta. Este exemplo segue a seguinte regra: Se “temperatura” for “baixa”, *então* “controle” é “maior”. “Temperatura” e “Controle” são variáveis de entrada e saída, enquanto que “baixa” e “maior” são parâmetros com faixas de valores atribuídos pelo usuário.

Para o presente estudo, o principal enfoque da utilização da lógica Fuzzy é corrigir de maneira mais eficiente o erro de temperatura em relação ao valor de referência (*setpoint*), principalmente no momento de perturbação do sistema. As relações criadas entre os valores de operação são feitas em torno da temperatura que se deseja obter (*setpoint*), buscando tornar o desempenho do sistema mais eficiente, dado o conhecimento prévio do seu comportamento.

3 METODOLOGIA

A partir da pesquisa bibliográfica do processo de malteação dos grãos de cevada e das diferentes técnicas de controle de temperatura, deu-se início a implementação desses conhecimentos em um aparato que realizasse o processo de torra dos grãos com temperatura controlada. Uma vez que o forno convencional, disponível no Laboratório de Desenvolvimento e Pesquisa – IFSC, já havia sido alterado para esse processo, passou-se ao desenvolvimento de um gabinete elétrico responsável pelo comando da resistência e do exaustor do forno. A Figura 7 representa a adaptação da estrutura interna do forno convencional para o processo de torra.

Figura 7 – Estrutura do forno adaptada para o processo de torra dos grãos.



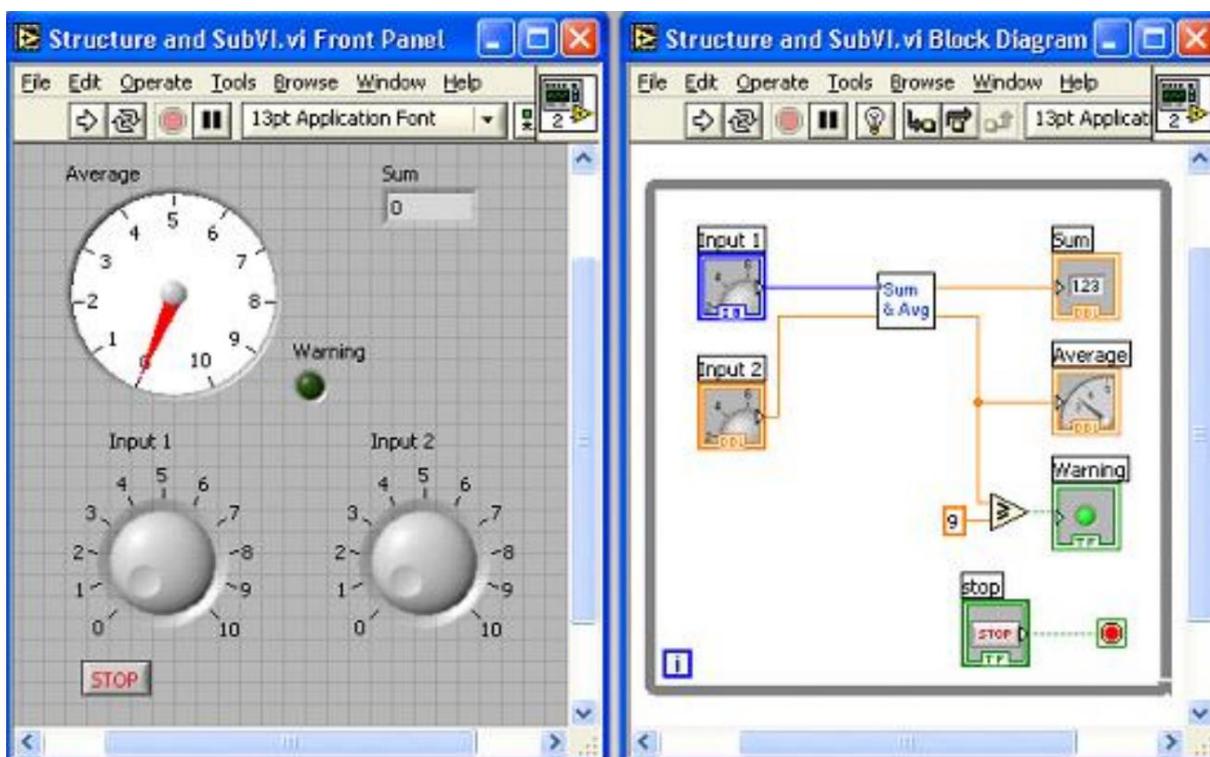
Fonte: O autor (2018)

3.1 LabVIEW e MyRIO

Para realizar o controle e monitoramento de todas as entradas e saídas, utilizou-se o software LabVIEW como sistema supervisorio dado a disponibilidade do dispositivo de projeto de sistemas embarcados MyRIO e o conhecimento prévio em como utilizá-lo. Propôs-se utilizar o *software* LabVIEW, de modo que o usuário possa em uma mesma interface, definir qual estratégia de controle será utilizada, bem como os parâmetros de temperatura e tempo referentes à obtenção de diferentes tipos de malte.

O LabVIEW é um software de engenharia desenvolvido com o intuito de facilitar as interações com o hardware ao longo dos ensaios. Ele é capaz de atender as necessidades de medição e controle ao longo de testes que exijam rápido acesso aos dados obtidos. Um programa feito no LabVIEW é chamado de VI (*Virtual Instrument*) e possui 2 abas principais: o diagrama de blocos e o painel frontal (Figura 8).

Figura 8 – Exemplo de painel frontal e diagrama de blocos (LabVIEW).



Fonte: Wanderingwith (2018).

No painel frontal ocorre a interação com o usuário, com displays e gráficos mostrando valores monitorados, além de botões e controles disponíveis para interação de modo que o usuário possa alterar parâmetros mesmo com o programa sendo executado. O processamento dos dados que passam pelo painel frontal é feito através do circuito implementado no diagrama de blocos.

O LabVIEW utiliza a linguagem de programação G, que é um modelo de programação em forma de fluxo de dados, semelhante a um fluxograma. É no diagrama de blocos onde é feito o código que irá executar todas as funções desejadas. Os objetos que podem ser criados no diagrama de blocos funcionam como nós de um circuito e representam funções específicas ou estruturas de execução do programa. Estes objetos ou blocos criados possuem entradas e/ou saídas que permitem uma interação intuitiva entre si, de modo que sabendo as necessidades do sistema, basta posicionar os componentes necessários e conectá-los corretamente para que o programa execute a função desejada.

Dentre os aparelhos oferecidos pela National Instruments, o MyRIO (*My Re-configurable Input/Output*), Figura 9, é notável por ser um dispositivo para projetos embarcados portátil e adaptativo. O MyRIO possui um processador programável Dual Core ARM Cortex A9, o qual se destaca por seu circuito Xilinx de arranjo de portas programáveis em campo (Field Programmable Gate Array, FPGA), que possibilita operações em tempo real com maior precisão. Contando com diversas portas analógicas e digitais, o dispositivo é ideal para a aplicação em estudo, que exige interpretação de sinais analógicos e digitais, como o do sensor de temperatura e do pulso que aciona a alimentação da resistência, a uma velocidade de processamento elevada (cerca de 1ms) para maior precisão.

Figura 9 – National Instruments MyRIO.

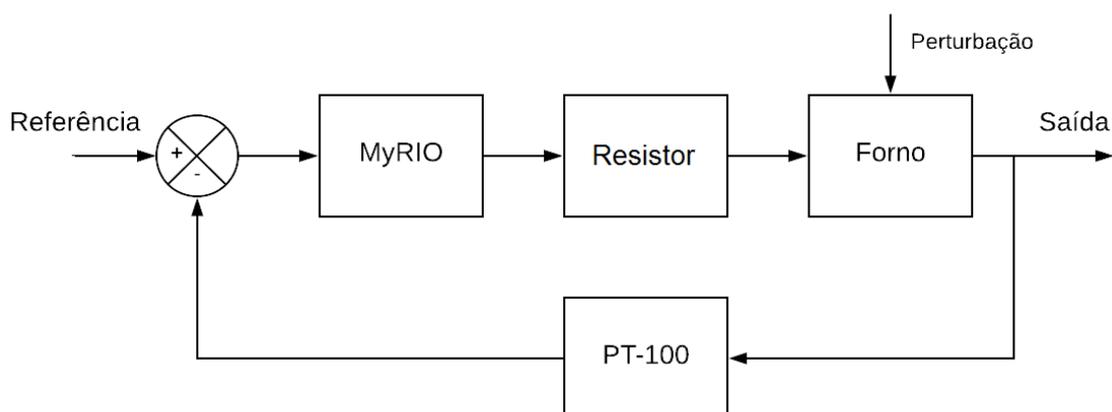


Fonte: National Instruments (2018)

3.2 Sistema de Controle

Uma vez estabelecidos os componentes e o comportamento desejado do sistema, p \hat{o} de-se ent \hat{a} o definir o diagrama de malha fechada para controlar a temperatura interna do forno (Figura 10).

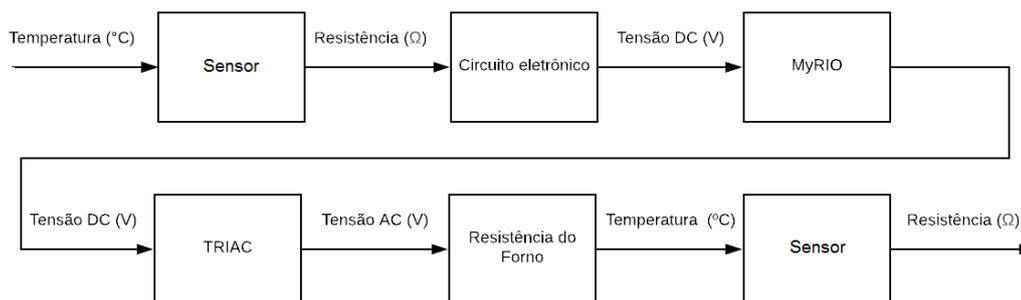
Figura 10 - Sistema em malha fechada.



Fonte: O autor (2018)

Uma rela \hat{c} o direta entre os sinais do resistor do forno, do sensor de temperatura e do controlador (MyRIO) n \hat{a} o seria poss \hat{i} vel. Como pode-se observar na Figura 11, para que os sinais possam ser devidamente compreendidos por cada parte do sistema, s \hat{a} o adicionados componentes respons \hat{a} veis pela interpreta \hat{c} o e convers \hat{a} o dos par \hat{a} metros.

Figura 11 – Sequência de sinais.



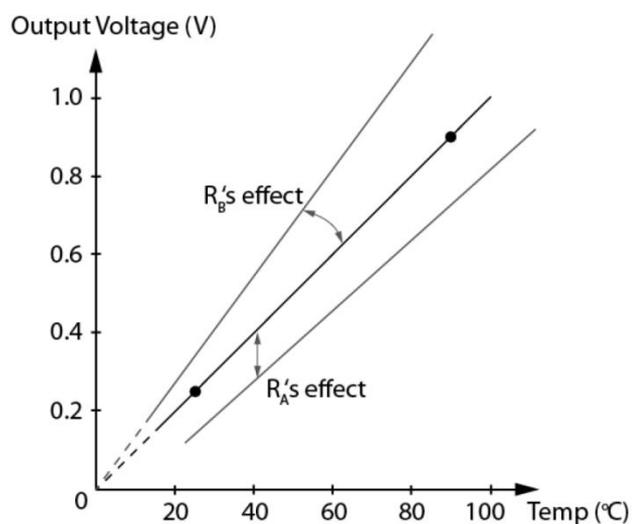
Fonte: O autor (2018)

3.2.1 Sensor de temperatura

Para o monitoramento da temperatura interna do forno, decidiu-se utilizar uma termoresistência PT-100 de três vias, dada a precisão e confiabilidade de tal sensor. Para que a variação na resistência do PT-100 pudesse ser lida e interpretada corretamente pela MyRIO, implementou-se um circuito de condicionamento com comportamento linear à variação na temperatura do PT-100. O circuito pode ser visto no Apêndice A (Lab Manual RTD PT-100, 2013).

O circuito é composto por resistores, que em conjunto com o PT-100 são responsáveis pela conversão de tensão de entrada em tensão de saída com comportamento linear à variação de temperatura. O circuito possui também amplificadores de sinal para aumentar o valor da tensão de saída.

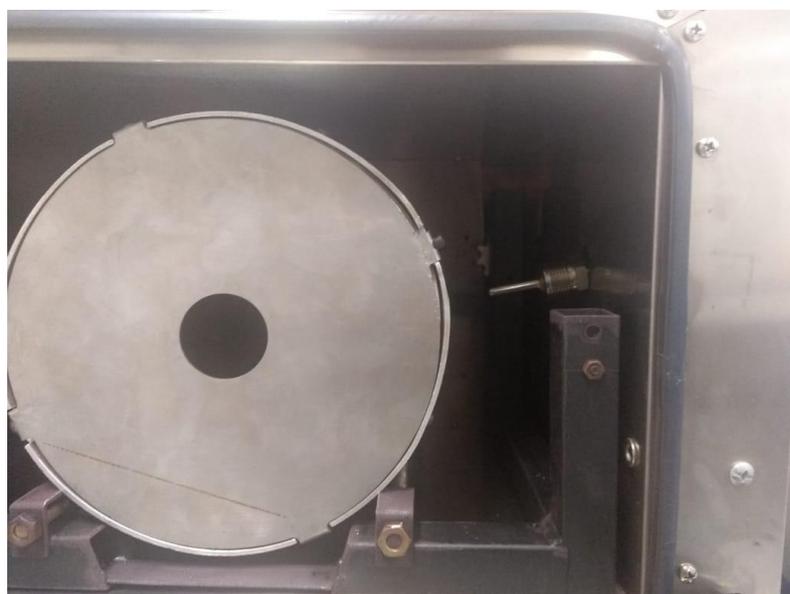
A calibração do PT-100 foi realizada com o auxílio do sensor termopar do tipo J, que monitorou a temperatura do processo através do multímetro Minipa ET-1649. Foram utilizados recipientes com água com temperaturas entre 1°C e 70°C, onde o PT-100 era mergulhado e o valor de tensão de saída do circuito analisado. Como o circuito de condicionamento possui dois potenciômetros de ajuste, foi possível fazer adaptações no comportamento da tensão de saída até ser obtida uma relação linear na qual a temperatura em graus Celsius medida pelo PT-100 fosse aproximadamente 100 vezes maior que a tensão de saída do circuito ($T = 100 * V_{out}$), com tal relação estabelecida no diagrama de blocos da MyRIO. A Figura 13 representa como cada potenciômetro (R_A e R_B) influencia no comportamento do circuito. Foram adotados os valores de 19Ω e 3 kΩ para os potenciômetros R_A e R_B , respectivamente.

Figura 12 - Influência dos potenciômetros R_A e R_B .

Fonte: Nguyen (2013)

Dada a arquitetura do forno disponível (com um furo em sua lateral), bem como a disponibilidade de um único sensor PT-100, tal sensor foi instalado na lateral do forno, conforme indicado na Figura 14.

Figura 13 - Posição do sensor PT-100 no forno.



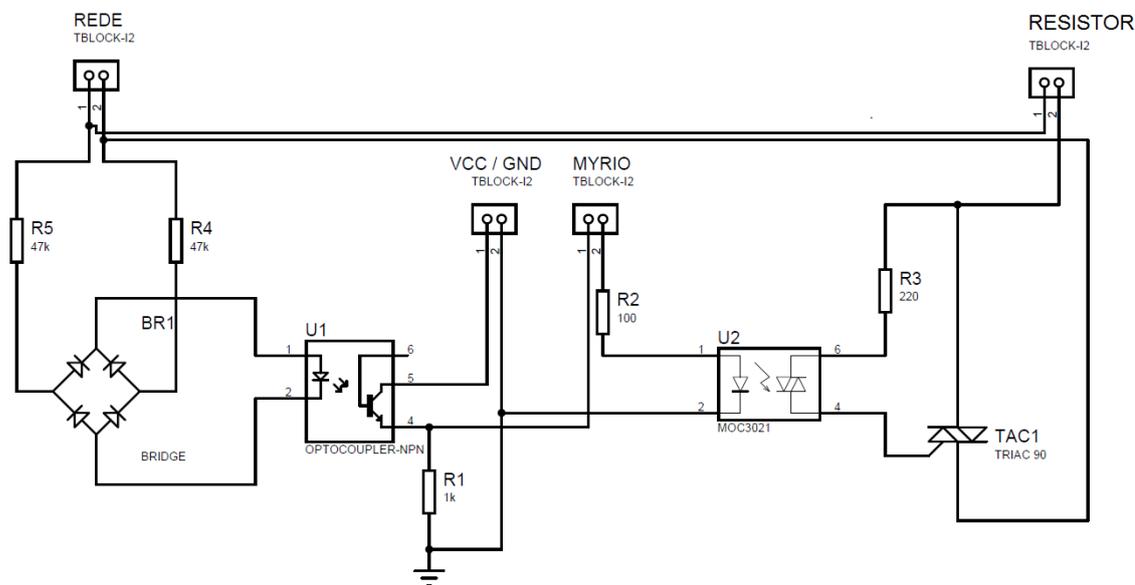
Fonte: O autor (2018)

3.2.2 Comando de sinais

Para que a variação na temperatura ocorra, é necessário que a tensão enviada para a resistência seja modificada ao longo de todo o processo. A ideia é

limitar a tensão em cada senoide enviada pela rede para que a variação de temperatura aconteça de maneira mais estável possível. A Figura 15 representa o circuito projetado para a realização deste objetivo.

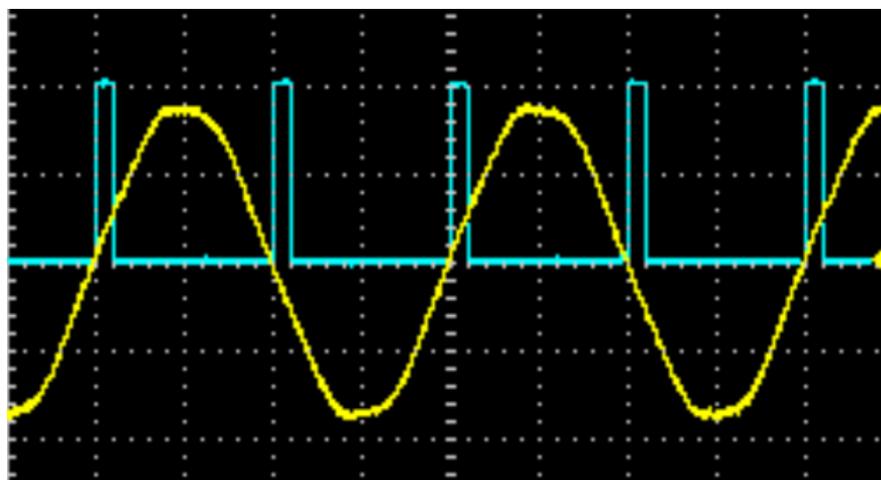
Figura 14 – Circuito de acionamento da resistência.



Fonte: O autor (2018)

O circuito implementado para o controle desta variação de tensão baseia-se na ideia de detecção de cruzamento de zero (*zero crossing*), onde o circuito é sincronizado com a alimentação da rede ao identificar a passagem do sinal de tensão alternada pelo valor de 0V em cada semiciclo. A Figura 16 ilustra a forma de onda da rede (em amarelo) e o pulso gerado (em azul).

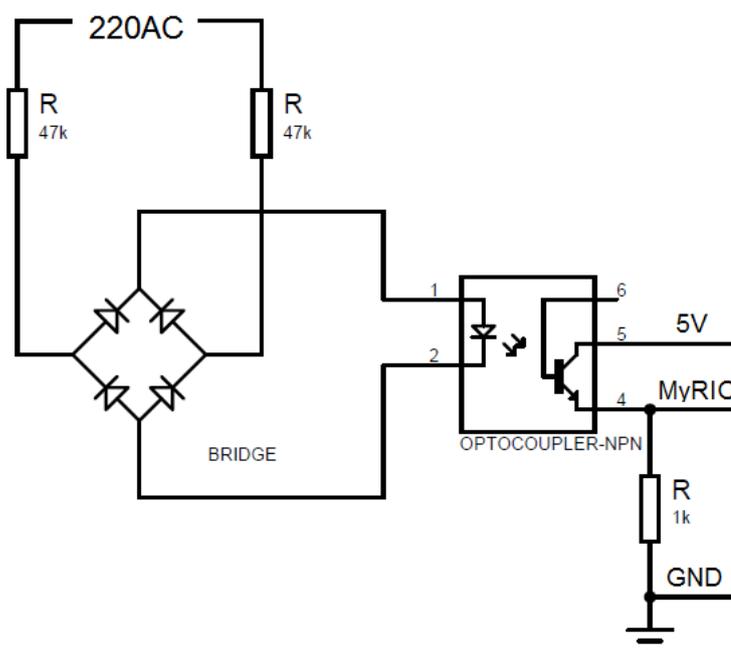
Figura 15 – Sinal da rede e pulsos de detecção de zero.



Fonte: O autor (2018)

Como pode ser observado na Figura 17, a parte do circuito projetada para a detecção de zero é composta por uma ponte de diodo para a retificação do sinal AC em onda completa e um opto acoplador 4N25, que tem sua saída de tensão conectada a entrada analógica da MyRIO, que receberá 0V quando o transistor interno do opto acoplador não receber corrente devido a passagem da tensão da rede pelo ponto zero.

Figura 16 – Circuito para detecção de zero.

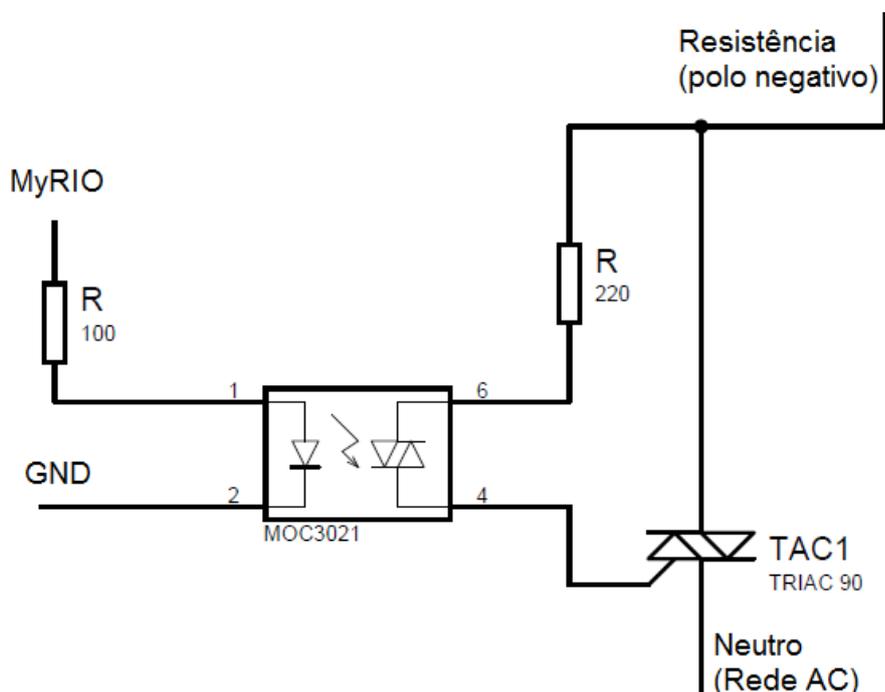


Fonte: O autor (2018)

Através da detecção de cruzamento de zero, o circuito consegue detectar o início de cada semiciclo de tensão da rede e então definir em qual momento a tensão será disponibilizada para a resistência do forno, alterando assim a amplitude do valor enviado.

Vale destacar que o circuito implementado tem por finalidade controlar a potência aplicada a resistência, fazendo com que esta aqueça o forno. Para tanto, é utilizado o opto acoplador MOC3031, que habilita a passagem da tensão de rede pelo TRIAC para a resistência quando o sinal de tensão vindo da MyRIO é recebido, Figura 18. Destaca-se que o resistor tem um de seus terminais conectado à um dos polos da rede (fase) enquanto que a saída do TRIAC está conectada ao outro (neutro).

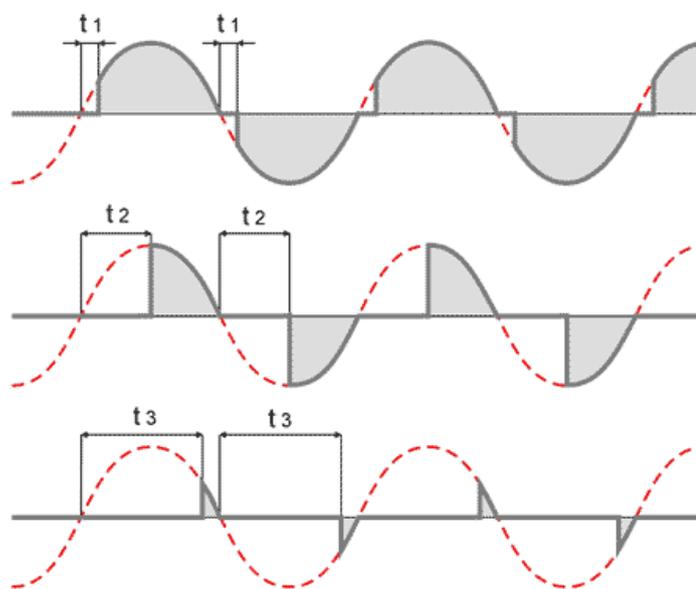
Figura 17 – Circuito para acionamento da alimentação da resistência.



Fonte: O autor (2018)

O pulso de tensão fornecido pela saída digital da MyRIO pode ser atrasado com o intuito de alterar a tensão recebida pelo forno. Atrasando o envio deste pulso em relação à detecção de zero, o sinal de tensão da rede elétrica passa parcialmente para a resistência e faz com que a temperatura do forno seja modificada. A Figura 19 representa três diferentes atrasos no pulso (t_1 , t_2 e t_3). Como se pode observar, o valor do atraso mantém uma relação inversa com a forma de onda enviada para a resistência. Quanto maior o atraso do pulso a ser enviado para o TRIAC, menor será a tensão de saída.

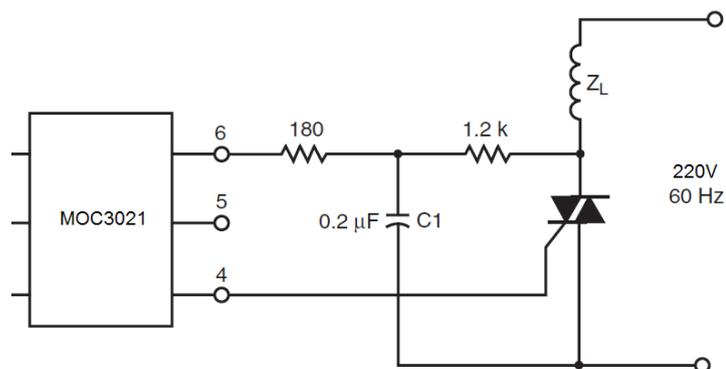
Figura 18 – Exemplos de limitação da tensão de saída.



Fonte: Adaptado de Cules (2018)

O forno também possui um exaustor interno, que pode ser utilizado para auxiliar no controle da temperatura. A velocidade angular é controlada utilizando o mesmo princípio do controle de potência da resistência, Figura 20. Ou seja, foi desenvolvido um circuito semelhante para a variação de velocidade angular do exaustor, utilizando a técnica de detecção de zero, porém o circuito foi adaptado às características de carga indutiva.

Figura 19 – Circuito de saída para acionamento do exaustor.

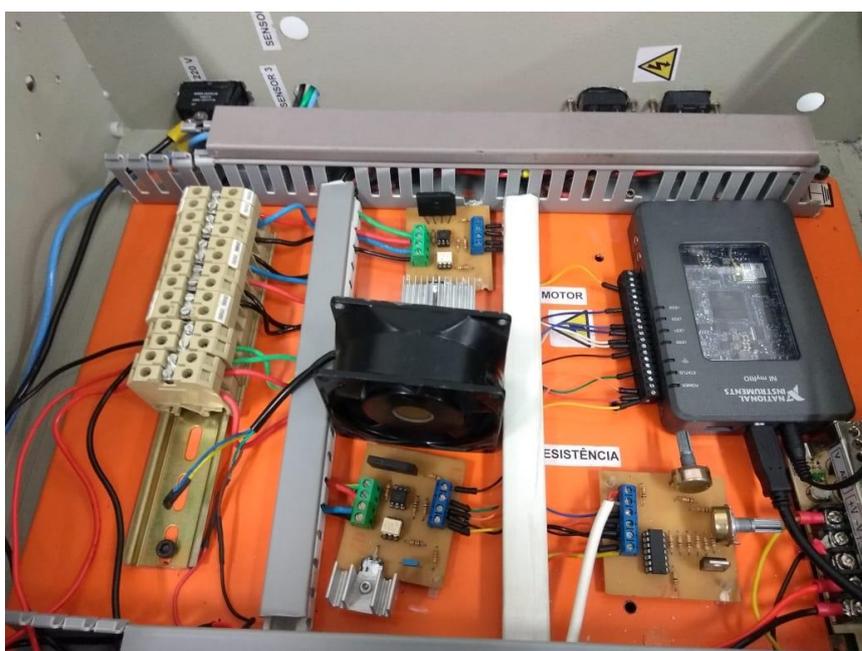


Fonte: Adaptado de Fairchild Semiconductor Datasheet (2005)

3.3 Gabinete Elétrico

Para a correta implementação do controle de temperatura do forno, foram desenvolvidas algumas placas de circuito eletrônico e adquiridos alguns componentes para que todo o sistema fosse integrado. Além de cabos, bornes de passagem e outros componentes que facilitam a organização e comunicação do gabinete, os principais itens utilizados são: MyRIO; circuito de comando da resistência; circuito de comando do exaustor; circuito de conversão do sensor PT-100; fonte 12V; *cooler* AC; botão de alimentação (ON/OFF) e botão de emergência. A Figura 21 representa a disposição dos componentes no gabinete.

Figura 20 – Gabinete elétrico.



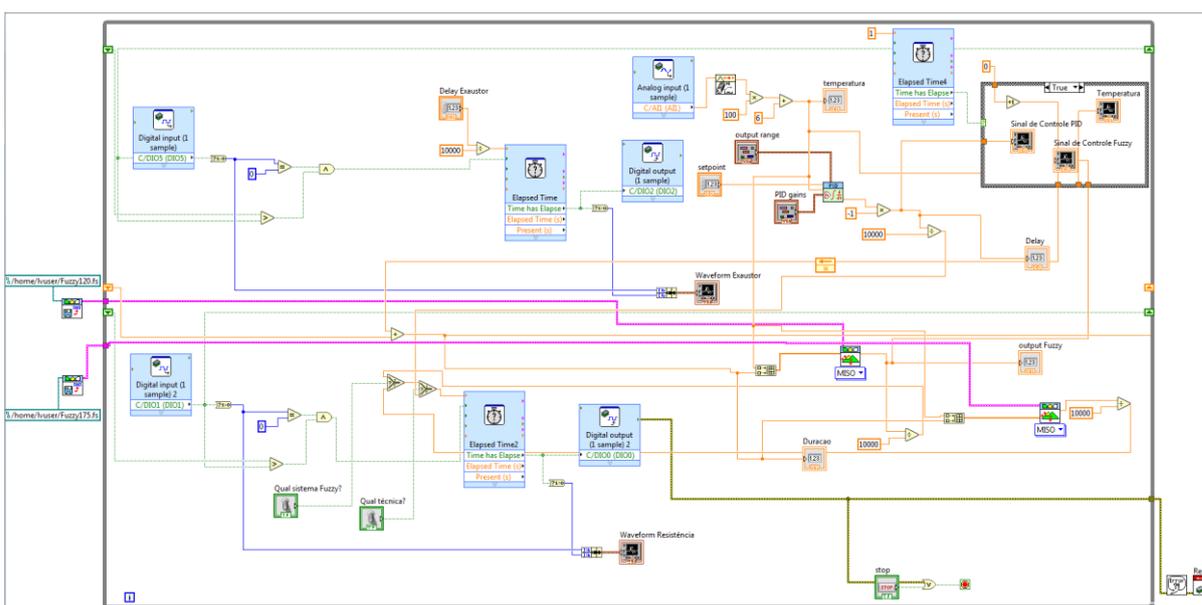
Fonte: O autor (2018)

A fonte de 12V foi utilizada para alimentar o circuito de conversão do sensor PT-100, que possui um regulador de tensão LM7805, como indicado no Apêndice A. A utilização do regulador de tensão auxilia a diminuir as oscilações na tensão de entrada, que podem afetar negativamente a leitura do sensor.

3.4 Diagrama de blocos

Como descrito anteriormente, a MyRIO é o dispositivo responsável pela variação da tensão de saída enviada para a resistência, por meio da variação no tempo em que o pulso que aciona o TRIAC é enviado em cada semiciclo da rede. Com os circuitos aptos para propagar todos os sinais de comando do sistema, foi desenvolvido um código em LabVIEW que pudesse monitorar e modificar a temperatura do forno, Figura 22.

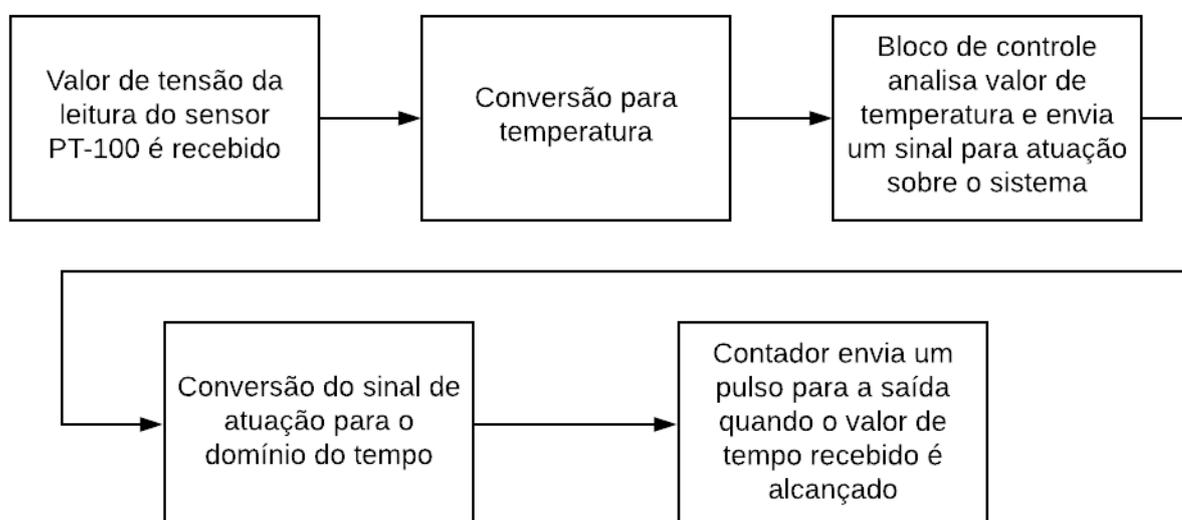
Figura 21 – Diagrama de blocos de comando do sistema, com bloco PID.



Fonte: O autor (2018)

O programa do diagrama de blocos opera da seguinte maneira: o valor de tensão proveniente do circuito PT-100 é recebido por uma entrada analógica da MyRIO; este valor é convertido para um valor de temperatura, para visualização no painel frontal e melhor interpretação do sinal; o valor de temperatura é então enviado para o bloco de controle e comparado com o valor de referência (*setpoint*); o valor de saída do bloco controlador (calculado de acordo com a lei de controle implementada é convertido para um valor de tempo, para que se tenha um atraso (*delay*) no acionamento do TRIAC; este valor de tempo é mandado para um contador, que ao atingir tal valor, envia um pulso (3.3V) para a saída digital da MyRIO e reinicia a contagem; esta saída digital da MyRIO está conectada ao opto acoplador MOC3031, que irá acionar o gate do TRIAC. A Figura 23 representa o fluxograma que resume o funcionamento do código desenvolvido.

Figura 22 – Fluxograma principal.



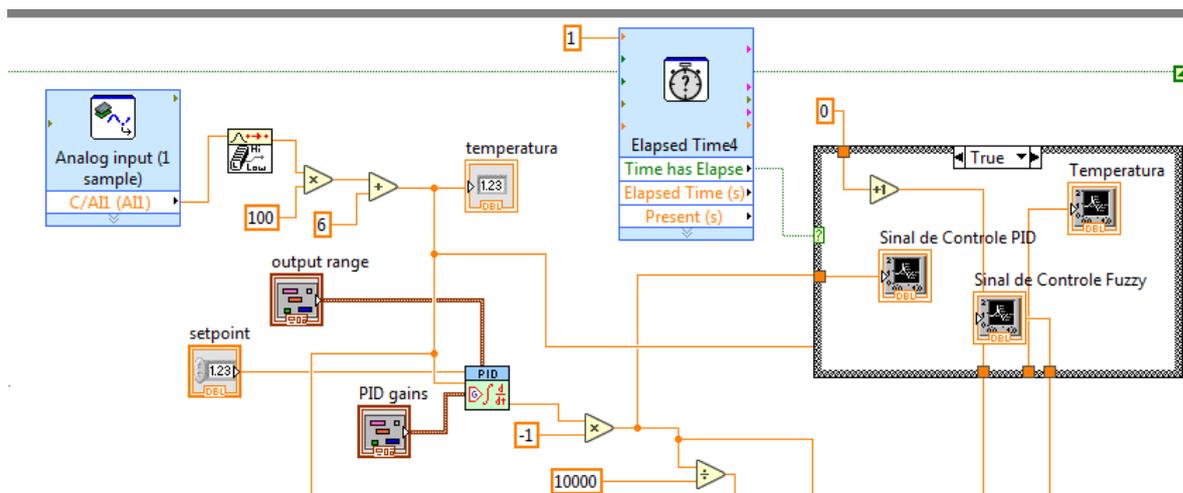
Fonte: O autor (2018)

3.4.1 Sincronização por cruzamento de zero

A MyRIO “lê” o sinal enviado pelo opto acoplador 4N25, (após detecção de zero), assegurando que o contador permaneça em sincronia com a frequência da rede e evite que o bloco envie pulsos incorretamente (Figura 24). Uma entrada digital foi utilizada para evitar ruídos na leitura da tensão, de modo que qualquer valor de tensão abaixo de 1,8V é considerado lógica baixa. Como o sistema detecta a lógica baixa antes do ponto zero ser cruzado, é adicionado um valor de 3ms a variável de controle (*delay*) a fim de evitar que o pulso seja enviado adiante antes do novo semiciclo iniciar (cruzamento do ponto zero).

Para garantir que o pulso será enviado apenas no momento inicial em que a leitura da tensão é interpretada como lógica baixa, o valor atual de tensão é constantemente comparado com o valor medido anterior. Esta comparação identifica o instante em que o valor atual for menor que o valor anterior, como sendo o início da contagem.

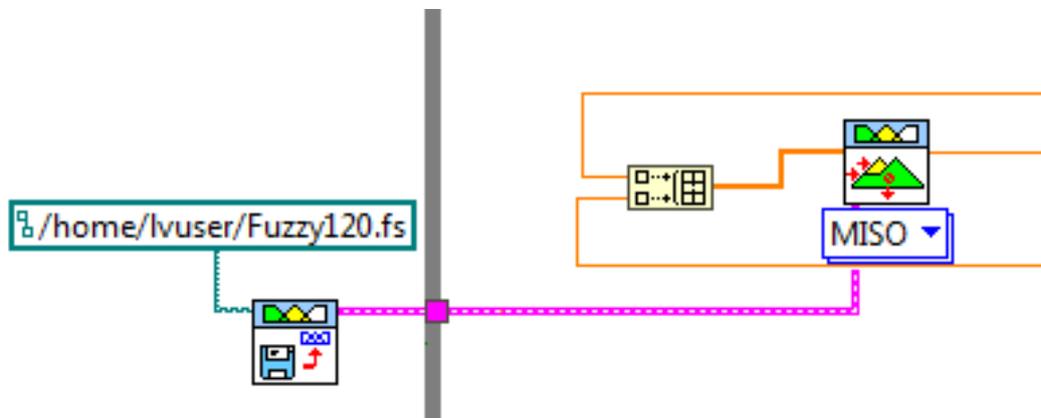
Figura 24 – Aquisição e controle de temperatura (PID).



Fonte: O autor (2018)

A Figura 26 ilustra as conexões do bloco Fuzzy, indicando suas entradas (temperatura e duração), sua saída (*delay*) e o *upload* do arquivo do sistema Fuzzy desenvolvido (.fs).

Figura 25 – Exemplo de conexões do bloco Fuzzy.



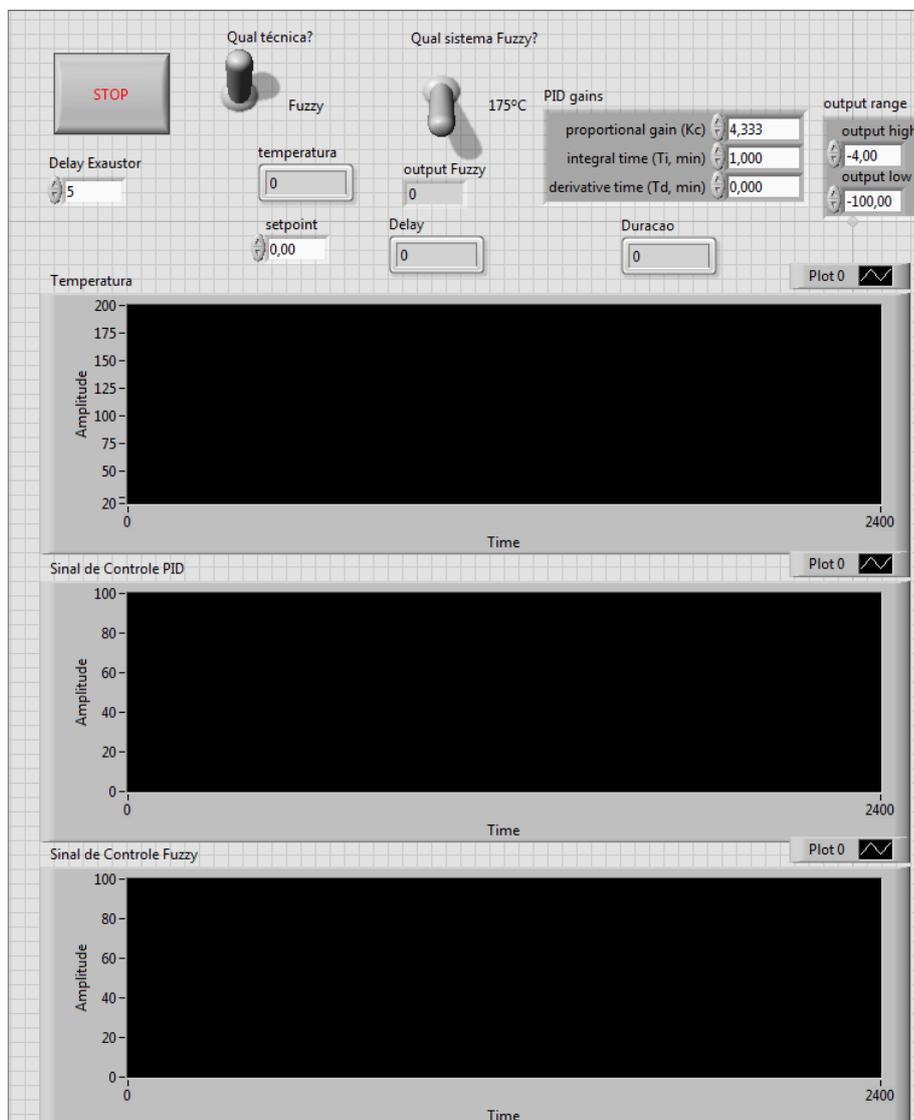
Fonte: O autor (2018)

3.5 Painel frontal

Operando como interface entre o sistema e o usuário enquanto o programa está em funcionamento, o painel frontal (Figura 27) apresenta em formato de gráfico e de display o valor de temperatura (em graus Celsius) e um gráfico com o valor da variável manipulada que irá para o contador, sendo ambos os gráficos atualizados a cada 1 segundo. O painel ainda disponibiliza campos para alteração

dinâmica dos parâmetros do controlador PID, do *setpoint* da temperatura que se deseja obter e da velocidade angular do exaustor com base no tempo de *delay* do seu contador.

Figura 26 – Painel frontal.



Fonte: O autor (2018)

3.6 Experimentos de Malha Aberta

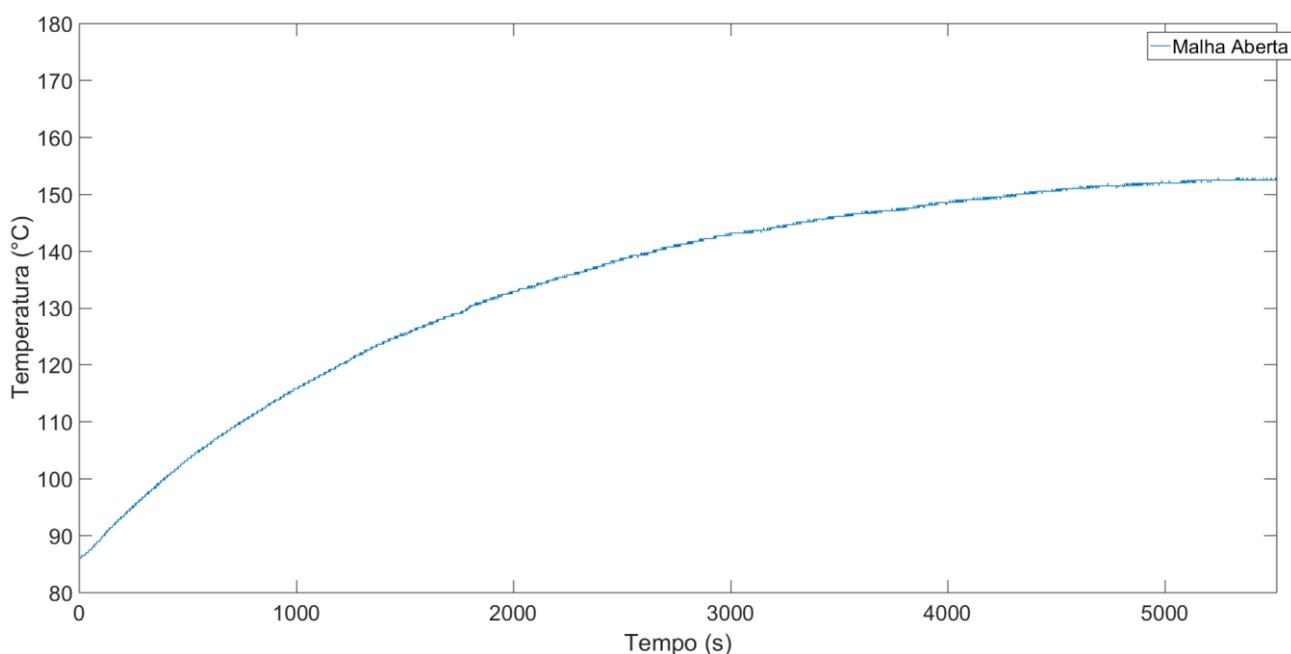
Como visto na Seção 2.2, pode-se compreender o comportamento do sistema através da análise da curva em malha aberta.

Como apresentado na Tabela 1, é possível encontrar na literatura valores de tempo e temperatura de torra relacionados a alguns tipos de malte. Dentre alguns

dos mais populares maltes, foram selecionados os tipos *Pale Gold Malt* (120°C por 20 minutos) e *Amber Malt* (175°C por 30 minutos).

Buscando realizar um ensaio que abrangesse boa parte da temperatura a qual o forno seria normalmente submetido, os valores de tempo da variável manipulada (atraso do pulso enviado ao TRIAC) foram os de 7,7ms e 6,9ms. Conforme pode ser observado na Figura 28, após o início do ensaio, o forno teve um aumento em sua temperatura de 86°C para 152°C, ao longo de 1 hora e 32 minutos. Destaca-se o comportamento de primeira ordem da curva e o valor de atraso de transporte nulo ($\theta = 0$).

Figura 27 – Curva ao degrau em malha aberta.



Fonte: O autor (2018)

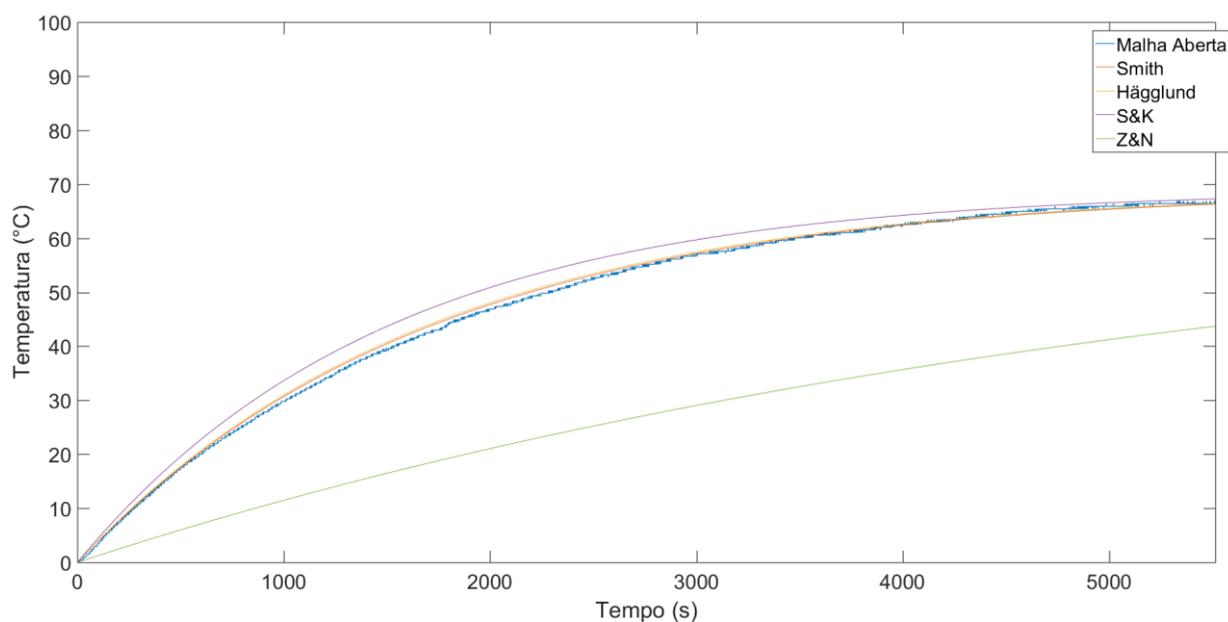
A partir dos valores analisados na curva de malha aberta, obteve-se a função de transferência, aplicando-se os quatro métodos abordados na Seção 2.2. A Tabela 2 representa a relação entre o ganho estático, a constante de tempo e o atraso de transporte para cada método.

Tabela 2 - Métodos de obtenção da função de transferência.

Método	Função de Transferência
Ziegler / Nichols	$\frac{69}{5494s + 1}$
Sundaresan / Krishnaswamy	$\frac{69}{1496s + 1}$
Smith	$\frac{69}{1700s + 1}$
Hägglund	$\frac{69}{1677s + 1}$

A Figura 29 representa a comparação entre a resposta obtida com cada função de transferência e os valores obtidos no ensaio experimental. Assim, pode-se observar qual dos quatro métodos apresenta um comportamento mais semelhante ao real.

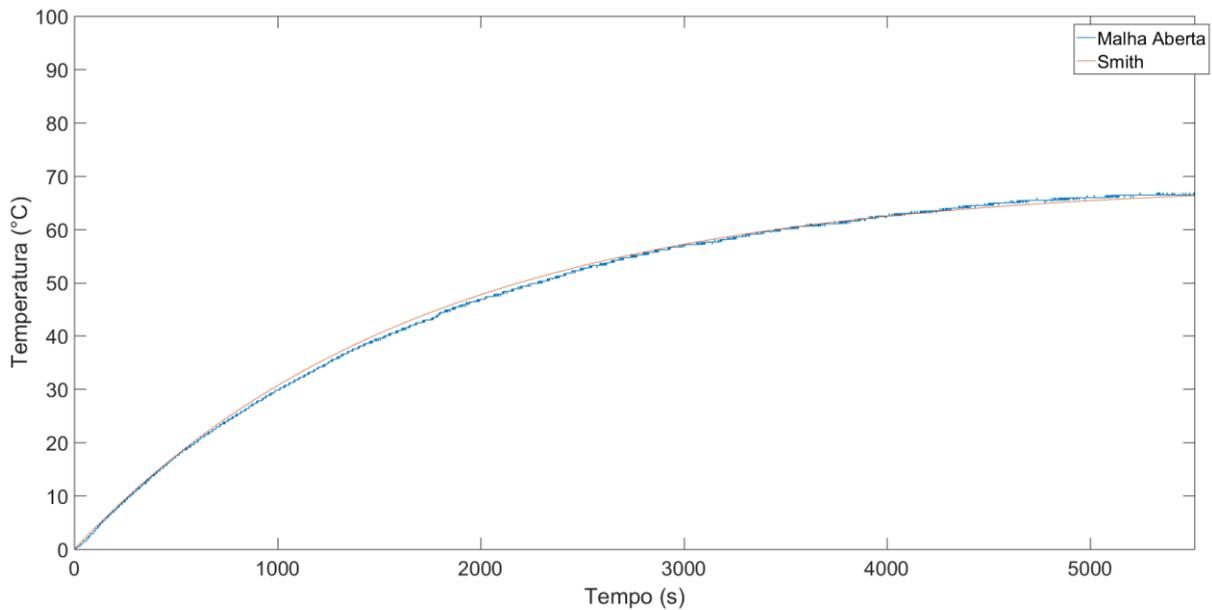
Figura 28 – Comparação entre malha aberta e técnicas em estudo.



Fonte: O autor (2018)

A partir da comparação entre curvas, observa-se que a função de transferência obtida pelo método de Smith apresenta melhor concordância com a resposta da planta (Figura 30). O método de Hägglund apresentou uma curva semelhante ao do método de Smith, enquanto que o método de Ziegler/Nichols apresenta o pior desempenho dentre os quatro.

Figura 29 – Comparação entre a curva em malha aberta e o método escolhido.



Fonte: O autor (2018)

3.7 Cálculo dos parâmetros PID

Para o cálculo dos parâmetros do controlador PID, algumas especificações precisam ser definidas. A função de transferência já foi previamente obtida como sendo $G(s) = \frac{69}{1700s+1}$; o erro em regime permanente deve ser nulo (0%); estipula-se o sobressinal para 5% do valor de referência; o tempo de acomodação é definido em 10 minutos (600 segundos).

A partir do tempo de acomodação é definido o valor de σ . A Equação 3 indica como foi obtido o valor de $\sigma = 0,0067$.

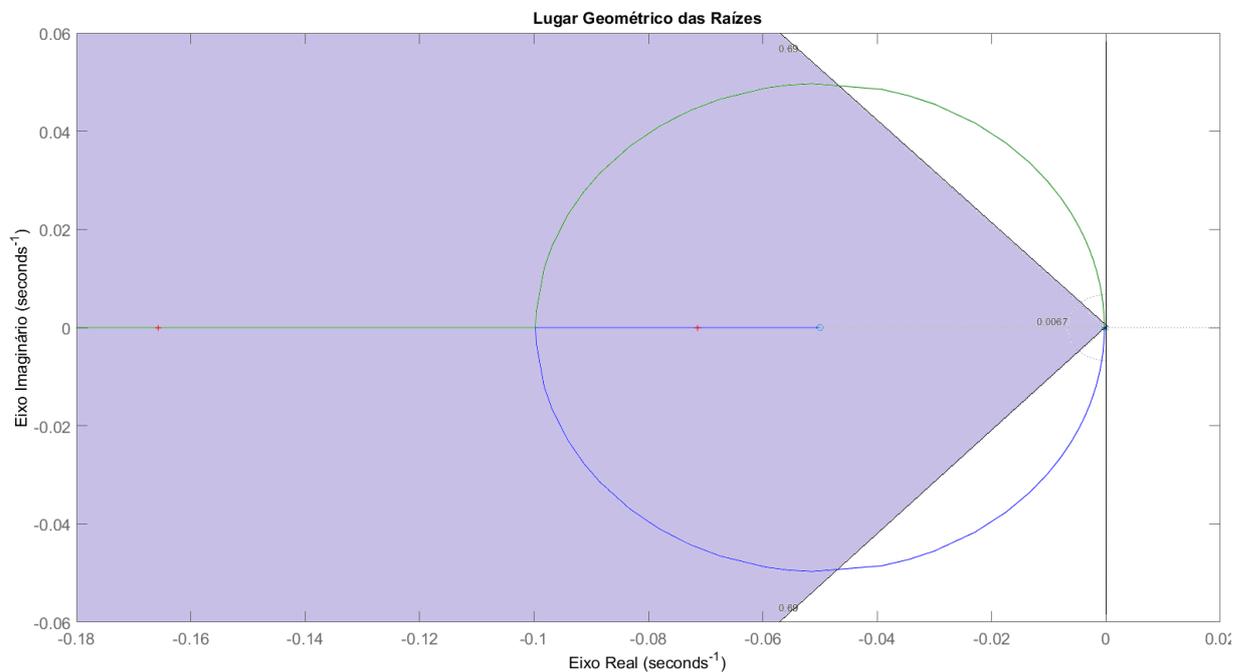
$$\sigma = \frac{4}{600} = 0,0067 \quad (3)$$

Sabe-se que o zero do controlador (Z_c) é igual a $-K_i/K_p$. A função de transferência em malha aberta é calculada para se encontrar os polos do sistema, Equação 4.

$$\frac{Kp(s+Ki/Kp)}{s} \times \frac{69}{1700s+1} = \frac{Kp(69s+69Ki/Kp)}{1700s^2+s} \quad (4)$$

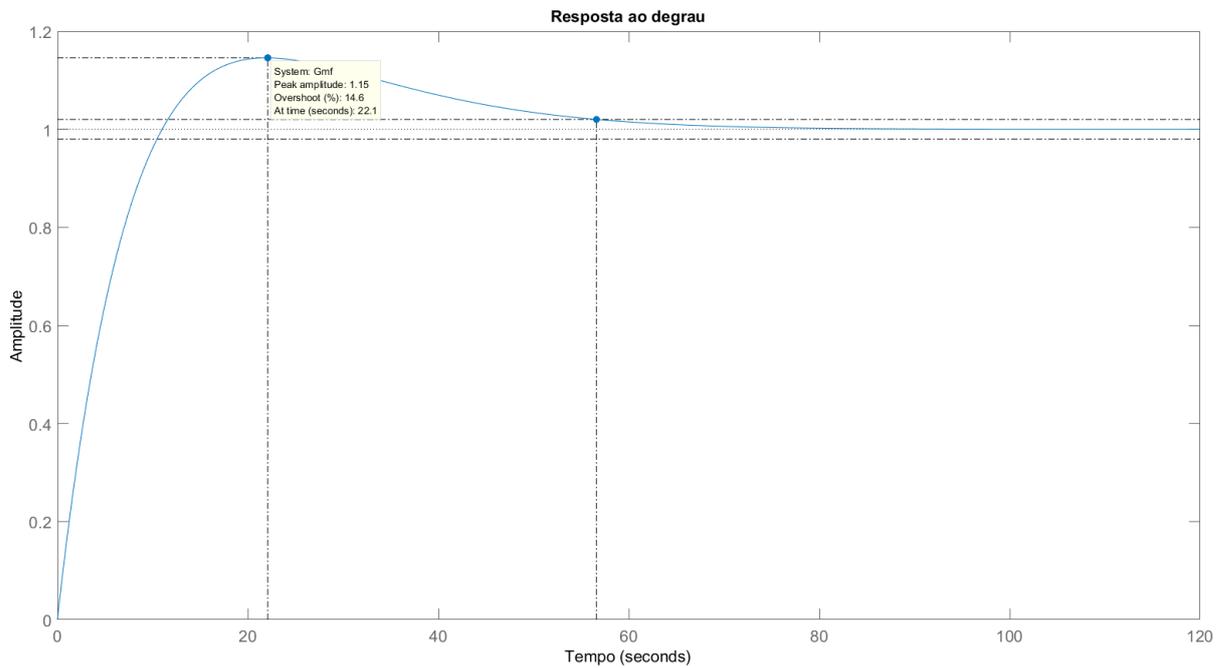
A partir da função de transferência em malha aberta é definido um valor para Zc de $\frac{1}{20}$, de modo que o tempo de integração (Ti) seja de 20 segundos. A região em destaque (lilás) na Figura 31 indica a região onde os polos de malha fechada podem ser alocados, atendendo o tempo de acomodação e sobressinal especificados. Dentre os possíveis valores para o ganho Kp , pelo método do Lugar Geométrico das Raízes, foi escolhido o valor de 4,3.

Figura 30 – Determinação do ganho pelo Lugar Geométrico das Raízes.



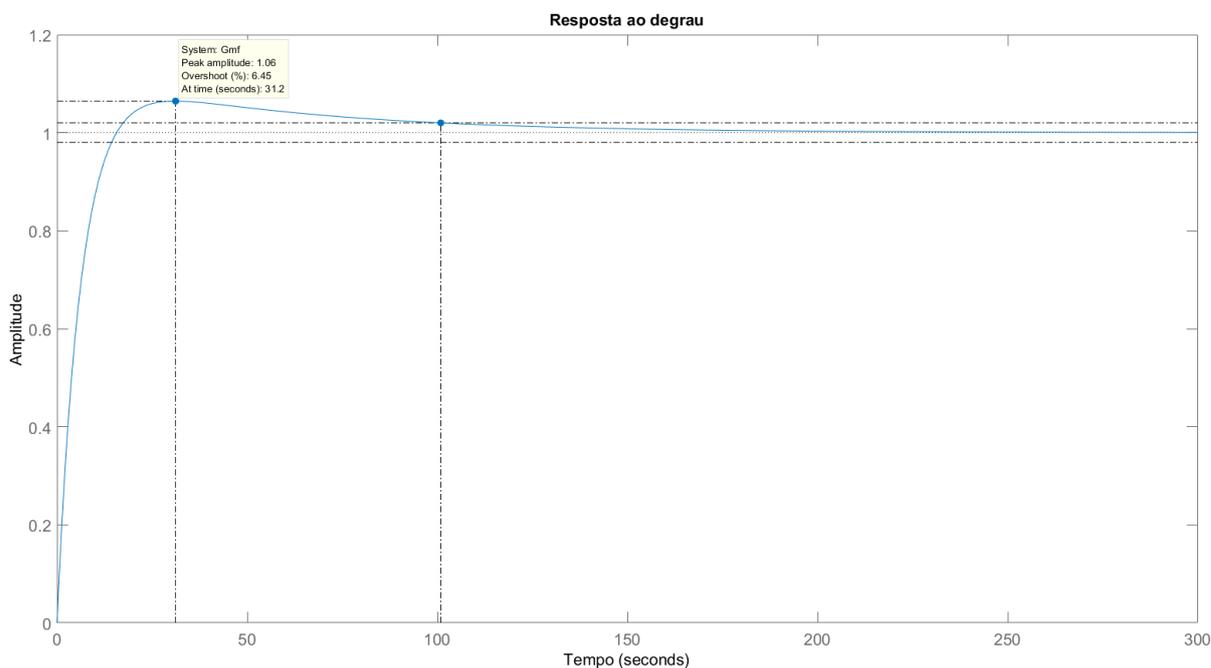
Fonte: O autor (2018)

Com o valor do ganho Kp definido, analisou-se, por simulação, a resposta do sistema à entrada do tipo degrau. Como indicado na Figura 32, o valor de sobressinal foi de 14,6%, muito maior do que o desejado.

Figura 31 – Resposta ao degrau com $T_i = 20$ e $K_p = 4,3$.

Fonte: O autor (2018)

Para corrigir este comportamento, o valor do ganho K_p foi mantido e modificou-se o valor do zero do controlador, Z_c , até que a curva simulada apresente um sobressinal satisfatório. A Figura 33 mostra a curva para $Z_c = \frac{1}{60}$, que apresentou um sobressinal de 6,45%, valor pouco acima do requisito original, porém aceitável para o processo em questão. O valor do tempo de acomodação foi de 101 segundos.

Figura 32 – Resposta ao degrau com $T_i = 60$ e $K_p = 4,3$.

Fonte: O autor (2018)

Com os parâmetros de Z_c e K_p definidos, tem-se também o valor de K_i , visto que $T_i = K_p/K_i$. Para $K_p = 4,3$ e $K_i = 0,072$. Utilizou-se o critério de Routh-Hurwitz para analisar a estabilidade do sistema, Tabela 3.

Tabela 3 – Critério de Routh-Hurwitz.

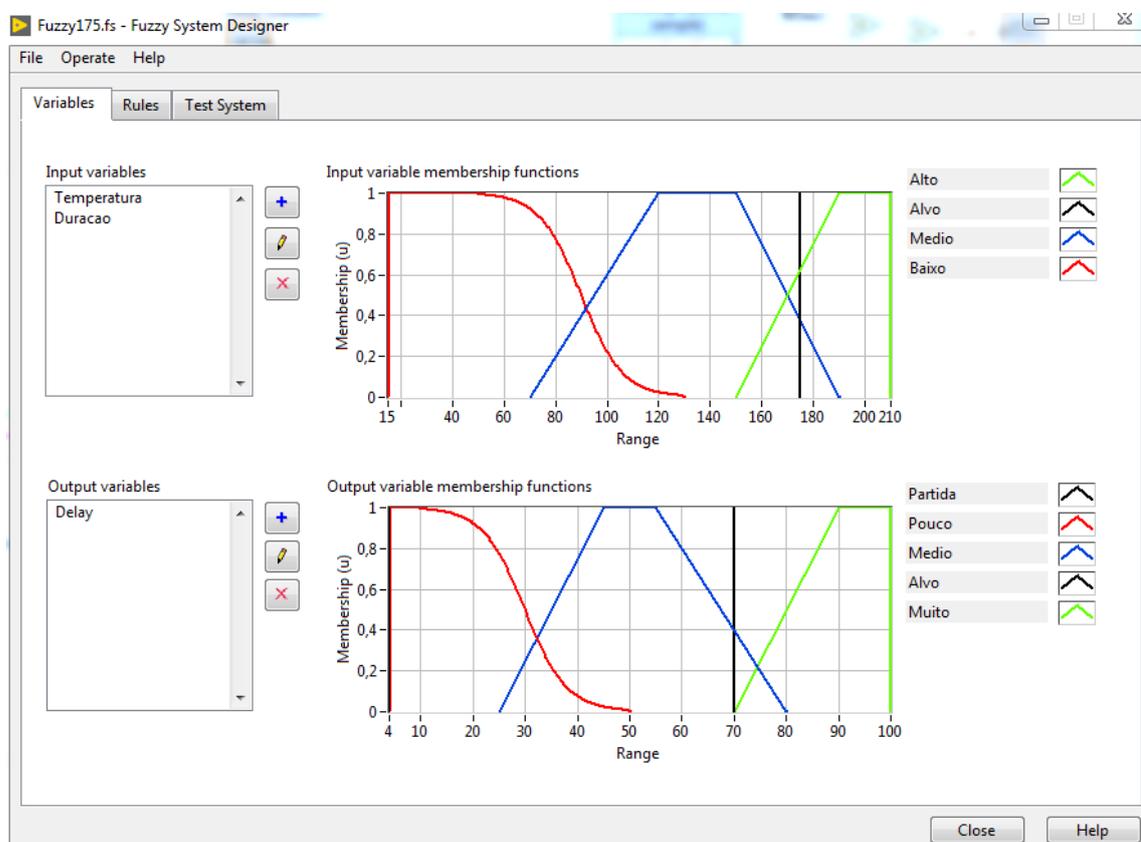
s^2	1	$69K_i/1700$
s^1	$(69 \cdot K_p + 1)/1700$	0
s^0	$69K_i/1700$	0

Para $69K_i/1700 > 0$, tem-se que o valor de K_i deve ser maior que zero. Para $(69 \cdot K_p + 1)/1700 > 0$, tem-se que o valor de K_p deve ser maior que 0,0145. A partir destes dois critérios, observa-se que os valores escolhidos para $K_p = 4,3$ e $K_i = 0,072$ garantem a estabilidade do sistema.

3.8 Parâmetros Fuzzy

O Labview possui uma extensão chamada *NI LabVIEW PID and Fuzzy Logic Toolkit*, com o qual é possível acrescentar algoritmos de controle ao código criado no diagrama de blocos. Dentre as ferramentas disponíveis para a utilização da lógica Fuzzy, existe o *Fuzzy System Designer*, com o qual é possível definir o grau prioridade dos parâmetros do sistema e criar regras que relacionem as variáveis de entrada e de saída. A Figura 34 mostra a janela de operação com as variáveis (PID and Fuzzy Logic Toolkit User Manual, 2009).

Figura 33 – Janela de criação e edição de sistemas fuzzy.



Fonte: Autor (2018)

Com o conhecimento prévio do comportamento do forno, projetou-se um sistema Fuzzy com duas variáveis de entrada e uma variável de saída: temperatura e duração como entradas e *delay* como saída. A variável “temperatura” é diretamente relacionada com o valor obtido pelo sensor. A variável “duração” representa um contador que diferencia os primeiros minutos do ensaio do restante

do processo. A variável “*delay*” representa a ação de controle que será enviada ao TRIAC.

Para cada temperatura de referência desejada, foi criado um sistema Fuzzy que pudesse atender aos requisitos de erro de regime permanente, tempo de acomodação e sobressinal, além de apresentar uma resposta satisfatória à perturbação. Foram desenvolvidos dois sistemas: um para temperatura de referência de 120°C (*Pale Gold Malt*) e um para 175°C (*Amber Malt*).

Os valores da variável de entrada “temperatura” foram classificados com as seguintes nomenclaturas: “baixo”, “médio”, “alvo” e “alto”. Estes valores foram distribuídos entre 15°C e 210°C com o intuito de atribuir à variável de saída um comportamento condizente com cada faixa de temperatura que o forno pudesse apresentar. Os parâmetros são definidos buscando-se criar um vínculo entre temperatura e sinal de saída que se assemelhe à uma relação diretamente proporcional, diminuindo o sobressinal do sistema.

A variável de entrada “duração” apresenta apenas dois parâmetros: “baixo” e “alto”. Entendendo que nos primeiros minutos de ensaio o forno pode trabalhar com potência máxima (diminuindo o tempo de acomodação), o objetivo deste parâmetro é indicar para a variável de saída até qual instante a ação de controle permanecerá com valor mínimo. O parâmetro “baixo” está diretamente relacionado com o parâmetro “partida” da variável de saída (*delay*).

Passado o tempo inicial de ensaio, esta variável deixa de influenciar o parâmetro de saída, de modo que a variável “temperatura” será responsável por guiar a ação de controle em torno do valor de referência.

A variável de saída “*delay*” possui cinco nomenclaturas: “partida”, “pouco”, “médio”, “alvo” e “muito”. Assim como no bloco controlador PID, o valor desta variável é conectado com a entrada de tempo alvo do bloco contador (*Elapsed Time*).

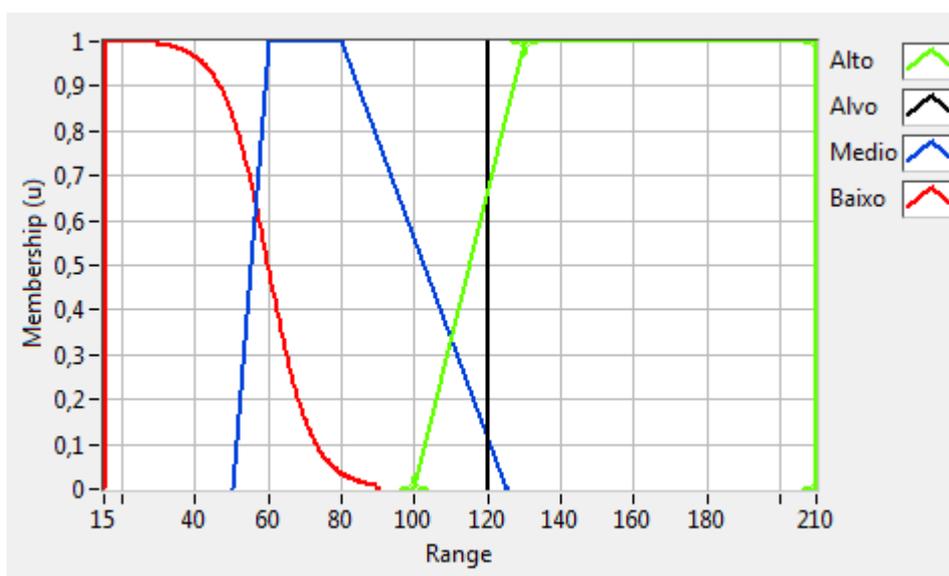
O parâmetro “alvo” da variável temperatura representa o valor de referência (120 ou 175°C) e possui um grau de pertinência máximo quando a temperatura medida atingir seu valor. Este parâmetro está diretamente relacionado com o parâmetro “alvo” da variável de saída *delay*, que também possui grau de pertinência máximo, a fim de enviar a potência exata para que o forno mantenha a temperatura

de referência. Conhecendo a relação entre o *delay* e a temperatura, é possível definir os parâmetros “alvo” para diversos valores de referência.

Cada uma das variáveis engloba uma faixa de valores que tem seu grau de pertinência modificado conforme for interessante para maior eficiência do sistema. As Figuras 35 a 40 ilustram o comportamento de cada parâmetro das variáveis do sistema para os dois valores de referência.

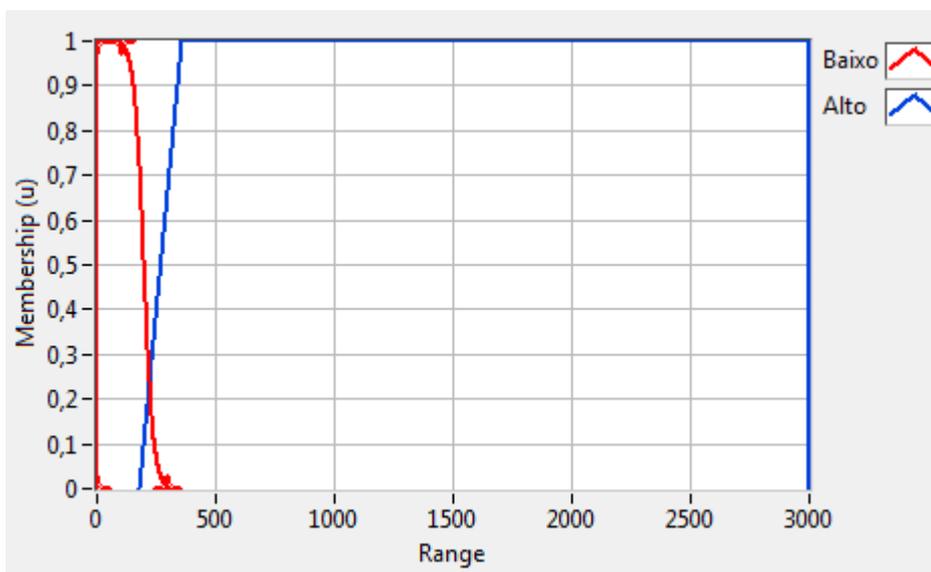
O diferente formato das curvas em cada parâmetro tem o objetivo de otimizar o desempenho do valor de saída do atuador. Foram utilizadas curvas em formato trapezoidal e sigmoidal, simulando o desempenho do controlador com cada tipo de curva.

Figura 34 – Parâmetros de temperatura para referência de 120°C.



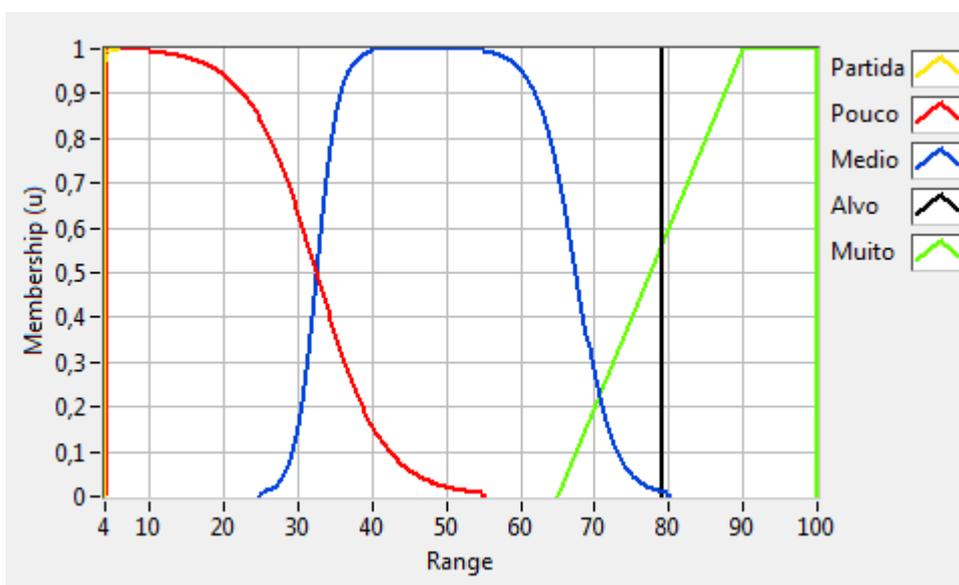
Fonte: Autor (2018)

Figura 35 – Parâmetros de duração para referência de 120°C.



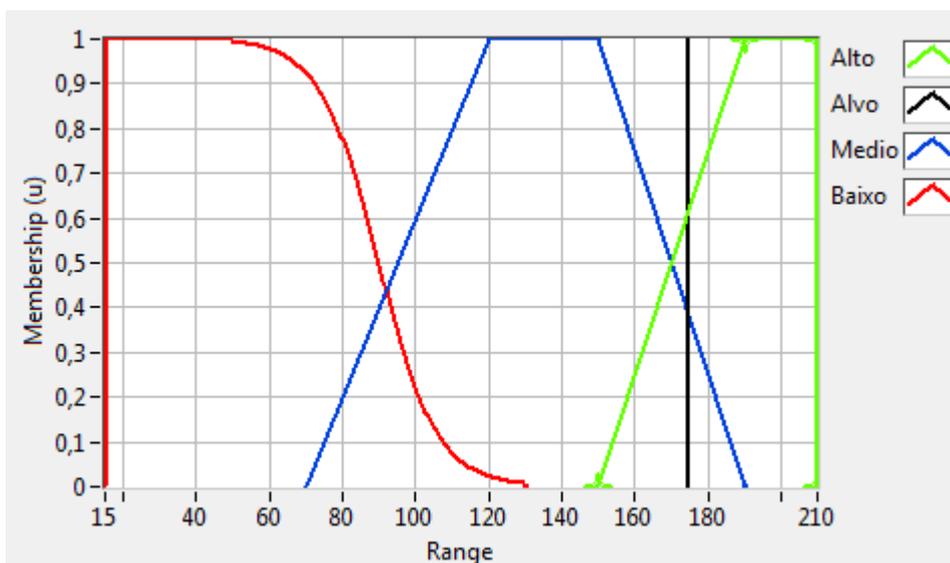
Fonte: Autor (2018)

Figura 36 – Parâmetros de delay para referência de 120°C.



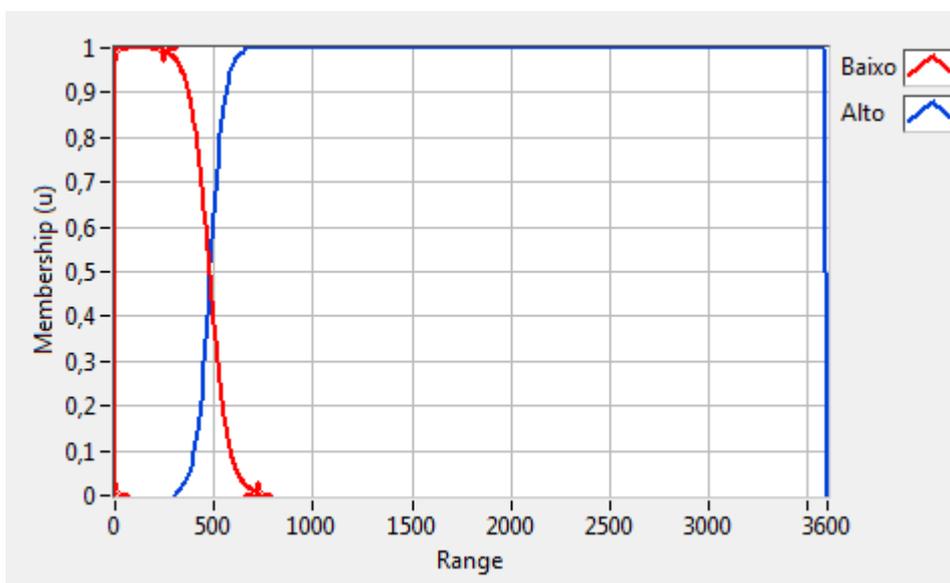
Fonte: Autor (2018)

Figura 37 – Parâmetros de temperatura para referência de 117°C.



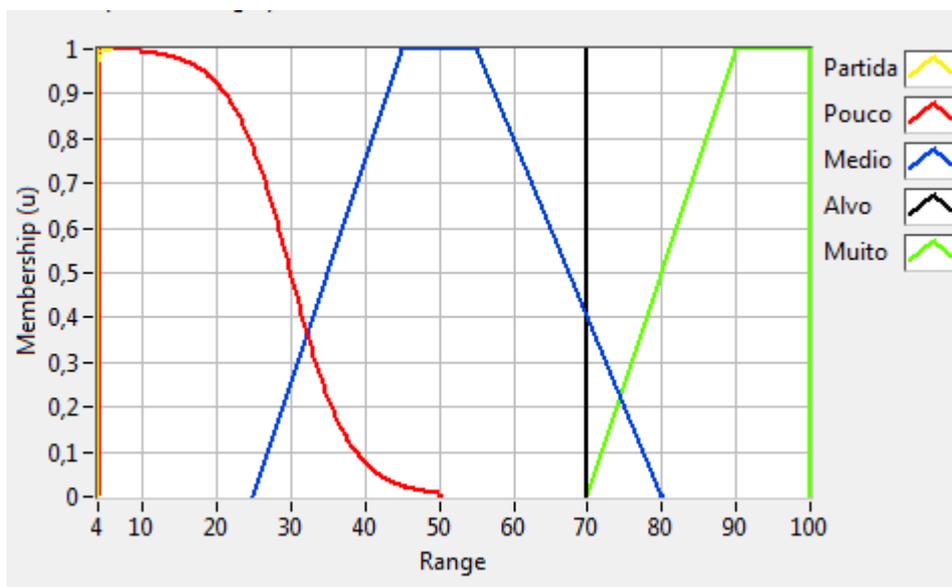
Fonte: Autor (2018)

Figura 38 – Parâmetros de duração para referência de 175°C.



Fonte: Autor (2018)

Figura 39 – Parâmetros de delay para referência de 175°C.



Fonte: Autor (2018)

Com as variáveis Fuzzy definidas, são estabelecidas regras lógicas para a interação destas variáveis e definição do parâmetro de maior influência no valor de saída. Combinando o grau de pertinência de cada parâmetro com as regras que relacionam as variáveis de entrada e saída, tem-se o sistema Fuzzy otimizado para o controle de temperatura do forno. A sequência a seguir apresenta as oito regras estabelecidas em ambos os sistemas Fuzzy (120 e 175°C):

1º Se “Temperatura” for “Alto” e “Duração” for “Baixo”, então “Delay” é “Partida”.

2º Se “Temperatura” for “Alto” e “Duração” for “Baixo”, então “Delay” é “Muito”.

3º Se “Temperatura” for “Alvo” e “Duração” for “Baixo”, então “Delay” é “Alvo”.

4º Se “Temperatura” for “Alvo” e “Duração” for “Baixo”, então “Delay” é “Alvo”.

5º Se “Temperatura” for “Médio” e “Duração” for “Baixo”, então “Delay” é “Partida”.

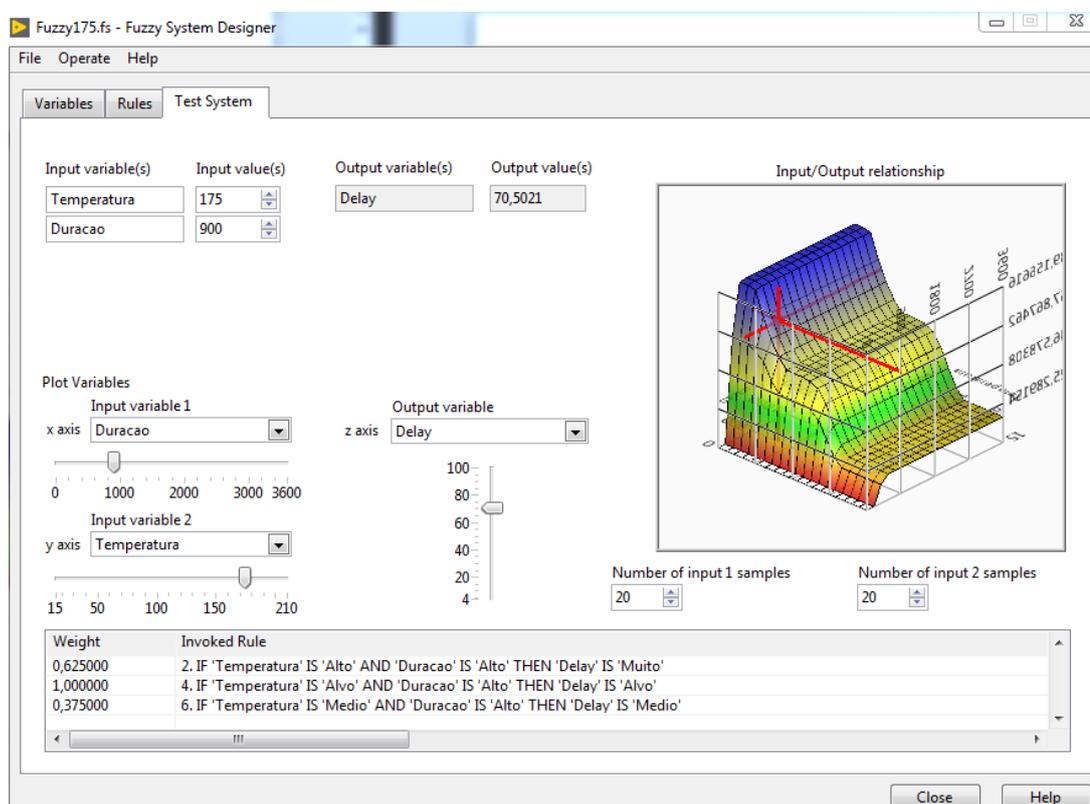
6º Se “Temperatura” for “Médio” e “Duração” for “Baixo”, então “Delay” é “Médio”.

7º Se “Temperatura” for “Baixo” e “Duração” for “Baixo”, então “Delay” é “Partida”.

8º Se “Temperatura” for “Baixo” e “Duração” for “Alto”, então “Delay” é “Pouco”.

Por fim, o *Fuzzy System Designer* do Labview permite que o usuário simule o sistema criado, facilitando nos ajustes dos parâmetros. A Figura 41 representa a aba de simulação (*Test System*) e suas funcionalidades.

Figura 40 – Janela de simulação de sistemas Fuzzy.



Fonte: Autor (2018)

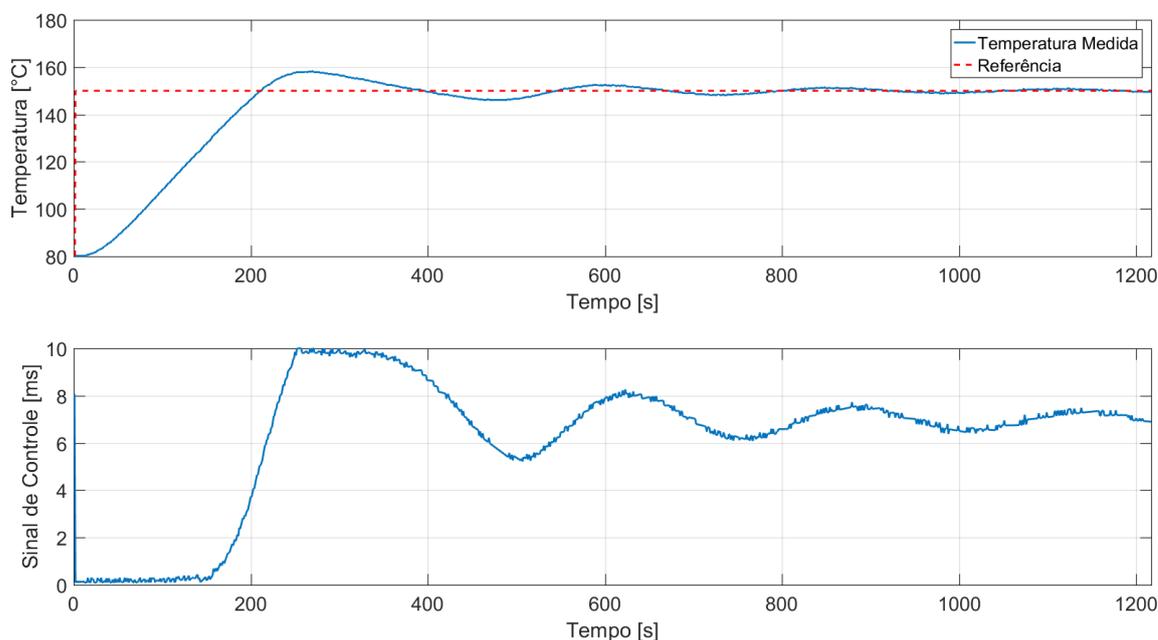
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 Resultados obtidos utilizando o controlador PID

Para validação dos parâmetros de PID calculados, foram realizados ensaios que avaliassem o comportamento da temperatura ao longo do tempo após estipulado um valor de referência. Os valores das variáveis controlada e manipulada foram registrados para futura análise e comparação com os resultados obtidos com a implementação do controlador Fuzzy.

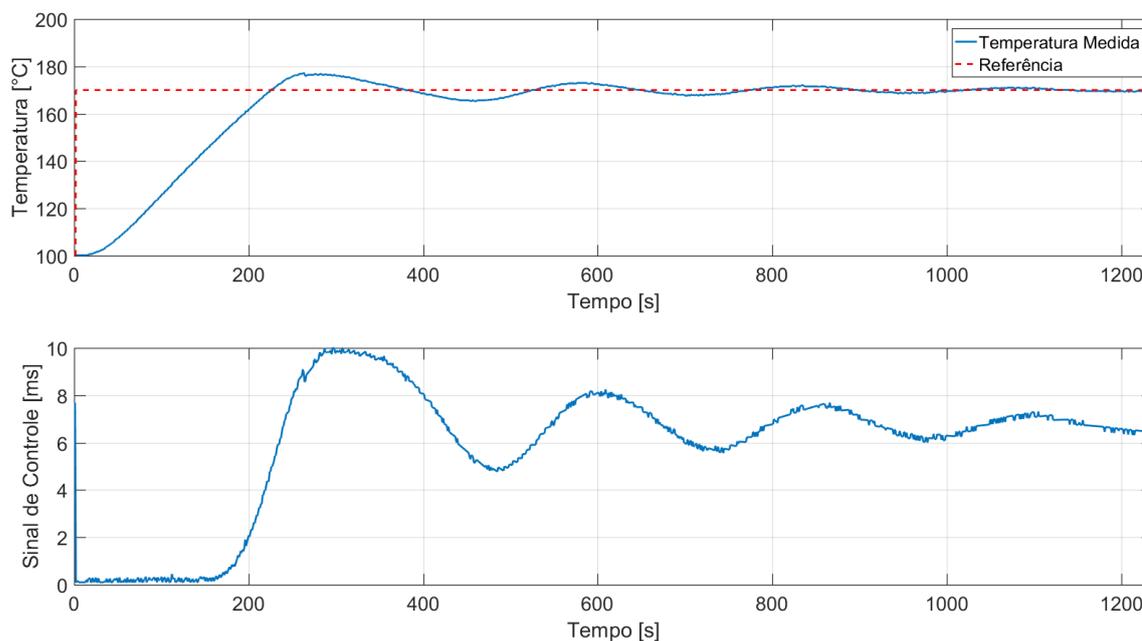
Foram realizados seis experimentos caracterizados pela variação do setpoint: três com variação de 80°C para 150°C e outros três com variação de 100°C para 170°C. Assim que o valor de referência (150 ou 170°C) é dado ao sistema, estipula-se um intervalo de 20 minutos para o término do experimento, valor maior que o tempo de acomodação. As Figuras 42 e 43 representam os resultados obtidos.

Figura 41 – Desempenho do controlador PID no ensaio de 80°C a 150°C.



Fonte: O autor (2018)

Figura 42 – Desempenho do controlador PID no ensaio de 100°C a 170°C.



Fonte: O autor (2018)

A Tabela 4 representa os valores de sobressinal e de erro em regime permanente, depois de atingido o tempo de acomodação do sistema. Os valores dispostos foram calculados utilizando o valor de temperatura registrado exatamente 10 minutos após o valor de *setpoint* ser dado ao sistema.

Tabela 4 – Porcentagens de erro e sobressinal nos ensaios de validação do PID.

Ensaio	Sobressinal (%)	Erro de regime (%)
80°C a 150°C	5,56	1,66
80°C a 150°C	5,56	1,66
80°C a 150°C	5,56	1,33
100°C a 170°C	4,34	1,47
100°C a 170°C	5,21	1,47
100°C a 170°C	4,34	1,76

Pode-se observar a semelhança entre os resultados dos ensaios, reforçando a validação do desempenho do controlador. Nota-se, também, que o erro em regime permanente flutua em torno de $\pm 1,5\%$. Fato relacionado ao isolamento térmico imperfeito do forno (há, constantemente, troca de calor entre o forno e o meio ambiente), e a possível má performance circuito de acionamento, fazendo com que ocasionais pulsos de tensão mais elevados aumentem a temperatura interna do forno.

Buscando observar o comportamento da temperatura e avaliar o desempenho do controlador em uma situação típica de utilização pelo usuário, decidiu-se realizar uma sequência de ensaios que se aproximasse do processo de torra dos grãos.

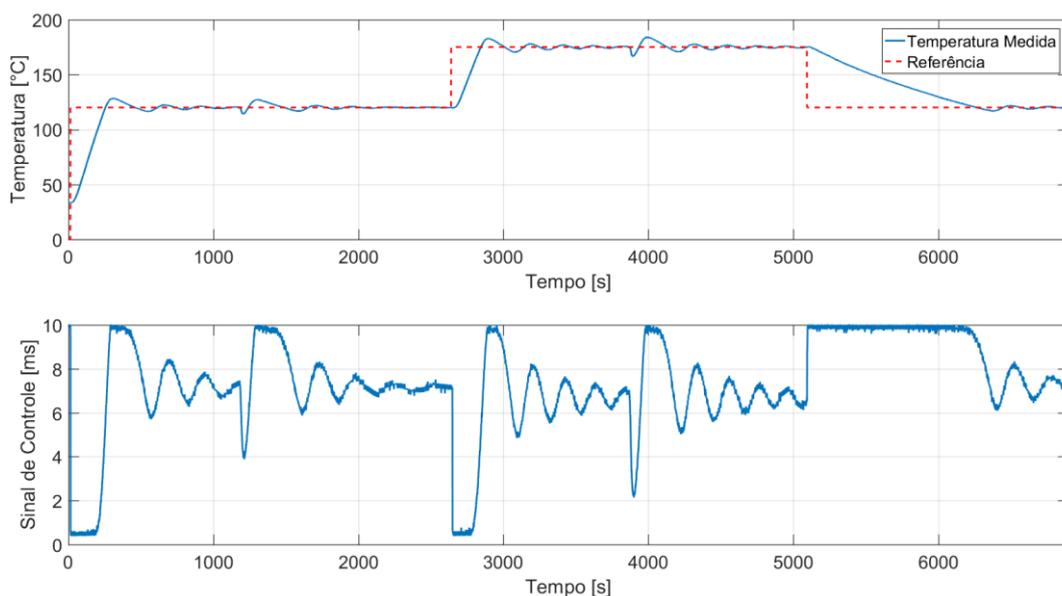
A perturbação pela qual o sistema foi submetido consiste em simular a situação em que o usuário coloca os grãos de cevada dentro do forno após a temperatura interna se estabilizar no valor de operação. Durante o depósito dos grãos dentro do forno, sua porta é aberta por aproximadamente 10 segundos causando, assim, uma queda na temperatura interna.

Os ensaios a seguir simulam uma situação onde o usuário utiliza o forno continuamente para obter os maltes do tipo *Pale Gold Malt* (120°C por 20 minutos) e *Amber Malt* (175°C por 30 minutos). Após a temperatura se estabilizar no valor desejado, o forno é aberto por cerca de 10 segundos para a deposição dos grãos em seu anterior. Uma vez fechado, espera-se o intervalo de 20 ou 30 minutos necessários para torra, totalizando, portanto, o intervalo de 40 minutos a 1 hora de ensaio (cerca de 20 minutos estabilizando a temperatura do forno + 10 segundos de perturbação com a porta do forno aberta + 20 ou 30 minutos de torra dos grãos).

Os ensaios foram realizados conforme a sequência descrita a seguir: ensaio da temperatura ambiente até 120°C; ensaio de 120°C até 175°C; ensaio de 175°C até 120°C; ensaio da temperatura ambiente até 175°C. Os três primeiros ensaios foram feitos em uma mesma sequência, onde ao término dos tempos estipulados do ensaio e a coleta de dados realizada, modificou-se o valor de *setpoint* do sistema e iniciou-se o próximo ensaio, como pode ser observado na Figura 44. O ensaio partindo da temperatura ambiente até 175°C foi realizado separadamente e o resultado poder ser observado na Figura 45. A segunda etapa do ensaio, de 120°C até 175°C teve duração de 20 minutos pós-perturbação e enfoque na observação do

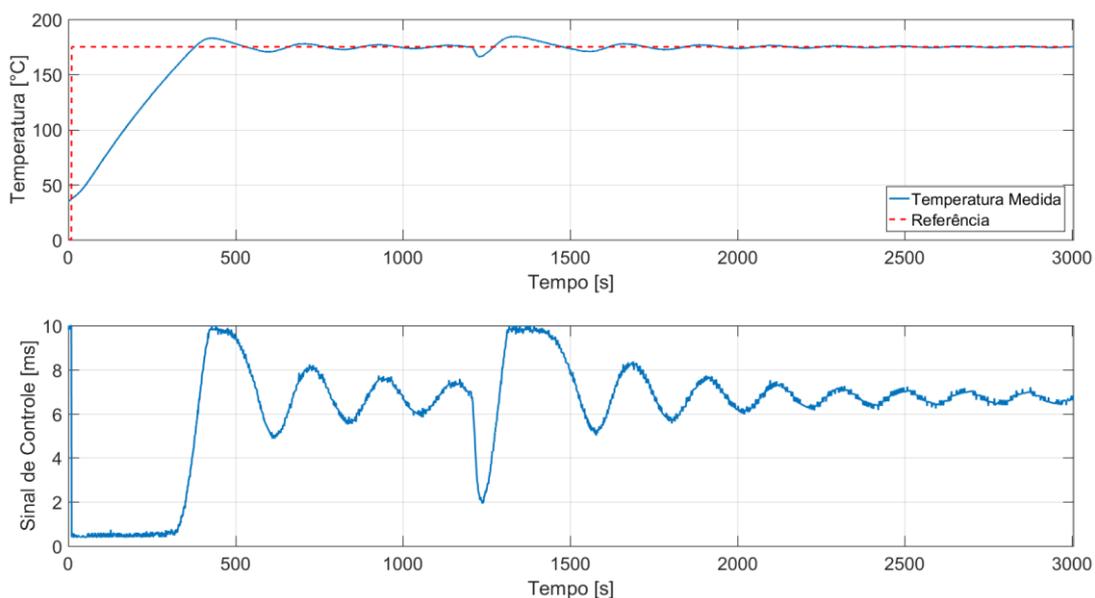
desempenho do sistema em estabilizar a temperatura em torno do valor de *setpoint*. Na terceira etapa do ensaio ocorre a saturação do sinal de controle, devido ao forno não possuir um sistema de resfriamento e limitar-se em diminuir a temperatura enviando o mínimo de tensão para o resistor. A quarta etapa, da temperatura ambiente até 175°C, teve 30 minutos de duração pós-perturbação, podendo ser observado o desempenho do sistema na obtenção do malte *Amber Malt*.

Figura 43 – Três primeiras etapas da sequência de ensaio com perturbação a 175°C.



Fonte: O autor (2018)

Figura 44 – Quarta etapa do ensaio, com perturbação a 175°C.



Fonte: O autor (2018)

Para os ensaios com perturbação pode-se notar que o sobressinal de temperatura foi de aproximadamente 6% do valor de referência. Já a resposta à perturbação proveniente da ação de controle gerou um sobressinal maior que a própria perda de temperatura ao se abrir o forno. A Tabela 5 indica os valores mínimos de temperatura e máximos de sobressinal pós-perturbação dos ensaios realizados, além do erro em relação ao valor de referência após 10 minutos de acomodação. O erro em porcentagem dos valores é dado em relação ao valor de referência.

Tabela 5 – Variação de temperatura pós-perturbação e erro de regime permanente.

Ensaio	Valor mínimo pós perturbação (%)	Sobressinal (%)	Erro de regime (%)
120°C	5,08	7,13	0,60
120°C	5,89	6,93	0,22
120°C	4,67	7,13	0,60
175°C	4,77	5,55	0,25
175°C	5,33	5,83	0,25
175°C	4,50	4,99	0,03

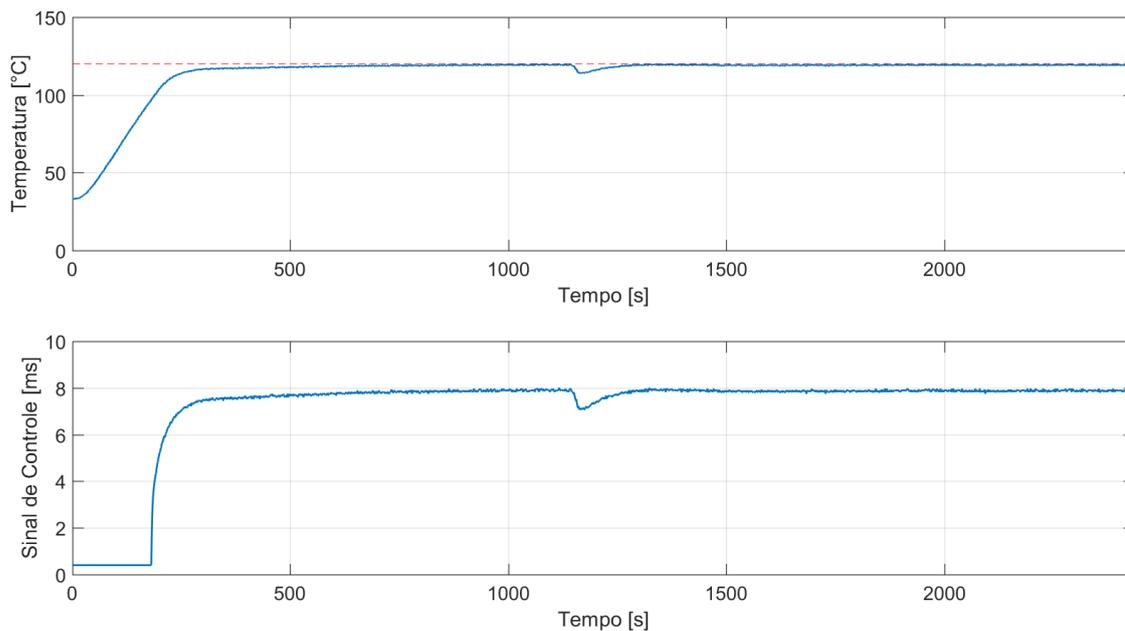
Observa-se uma variação maior nos valores de temperatura dos ensaios para 175°C do que nos ensaios para 120°C. Uma característica notada ao longo dos ensaios foi o fato de que o sensor PT-100 não indicava instantaneamente a temperatura atual do forno, levando alguns segundos para se igualar com valor real.

4.2 Resultados utilizando lógica Fuzzy

Buscando avaliar os parâmetros Fuzzy projetados, foram realizados ensaios semelhantes aos do controlador PID. As Figuras 46 e 47 ilustram o comportamento da temperatura e do sinal de controle para os dois sistemas Fuzzy (120 e 175°C).

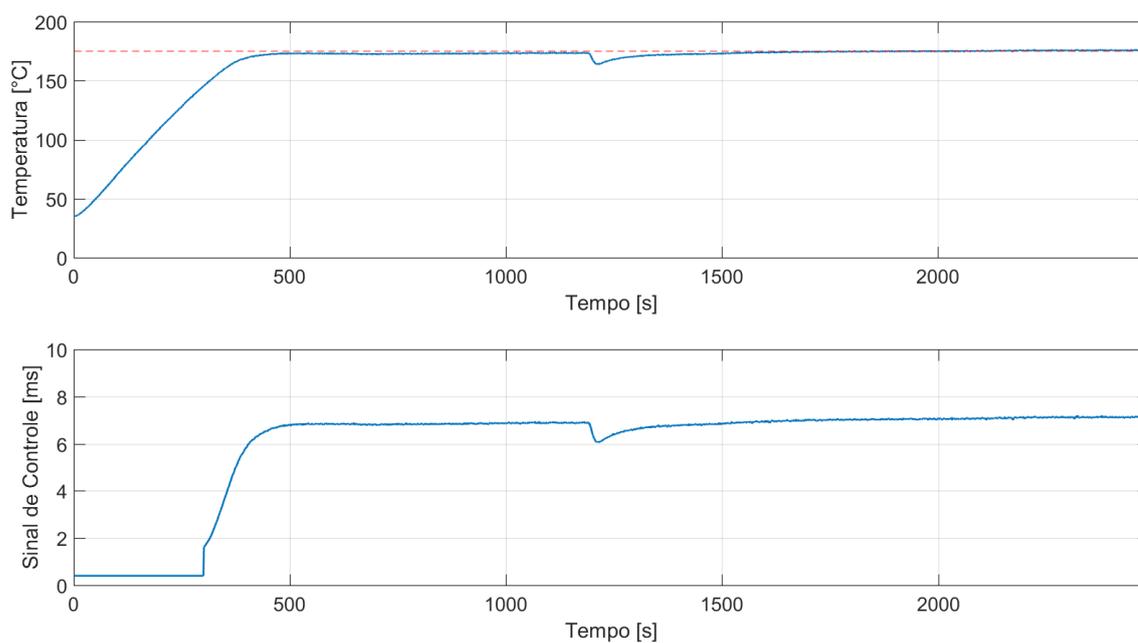
Assim como nos ensaios com controlador PID, o sistema Fuzzy foi submetido a uma perturbação que simula a deposição dos grãos dentro do forno.

Figura 45 – Ensaio Fuzzy para referência de 120°C.



Fonte: O autor (2018)

Figura 46 – Ensaio Fuzzy para referência de 175°C.



Fonte: O autor (2018)

Destaca-se o comportamento do sinal de controle nos primeiros minutos dos ensaios, fazendo com que a temperatura aumente o mais rápido possível. Até um instante previamente conhecido, o parâmetro fuzzy responsável por julgar a duração do ensaio “baixa” exerce influência sobre o sinal de saída, podendo ser observada uma transição mais brusca da duração “baixa” para “alta” no ensaio para 175°C (transição em aproximadamente 300 segundos). A Tabela 6 indica os valores mínimos de temperatura e máximos de sobressinal pós-perturbação dos ensaios realizados, além do erro em relação ao valor de referência após 10 minutos de acomodação.

Tabela 6 - Variação de temperatura pós-perturbação e erro de regime permanente.

Ensaio	Valor mínimo pós perturbação (%)	Sobressinal (%)	Erro de regime (%)
120°C	6,30	0,0	1,01
120°C	5,01	0,1	0,60
175°C	6,17	0,81	0,03
175°C	5,61	0,0	0,25

4.3 Comparação de desempenho

Dentre as características analisadas na implementação das duas técnicas de controle, destaca-se o valor de sobressinal pós-perturbação, de aproximadamente 6% para o controlador PID e menor que 1% para o controlador Fuzzy. Dado a relação entre a temperatura e o sinal de controle no sistema Fuzzy, pode-se observar um comportamento menos oscilatório da variável manipulada, impactando positivamente no processo de torra e evitando que os grãos aqueçam de maneira heterogeneia ou a temperaturas indesejadas.

5 Conclusões

Ambas as técnicas de controle analisadas, PID e Fuzzy, atenderam aos requisitos mínimos que se esperam de um controlador de temperatura para o processo de torra de grãos. Para o controlador Fuzzy, destacam-se maior eficiência no controle de temperatura, menor valor de sobressinal e menor oscilação em regime permanente.

O dispositivo MyRIO e o software LabVIEW foram ferramentas práticas e eficientes, por permitirem a programação do sistema e o monitoramento dos ensaios de forma dinâmica. O LabVIEW ainda se mostrou útil na criação e simulação dos sistemas Fuzzy, tornando o processo de elaboração dos parâmetros e definição do grau de pertinência mais dinâmico e intuitivo.

Todos os ensaios foram realizados com a leitura de temperatura de um único sensor PT-100, instalado na lateral do forno. A fim de se obter leituras mais precisas, propõe-se a instalação de mais sensores. Desta forma, tem-se um valor médio que representa melhor a temperatura interna do forno.

Dentre as possíveis melhorias, propõe-se uma revisão do sistema mecânico do forno, adaptando-o para o processo de torra a altas temperaturas.

Como proposta de trabalho futuro, pode-se integrar as técnicas PID e Fuzzy, resultando numa ação de controle adaptativa. Por exemplo, os parâmetros PID para diferentes valores de *setpoint* poderiam ser calculados por um sistema Fuzzy.

Referências

- Beer Styles: Ingredients (Part One) – What is Malt?** Disponível em: <<https://justbeerapp.com/article/beer-styles-the-ingredients-part-one-malt>>. Acesso em 22 nov. 2018.
- BENTO, C. R. **Sistemas de Controle Teoria e Projetos**. Erica, 1989
- BORZANI, W. **Biotecnologia industrial**. E. Blücher, São Paulo, 2001.
- BOULTON, C.; QUAIN, D. **Brewing Yeast and Fermentation**. Blackwell Science Ltd, p.19-45, Oxford, 2001.
- BRIGGS, D. E. et al. **Malting and brewing science**. Champman & Hall, Londres, 1995 .
- BROSILOW, C.; JOSEPH, B. **Techniques of Model-Based Control**. Prentice Hall, 2002.
- CAMPOS, M. C. M. M; TEIXEIRA. H. C. G. **Controles Típicos de equipamentos e processos industriais**. 2ª ed. Edgar Blücher, 2010
- COELHO, A. A. R.; COELHO, L. S. **Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares**. Editora da UFSC, Florianópolis, 2004.
- Electronics Block Diagram software What is Labview Programming and why You Should Use It**. Disponível em: <https://wanderingwith.us/40-electronics-block-diagram-software-hd3g/electronics-block-diagram-software-what-is-labview-programming-and-why-you-should-use-it/>. Acesso em 22 nov. 2018.
- CORRÊA, E. C. **Sistema Supervisório utilizando controle Fuzzy-PID em um processo de fermentação alcoólica**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2015.
- FERREIRA, R. H.; VASCONCELOS, M. C. R. L.; JUDICE, V. M. M.; NEVES, J. T. de R. **Inovação na fabricação de cervejas especiais na região de Belo Horizonte**. Perspectivas em Ciência da Informação, v.16, n.4, p.171-191, Belo Horizonte, 2011.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. **Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica Fuzzy**. SBA Controle & Automação. Campinas, v.4, n.3, p. 97-115, set/out. 1994.

JOHNSON, J. **Roasted: A Homebrewer's Guide to Home Roasting Grain**. Estados Unidos, Amazon Digital Services, 2013.

Kuidas 220V LED-lampide valgustugevust. LED-lambid dimmer - tüübid ja ühendamise viisid. Disponível em: <<https://cules.ru/et/how-does-the-dimmer-for-led-lamps-220v-dimmer-for-led-lamps-types-and-methods-of-connection/>> Acessado em 22 nov. 2018.

KUNZE, Wolfgang. **Techonology brewing and malting**. Vlb Berlin, 726 p. Berlim, 1999.

MORADO, R. **Larousse da cerveja**. Larousse do Brasil, p.357, São Paulo, 2009.

NI MyRIO. Disponível em: <<http://sine.ni.com/psp/app/doc/p/id/psp-1166/lang/pt>> Acessado em 22 nov. 2018.

NGUYEN, T. H. **Lab Manual RTD PT-100**. ElectroMechanical Energy Laboratory, 2013.

OLIVEIRA, J. C. P. **Comparação de controlador PID com ganho variante no tempo e controlador PID com ganho fixo**. Rio de Janeiro, 2016.

PASSINO, M. K.; YOURKOVICH, S. **Fuzzy control**. Menlo Park: Addison-Wesley, 1997.

PORTO, P. D. **Tecnologia de Fabricação de Malte: Uma Revisão**. Porto Alegre, 2011.

SIMÕES, M. G. SHAW, I **Controle e Modelagem Fuzzy**. Editora Blucher, p.05-08, São Paulo, 1999.

TOSTES, L. R. de M. **Instrumentação e controle do processo de produção de uma microcervejaria**. Rio de Janeiro, 2015.

VENTURINI, W. G. **Tecnologia de Bebidas: matéria-prima, processamento e BPF/APPCC, legislação e mercado**. São Paulo: E. Blücher, 2005.

